MECHMATE

Strategic Partnership in the field of Mechatronics for innovative and smart growth of European manufacturing SMEs

ÕPPE-MATERJALID

2016-1-PL01-KA202-026350

www.mechmate.eu

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

MECHMATE ÕPPEMATERJALID

PARTNERID

AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)
KREETA TEHNIKAÜLIKOOL(TUC)
EUROOPA KVALITEEDIKESKUS (ECQ)

2018

ISBN 978-9949-01-116-2 (köites)
ISBN 978-9949-01-117-9 (pdf)

EESSÕNA

See kogumik sisaldab õpikuid, mis on loodud projekti nimetusega „Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks“ koodnimega MechMate teostamise tulemusena. Projekti MechMate (No. 2016-1-PL01-KA202-026350) toetas Erasmus+ Programm, KA2-Cooperation and Innovation for Good Practices, funded by European Union - Project website: http://www.mechmate.eu

MechMate õppeainete õppematerjalid on õppimiseks vabalt kättesaadavad e-õppe platvormil (Coursevo). E-õppematerjalid toetuvad MechMate õppimise metoodikale ja nende kasutamiseks külastage internerisaiti aadressil

https://mechmate.coursevo.com/

Õpikud

Mehhaanika ja masinaelemendid (M001et)

Elektrotehnika ja elektroonika alused (M002et)

Signaalid, süsteemid ja juhtimine mehhatroonikas (M003et)

Digitaalsüsteemid (M004et)

Manussüsteemid mehhatroonikas (M005et)

Sideliidesed ja protokollid (M006et)

PLC süsteemid (M007et)

Mõõtmine ja andmehõive (M008et)

Andurid mehhatroonikas (M009et)

Täiturid mehhatroonikas (M010et)

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 01: MEHAANIKA JA MASINA ELEMENDID [M001ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

MICHAŁ SMATER, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
BOGUMIŁA WITTELS, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
PIOTR FALKOWSKI, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)

2018

Dokumendi kohta

Seda dokumenti tuleks kasutada õppematerjalina (tekstina) moodulis: mehaanika ja masina elemendid

Sisukord

Dokumendi kohta 3
Jooniste nimekiri 8
Tabelite nimekiri 10
Sissejuhatus 11
Lühendid 11
Terminite sõnastik 11
Sissejuhatus 11
1 Mehaanika alused 12
1.1 Sissejuhatus 12
1.2 Staatika 12
1.3 Dünaamika 12
1.4 Jõud 12
1.5 Newtoni seadused 12
1.5.1 Newtoni esimene seadus 12
1.5.2 Newtoni teine seadus 12
1.5.3 Newtoni kolmas seadus 13
1.5.4 Hõõrdumine 13
1.5.5 Tsentrifugaaljõud 13
1.6 Pöördemomendid 13
1.7 Impulss 14
1.8 Energia 14
1.8.1 Kineetiline energia 14
1.8.2 Potentsiaalne energia 14
1.9 Lihtsad masinad 15
1.9.1 Kaldtasapind 15
1.9.2 Kang 16
1.9.3 Plokk 17
1.9.4 Kruvi 17
1.9.5 Ratas ja telg 18
1.10 Enesekontroll 19
2 Materjalide põhiline tugevus 20
2.1 Teoreetiline sissejuhatus 20
2.1.1 Pinge 20
2.1.2 Deformatsioon/venitus 20
2.2 Tala ja selle piirangud – objekti geomeetriline mudel 20
2.2.1 Toed 22
2.2.2 Koormused 23
2.3 Sisemised jõud talas 25
2.4 Paisumine, kokkusurumine, painutamine ja torsioon 25
2.4.1 Paisumine ja kokkusurumine 25
2.4.2 Painutamine 26
2.4.3 Torsioon 26

2.4.4 Põhilised inertsimomendid ja Steineri meetod ... 27
2.5 Materjalid ... 28
2.5.1 Hooki seadus ... 28
2.6 Lahenduse näide ... 29
2.7 Enesekontroll ... 32
3 Ajamite komponendid ... 34
3.1 Mootorid ... 34
3.1.1 Mootorite põhitüübid, mis põhinevad kasutatud energial ... 34
3.1.2 Mootori valik ... 35
3.2 Hammasrattad ... 36
3.2.1 Hammasrataste tüübid ... 37
3.2.2 Hammasratta valik ... 40
3.3 Rihmad ... 41
3.3.1 Rihmade tüübid ... 41
3.3.2 Pingutamine ... 42
3.3.3 Rihma valimine ... 42
3.4 Ühendusmuhvid ... 43
3.4.1 Ühendusmuhvide tüübid ... 43
3.5 Enesekontroll ... 46
4 Võllid ... 47
4.1 Võllide põhitõed ... 47
4.1.1 Võllide kokkupanek ... 48
4.1.2 Vastupidavus ... 48
4.2 Võllide projekteerimine ... 50
4.3 Kiilud ... 51
4.3.1 Kiilutüübid ... 51
4.3.2 Kiilu kokkupanek ... 53
4.3.3 Kiilu parameetrid ... 53
4.4 Kiilude valik ... 54
4.5 Sobivused ja tolerantsid ... 54
4.5.1 Mõõtmete tolerantsid ... 54
4.5.2 Sobivused ... 54
4.5.3 Kujutise tolerants ... 55
4.5.4 Karedus ... 56
4.5.5 Kasutuse näide ... 56
4.6 Enesekontroll ... 57
5 Laagrid ... 59
5.1 Laagrite tüübid ... 59
5.1.1 Tavalised laagrid ... 59
5.1.2 Veerelaagrid ... 60
5.1.3 Määrdelaagrid ... 62
5.1.4 Magnetlaagrid ... 62
5.1.5 Koormuse tüüp ... 62
5.1.6 Konfiguratsioonid ... 63
5.2 Lukustusmeetodid ... 63

5.2.1 Konstruktsiooni modifikatsioon 63
5.2.2 Kruvi ja seib 64
5.2.3 Mutrid 64
5.2.4 Vedrurõngad 65
5.2.5 Kinnituskiilud 65
5.2.6 Lukustuskruvid 66
5.3 Laagri valik 66
5.4 Enesekontroll 68
Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused 70
Viited 71

JOONISTE NIMEKIRI

Joonis 1.1 Kaldtasapinna skeem ... 16
Joonis 1.2 Kangide skeemid ... 16
Joonis 1.3 Ploki erinevate rakenduste skeemid ... 17
Joonis 1.4 Erinevate kruvitüüpide skeeme [4] ... 17
Joonis 1.5 Ratta ja telje skeem ... 18
Joonis 2.1 Sisemised jõud tala ühes osas ... 22
Joonis 2.2 Rulliku toe ja selle reaktsioonijõu skeem ... 22
Joonis 2.3 Kinnitatud tugi ja selle reaktsioonijõudude skeem ... 23
Joonis 2.4 Fikseeritud toe ja selle reaktsioonijõudude ja impulsside skeem ... 23
Joonis 2.5 Erinevad koormused ja reaktsioonijõud ... 24
Joonis 2.6 Normaal- ja nihkejõudude skeem 3-D ja tasapinnaliste juhtumite korral ... 25
Joonis 2.7 Tala paisumine ja kokkusurumise lihtne skeem ... 25
Joonis 2.8 Tala painutamise lihtne skeem – paindemomendi ja pinge jaotumine talaosas küljelt vaadatuna ... 26
Joonis 2.9 Tala torsiooni lihtne skeem – väändemoment ja pinge jaotumine tala osas otsevaates näidatuna ... 26
Joonis 2.10 Venivus – pinge diagramm [5]44 ... 29
Joonis 2.11 Näite illustratsioon ... 29
Joonis 2.12 Tugede asendamine reaktsioonijõududega ... 30
Joonis 2.13 Sisemiste jõudude arvutamine erinevates segmentides ... 30
Joonis 2.14 Nihkejõu ja paindemomendi joonised ... 31
Joonis 2.15 Paindepinge jaotus ... 31
Joonis 2.16 Maksimaalse paindepinge joonis ... 31
Joonis 3.1 Sisepõlemismootor [6] ... 34
Joonis 3.2 Elektrimootor [7] ... 34
Joonis 3.3 Pneumotäitur [8] ... 35
Joonis 3.4 Hammasratta parameetrid [9] ... 37
Joonis 3.5 Silinderhammasratas [10] ... 38
Joonis 3.6 Spiraalne hammasratas [11] ... 38
Joonis 3.7 Kooniline hammasratas [12] ... 38
Joonis 3.8 Spiraalne kooniline hammasratas [13] ... 39
Joonis 3.9 Hüpoidhammasratas [14] ... 39
Joonis 3.10 Tigu hammasratas [15] ... 39
Joonis 3.11 Hammaslatt ja väikeratas [16] ... 40
Joonis 3.12 Planetaarülekanne [17] ... 40
Joonis 3.13 Harmooniline hammasratas [18] ... 40
Joonis 3.14 Lamerihm [19] ... 41
Joonis 3.15 Kiilrihm [20] ... 41
Joonis 3.16 Hammasrihm [21] ... 42
Joonis 3.17 Pingutamise skeem ... 42
Joonis 3.18 Pingutussüsteem [22] ... 42
Joonis 3.19 Osa torumuhvist [23] ... 43
Joonis 3.20 Paindlik ühendusmuhv [24] ... 44
Joonis 3.21 Ketas-ühendusmuhv ... 44

Joonis 3.22 Hammas-ühendusmuhv [25] 44
Joonis 3.23 Pöörd-ühendusmuhv 45
Joonis 3.24 Haarats ühendusmuhv 45
Joonis 3.25 Kokkupandud Oldhami ühendusmuhv [26] 45
Joonis 3.26 Lahtivõetud Oldhami ühendusmuhv [27] 46
Joonis 3.27 Universaalne ühendus [28] 46
Joonis 4.1 Kõige iseloomulikud modifikatsioonid võllide geomeetrias, mida kasutatakse kokkupaneku eesmärgil. 48
Joonis 4.2 Kõige iseloomulikud modifikatsioonid võllide geomeetrias, mida kasutatakse nende vastupidavuse suurendamiseks. 50
Joonis 4.3 Paralleelsete kiiludega ühendatud liigendi ristlõige [29] 51
Joonis 4.4 Kandilised, ristkülikukujulised ja sidekiilud 51
Joonis 4.5 Segmentkiiluga liitekoha ristlõige [30] 51
Joonis 4.6 Kitseneva otsaga kiil 52
Joonis 4.7 Ninakiil 52
Joonis 4.8 Lõik tangentsiaalsest kiilust 52
Joonis 4.9 Lõik ümmargusest kiilust 52
Joonis 4.10 Hammaskiil 53
Joonis 4.11 Kiilude kokkupanemise kahe meetodi näited 53
Joonis 4.12 Kiilude parameetrite skeem 53
Joonis 4.13 Mõõtmete tolerantside erinevad tüübid 54
Joonis 4.14 Sobivuse tüübid 55
Joonis 4.15 6,3 kareduse sümbol töötlemisprotsessi jaoks 56
Joonis 4.16 Profiili suurendatud näide 56
Joonis 4.17 Sobivuste ja tolerantside kasutamine 57
Joonis 4.18 Kiiluavade sobivused ja tolerantsid 57
Joonis 5.1 Puksi hülss [32] 60
Joonis 5.2 Kaheosaline laager [33] 60
Joonis 5.3 Kuullaager [34] 60
Joonis 5.4 Silindriline rull-laager [35] 60
Joonis 5.5 Sfäärilised rull-laagrid [36] 61
Joonis 5.6 Hammasratas-laagrid [37] 61
Joonis 5.7 Koonus rull-laagrid [38] 61
Joonis 5.8 Nõellaager [39] 61
Joonis 5.9 Määrde-laagrite skeem [40] 62
Joonis 5.10 Magnet-laagrid [41] 62
Joonis 5.11 Aksiaallaager (vasakul) [42] ja radiaallaager (paremal) [43] 63
Joonis 5.12 O-stiilis laagrid 63
Joonis 5.13 X-stiilis laagrid 63
Joonis 5.14 Konstruktsiooni modifikatsiooniga võlli mudel ja ristlõige 64
Joonis 5.15 Kruvi ja seibi lukustusega mudel ja ristlõige 64
Joonis 5.16 Kinnitusmutriga varustatud võlli mudel 65
Joonis 5.17 Lukustusmutter (vasakul) 65
Joonis 5.18 Vedrurõngas 65
Joonis 5.19 Vedrurõngaga võlli mudel ja ristlõige 65

Joonis 5.20 Kinnituskiiluga võlli mudel 66
Joonis 5.21 Kinnituskiil 66
Joonis 5.22 Lukustuskruviga laagri mudel ja ristlõige 66

TABELITE NIMEKIRI

Tabel 0.1. Peamised terminid..... 11
Tabel 2.1 Tavapärased inertsimomendid osade eri geomeetriatele 27
Tabel 2.2 Materjalide parameetrid 28
Tabel 5.1 Aksiaaljõud erinevatele laagritele 67

SISSEJUHATUS

Lühendid

DOF Vabadusaste

Terminite sõnastik

Tabel 0.1. Peamised terminid

Nimi	Seletus
Backlash (lõtk)	Vahe/lõtk koos töötavate elementide pindade vahel.
Direct drive (otseajam)	Ilma ülekandeta mootori jõuülekandemehhanism.
Degree of freedom (vabadusaste)	Iseseisvate liikumiste arv, mida keha või süsteem võib sooritada.
Slip (libisemine)	Juhtimis- ja juhitavate elementide kiiruste erinevuse mõju.

Sissejuhatus

Masinaehitus on pidevalt arenev teadusala, mis võimaldab kujundada ja luua üha enam täiustatud masinaid. Masin on seade milles toimub mehhaaniline liikumine.

See on erialade vaheline teadus, mis hõlmab inseneri-, füüsika-, matemaatika- ja materjaliteadusi erinevate konstruktsioonide kavandamiseks, arvutamiseks, kontrollimiseks ja tootmiseks. See moodul annab ülevaate mehhaanika ja materjaliteaduste põhitõdedest koos teabega masinakomponentide kohta, et tutvustada teemat õppijale.

1 MEHAANIKA ALUSED

1.1 Sissejuhatus

Mehaanika on teadusharu, mis kirjeldab erinevate elementide käitumist, mida mõjutavad erinevad jõud. Selle põhimõtted kehtivad kõikidele masinatele ja võimaldavad nende tööd matemaatiliselt kirjeldada. Tuleb aga arvestada, et mehaanika põhimõtted on veatud ainult ideaalsete tingimuste korral. Reaalses elus rakendamiseks tuleb teha mõned lihtsustused. Seepärast eristatakse tingimuste eeldustel põhinevaid erinevaid mehaanika valdkondi.

1.2 Staatika

Staatika on mehaanika haru, mis kehtib ainult tasakaalus kehadele. Veelgi enam, ükski neist ei pruugi liikuda vaatleja raamistikus (analüüsi jaoks valitud raamistik). Analüüsitud süsteemi elemente võivad mõjutada mitmesugused jõud ja pöördemomendid, kuid nende tulemuseks olev jõud ja impulss peavad võrduma nulliga. Selle põhjus on asjaolu, et kui tekkiv jõud ei võrdu nulliga, siis kiirendab analüüsitud keha, või kui selle tulemusena saadud pöördemoment ei võrdu nulliga, siis analüüsitud keha pöörleb ümber oma telje kiirendatud liikumisega. Kui keha ei jää liikumatuks, ei saa staatika põhimõtteid rakendada.

1.3 Dünaamika

Dünaamika on mehaanika haru, mis kehtib liikuvatele kehadele. Seda saab jagada kaheks haruks – kinemaatika ja kineetika. Kinemaatika on õppevaldkond, mis keskendub mehhanismide positsioonide, kiiruste ja kiirenduste analüüsile. Teiselt poolt on kineetika õppevaldkond, mis keskendub mehhanismide jõudude, impulsside ja pöördemomentide analüüsile. Samuti hõlmab see energia ja töö tasakaalu puudutavaid aspekte.

1.4 Jõud

Jõu on interaktsioon, mis põhjustab muutuse objekti liikumises. Kuna tegemist on vektoriga, võib seda kirjeldada selle mõõtmete ja suuna järgi. Massiga objektile rakendatav jõud muudab selle kiirust (kiirendab seda). Jõude võid lisada ja lahutada nagu kõiki teisi vektoreid või korrutada konstantidega.

1.5 Newtoni seadused

Newtoni seadused kirjeldavad dünaamika ja staatika põhitõdesid. Allpool on toodud nendele põhimõtetele vastavad valemid.

1.5.1 Newtoni esimene seadus

Kui resultantjõud (kõigi objekti mõjutavate jõudude vektorsumma) on võrdne nulliga, siis jääb objekti kiirus konstantseks (võrdub esialgse kiirusega). Seetõttu on objekt ühtlases liikumises, kui sellele ei mõju ükski jõud (jääb paigale ka siis, kui selle esialgne kiirus on võrdne 0-ga).

$$\sum \boldsymbol{F} = \mathbf{0} \Leftrightarrow \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \mathbf{0}$$

1.5.2 Newtoni teine seadus

Keha impulss ja kiirus muutuvad proportsionaalselt jõu väärtusega ning vastupidi keha massile (keha kiirendab või aeglustab) jõu suunas. Selle seaduse valemid kehtivad ainult konstantse massiga kehadele.

$$\boldsymbol{F} = \frac{d\boldsymbol{p}}{dt} = \frac{d(m\boldsymbol{v})}{dt}$$

$$\boldsymbol{F} = m\frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = m\boldsymbol{a}$$

1.5.3 Newtoni kolmas seadus

Kõik kahe keha vahel olevad jõud eksisteerivad võrdses suuruses ja vastupidises suunas. Seepärast toimub iga tegevuse korral sama väärtusega reaktsioon. See seadus kehtib kahe erineva keha või ühe keha kahe piirkonna vastastikuse mõju kohta.

1.5.4 Hõõrdumine

Hõõrdumine on jõud, mis vastandub liikumisele ja on proportsionaalne normaalse (reaktsiooni) jõuga ja hõõrdeteguriga m. Seda tüüpi jõud tekib siis, kui kokkupuutepinnad ei ole siledad. Hõõrdetegur sõltub pinna karedusest ja materjalist, samas pole see pinna alaga seotud. Hõõrdumist on kahte tüüpi – staatiline ja dünaamiline. Esimene toimib enne keha liikumist ja see on tavaliselt tugevam kui teine.
Keha liikuma panemiseks tuleb hõõrdeside purustada resultantjõuga. Kuigi hõõrdumine takistab liikumist, on see mõju, mis seda üldse võimaldab.

1.5.5 Tsentrifugaaljõud

Tsentrifugaaljõud on inertsiaalne jõud, mis ilmneb pöörlevates seadmetes. See on suunatud pöörlemisteljest eemale. Seda jõudu tasakaalustab tsentripetaaljõud, mis võimaldab keha liikumist piki kavandatud teed. Tsentrifugaaljõu näide on Maa ringlus ümber päikese. Sellisel juhul peavad kõik jõud olema tasakaalustatud, nii et maa suudab oma orbiidil püsida.

Tsentrifugaaljõudu võib arvutada allpool esitatud valemiga, kus v on kiirus, m on keha mass ja R on keha orbiidi raadius.

$$\boldsymbol{F_c} = \frac{mv^2}{R} \cdot \frac{\boldsymbol{R}}{R} = m\omega^2\boldsymbol{R}$$

1.6 Pöördemomendid

Pöördemoment, moment või jõu moment, on jõu mõju mis on rakendatud pöördepunkti kauguselt. Seepärast võib see keha väänata selle asemel, et seda lihtsalt suruda või tõmmata. Selle vektori suurus sõltub rakendatavast jõust (*F*), kangist (*R*) ja nende kahe vahelisest nurgast (*Θ*). Pöördemomendi võib arvutada vektorina või selle suurusena allpool esitatud valemite põhjal.

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{R} \times \boldsymbol{F}$$

$$M = R \cdot F \cdot sin\theta$$

1.7 Impulss

Impulss (*p*) on massi (*m*) vektorprodukt ja selle kiirus (*v*). Selle suurus ja suund sõltuvad valitud tugiraamistikust. Kehade koguimpulss (kõigi nende impulsside vektori summa) suletud objektis on konstantne. Sellist suhet kasutatakse tavaliselt kokkupõrgete simulatsioonideks ja see esitatakse allpool toodud valemitega.

$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v}$$

$$\sum \Delta \boldsymbol{p} = 0$$

1.8 Energia

Energia on kvantitatiivne omadus, mida kasutatakse töö tegemiseks või soojuse ülekandmiseks. Energia jäävuse seaduse tõttu ei saa selle üldkogust isoleeritud süsteemis vähendada. Energia võib oma vormi muuta. On olemas erinevad energiaid, nagu kineetiline, potentsiaalne, elastsus, keemiline, kiirgus ja termiline.

1.8.1 Kineetiline energia

Kineetiline energia (E_k) on liikumisega seotud energia. Lähtudes sellest määratlusest, on see summa võrdne tööga, mis on vajalik vaadeldava massiga keha kiirendamiseks soovitud kiiruseni tema puhkeasendist. Seda tüüpi energia sõltub keha massist (*m*) ja inertsi impulsist (*J*) ning samuti selle lineaarsetest (*v*) ja pöörlemiskiirustest (ω). Selle põhivalem on esitatud allpool.

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}J\omega^2$$

1.8.2 Potentsiaalne energia

Potentsiaalne energia on energia, mis on seotud asendiga teiste kehade, sisemise pinge, väljade või muude tegurite suhtes. Selle tavaline tüüp on gravitatsiooniline potentsiaalne energia (E_g) olenevalt objekti massist (*m*), selle ristkaugus Maa pinnast (*h*) ja Maa raskusjõud (*g*). Kuna Maa raskusjõud muutub kaugusega pinnast (*R*), siis kosmoses olevate kehade jaoks võib kasutada ainult Maa massil (*M*) ja gravitatsioonikonstandil (*G*) põhinevat võrrandit. Need suhted on esitatud allpool toodud valemitega.

$$E_g = mgh$$

$$E_g = -G\frac{mM}{R}$$

Teisest küljest on elastne potentsiaalne energia (E_s) potentsiaalse mehaanilise energia tüüp, mida jagatakse elastsete elementide kokkusurumise või laiendamise käigus. See on salvestatud elementidesse, mida nimetatakse vedrudeks. Lineaarne elastsusenergia sõltub mõõtme

muutusest (Δx) ja vedru konstandist (k), mis on ühenduses materjali tüübiga. Seda võib arvutada allpool esitatud valemi järgi:

$$E_s = \frac{1}{2} k \Delta x^2$$

Kolmas tüüp – elektriline potentsiaalne energia (Ee) on konservatiivsete Coulombi jõudude mõju. Seda tüüpi energia sõltub elemendi (q), laengust, teise elemendi (Q) laengust, mis genereerib potentsiaalset välja ($\Phi(r)$), ja nende vahekaugusest (R). Valem hõlmab ka Coulombi konstanti (k_e). Seda võib arvutada allpool esitatud valemiga.

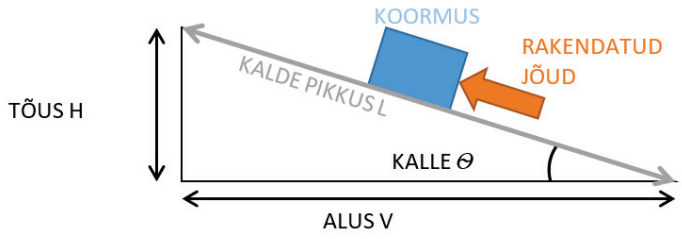
$$E_e = q\Phi = k_e \frac{qQ}{R}$$

1.9 Lihtsad masinad

Teoreetiliselt on kõik keerulised masinad valmistatud lihtsatest osadest (lõpuks lihtsaimatest mehhanismidest, nn lihtsatest masinatest). **Lihtsad masinad** on füüsika kontseptsiooni nimi. See viitab elementidele, mis kasutavad mehaanika põhimõtet jõu suuruse või suuna muutmiseks. Seetõttu võivad nad praktikas vahetada liikumissuundi (nt pöörlemisest lineaarseks) või võimaldada teatud tööd väiksema rakendatava jõu kasutamisega. Tasub märkida, et ükski päriselus töötavatest mehhanismidest ei saa olla 100% efektiivne. Sel põhjusel on iga täiendava elemendi (lihtne masin) rakendamine on seotud täiendavate kadudega. Komplekssete mehhanismide kavandamist võib võrrelda põhiplokkide (lihtsate masinate) ühendamisega keerulise struktuuri loomiseks.

1.9.1 Kaldtasapind

Kaldtasapind (Joonis 1.1) on struktuur, mis vähendab teatud töö tegemiseks vajalikku jõudu ja pikendab kaugust, milles jõudu tuleb rakendada. Selline lihtne masina tööpõhimõte vastab energia jäävuse seadusele (ilma igasuguse kaota on vajalik töökogus keha tõstmiseks teatud kõrgusele alati sama). Kaldtasapindade tavalised lisad on laadimisrambid. Seda tüüpi masinaid iseloomustab peamiselt selle kalle (Θ). See määrab nende kallaku kalde. Mida suurem on tõus, seda suurem on jõud (F) keha tõstmiseks ja seda lühem on kallaku pikkus (L). Kaldtasapindade mehaaniline eelis (MA) põhineb nende kallakul. See arvutatakse objekti (F_g) gravitatsioonijõu ja rakendatava jõu (F_a) suhtena. Allpool on esitatud valemid tavapärase kaldtasapinna parameetrite kohta.



Joonis 1.1 Kaldtasapinna skeem

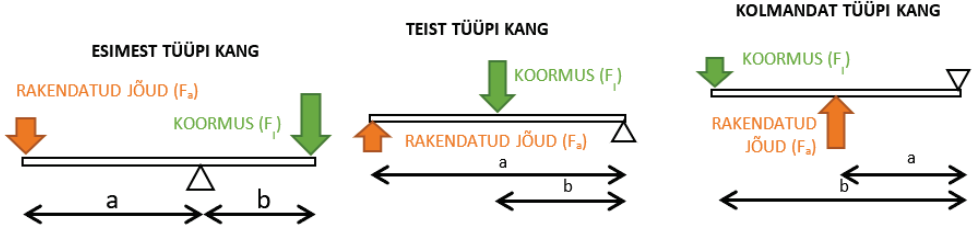
$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{V}\right)$$

$$MA = \left(\frac{F_g}{F_a}\right)$$

$$W = F_a \cdot L$$

1.9.2 Kang

Kang on lihtne masin, mis koosneb ümber liitekoha pöörlevast talast (nimetatakse tugipunktiks). Tasakaalu jäämiseks peab kõikide pöördemomentide vektorsumma võrduma nulliga. Seetõttu saab kangi kasutada sisendjõu vähendamiseks või suurendamiseks ja selle suuna muutmiseks. Seda efekti võib kasutada raskemate objektide tõstmiseks. Kangi üldkasutatavad rakendused on käärid, tangid, kärud, ekskavaatorid ja tõstukid. Selle mehaaniline eelis (*MA*) rakendatava jõu (*a*) ja koormuse (*b)* vahekaugustel tugipunktist. On olemas kolme põhilist tüüpi kange (Joonis 1.2), mis on allpool esitatud koos nendele iseloomulike võrranditega.



Joonis 1.2 Kangide skeemid

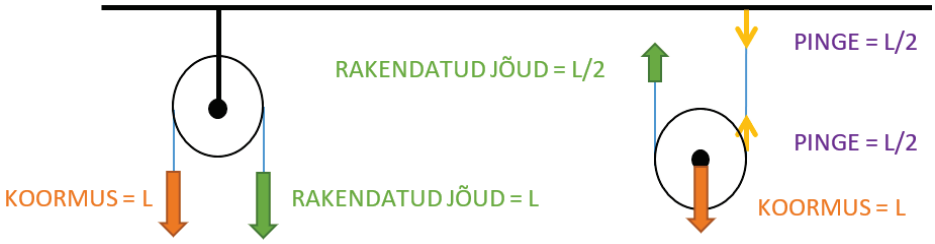
$$F_a \cdot a = F_l \cdot b$$

$$MA = \frac{F_l}{F_a} = \frac{a}{b}$$

1.9.3 Plokk

Plokk on ratas, mis pöörleb ümber oma telje ja toetab köie liikumist. Lülide süsteemide kasutamine võib vähendada teatud töö teostamiseks vajalikku jõudu ja muuta rakendatud jõu suunda. Plokksüsteemid põhinevad trossis oleval pingel, mis jääb samaks ploki mõlemal küljel, kui köie liikumine selles punktis ei kiirene.

Plokid võivad olla fikseeritud või liikuvad (tõstetud köiele – Joonis 1.3). Enamikus süsteemides kasutatakse mõlemat tüüpi plokkide kombinatsioone. Ploki mehaaniline eelis (*MA*) arvutatakse koormuse (*L*) ja köies oleva pinge (*T*) suhtena. Selle valem on esitatud allpool.

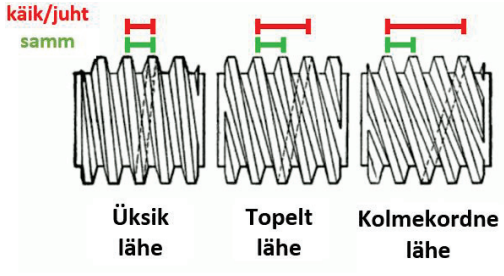


Joonis 1.3 Ploki erinevate rakenduste skeemid

$$MA = \frac{L}{T}$$

1.9.4 Kruvi

Kruvi (Joonis 1.4) on spiraalne kaldtasapind. See mehhanism muudab pöörleva liikumise lineaarseks ja pöördemomendi lihtsaks jõuks või vastupidi. Kruvi keere võib olla eri kujuga ja olla vasakpoolne või parempoolne. Vahemaad keerme harjade vahel nimetatakse **sammuks** ja aksiaalset kaugust, mida kruvi läbib, et teha 360 kraadine pööre, nimetatakse **käiguks/juhiks** (ingl *lead*) (*l*).



Joonis 1.4 Erinevate kruvitüüpide skeeme [4]

Kruvide mehaaniline eelis (*MA*) määratakse kindlaks nende käigu/juhi (*l*) ja õla (*r*) abil, millele rakendatakse pööratava liikumise eest vastutavat jõudu. Nende mehhanism põhineb energia jäävuse seadusel.
Kruvi teljesuunalise liikumise (*d*) arvutamiseks, mis põhineb pööramisel (α) või tööl (*W*), mis põhineb rakendatud (F_a) või väljundjõul (F_o) (mis kehtib hõõrdumist mitteomavatel juhtudel), võib kasutada allpool esitatud valemeid.

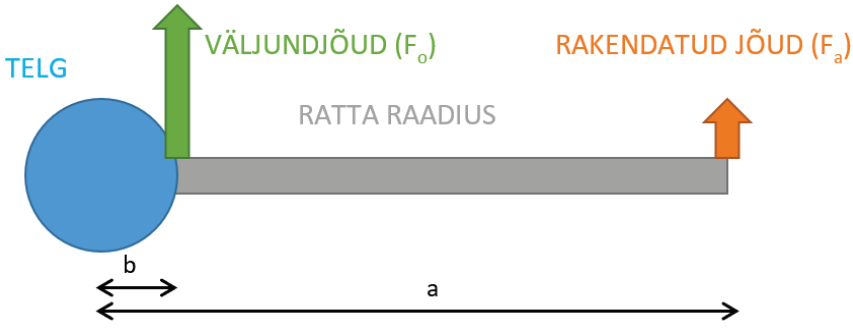
$$MA = \frac{2\pi r}{l}$$

$$d = l\frac{\alpha}{360°}$$

$$W = 2\pi r F_a = l F_o$$

1.9.5 Ratas ja telg

See mehhanism (Joonis 1.5) on suure ratta ja väiksema telje kombinatsioon, nii et pöördemomenti (või õlale rakendatavat jõudu) saaks suurendada või vähendada. Ratas ja telg võivad olla teatud tüüpi kangina, mida kasutatakse pöördemomendi koormuste jaoks. Seetõttu saab juhtumi puhul rakendada ka kangil kasutatava mehaanilise eelise (*MA*) valemit – allpool on toodud nõuetekohased võrrandid. Kaevudes ja uksenuppudel kasutatakse tavaliselt ratta- ja teljesüsteeme.



Joonis 1.5 Ratta ja telje skeem

$$MA = \frac{F_l}{F_a} = \frac{a}{b}$$

$$F_a \cdot a = F_o \cdot b$$

1.10 Enesekontroll

1. Staatikat:
    a. võib rakendada kõikidele kehadele.
    b. võib rakendada kehadele, mis on jõudude poolest tasakaalus, kuid nende resultatiivsed impulsid ei ole 0-ga võrdsed.
    c. võib rakendada kehadele, mis on impulsside poolest tasakaalus, kuid nende resultatiivsed impulsid ei ole 0-ga võrdsed.
    d. võib rakendada ainult täielikult tasakaalus olevatele kehadele.
2. Hõõrdumine sõltub:
    a. materjali tüübist, selle karedusest ja kontaktalast.
    b. materjali tüübist, selle karedusest ja kontakti pinnale normaalsest jõust.
    c. keha kiirusest, kontakti pinnale normaalsest jõust ja kontaktalast.
3. Vedru kogutud energiat nimetatakse kui:
    a. kineetiline energia
    b. keemiline energia
    c. elastne potentsiaalenergia
    d. gravitatsioonienergia
4. Millised valemid kehtivad elektrilise potentsiaalenergia arvutamiseks?
    a. $E_e = q\Phi = k_e \frac{qQ}{R}$
    b. $E_s = \frac{1}{2} k \Delta x^2$
    c. $E_g = -G \frac{mM}{R}$
    d. $E_k = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J \omega^2$
5. Millist lihtsat masinat kasutatakse tavaliselt laadimisrampide jaoks?
    a. Kaldtasapind
    b. Kang
    c. Plokk
    d. Kruvi
    e. Ratas ja telg
6. Millist lihtsat masinat kasutatakse tavaliselt kaevudes?
    a. Kaldtasapind
    b. Kang
    c. Plokk
    d. Kruvi
    e. Ratas ja telg
7. Kruvi mehaaniline eelis sõltub:
    a. selle käigust/juhist ja sammust
    b. selle sammust ja pikkusest
    c. selle käigust/juhist ja õlast, millele jõudu rakendatakse
    d. selle õlast, millele jõudu rakendatakse
    e. täielikust pöördest ja õlast, millele jõudu rakendatakse

8. Pinge ümber ploki olevas köies on:
    a. võrdne 0-ga
    b. sama mõlemal pool plokki
    c. koormusega küljel kaks korda suurem kui küljel, kuhu on rakendatud jõud
    d. koormusega küljel kaks korda väiksem kui küljel, kuhu on rakendatud jõud
    e. See sõltub ploki tüübist

2 MATERJALIDE PÕHILINE TUGEVUS

2.1 Teoreetiline sissejuhatus

Materjalide tugevus on õppevaldkond, mis keskendub kehade käitumisele kindlaksmääratud koormustel ja piirangutingimustel. Seoses selle põhimõtetega on kogu sisemised jõud kõigis punktides võrdsed nulliga. Näitena võib keha kujutada kahe või enama osana, mille sisepindadele on rakendatud piisavaid sisemisi jõude (nende summa kõikide keha osade jaoks peab kokku andma nulli). Peale selle peab kõigi sisemiste ja väliste osade summa olema objekti iga osa jaoks võrdne nulliga.

2.1.1 Pinge

Teatavas punktis ala *A* [m2] mõjutav sisemine jõud *P* [N] on pinge *p* [Pa], mis ilmub selles punktis ja mida nimetatakse kogupingeks. See on normaalse (σ [Pa], sisepinnaga risti) ja nihkepinge (τ [Pa], paralleelne sisemise pinnaga) vektorsumma. Allpool on esitatud kindla punkti sisemise rõhu (pinge) universaalne valem.

$$p = \lim_{A \to 0} \frac{P}{A}$$

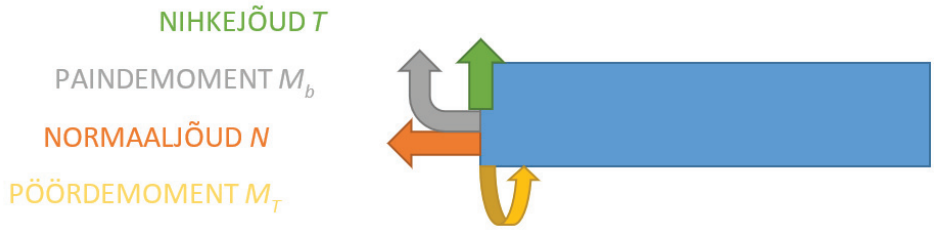
2.1.2 Deformatsioon/venitus

Keha sees esineva pinge tulemus on selle venimine ε (deformatsioon). Selle väärtus arvutatakse vahemaa muutuse keha sees Δl [m] (kahe valitud punkti vahel) ja nende esialgse kauguse *l* [m] suhtena. Täieliku deformatsiooni universaalne valem on toodud siin.

$$\varepsilon = \lim_{l \to 0} \frac{\Delta l}{l}$$

2.2 Tala ja selle piirangud – objekti geomeetriline mudel

Tala on tahke element, mis on loodud kuju väljapressimisega mööda sirgjoont. Selle osad võivad olla kas konstantsed või muutuvad. Materjalide tugevuse põhitõdede kohaselt on kõik tala osad, mis on oma telje suhtes normaalsed, mittedeformeeruvad (need jäävad tavaliseks). Jõud ja impulsid, mis põhjustavad tala deformatsiooni (Joonis 2.1), võib määrata selle igas osas. Need on nihke (T) ja normaalsed (N) jõud [N], paindemoment (Mb) ja pöördemoment (MT) [Nm].



Joonis 2.1 Sisemised jõud tala ühes osas

2.2.1 Toed

Üldjuhul käsitletakse juhtumeid koormuste ja tugede (piirangud) korral 2-D-süsteemidena. Igaüks neist vähendab vabaduseastmeid (DOF). Selle alusel on määratletud erinevat tüüpi tugesid. Juhtumite esimese osa eesmärk on lahendada toetuste graafilise esituse asendamine reaktsioonidega (jõud ja impulsid). Erinevat tüüpi toed tulevad erinevate reaktsioonide tüüpide ja erinevate piirtingimustega.

2.2.1.1 Rulliku tugi

Selline tugi võimaldab konstruktsiooni liikumist mööda pinna, samal ajal lukustades selle ristipidise liikumise. Tavaliselt tähistab seda allpool näidatud märgistus (Joonis 2.2). Rullikuga toetuspunktis on pinnaga risti olev reaktsioonijõud. Siiski ei ole siin kunagi mingisuguseid paralleelseid reaktsioone ega jõuimpulsse.

Joonis 2.2 Rulliku toe ja selle reaktsioonijõu skeem

2.2.1.2 Kinnitatud tugi

See tugi on sarnane rullikuga, kuid see takistab ka konstruktsiooni liikumise mööda pinda. Tavaliselt tähistab seda allpool näidatud märgistus (Joonis 2.3). Kinnituspunkti juures on pinna suhtes risti ja paralleelsed reaktsioonijõud. Siiski ei ole siin kunagi jõuimpulsse.

Joonis 2.3 Kinnitatud tugi ja selle reaktsioonijõudude skeem

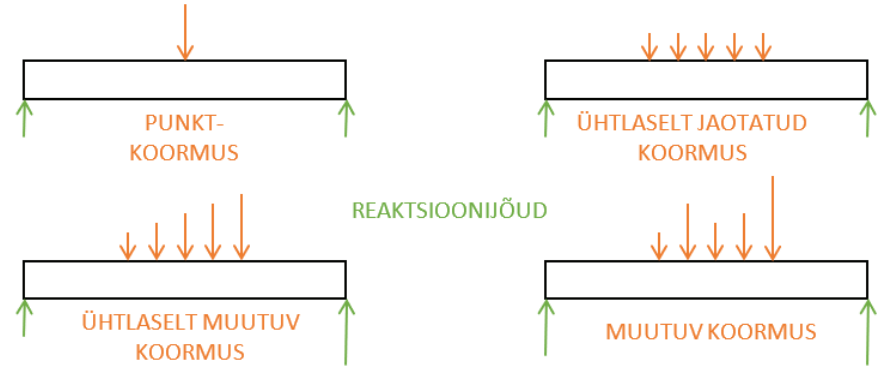
2.2.1.3 Fikseeritud tugi

Selline tugi takistab konstruktsiooni nii horisontaalset kui ka vertikaalset liikumist. Samuti on toe toetuspunktis tala pöörlemine võimatu. Tavaliselt näidatakse seda tala pinnaga kokku-puutena (Joonis 2.4). Toe toetuspunktis toimivad reaktsiooni jõud alati perpendikulaarselt ja paralleelselt pinnaga.

Joonis 2.4 Fikseeritud toe ja selle reaktsioonijõudude ja impulsside skeem

2.2.2 Koormused

Konstruktsioon võib olla punkt-, ühtlaselt jaotatud, ühtlaselt muutuva või muutuva koormuse all (Joonis 2.5). Kõik koormused võivad olla kas jõu- või impulsikoormused (paindemomendid või pöördemoment).



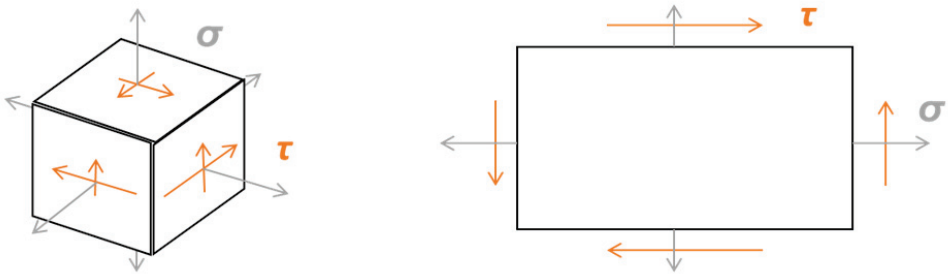
Joonis 2.5 Erinevad koormused ja reaktsioonijõud

2.3 Sisemised jõud talas

Põhilise materjali tugevuse teooria kohaselt võib iga tala jaotada kaheks osaks. Veelgi enam, tala teljega risti asetsevad küljed jäävad deformeerumata. Kuna mõlemad osad peavad jääma tasakaalu, ilmuvad ühes osas jõud ja impulsid (need on reaktsioonid tavaliselt ühendatud osade teoreetilisele jaotamisele ja neid nimetatakse sisemisteks jõududeks).
Sellised osad võimaldavad analüüsida tala staatikat. Sisemise jõu määramine kogu tala teljel on tavaliselt iga staatika juhtumi korpuse lahenduse esimene samm.

2.4 Paisumine, kokkusurumine, painutamine ja torsioon

Sisemised jõud põhjustavad erinevat tüüpi sisemist pinget ja selle tulemusena erinevaid deformatsioonitüüpe. Analüüsi eesmärgil jagatakse materjal teoreetiliselt lõpmata väikesteks kuubikuteks (või tasapinnaliste juhtude ristkülikuteks), kus paaride seintele mõjuvad on normaalsed (σ) ja tangentsiaalsed (τ) pinged [Pa] (Joonis 2.6). Neid kasutatakse deformatsiooni arvutamiseks.



Joonis 2.6 Normaal- ja nihkejõudude skeem 3-D ja tasapinnaliste juhtumite korral

2.4.1 Paisumine ja kokkusurumine

Paisumine ja kokkusurumine (Joonis 2.7) on normaalsete pingete mõjud (mille põhjus on osa pinnaga risti olevad jõud). Struktuur muudab pikisuunalist mõõdet ja muutub kas pikemaks või lühemaks.

Joonis 2.7 Tala paisumine ja kokkusurumise lihtne skeem

Paisumise ja kokkusurumise pinge σ [Pa] tala teatud osas sõltub normaalsest jõust N [N] ja osa A pindalast A [m^2]. See saadakse allpool toodud valemiga.

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

Paisumise või kokkusurumise deformatsioon ε [1] tala teatud osas sõltub materjali paisumise või kokkusurumise pingest σ [Pa] ja Youngi moodulist E [Pa]. See saadakse allpool toodud valemiga.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$$

2.4.2 Painutamine

Painutamine (joonisJoonis 2.8) on normaalse pinge ebavõrdse jaotuse efekt (põhjustatud sisemistest paindemomentidest). Üks objekti pindadest (alumine või ülemine) lüheneb, samas kui teine pikeneb. Kolmemõõtmeliste juhtumite puhul võib olla kaks ristlõikelist paindemomenti, mis võivad olla vektori summad.

Joonis 2.8 Tala painutamise lihtne skeem – paindemomendi ja pinge jaotumine talaosas küljelt vaadatuna

Painutuspinge σ [Pa] tala teatud kohas sõltub paindemomendist M_b [Nm], kaugusest tala teljest y [m] ja inertsimomendist ümber painutuspinge telje I [kg m2]. See saadakse allpool toodud valemiga.

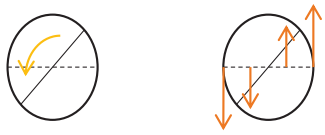
$$\sigma = \frac{M_b y}{I}$$

Tala läbipainet w [m] saab arvutada allpool esitatud valemiga (kus E [Pa] on materjali Youngi moodul) ja piirtingimuste rakendamisega.

$$M(x) = -EI\frac{d^2w}{dx^2}$$

2.4.3 Torsioon

Torsioon (Joonis 2.9) on tangentsiaalse pinge mõju koos ebaühtlase jaotusega (põhjustatud sisemistest väändemomentidest – pöördemomentidest). Torsioon muudab objekti osa kõveraks.



Joonis 2.9 Tala torsiooni lihtne skeem – väändemoment ja pinge jaotumine tala osas otsevaates näidatuna

Väändepinge τ [Pa] tala teatud osas sõltub väändemomendist M_T [Nm], kaugusest tala teljest r [m] ja selle telge ümbritsevast inertsimomendist I [kg m^2]. See saadakse allpool toodud valemiga.

$$\tau = \frac{M_T r}{I}$$

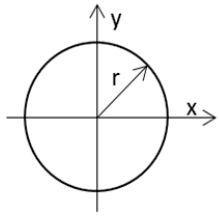
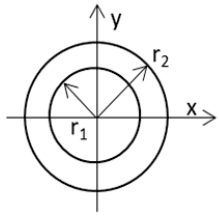
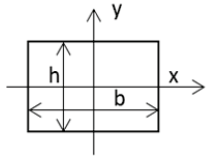
Tala väändenurga ϕ [°] võib arvutada allpool esitatud valemiga (kus *G* [Pa] on materjali nihkemoodul).

$$\varphi = \int_0^l \frac{M_T(x)}{GI} dx$$

2.4.4 Põhilised inertsimomendid ja Steineri meetod

Inertsimomendid (Tabel 2.1) võib lisada, kui osa on põhikujundite kombinatsioon. On vaja lisada impulsse, mis mõjuvad alati sama telje ümber.

Tabel 2.1 Tavapärased inertsimomendid osade eri geomeetriatele

Tala osa	Inertsimomendid
	$I_x = \frac{\pi r^4}{4}$ $I_y = \frac{\pi r^4}{4}$ $I_z = \frac{\pi r^4}{2}$
	$I_x = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{4}$ $I_y = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{4}$ $I_z = \frac{\pi(r_2^4 - r_1^4)}{2}$
	$I_x = \frac{bh^3}{12}$ $I_y = \frac{hb^3}{12}$

Arvestades sektsioonis olevat ava, tuleb lisada negatiivne inertsimoment (kujundi ava negatiivne inertsimoment).

Objekti, mille mass on *m* [kg] teljekaugusega *d* [m] keskteljest, inertsimomendi *I* arvutamiseks, võib kasutada allpool esitatud valemit (kus Ic on tsentraalne inertsimoment).

$$I = I_c + md^2$$

2.5 Materjalid

Igal materjalil on iseloomulikud parameetrid, mis on kasulikud tugevuse analüüsi jaoks (Tabel 2.2). Nende hulka kuuluvad muu hulgas:

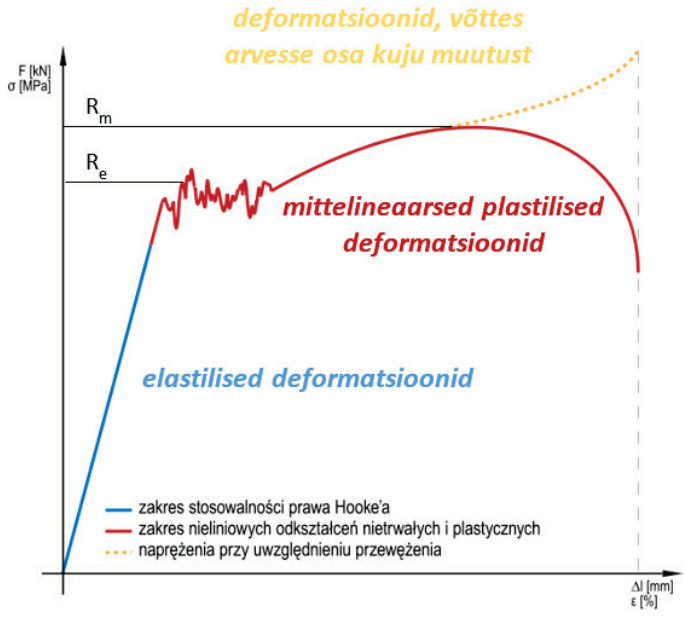
- Tihedus ρ [kg/m^3]
- Youngi moodul E [GPa] ja nihkemoodul G [GPa]
- Tõmbetugevus R_e [MPa] – elastse venivuse piir ja Hooki seaduse kohaldamine
- Ülim tugevus R_m [MPa] – talaosade mittedeformeeritavuse piir
- Lubatavad pinged (k_b painutamiseks, k_c kokkusurumiseks ja k_t torsiooniks; tavaliselt ka ühepoolsete ja kahepoolsete tsüklite puhul erinevad) [MPa] – pinge piir, mis ei kahjusta objekti

Tabel 2.2 Materjalide parameetrid

Materjal	ρ [kg/m^3]	E [GPa]	G [GPa]	ν	R_m [MPa]	R_e [MPa]	k_c [MPa]	k_b [MPa]	k_t [MPa]
Teras S235	7860	206	80	0,29	380	235	120	145	75
Teras E295	7860	210	80	0,29	490	295	145	170	90
Alumiinium	2700	72	27	0,34	90	50	25	30	15
Vask	8920	115	43	0,34	220	70	35	40	20
Plii	11340	17	6	0,42	20	5	2.5	3	1.5
Kumm	930	0.004	0.001	0,49	20	–	–	–	–
Betoon	2600	30	13	0,13	2–40	–	–	–	–

2.5.1 Hooki seadus

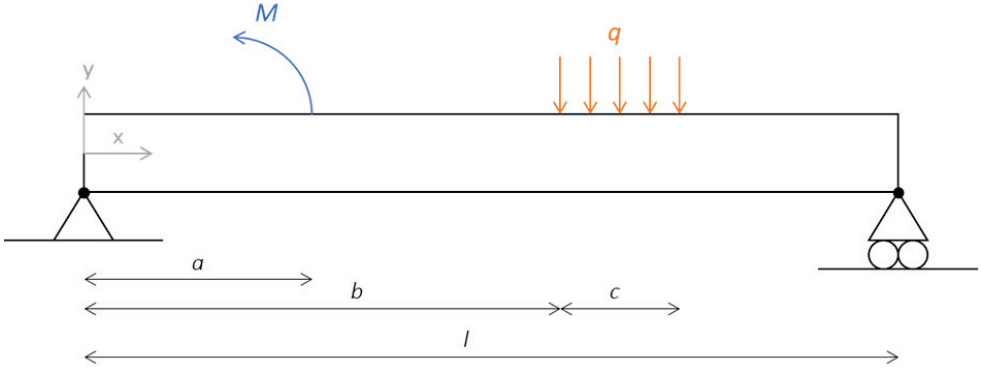
Hooke seaduse kohaselt on materjali elastsus proportsionaalne tema venivusega. See seadus kehtib ainult juhtudel, kus pinge on madalam kui tõmbetugevus (Joonis 2.10 – sinine joon).



Joonis 2.10 Venivus – pinge diagramm [5]71

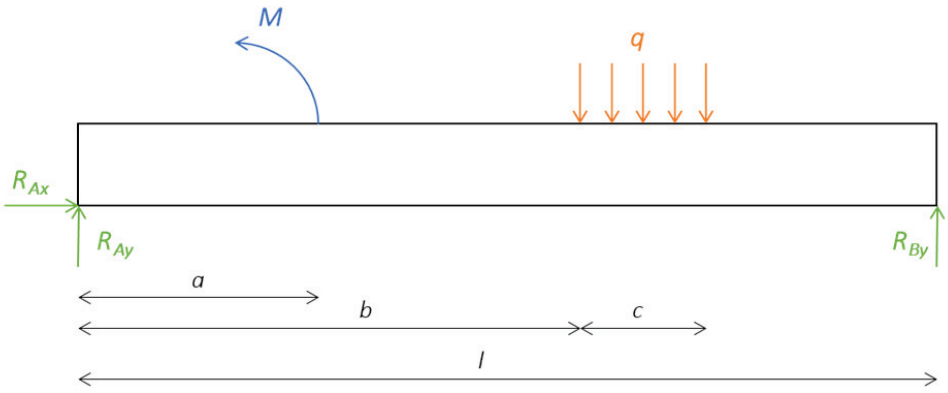
2.6 Lahenduse näide

Tala, mis on koormatud punkti momendi koormusega *M* [Nm] ja ühtlaselt jaotatud jõukoormusega *q* [N/m], toetatakse rullikuga ja kinnitatud tugedega (Joonis 2.11). Mis on sisemiste jõudude jaotus?



Joonis 2.11 Näite illustratsioon

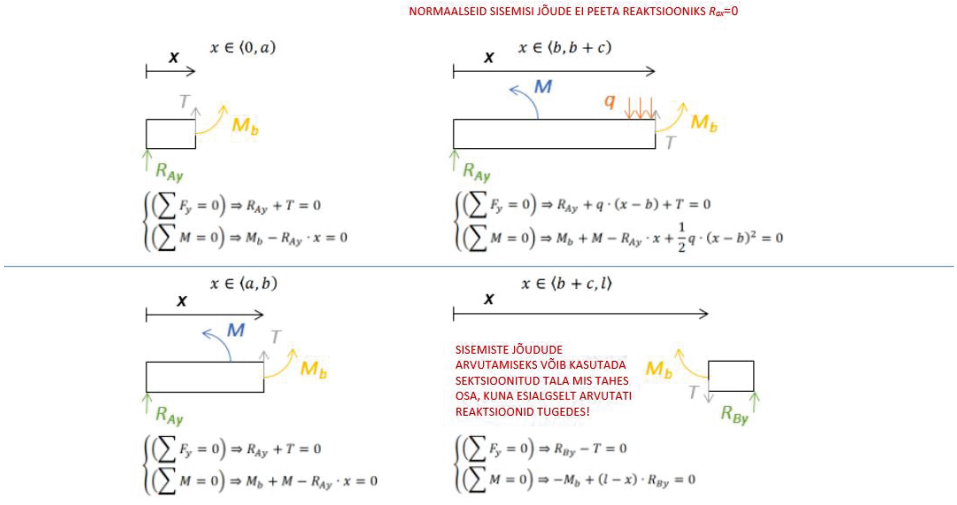
Lahenduse esimene etapp on tugede asendamine reaktsioonidega (Joonis 2.12), kasutades selleks allpool esitatud tasakaaluvalemeid.



Joonis 2.12 Tugede asendamine reaktsioonijõududega

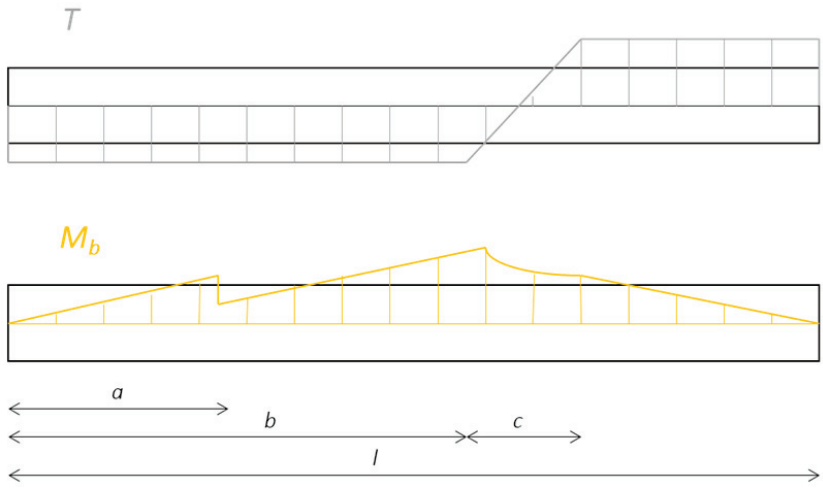
$$\begin{cases} \left(\sum F_x = 0\right) \Rightarrow R_{Ax} = 0 \\ \left(\sum F_y = 0\right) \Rightarrow R_{Ay} + R_{By} - q \cdot c = 0 \\ \left(\sum M = 0\right) \Rightarrow R_{By} \cdot l + M - q \cdot c \cdot (b + c/2) = 0 \end{cases}$$

Seejärel tuleb sisemisi jõude arvutada kõigi segmentide puhul, kus need muutuvad (Joonis 2.13). Seepärast on erinevate *x* väärtuste jaoks rakendatud sektsioonimeetodit.



Joonis 2.13 Sisemiste jõudude arvutamine erinevates segmentides

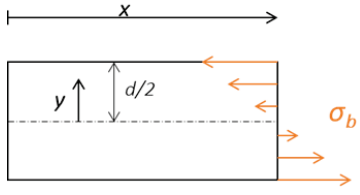
Selle tulemusena võib jõudude jagunemist joonestada (Joonis 2.14).



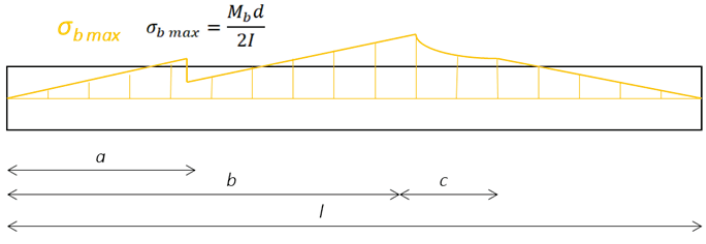
Joonis 2.14 Nihkejõu ja paindemomendi joonised

Kuna puuduvad normaalsed jõud ega väändemomendid, ilmub ainult standardne paindepinge profiil (Joonis 2.15, Joonis 2.16).

$$x \in \langle 0, l \rangle \qquad \sigma_b = \frac{M_b y}{I}$$



Joonis 2.15 Paindepinge jaotus



Joonis 2.16 Maksimaalse paindepinge joonis

Paindepinge põhjustab tala läbipainde. See arvutatakse allpool esitatud valemi põhjal.

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M(x)}{-EI}$$

$$\frac{dw}{dx} = \frac{\int_0^x M(x)dx}{-EI} + C_1$$

$$w = \frac{\iint_0^x M(x)dx}{-EI} + C_1 x + C_2$$

Juhtumi lahendamiseks tuleb siiski arvestada ka allpool mainitud piirtingimustega.

$$w_{x=0} = C_2 = 0$$

$$w_{x=l} = \frac{\iint_0^l M(x)dx}{-EI} + C_1 l + C_2 = 0$$

Selle tulemusel saadakse lõplik valem tala läbipaine arvutamiseks:

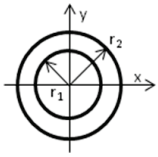
$$w = \frac{\iint_0^x M(x)dx}{-EI} + \frac{\iint_0^l M(x)dx}{EIl} x$$

2.7 Enesekontroll

1. Milline inertsijõu tüüp ilmub kokkusurutud tala osades?
    a. Pöördemoment
    b. Paindemoment
    c. Normaaljõud
    d. Nihkejõud
2. Millist tüüpi toed hõlmavad ka impulsireaktsiooni oma matemaatilises esituses?
    a. Rullik
    b. Kinnitatud
    c. Fikseeritud
3. Veega täidetud klaasi põhi on mille mõju all?
    a. Kohtjõu koormus
    b. Punkti momendi koormus
    c. Võrdselt jaotatud jõukoormus
    d. Ühtlaselt jaotatud impulsi koormus
    e. Ühtselt muutuv jõu koormus
    f. Ühtlaselt muutuv impulsi koormus

4. Millised valemid kehtivad torsioonipinge arvutamiseks?
   a. $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$
   b. $M(x) = -EI\frac{d^2w}{dx^2}$
   c. $\tau = \frac{M_T r}{I}$
   d. $\sigma = \frac{M_b y}{I}$

Inertsimoment, mida tuleks kasutada tala torsiooniks allpool esitatud osas, on:



   a. $I_x = \frac{\pi r^4}{4}$
   b. $I_x = \frac{\pi({r_2}^4 - {r_1}^4)}{4}$
   c. $I_z = \frac{\pi r^4}{2}$
   d. $I_y = \frac{\pi({r_2}^4 - {r_1}^4)}{4}$
   e. $I_z = \frac{\pi({r_2}^4 - {r_1}^4)}{2}$

5. Milline materjali tõmbetugevus R_m on olemas ja on kõige suurem?
   a. Kumm
   b. Betoon
   c. Teras E295
   d. Teras S235
6. Hooki seadust võib kohaldada:
   a. Ainult elastsete deformatsioonide korral
   b. Ainult plastiliste deformatsioonide jaoks
   c. Ainult elastsete ja plastiliste deformatsioonide jaoks
   d. Kõikide deformatsioonide jaoks, arvestamata osa kuju muutumist

3 AJAMITE KOMPONENDID

3.1 Mootorid

Mootorid on ajamite elemendid, mis muudavad teatud tüüpi energia (nt keemiline või elektrienergia) mehaaniliseks energiaks. Nende kasutamine võimaldab mehhanismide osade kontrollitud liikumist. Need jagunevad tavaliselt nende tööpõhimõtete, suuruste, rakenduste jne alusel.
Mootori valimise ajal on oluline mudeli vastavus kavandatud rakendusele ja selle kataloogi parameetrite kontrollimine.

3.1.1 Mootorite põhitüübid, mis põhinevad kasutatud energial

Sisepõlemismootorid (Joonis 3.1) – mootorid, mis kasutavad põlemisprotsessi, et muuta soojusenergia mehaaniliseks. Enamasti kasutatakse sõidukite või suuremate masinate jaoks.

Joonis 3.1 Sisepõlemismootor [6]

Elektrimootorid (Joonis 3.2) – seadmed, mis muudavad elektrienergia mehaaniliseks. Kaasavad magnetvälja ja elektrivoolu vahelise interaktsiooni. Väga täpsed, kuid ka üsna kallid.

Joonis 3.2 Elektrimootor [7]

Füüsilisel jõul töötavad mootorid (Joonis 3.3) – pneumaatilised (suruõhuga töötav) või hüdrauliline (surve all vedelikuga töötav) seadmed, mis ei ole nii täpsed kui elektrilised, aga samas palju odavamad.

Joonis 3.3 Pneumotäitur [8]

3.1.2 Mootori valik

Esiteks tuleb otsustada ajami põhiaspektide üle:

- Mootori tüüp
- Ajami vastuvõetav suurus koos lisavarustusega
- Elektrisüsteemi võimalikud parameetrid
- Nõuded seadmetele

Kui kõik otsused on tehtud, on võimalik jätkata valimist mehaaniliste valemite põhjal. Siin osas on esitatud elektrimootori ja pneumaatilise täiturmehhanismi valikumenetlused.

3.1.2.1 Elektrimootori valik

Mehhaanilise mootori korral on oluline määratleda miinimumnõuded ajamile, nagu:

- Väljundvõlli pöördemoment (T_o) [Nm]
- Pöörete arv minutis (n_o) [1/min] või võlli pöörlemiskiirus (ω_o) [rad/s]. Nende teisendamiseks võib kasutada allpool esitatud valemit.

$$\omega_o = \frac{2\pi n_o}{60}$$

Seejärel arvutatakse võimsus (P_o) väljundvõllil järgmise valemi alusel:

$$P_o = T_o.\omega_o$$

Samuti on vaja arvestada ajami efektiivsust (η), mis on üksikute elementide tõhususe korrutamise tulemus. Järgmise valemi põhjal võib leida arvutusvõimsuse (P_c):

$$P_c = \frac{P_o}{\eta}$$

Kataloogist võib valida mootori võimsuse (P_M) ja pöörlemiskiirusega (ω_M), kui on täidetud järgmised tingimused:

$$P_M \geq P_c \wedge \omega_M \approx \omega_c$$

Mootori valimisel tuleb analüüsida ka väljundvõlli läbimõõtu (d_M) (tuginedes selle väände-jõule). See arvutatakse järgmise valemi alusel(kus T on võlli pöördemoment ja k on võlli materjalil põhinev parameeter, tavaliselt 15 ÷ 30 MPa) ja seejärel ümardatakse 5 mm kordseni.

$$d_M = \sqrt[3]{\frac{T}{0{,}2 \cdot k}}$$

3.1.2.2 Pneumotäituri valimine

Pneumaatilise ajamiga on olukord palju lihtsam. On oluline määratleda ajami miinimum-nõuded, nagu näiteks:

- Soovitud väljundvõimsus [N]
- Täiturmehhanismi käik [mm]

Seejärel võib selle teabe põhjal valida kataloogist täiturmehhanismi.
Alternatiivina on võimalik valida täiturmehhanism kolvi suuruse ja tarnitud rõhu põhjal.

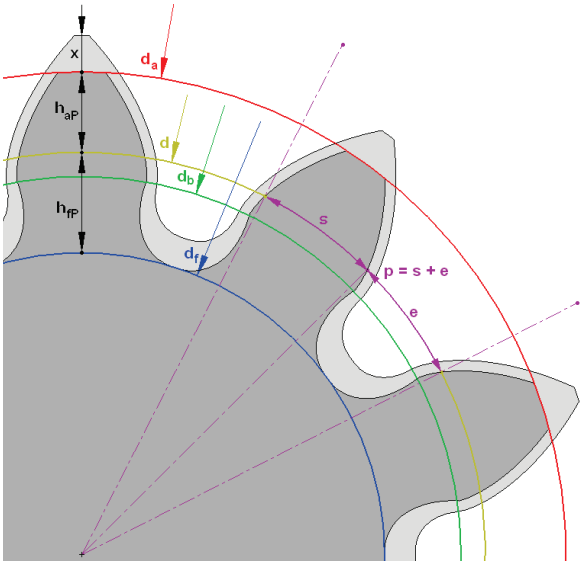
3.2 Hammasrattad

Kuna mootorid toodavad tavaliselt suhteliselt väikseid pöördemomente, samas kui nende võllid pöörlevad kiiresti, on vaja suurendada pöördemomenti ja vähendada väljundi pöörlemiskiirust (ideaaljuhul ilma igasuguste kadudeta püsib jõud konstantsena). Hammas-rattad vastutavad üldiselt pöördemomendi, kiiruste ja liikumise suuna muutmise eest. Need on tavaliselt erineva suurusega rattad, millest on hambad välja lõigatud. Rattad on paigaldatud nii, et need haakuksid üksteisega ja edastaksid võimsust. Mõnikord sobitatakse ratas lineaarse elemendiga, mida nimetatakse hammaslatiks, nii et see süsteem võib muuta pöörleva liikumise lineaarseks. Nende sisend- ja väljundkiiruste või väljundi ja sisendi pöördemomen-tide suhteid nimetatakse ülekandearvudeks.
Ülekandearv (R) on hammasrataste kõige olulisem omadus. See kujutab mehhanismi mehaanilist eelist. Seda saab arvutada allpool toodud valemiga (mittelibisevate juhtumite korral), kus ω on pöörlemiskiirus, r on sammu raadius (pool sammu diameetrist), z on hammaste arv, η on hammasratta efektiivsus ja T on pöördemoment. Indeksit i kasutatakse sisendparameetrite (vedav hammasratas) jaoks, samas kui indeksit o kasutatakse väljund-parameetrite (veetav hammasratas) jaoks.

$$R = \frac{\omega_i}{\omega_o} = \frac{r_o}{r_i} = \frac{z_o}{z_i} = \eta \frac{T_o}{T_i}$$

Hammasrataste projekteerimisel on olemas tavapärased parameetrid (Joonis 3.4) , mis tuleb täpsustada ja mis peavad olema standarditega vastavuses, nii et valitud hammasrattad sobivad ja töötavad ohutult. Muu hulgas on need järgmised:

- d_a – hamba peade ringjoon
- d – jaotusringjoon
- d_b – põhja ring
- d_f – jalgade ringjoon
- s – hamba paksus
- p – hambumise samm
- m – moodul
- z – hammaste arv



Joonis 3.4 Hammasratta parameetrid [9]

Kõige tavalisem parameeter hammasratta kirjeldamiseks on selle suhe, hammasratta paari keskmine kaugus, moodul – hamba kuju kirjeldav parameeter (arvutatuna allpool esitatud valemiga), hammasratta tüüp ja heeliksi nurk – nurk, kuidas hammasrattad on kaldu.

$$m = \frac{p}{\pi}$$

3.2.1 Hammasrataste tüübid

Hammasrattad jagunevad nende telgede geomeetria põhjal, mis tüüpi liikumist nad edasi annavad, ja hammaste kuju järgi. Siin osas on esitatud kõige levinumad hammasrataste tüübid.

Silinder (Joonis 3.5) – lihtsaim hammasratta tüüp, mis koosneb ainult silindrilisest rattast ja sirgelt lõigatud hammastest, mis ulatuvad radiaalselt selle keskosast väljapoole.

Joonis 3.5 Silinderhammasratas [10]

Spiraalne (Joonis 3.6) – sarnane silinderhammasrattale, erineb ainult hammaste kuju poolest. Spiraalsetel hammasratastel ei ole hammaste välisservad paralleelsed hammasratta pöörlemise teljega. Seda tüüpi hammasrattad töötavad järk-järgult ja kestavad kauem, kuid samal ajal loovad nad tõukejõudu piki oma telge.

Joonis 3.6 Spiraalne hammasratas [11]

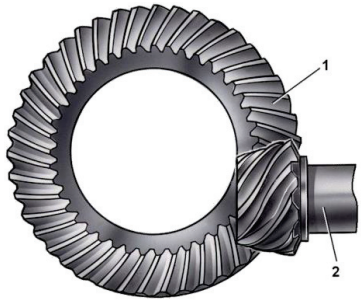
Kooniline (Joonis 3.7) – hammasratta tüüp, mis kujutab endast parempoolset ümmargust koonusekujulist ratast ja sirgeid hambaid ratta teljega risti. Seda tüüpi hammasratas võib muuta liikumise suunda (kahe ratta telje vahel võib olla ükskõik milline nurk, välja arvatud 0° ja 180°).

Joonis 3.7 Kooniline hammasratas [12]

Spiraalne kooniline (Joonis 3.8) – hammasrataste tüüp, mis on sarnane koonilistele hammasratastele liikumissuuna muutmise puhul, kuid hambad on samasugused kui spiraalsetel hammasratastel. Nende kahe erinevus on sama kui silindriliste ja spiraalsete hammasrataste vahel.

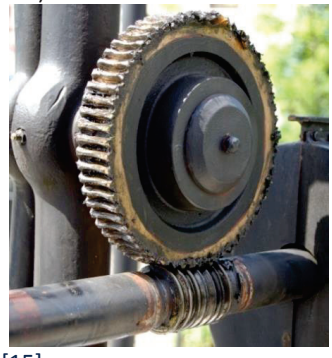
Joonis 3.8 Spiraalne kooniline hammasratas [13]

Hüpoid (Joonis 3.9) – hammasrataste tüüp, kus hammasrataste teljed ei lõiku ja nurk nende vahel on 90°. Hüpoid-hammasrattad võimaldavad sujuvat liikumist ja järkjärgulist pinge jaotust hammaste vahel.



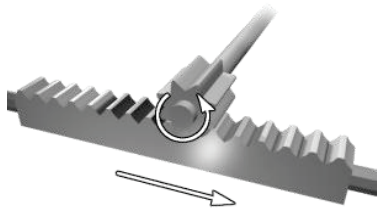
Joonis 3.9 Hüpoidhammasratas [13]

Tigu (Joonis 3.10) – tiguratta (sarnane silinder hammasrattaga) ja tigukruvi kombinatsioon. Sellised hammasrattatüübid muudavad tavaliselt ühe liikumise risti liikumiseks ja neil võivad olla väga laias vahemikus ülekandearvud (10 : 1 kuni 500 : 1, mis on palju suurem väärtus kui muud tüüpi hammasrataste puhul).



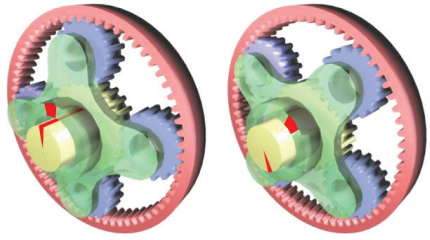
Joonis 3.10 Tigu hammasratas [15]

Hammaslatt ja väikeratas (Joonis 3.11) – elementide kombinatsioon, silinderhammasratas ja hammastega latt, mis võib muuta pöörleva liikumise lineaarseks.



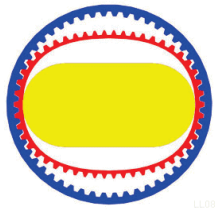
Joonis 3.11 Hammaslatt ja väikeratas [16]

Planetaarülekanne (Joonis 3.12) – hammasratta tüüp, kus vähemalt ühe hammasratta keskpunkt pöörleb ümber teise keskpunkti. Hammasrattad on ühendatud vedukiga ja hambumine on selline, et libisemise mõju on vähenenud. Sisemist pöörlevat hammasratast nimetatakse **päikeserattaks** ning välimisi pöörlevaid ja tiirlevaid hammasrattaid nimetatakse **satelliithammasratasteks**.



Joonis 3.12 Planetaarülekanne [17]

Harmooniline (Joonis 3.13) – hammasrataste tüüp, mis põhineb elastsetel dünaamikatel, mis kasutavad metalli paindlikkust. Need on valmistatud kolmest osast – lainegeneraator (kollane), painduv hammasliide (punane) ja ümmargune hammasliide (sinine). Harmoonilistele hammasratastele on iseloomulik lõtku puudumine, kompaktne suurus ja kaal ning väga kõrge ülekandearv. Neid kasutatakse enamasti robootikas ja lennunduses.



Joonis 3.13 Harmooniline hammasratas [18]

3.2.2 Hammasratta valik

Hammasratta valimise protsessi alustamiseks on väga oluline kasutuse eesmärgi määratlemine. Muu hulgas tuleb hammasrataste puhul arvestada järgmist:

- Sisend- ja väljundliikumise tüübid ja suunad
- Ülekandearv (*R*)
- Vastuvõetav efektiivsus (η)
- Töötingimused

Toodud tegurite alusel võib valida hammasratta, seejärel tuleb ajami arvutamiseks rakendada hammasrataste omadusi (nt mootori ja hammasratta efektiivsuse suurenemine). Peale selle tuleb kaaluda tugevuse arvutusi.

3.3 Rihmad

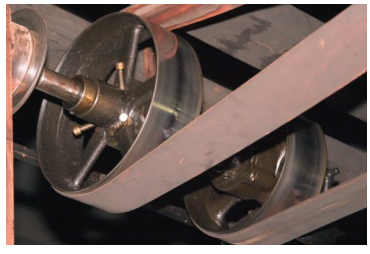
Rihmasüsteemid on teine jõuülekande vorm. Need võimaldavad liikumise konvektsiooni, sest on painduvad silmused pöörlevate võllide ümber. Kõige sagedamini on nad ühendatud ka rihmaratastega, mis võimaldab pöörlemiskiiruste ja võllides olemasolevate pöördemomentide muutusi. Rihmaajamid ei vaja aksiaalselt joondatud võlli ega ole kallid. Pealegi ei vaja need määrimist ja neil on suhteliselt kõrge kasutegur. Kuid teisest küljest ei pruugi rihmade süsteemiga ühendatud võllide vaheliste pöörete suhe püsida konstantsena venivustingimuste ja libisemise tõttu.

3.3.1 Rihmade tüübid

Kasutada on erinevaid rihmade tüüpe olenevalt koormustest ja muudest nende töötingimustest. Muu hulgas on need järgmised:

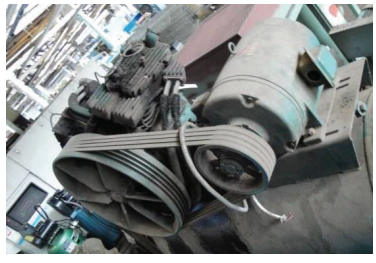
Ümarrihmad – tavaliselt tehtud kummist ja kasutatakse kergete koormuste jaoks.

Lamerihmad (Joonis 3.14) – lihtne rihma tüüp, probleemne libisemise tõttu rihmaratastel.



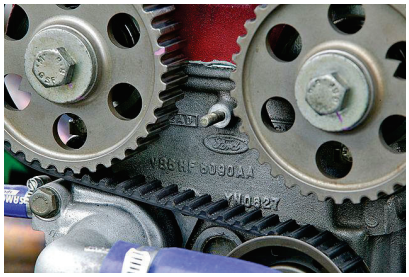
Joonis 3.14 Lamerihm [19]

Kiilrihmad (Joonis 3.15) – rihmad, mis on ristlõikes V-kujulised. Kuna neil on palju suurem pind, mis kannab edasi friktsiooni, kui lamerihmadel, on nad võimelised edasi kandma palju suuremaid koormusi.



Joonis 3.15 Kiilrihm [20]

Hammasrihmad (Joonis 3.16) – hammastega rihmad, mis kõrvaldavad libisemisprobleemi, kuid on ka kallimad kui teised. Need on tavaliselt ühendatud hammastega rihmaratastega ja neil on vaja tõhusat pinget, et korralikult töötada. Hammasrihmasid on palju erinevaid tüüpe ja nende ainus piirang tuleneb kasutuse eesmärgist ja rihmarataste parameetritest.



Joonis 3.16 Hammasrihm [21]

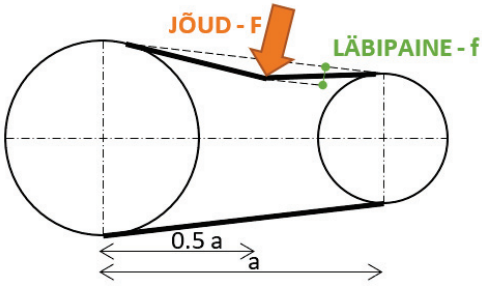
3.3.2 Pingutamine

Hammasrihmale optimaalsete töötingimuste tagamiseks tuleb luua täiendav pinge. On erinevaid meetodeid, mida saab selle tegemiseks kasutada (Joonis 3.18). Kasutuses võib olla kas täiendav, sageli liigutatav rihmaratas (koos täiendava vedru- või kruvimehhanismiga) või rihmapinguti. Rihmapinguti kasutamisel pingutatakse rihm tavaliselt selle silmuse sisemise osa suunas.

Läbipaine jõudu – F ja läbipaine – f võib arvutada allpool toodud valemite alusel, kus a on rihmarataste keskpunktide vaheline kaugus, F_0 on rihma eelkoormuse jõud ja c sõltub turvavöö tüübist (tavaliselt c=7÷50 [N]).

$$f = \frac{1.55a}{100}$$

$$F = \frac{(1.33F_0 + c)}{15}$$



Joonis 3.17 Pingutamise skeem

Joonis 3.18 Pingutussüsteem [22]

3.3.3 Rihma valimine

Rihma valimise protsessi alustamiseks on vaja hinnata:

- P_i ja P_o – sisend- ja väljundvõimsused [kN]
- T_i ja T_o – sisend- ja väljundpöördemomendid [Nm]

– n_i ja n_o – sisendi ja väljundi pöörded [rot/min]

Seejärel tuleb otsustada kasutatava rihma tüübi ja materjali üle, võttes arvesse töötingimusi ja kasutuse eesmärki. Seejärel võib kasutada standardvalemeid. Siiski on enamikul rihmasüsteemide tootjatel oma algoritmid rihmade ja rihmarataste valimisel, mis on esitatud nende kataloogides.

3.4 Ühendusmuhvid

Ühendusmuhvide kasutamine on teine võimalus kahe võlli ühendamiseks, et võimsust ühelt teisele edastada. Tavaliselt ei saa nendega ühendatud võlle töö ajal lahti ühendada (välja arvatud mõned kindlad ühenduste liigid)). Lisaks on ühendusmuhvidel täiendavad funktsioonid, nagu ülekantud pöördemomendi piiramine (kaitse ülekoormuse eest), võlli telgede joondamise ebatäpsuse vähendamine või ülekantud löögi ja vibratsiooni hulga alandamine. Üldjuhul võib neid valida tootjate tabelite põhjal, samas kui valik põhineb nende ülekantud pöördemomendil.

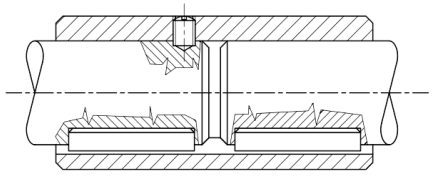
3.4.1 Ühendusmuhvide tüübid

On erinevat tüüpi ühendusmuhve erinevate kasutuseessmärkidega ja laia valiku koormuste jaoks, mida need võivad üle kanda. Elastsuse järgi on need jagatud järgmiselt:

– **Jäik**, mida võib kasutada täiuslikult joondatud võllide jaoks
– **Painduv**, mida kasutatakse tavaliselt juhtudel, kui võllil on kas nurk või küljele kõrvalekalle

Lisaks võivad ühendusmuhvid olla lahti ühendatavad ning neil võib olla libisemisefekt (siis ei ole kahe võlli kiirus võrdne). Ühendusmuhvide mitmekesisus annab võimaluse valida sobiv ühenduselementi vastava kasutamise eesmärgi jaoks. Järgmised on kõige tavalisemad ja funktsionaalsemad.

Torumuhv (Joonis 3.19) – jäik ühendusmuhv, mis koosneb torust, mis lukustab kaks võlli (kus võlli sobivust reguleeritakse aukude järgi või võtmega).



Joonis 3.19 Osa torumuhvist [23]

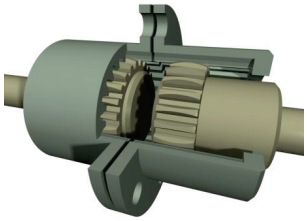
Paindlik ühendusmuhv (Joonis 3.20) – painduv ühendusmuhv, mis on valmistatud ühest materjali tükist, mille ümber on sisse lõigatud jooned. Kuna paindlik ühendusmuhv on tehtud materjali ühest tükist, ei esine sellel lõtku.

Joonis 3.20 Paindlik ühendusmuhv [24]

Membraan-ühendusmuhv – painduv ühendusmuhv, mis põhineb ühel või mitmel järjestikusel elastsel kettal või membraanil. Ketastelt edastatakse suuri pöördemomente siseläbimõõdule pooli kaudu ja seejärel tagasi välisele osale. Seda tüüpi ühendusmuhvid lahendavad nurga- ja radiaalsete nihete probleemi ning ka kõrge telgjoone.
Ketas-ühendusmuhv (Joonis 3.21) – painduv ühendusmuhv elastsete ketastega. See põhineb tavaliselt pingel, mis tekib ühendusmuhvi profiilsete ketaste teistega poltidega ühendamisel. Selline ühendusmuhv ei luba lõtku ega ka muud tüüpi kõrvalekaldeid.

Joonis 3.21 Ketas-ühendusmuhv

Elastne ühendusmuhv – painduv ühendusmuhv, mis edastab eri tüüpi pöördemomente või koormust elastse komponendi abil.
Hammas-ühendusmuhv (Joonis 3.22) – painduv ühendusmuhv, mis edastab suurimat pöördemomendi (võrreldes teiste elastsete haakeseadistega) kahe radiaalse nihkega võlli vahel. See koosneb kahest väljastpoolt haakuvast rummust, mis on kokku pandud kahe sisemiste hammastega hülssidega, mis on poltidega ühendatud. Seda tüüpi ühendusmuhvidel on suur lõtk ja need vajavad perioodilist määrimist.

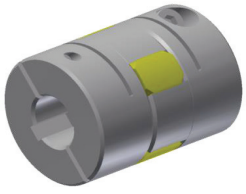


Joonis 3.22 Hammas-ühendusmuhv [25]

Pöörd-ühendusmuhv (Joonis 3.23) – painduv ühendusmuhv, mis on valmistatud kahest rummust ja ühendatud metallist rest-vedruga. Sellised ühendusmuhvid summutavad teatud tüüpi vibratsioone ja vähendavad koormuste tippude suurust.

Joonis 3.23 Pöörd-ühendusmuhv

Haarats-ühendusmuhv (Joonis 3.24) – painduv ühendusmuhv, mis on valmistatud kahest rummust, mille haaratsite vahel on elastsed kodarad. Haarats-ühendusmuhve kasutatakse tavaliselt madalamate pöördemomentide edastamiseks.



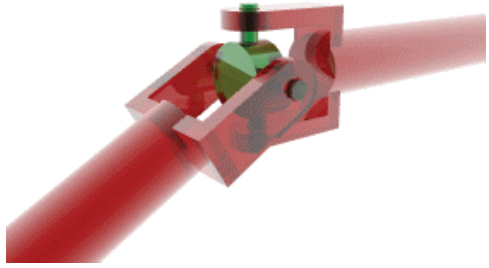
Joonis 3.24 Haarats ühendusmuhv

Oldhami ühendusmuhv (Joonis 3.25, Joonis 3.26) – kolm keele ja soonega ühendatud ketast (keskmiste ketaste keel ja soon on üksteisega risti). Esimene ja kolmas ketas on pöördemomendi edastamiseks ühendatud võllidega. Oldhami ühendusmuhvi eelis on kompaktne suurus võrreldes teiste ühendusmuhvidega. Mõnikord on Oldhami ühendusmuhvile lisatud ka vedruelement, mis vähendab lõtku.

Joonis 3.25 Kokkupandud Oldhami ühendusmuhv [26]

Joonis 3.26 Lahtivõetud Oldhami ühendusmuhv [27]

Universaalne ühendus (Joonis 3.27) – nimetatud ka kardaanliigendiks – lahendus, mis ühendab kaht võlli nurknihkega. Selle kinemaatika kohaselt on universaalne ühendusliigend kahe üksteisega risti asetseva hinge kombinatsioon. Selline liigend ei võimalda pideva kiirusega liikumist.



Joonis 3.27 Universaalne ühendus [28]

3.5 Enesekontroll

1. Mille näide on pneumotäitur?
    a. Sisepõlemismootor
    b. Elektrimootor
    c. Füüsilisel jõul töötav mootor
2. Mille suhtarv on ülekandearv?
    a. Sisendi ja väljundi pöörlemiskiirus
    b. Väljundi ja sisendi sammu diameetrid
    c. Väljundi ja sisendi hammaste arv
    d. Kõik eespool nimetatud
3. Milliseid hammasrattaid tuleks kasutada pöörleva liikumise teisendamiseks lineaarseks liikumiseks?
    a. Hüpoid
    b. Hammaslatt ja väikeratas
    c. Spiraalne kooniline
    d. Tigu
    e. Planetaarülekanne
4. Milliseid hammasrattaid kasutatakse kõige tõenäolisemalt juhul, kui on vaja väga suurt ülekandearvu?
    a. Silinder

b. Spiraalne
c. Spiraalne kooniline
d. Hammaslatt ja väikeratas
e. Tigu

5. Millist tüüpi rihmad kõrvaldavad libisemisprobleemi?
   a. Ümarrihmad
   b. Lamerihmad
   c. Kiilrihmad
   d. Hammasrihmad
6. Rihmapinguteid kasutatakse selleks, et:
   a. võimaldada ümarrihmadel kanda raskeid koormusi
   b. võimaldada hammasrihmadele optimaalseid töötingimusi
   c. venitada igasugust tüüpi rihmasid, et need töötaksid kiiremini
   d. täiesti kõrvaldada libisemise mõju lamerihmadega süsteemides
7. Ühendusmuhvi, mis hoiab ära aksiaalse nihke halvad tagajärjed ja on suhteliselt kompaktne, nimetatakse kui:
   a. Membraan-ühendusmuhv
   b. Oldhami ühendusmuhv
   c. Haarats-ühendusmuhv
   d. Hammas-ühendusmuhv
8. Kardaanliigend on lahendus ühendamaks:
   a. Ainult täiuslikult joondatud võllid
   b. Võllid, mis on ainult aksiaalselt valesti joondatud
   c. Võllid, mis on nurga all valesti joondatud

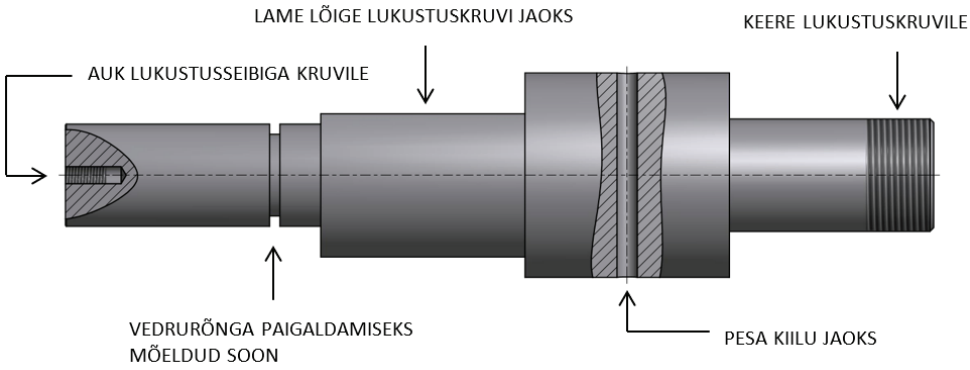
4 VÕLLID

4.1 Võllide põhitõed

Võllid on masina elemendid, mis kannavad üle pöörleva liikumise ja edastavad pöördemomendi. Kuna nad ühendavad tavaliselt vähemalt kaht masina liikuvat osa, on mitmesuguseid elemente, mida võib nendega ühendada, nagu hammasrattad, rihmarattad või ketaspidurid. Lisaks võivad hambad (analoogne hammasrataste hammastega) olla nende homogeenne osa.

4.1.1 Võllide kokkupanek

Kõik võllid tuleb masinasse monteerida viisil, mis võimaldab nende pöörlevat liikumist. See lahendatakse tavaliselt laagrite rakendamisega. Võlli hoidmiseks aksiaalses koordinaadis on vaja rakendada üht võlli lukustussüsteemidest, mis takistavad aksiaalseid liikumisi. Neid süsteeme kirjeldatakse 5. õppetükis. Siin peatükis käsitletakse lukustuselementide rakendamiseks vajalike võllide muudatusi (Joonis 4.1).

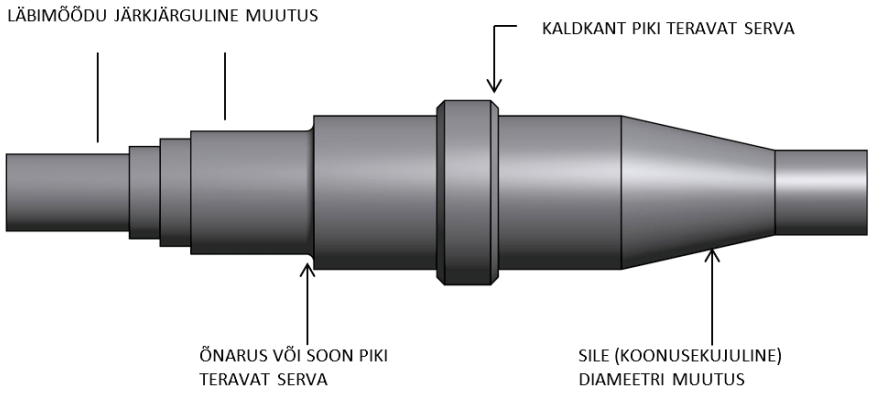


Joonis 4.1 Kõige iseloomulikud modifikatsioonid võllide geomeetrias, mida kasutatakse kokkupaneku eesmärgil.

4.1.2 Vastupidavus

Võllid peavad diameetri vähendamisel edastama suhteliselt suuri pöördemomente. Seetõttu on need valmistatud vastupidavatest materjalidest, tavaliselt karastamata terasest. Kui võllil on vaja paremaid tugevuse parameetreid, kasutatakse terasesulamit. Tavaliselt hõlmab tootmisprotsess kuumvaltsimist ning seejärel külmtõmbamist ja lõikamistehnikaid kujundamiseks.

Võllide suurim vastupidavus võib olla erinevatel põhjustel otsustava tähtsusega ning on tavaliselt seotud valitud materjali tugevusparameetrite ja kavandatud geomeetriaga. Võllide tööea pikendamiseks (töötsüklite arvu suurendamine) vähendatakse sisemist kumuleeritud pinget. On mitmeid lähenemisviise nende vähendamiseks olenevalt sisemisest pingejaotusest, mis on põhjustatud koormustest ja nende paigutusest. Kuna ebakorrapäraste kujutistega kohtades esineb kõige suurem pinge, on vastupidavuse suurendamine üldiselt geomeetria järskude muutuste vähendamine (Joonis 4.2).



Joonis 4.2 Kõige iseloomulikud modifikatsioonid võllide geomeetrias, mida kasutatakse nende vastupidavuse suurendamiseks.

4.2 Võllide projekteerimine

Üks eesmärk võllide projekteerimisel on arvutada minimaalne läbimõõt, mis võimaldab võlli ohutu toimimise kindlate koormuste all ja etteantud piirangutel. Selle protsessi esimene etapp on staatilise probleemi lahendus – paindemomentide (M_{bx} and M_{by} [Nm]) ja pöördemomendi T [Nm] arvutamine võlli telje pikkuse ulatuses ning kõigi tugedes esinevate reaktsioonide (R [N]) arvutamine. Seejärel võib kohaldada järgmist protseduuri. Kõik arvutused tuleb teha kogu võlli pikkuse ulatuses (kuna võlli diameeter on erinevates lõikudes erinev, mida tavaliselt määravad põhipunktid, kuhu koormus on kinnitatud või kus piirangud esinevad).

Järgmiste arvutuste jaoks vajaliku asendusliikumise paindemomendi M_{bs}[Nm] võib määratleda allpool toodud võrrandi põhjal, kus α on ligikaudu √3/2 nende võllide puhul, mis muudavad pöörlemissuundi ja pöörlemiste suunda ning √3/4 võllidele, mis on konstantse pöörlemissuunaga.

$$M_{bs} = \sqrt{{M_{bx}}^2 + {M_{by}}^2 + (\alpha T)^2}$$

Võlli teoreetilise läbimõõdu d_t [m] võib arvutada eelnevalt kindlaks määratud paindemomendi M_{bs} ja materjali tugevuse järgi kahepoolse painde jaoks k [Pa], järgmise võrrandi alusel.

$$d_t = \sqrt[3]{\frac{10 \cdot M_{bs}}{k}}$$

Tegelikud läbimõõdud d [m] täidavad eeldatavalt allpool olevat tingimust ja ümardatakse täismillimeetritesse.

$$d \geq d_t$$

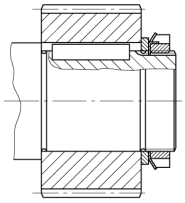
4.3 Kiilud

Võllid on üldiselt kokku monteeritud pöörlevate elementidega, nagu rihmarattad, hammasrattad, ketaspidurid või ühendusmuhvid. Pöördemomendi edastamiseks nende vahel on need tavaliselt kiiludega ühendatud. Need on elemendid, mis ühendatakse võllide kiiluavadesse ja võllile paigaldatud elemendi soonele. On mitmesuguseid kiilutüüpe, mis põhinevad nende kujul ja ühendamise meetodil.

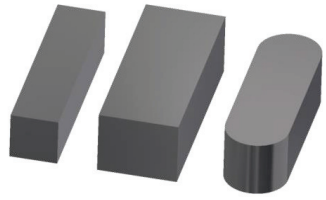
4.3.1 Kiilutüübid

Süvis – kiilu tüüp, mis sobib nii võlli kui ka teise elemendi kiiluavasse põhivooludega. Nad on omakorda jagatud kuju alusel tüüpideks.

Paralleelsed (Joonis 4.3, Joonis 4.4) – kõige laialdasemalt kasutatavad kiilud, mis on ristlõikes ristkülikukujulised. Kui need on rööpkülikud ja nende ristlõige on ristkülikukujuline, nimetatakse neid **ristkülikukujulisteks** või **kandilisteks kiiludeks**, kui nende ristlõige on ruut. Kui nende otsad on ümarad, nimetatakse neid **sidekiiludeks**.

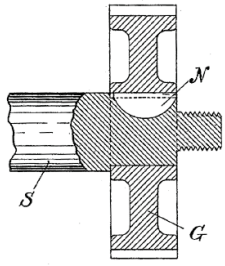


Joonis 4.3 Paralleelsete kiiludega ühendatud liigendi ristlõige [29]



Joonis 4.4 Kandilised, ristkülikukujulised ja sidekiilud

Segment (Joonis 4.5) – poolringikujuline kiil, mis on paigutatud võlli poolringikujulisse kiiluavasse ja masina elemendi ristkülikukujulisesse soonde. Segmentkiilu peamine eelis võrreldes paralleelkiiluga on freesimise vähendamine võllide tahkude lähedal. Veelgi enam, segmentkiilu saab lihtsalt haamriga kiiluavast eemaldada.

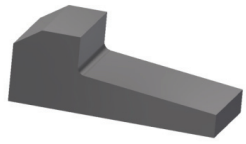


Joonis 4.5 Segmentkiiluga liitekoha ristlõige [30]

Kitseneva otsaga (Joonis 4.6) – selle liigi kiilud on kitsenevad mööda rummuga ühendatud servi. Seetõttu võimaldavad need osi jäigalt ühendada ilma kruvide kasutamiseta. Seda tüüpi ühendus võib põhjustada aga probleeme pöörlemise keskpunktiga. Mõnedel kitseneva otsaga

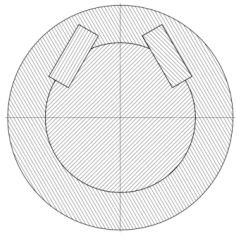
kiiludel, nn **ninaga** kiiludel (Joonis 4.7), on täiendavad otsad, mis hõlbustavad kokkupanekuprotsessi.

Joonis 4.6 Kitseneva otsaga kiil



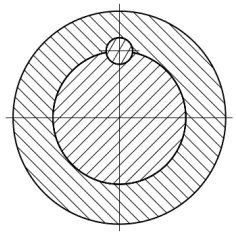
Joonis 4.7 Ninakiil

Hõõrd – kiilu tüüp, mis on kinnitatud ühe vedava osa külge. Olenevalt selle serva kujust, mis sobib võlliga, on see kas **lame hõõrdkiil** (sirge serv) või **õõnes hõõrdkiil** (kõver serv). Seda tüüpi kiilusid kasutatakse harva, kuna need võivad edastada vaid kergemaid koormusi.
Tangentsiaal (Joonis 4.8) – seda tüüpi kiilusid kasutatakse tavaliselt raskeid koormusi kandvatel võllidel. Tangentsiaalsed kiilud paigaldatakse võllile tangentsiaalselt. Kuna neil on ainult üks külg, mis reageerib väändejõule, peab olema vähemalt kaks tangentsiaalset kiilu, mis on ühendatud teineteisega 90° või 120° nurga all, et tagada võlli kahesuunaline pöörlemine.



Joonis 4.8 Lõik tangentsiaalsest kiilust

Ümmargune (Joonis 4.9Joonis 4.10 – kiilu tüüp, mis on ristlõikes ümmargune, mis on paigaldatud võllile ja rummule puuritud auku. Nende tootmine on suhteliselt lihtne, kuid neid kasutatakse peamiselt väikese võimsusega ülekande puhul.



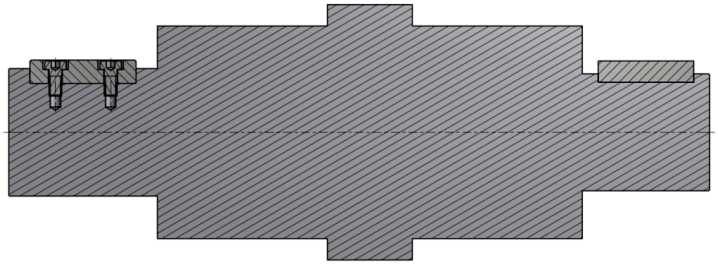
Joonis 4.9 Lõik ümmargusest kiilust

Hammas (Joonis 4.10) – kiilu tüüp, mis on võlli osa.

Joonis 4.10 Hammaskiil

4.3.2 Kiilu kokkupanek

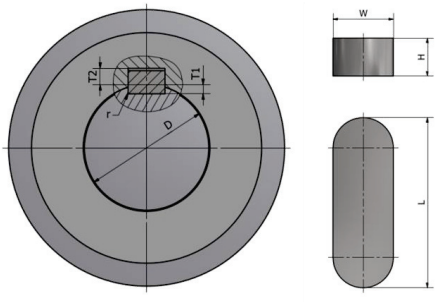
Kiilud sobitatakse tavaliselt tihedalt kiiluavasse. Kuid juhul, kui kiilu asend peab olema täpne isegi raskete koormuste korral, kasutatakse ka kruvisid (Joonis 4.11).



Joonis 4.11 Kiilude kokkupanemise kahe meetodi näited

4.3.3 Kiilu parameetrid

Kuna kiilud on normatiivsed elemendid, on nende parameetrid rangelt reguleeritud võlli läbimõõdu alusel (*D*). Kiilusid on kirjeldatud nende mõõtmetega – laius *W*, kõrgus *H*, pikkus *L*, kiiluava sügavus T_1, kõrgus kiiluava kohal T_2 (Joonis 4.12).



Joonis 4.12 Kiilude parameetrite skeem

4.4 Kiilude valik

Kiilude valik on suhteliselt lihtne, sest need on kataloogielemendid ja kõik nende parameetrid on normatiivsed. Kogu protsessi eesmärk on valida standardile vastav kiil, mis on edastatava pöördemomendi koormusele vastupidav. Arvutuste alustamiseks tuleb kindlaks määrata võlli läbimõõt *D* [m] ja pöördemoment *T* [Nm] kohas, kuhu kiil paigaldatakse.
Kuna võlli diameetri *D* jaoks on antud kiilu laius *W* [m] ja kõrgus *H* [m], võib vahemikust valida ainult selle pikkuse *L* [m] (normide alusel). Vajaliku minimaalse pikkuse arvutamiseks L_{min} [m] pöördemomendi *T* jaoks võib kasutada järgmist valemit, kus *k* [Pa] on valitud materjali maksimaalne lubatud pinge ja ühenduse tüüp.

$$L \geq L_{min} = \frac{4T}{H \cdot D \cdot k}$$

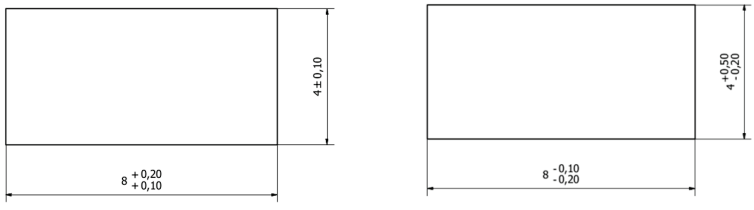
Kui kiilu *L* pikkus jääb normi ulatusse, võib seda kiilule kohandada. Juhul kui L_{min} on ülemise piiri ulatusest suurem, tuleb kasutada rohkem kiilusid (ja siis eeldatakse, et pikkus *L* on kõigi võlli ühes lõigus kasutatud kiilude kogupikkus) või tuleb võlli läbimõõtu suurendada ja kogu kiilu valiku protseduuri tuleb korrata.

4.5 Sobivused ja tolerantsid

Võllide täpse paigutuse tagamiseks laagrites või võimsust edastavate elementide vahelise ühenduse vastupidavuse parandamiseks kasutatakse konstruktsioonides sobivusi ja tolerantse. Need on meetmed, mis määravad vastuvõetavad erinevused reaalse ja disaini mõõtmete ja kujundite vahel. Need on projektides tähistatud järgmistes slaidides kirjeldatud normatiivsete sümbolitega.

4.5.1 Mõõtmete tolerantsid

Mõõtmete tolerants väljendab nominaalse mõõtme ja selle tegeliku väärtuse aktsepteeritavat erinevust. See on tavaliselt märgistatud kas sümmeetrilise kõrvalekaldega või kõrvalekallete kahe väärtusega (Joonis 4.13). Olenevalt kohaldatavast tolerantsist võib saavutada erinevat tüüpi ühendusi. Seetõttu on ühendatud elementidel kas võimalus libiseda, need jäävad paigale või nende kokkupanek nõuab isegi täiendava jõu rakendamist.



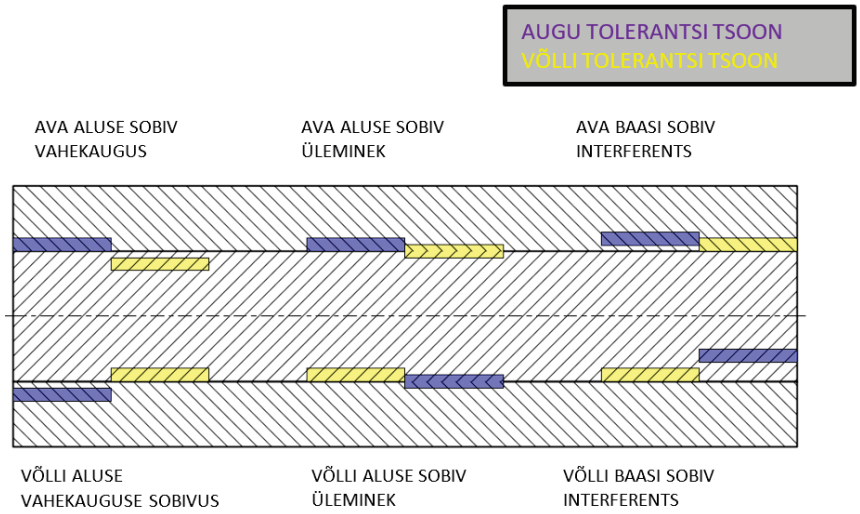
Joonis 4.13 Mõõtmete tolerantside erinevad tüübid

4.5.2 Sobivused

Sobivused on mõõtmete tolerantsid, mida tavaliselt kasutatakse võllidega. Nad kirjeldavad vahekaugust võlli ja rummu vahel. Sobivused märgitakse aukude puhul suure tähe ja numbriga ning võllide puhul väikse tähe ja numbriga. Iga sobivuse kõrvalekalded on määratud ISO- ja

ANSI-standardites. Ühenduste tüüp sõltub mõlema, nii augu kui ka võlli sobivusest (Joonis 4.14). Siiski vaadeldakse sobivuse vaatlemisel tavaliselt üht neist läbimõõtudest ilma hälbeta. Seda nimetatakse sobivuseks augu alusel (HX/xx, kus X/xx võivad esineda erinevate väärtustena), kui ava läbimõõt on võrdlusmõõde või sobivus võlli alusel (XX/hx, kus XX/x võib esineda erinevate väärtustena), kui võlli läbimõõt on võrdlusmõõde.

- Kui kogu augu tolerantsi tsoon on võlli oma kohal ja ei lõiku sellega, siis nimetatakse seda **kliirensi sobivuseks**. Sellisel juhul võivad ühendatud elemendid üksteise suhtes pöörelda. Seda liiki ühendust saab kasutada liugelaagrite jaoks.
- Kui ava tolerantsi tsoon on allpool, kuid osaliselt lõikub võlli omaga, siis nimetatakse seda **ülemineku sobivuseks**. Sellisel juhul võib elemente kokku panna vähese jõu abil. Seda tüüpi ühendust saab kasutada enamiku hammasrataste ja laagritega (ka nendega, mida sageli eemaldatakse).
- Kui kogu augu tolerantsi tsoon on allpool võlli oma, siis nimetatakse seda **interferentsi sobivuseks**. Sellisel juhul pannakse need kokku suurema jõu kasutamisega. Seda tüüpi ühendust võib kasutada hammasrataste ja laagrite jaoks, mida eemaldatakse harvemini või mis paigaldatakse püsivalt.



Joonis 4.14 Sobivuse tüübid

4.5.3 Kujutise tolerants

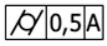
Kujutise tolerantsid kirjeldavad vastuvõetavaid erinevusi elemendi reaalse kuju ja disaini vahel. Need on üldjuhul tähistatud sümboliga, vastuvõetava erinevuse väärtusega ja mõnikord ka andmetega (viide teljele, tasapinnale või teisele tahule).

Kõige tavalisemate tolerantside näited on toodud allpool:

- Sirgsus

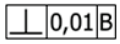
– Lamedus

– Silindrilisus



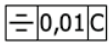
– Kalle

– Ristisus



– Paralleelsus

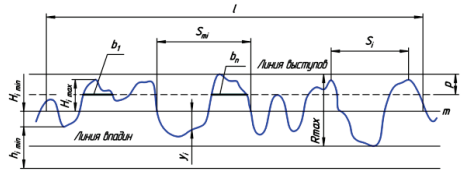
– Sümmeetria



4.5.4 Karedus

Pinna karedus on pinna ebatäpsuste mõõt ja kirjeldab objekti tekstuuri. Erineva kareduse rakendamine võib muuta elementide omavahelist hõõrdumist, mida kasutatakse montaaži eesmärgil. Seda kirjeldab tavaliselt selle R_a väärtus (Joonis 4.15). Siiski kasutatakse mõnikord ka erinevaid väärtusi. R_a väärtus arvutatakse järgmise valemi põhjal, kus y_i on hälve proovivõtupunktis *i* (Joonis 4.16).

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i|$$

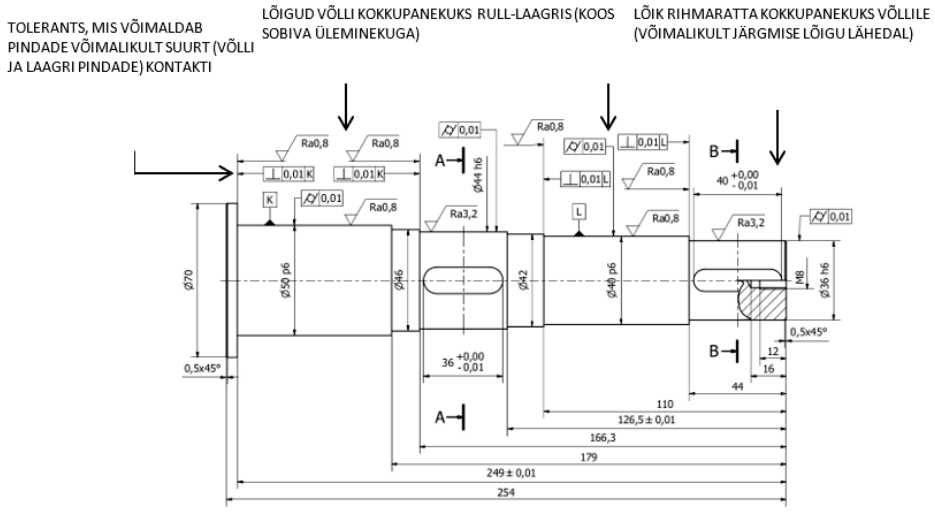


Joonis 4.16 Profiili suurendatud näide

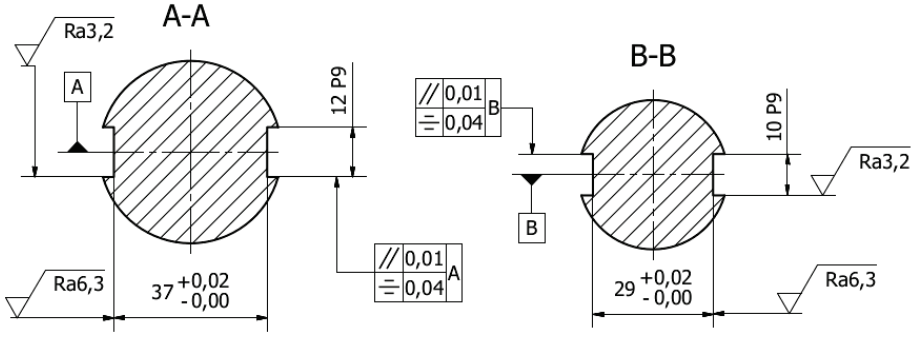
Joonis 4.15 6,3 kareduse sümbol töötlemisprotsessi jaoks

4.5.5 Kasutuse näide

Kõigi eespool nimetatud sobivuste ja tolerantside kirjeldusi võib kasutada projekteerimisprotsessi käigus. Neid rakendatakse tavaliselt osade võllidele, mis on kontaktis laagrite, hammasrataste või rihmaratastega (Joonis 4.17), ja kiiluavadele (Joonis 4.18).



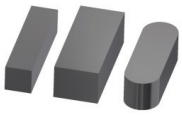
Joonis 4.17 Sobivuste ja tolerantside kasutamine



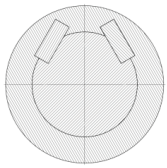
Joonis 4.18 Kiiluavade sobivused ja tolerantsid

4.6 Enesekontroll

1. Milline modifikatsioon peaks vedrurõngaga kokkupandud võllil olema?
    a. Lame lõige vedrurõnga paigaldamiseks
    b. Keere vedrurõnga paigaldamiseks
    c. Soon vedrurõnga paigaldamiseks
    d. Pesa kiilu jaoks
    e. Modifikatsiooni ei ole vaja
2. Võlli vastupidavust saab suurendada:
    a. eriline õnarus või soon piki teravat serva
    b. kõikide võlli läbimõõtude vähendamisega
    c. läbimõõdu järkjärguliste muutuste vähendamisega
3. Milline allpool toodud piltidest kujutab kitseneva otsaga kiilu?

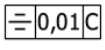
a. 

b.

c. 

4. Kiilud raskete koormuste jaoks:
    a. on sidekiilud
    b. vähemalt kaks neist peavad olema paigutatud 90° või 120° nurga all teineteisest
    c. on kinnitatud ühele vedavale osale
    d. kõik eelpool mainitud on tõsi
    e. üksi eelpool toodud väide ei ole õige
5. Kiilud paigaldatakse järgmiselt:
    a. leitakse lihtsalt väga täpselt sobiv kiil
    b. lihtsalt kruvidega
    c. leitakse väga täpselt sobiv kiil ja kasutatakse kruvisid
    d. ükski eespool nimetatud meede pole vajalik
6. Kiilud peavad olema järgmised:
    a. olema viis korda väiksema kõrgusega, kui on võlli läbimõõt
    b. pikkus ei tohi olla suurem poolest võlli osa pikkusest
    c. olema laiemad kui 0,7 võlli läbimõõdust
    d. olema normidele vastavate mõõtmetega ja sõltuma võlli läbimõõdust
7. Võlli aluse interferentsi sobivus tähendab, et:
    a. võlli mõõde on nominaalsest suurem
    b. ava mõõde on nominaalsest väiksem
    c. võlli mõõde on nominaalsest väiksem
    d. ava mõõde on nominaalsest suurem
    e. ava mõõde võib olla nominaalsest kas väiksem või suurem
8. Sobivus, mida saab kasutada liugelaagrite jaoks on:
    a. kliirensi sobivus
    b. ülemineku sobivus
    c. interferentsi sobivus

See sümbol tähendab:



d. pinnal peab olema vähemalt 99% ulatuses kontakt pinnaga C

e. pind peab olema kokkupuutes silindriga C täpsusega 0,01 mm
f. pind peab olema sümmeetriline tasapinna C suhtes täpsusega 0,01 mm
g. pind peab olema tasane selle keskme C suhtes vähemalt 99% ulatuses

9. Pinna karedus kirjeldab:
   a. objekti materjali
   b. objekt tootmisprotsesside tüübid
   c. objekti pinna ebatäpsused

5 LAAGRID

5.1 Laagrite tüübid

Laagrid on mehaanilised elemendid, mis piiravad liikumise pöörlemisega ümber konkreetse telje. Samuti on nende eesmärk vähendada liikuvate elementide hõõrdumist. Need on jagatud eri tüüpidesse, mis põhinevad nende rakendusel, lubatava liikumise tüübil või konstruktsiooni mõjutavatel koormustel. Olenevalt nende rakendusest võivad need elemendid olla erineva konstruktsiooniga (erinevad veereelemendid või üldse mitte veerevad ja erineva liikumisega südamiku ja laagrivõru vahel) ja omada täiendavaid funktsioone (nt suurem vastupidavus). Õigesti valitud laagrid peavad vastama tõhususe, tugevuse ja vastupidavuse nõuetele.
Need jagunevad tavaliselt järgmisteks põhitüüpideks:

- **Tavalised** laagrid – mida käsitletakse võllina augus ja realiseeritakse erinevate meetoditega
- **Veere**laagrid – üks kõige tavalisemat tüüpi laagreid, millel on palju alamtüüpe, mis põhinevad veerelementide tüübil
- **Määrde**-laager – laagrite tüüp ilma liugehõõrdumiseta
- **Magnet-**laager – magnetväljaga laagrite tüüp, mis minimeerib hõõrde ja võimaldab suurema kiiruste vahemiku

5.1.1 Tavalised laagrid

Tavalisi laagreid tuntakse ka liuglaagrite nime all. Neid kasutatakse tavaliselt raskemate koormuste jaoks, sest neil ei ole kergesti purunevaid veereelemente. Nad on suhteliselt kerged ja samuti odavad. Kuid nende rakendamine on seotud suure hõõrdumisega. Tavalisetel laagritel on iseloomulikud allpool nimetatud konstruktsioonid:

- **Kande**laager – võll, mis paigutatud otse elementi tehtud avasse. See on odavaim viis laagri saamiseks, kuid samal ajal ei ole seda laagrit võimalik vahetada.
- **Puks** (Joonis 5.1) – võll, mis paigutatakse avasse monteeritud laagripesasse. Kõige tavalisem liuglaagri tüüp, tänapäeval muutunud väga odavaks.
- **Kaheosaline** (Joonis 5.2) – laager, mis on valmistatud kahest hülsstoorikust, mis on paigutatud teineteise sisse. Tavaliselt kasutatakse suuremate läbimõõtude jaoks.

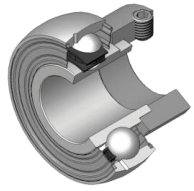
Joonis 5.1 Puksi hülss [32]

Joonis 5.2 Kaheosaline laager [33]

5.1.2 Veerelaagrid

Veerelaagrid, mida nimetatakse ka rull-laagriteks ning on hea hinna, kvaliteedi, suuruse, lubatavate koormuste ja vastupidavuse suhtega. Mainitud spetsiifilistel alamtüüpidel on oma eriliste omaduste pärast teiste laagritega võrreldes eelised. Rull-laagrid suudavad tavaliselt kanda väiksemaid koormusi kui tavalised laagrid ja neil on suurem väline läbimõõt, aga samas vähendavad hõõrde mõju. Tänu nende mitmekülgsusele ja paljudele alamtüüpidele on see laagri tüüp kõige levinum. Neil võib olla rohkem kui üks rullikutega rõngas või laagrivõrud, mis on paigaldatud nurga all, mitte paralleelselt. Need modifikatsioonid mõjutavad laagrite vastupidavust ja tugevust. Tavalised veerelaagrite tüübid on muu hulgas järgmised:

- **Kuul**laagrid (Joonis 5.3) – üks kuullaagrite kõige levinumatest alatüüpidest. Tavaliselt kasutatakse seda suuremate pöörlemiskiiruste ja kergemate koormuste jaoks kuulide deformatsiooniriski tõttu.



Joonis 5.3 Kuullaager [34]

- **Silindriline rull-**laager (Joonis 5.4) – laagrid, millel on kuulidega silindrid laagrivõrude vahel. Need võimaldavad suurema radiaalkoormuse kandmist kui kuullaagrid. Võrreldes nendega on silindrilised rull-laagrid aga vähem efektiivsed teljekoormuste all ja on ka kallimad. Veelgi enam, need ei vähenda hõõrdumist just väga palju.

Joonis 5.4 Silindriline rull-laager [35]

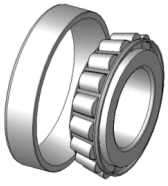
- **Sfäärilised rull-**laagrid (Joonis 5.5) – laagrid, mis on silindriliste kuullaagritega sarnased, kuid tünnikujuliste rullikutega. Nad võimaldavad võlli nurkhälvet ja selle vähese hõõrdumisega pöörlemist. Enamik neist laagritest on valmistatud kahe rullikute reaga.

Joonis 5.5 Sfäärilised rull-laagrid [36]

- **Hammasratas-**laagrid (Joonis 5.6) – komplekt hammastega laagrivõrudest ja hammasratastest, mis toimivad rullikutena. Nendel laagritel on minimaalsed hõõrdekaod vähenenud libisemise tõttu. Teisalt tuleb need valmistada erimaterjalidest, sest nende määrimine võib olla raskendatud.
-

Joonis 5.6 Hammasratas-laagrid [37]

- **Koonus rull-**laagrid (Joonis 5.7) – kooniliste rullikute ja laagrivõrudega laagrid. See võib kanda sama radiaal- kui aksiaalkoormust.
-



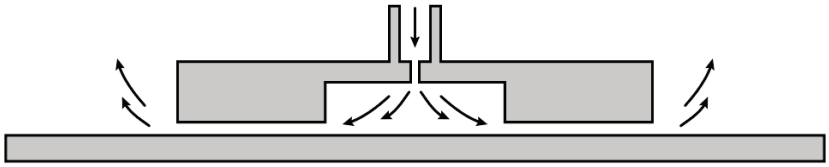
Joonis 5.7 Koonus rull-laagrid [38]

- **Nõel**laager (Joonis 5.8) – laagrid pikkade ja õhukeste silindriliste rullikutega. Nõellaagrid võivad kanda suuremaid koormusi kui kuullaagrid, kuigi on ise väiksemad.

Joonis 5.8 Nõellaager [39]

5.1.3 Määrdelaagrid

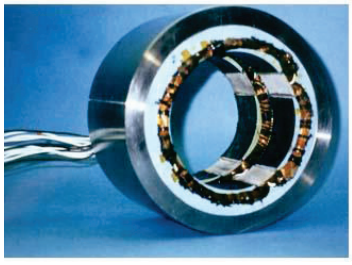
Määrdelaagrid (Joonis 5.9) kannavad koormaid pidevalt pumbatava survestatud vedela ainega. See võib olla vedelik, nagu vesi või õli või gaas, näiteks suruõhk. Seda tüüpi laagreid kasutatakse sageli suure kiiruse, täpsuse või koormusega rakenduste jaoks. Kuna rullikud või otsene kontakt rummude vahel puudub, kõrvaldavad laagrid peaaegu kogu hõõrdumise, mistõttu need on palju tõhusamad. Veelgi enam, need on odavamad ja vaiksemad kui kuullaagrid. Teisest küljest nõuavad need kindlatel tingimustel pidevat määrimist.



Joonis 5.9 Määrde-laagrite skeem [40]

5.1.4 Magnetlaagrid

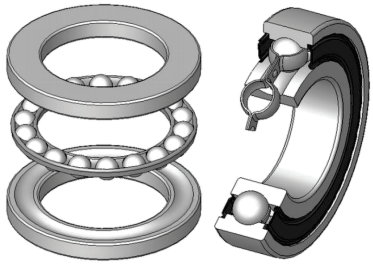
Magnetlaagrid (Joonis 5.10) kannavad koormusi magnetvälja efektiga, ilma osade füüsilise kontaktita. Seetõttu ei esine neil peaaegu üldse mehaanilist kulumist ega hõõrdumist. Samuti ei vaja need määrimist ega vaakumit. Kuna need on suhteliselt kallid, kasutatakse neid tavaliselt suurt täpsust nõudvate seadmetega (nt kunstlikud südamed) või rakendustega, kus kõrge tõhusus on elulise tähtsusega (nt ülikiired elektrirongid).



Joonis 5.10 Magnet-laagrid [41]

5.1.5 Koormuse tüüp

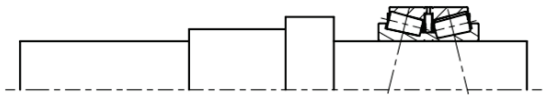
Laagritel võib olla kaks põhikonfiguratsiooni, mille määravad neid mõjutavad kaks suurimat jõudu (Joonis 5.11). Teljekoormuste puhul kasutatakse aksiaallaagreid, radiaalkoormuste korral aga radiaallaagreid. Mõlemad puudutavad nii rull-laagreid kui ka eri tüüpi laagreid. Rull-laagreid kasutatakse tavaliselt aga nende nurgakontaktiline konfiguratsiooniga, mis on tingitud nii aksiaalsete kui ka radiaalsete jõudude esinemisest.



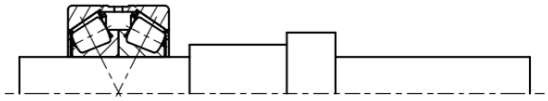
Joonis 5.11 Aksiaallaager (vasakul) [42] ja radiaallaager (paremal) [43]

5.1.6 Konfiguratsioonid

Mõlema, nii teljesuunalise kui ka radiaalsuunalise koormuse all olevad võllid paigaldatakse tavaliselt ühte fikseeritud laagrisse ja ühte ujulaagrisse (nõrga aksiaalse liikumise võimalusega laagrivõrude vahel). Esimene neist vastutab aksiaalsete ja radiaalsete koormuste kandmise eest, teine aga kannab ainult radiaalset koormust. Iga laagrite paari võib kokku panna O- või X-konfiguratsioonis (Joonis 5.12, Joonis 5.13). Rullikute suurema vahe tõttu on O-stiilis laagritega konstruktsioonid vastupidavamad impulsskoormustele. Seetõttu kasutatakse X-stiilis laagreid tavaliselt kergete koormusega rakenduste jaoks, samas kui enamikus rakendustes võib kasutada O-stiilis laagreid. Tasub märkida, et konfiguratsiooni valimisel tuleks lähtuda arvutatud reaktsioonidest ja muudest teguritest iga konkreetse juhtumi puhul eraldi.



Joonis 5.12 O-stiilis laagrid



Joonis 5.13 X-stiilis laagrid

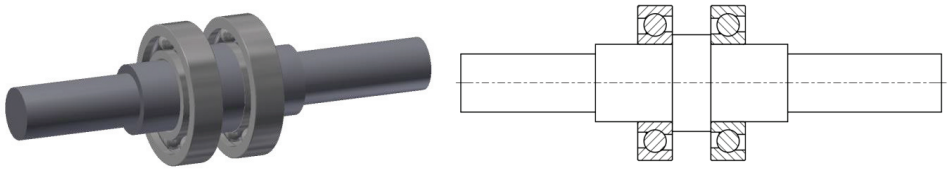
5.2 Lukustusmeetodid

Kuna võlli mõjutavad aksiaalsed koormused võivad põhjustada selle liikumist laagrites, tuleb rakendada mõnda lukustamismeetodit. Meetodi osana võib kasutada võlli konstruktsiooni-elemente või stabiilsust tagavaid komplekti täiendavaid elemente.
Meetodi valik peaks põhinema võlli rakendamisel, kokkusobivuses valitud laagritega ja jõududele, mis mõjutavad konstruktsioone tugipunktides.

5.2.1 Konstruktsiooni modifikatsioon

Võlli lukustamiseks on kõige lihtsam see konstrueerida täiendava laiema osaga (Joonis 5.14), mida saab laagrite vahel lukustada või laagri vastu toetada ja muu meetodiga küljelt poolt lukustada. Siiski ei saa seda meetodit rakendada iga juhtumi puhul, kuna see vajab spetsiaalset

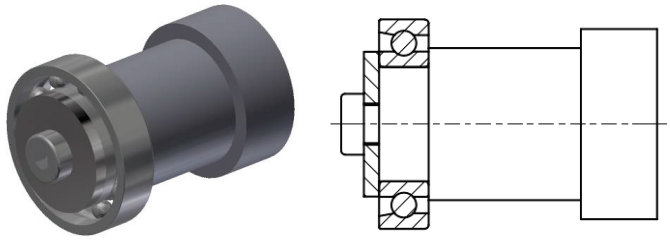
kokkupanekuprotsessi. Pealegi teeb see asendamise või lahtivõtmise protsessid palju keerulisemaks.



Joonis 5.14 Konstruktsiooni modifikatsiooniga võlli mudel ja ristlõige

5.2.2 Kruvi ja seib

Mõnikord lukustatakse võllid kruvi ja seibiga, mis on paigaldatud võlli otsa (Joonis 5.15), nii et need pingutaksid kaht elementi (nagu võll ja laager, hammasratas või rihmaratas). See meetod on suhteliselt lihtne, kuid kruvid võivad elementide inertsi, hõõrdumise ja vibratsiooni tõttu lahti tulla.



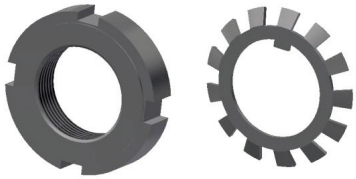
Joonis 5.15 Kruvi ja seibi lukustusega mudel ja ristlõige

5.2.3 Mutrid

Lukustusmutreid kasutatakse tavaliselt koos paindotsaga lukustusseibidega (

Joonis 5.16, **Error! Reference source not found.**). See kombinatsioon teeb praktiliselt võimatuks lahtitulemise, kui see asetatakse võlli otsa välisele keermele. Lukustusmutreid kasutatakse tavaliselt laagrite kinnitamiseks. Selle ühenduse vastupidavuse parandamiseks võib ühe seibi paindotsa voltida mutri pessa ja sisemine paindots paigutatakse võllis olevasse pesasse.

Joonis 5.16 Kinnitusmutriga varustatud võlli mudel

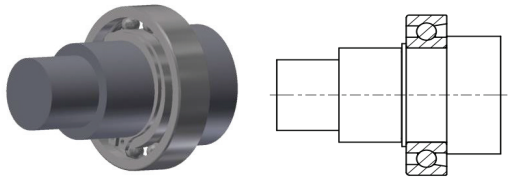


Joonis 5.17 Lukustusmutter (vasakul) ja paindotsaga lukustusseib (paremal)

5.2.4 Vedrurõngad

Vedrurõngad (Joonis 5.18), mida nimetatakse ka tõkkerõngasteks ja lukustusrõngasteks, on valmistatud poolpainduvast metallist ja kujundatud avatud rõngasteks. Need asetatakse spetsiaalsetesse soontesse, et vältida võllile monteeritud elementide külgsuunalist liikumist (Joonis 5.19).

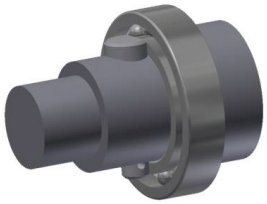
Joonis 5.18 Vedrurõngas



Joonis 5.19 Vedrurõngaga võlli mudel ja ristlõige

5.2.5 Kinnituskiilud

Kinnituskiilud on kas kiilud või tihvtid, mis sisestatakse aukudesse, et lukustada võllile paigaldatud elementide külgmine liikumine (Joonis 5.20, Joonis 5.21). Tasub märkida, et kinnituskiiludel on üldjuhul nende elementidega väiksem kokkupuuteala võrreldes sama suurusega vedrurõngastega. Kinnituskiile on mitmeid erinevaid tüüpe. Mõned neist on ühendatud mutritega või rõngaskinnitustega, et vältida nende august väljakukkumist.

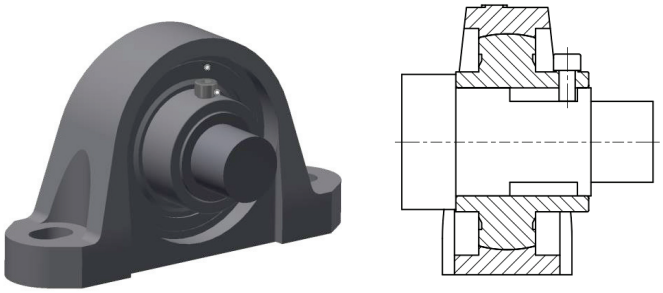


Joonis 5.20 Kinnituskiiluga võlli mudel

Joonis 5.21 Kinnituskiil

5.2.6 Lukustuskruvid

Mõned laagrid võimaldavad kokkupanemiseks kasutada kruvisid ja lamedaid väljalõikeid võlli teatud osadel (Joonis 5.22).



Joonis 5.22 Lukustuskruviga laagri mudel ja ristlõige

5.3 Laagri valik

Laagrid võib valida nende kulumiskindluse (töötundide arv L_h) ja tugevuse alusel (staatiline koormus C_0 või dünaamiline koormus C). Protseduuri alustamiseks tuleb määratleda järgmised parameetrid:

- Radiaalreaktsioonid võlli tugedes (R_1, R_2) [N]
- Võlli telgjõu koormus kokku (F_a) [N]
- Võlli diameeter (d) [m]
- Võlli pöörlemissagedus (n) [pöördeid/min]
- Laagri töötundide arv (L_h) [h]
- Andmed koormuse muutuste kohta

Laagrid võivad olla kokku pandud kas O- või X-stiilis. Olenevalt sellest võivad valikuprotsessis kasutatavad parameetrid erineda. Kogu protseduur jääb siiski samaks, mistõttu tuleb parameetrite täpseid väärtusi kontrollida tabelitega tootjate veebisaitidel, kataloogides või raamatutes. Iga laagri puhul tuleb arvutada radiaalreaktsiooni täiendav telgjõud (S_1, S_2) [N] allpool toodud valemi põhjal (nende suund sõltub laagrite stiilist – teineteise suunas X-stiilis ja teineteisest eemale O-stiilis), kus e on parameeter, mis on korreleeritud valitud laagriga.

$$S_i = \begin{cases} e \cdot R_i & \textit{nurgakontaktilise tõukejõuga} \\ 0{,}83 \cdot e \cdot R_i & \textit{kuullaagrite jaoks} \end{cases}$$

Seejärel tuleb arvutada kogu aksiaaljõu vektor (***ΣF$_a$***)[N] järgmise valemiga:

$$\overline{\Sigma F_a} = \overline{F_a} + \overline{S_1} + \overline{S_2}$$

Siis tuleb oletada aksiaaljõud igale laagrile (F_{1a}, F_{2a}) [N] (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Aksiaaljõud erinevatele laagritele

	X-stiil	**O-stiil**
ΣF$_a$ suunaga laagrist 1 laagri 2 suunas	$F_{1a} = S_2 + F_a$ $F_{2a} = S_2$	$F_{1a} = S_1$ $F_{2a} = S_{1+} + F_a$
ΣF$_a$ suunaga laagrist 2 laagri 1 suunas	$F_{1a} = S_1$ $F_{2a} = S_{1+} + F_a$	$F_{1a} = S_2 + F_a$ $F_{2a} = S_2$

Iga laagri jaoks tuleb arvutada suhe F_{ia}/R_i esitatud võrrandist lähtudes. Selle põhjal võib leida väärtused X_i ja Y_i.

$$\frac{F_{ia}}{R_i} \leq e \Rightarrow X_i = 1 \wedge Y_i = 0$$

Kui ülaltoodud tingimus ei ole täidetud, tuleb vastavate laagrite väärtused tabelites leida nende parameetrite ja arvutatud suhete alusel.
Lõpuks võib iga laagri jaoks valemi alusel arvutada samaväärsed radiaalsed jõud:

$$F_i = X_i \cdot R_i + Y_i \cdot F_{ai}$$

Pärast seda tuleb iga laagri tugevusnõuet kontrollida ohutustegurite arvutamisel (kas s või s_0). Kui võll pöörleb kiiremini kui 10 pööret minutis, kasutatakse valemit dünaamilise koormuse väärtusega C [kN]. Juhul, kui see pöörleb aeglasemalt, tuleb rakendada valemit staatilise koormus väärtusega C_0 [kN].

$$s_i = \frac{C_i}{F_i} \vee s_{0i} = \frac{C_{0i}}{F_i}$$

Lõpuks saab laagri teoreetilist tööaega L_{hc} [h] arvutada järgmise valemiga, kus p on kuullaagrite puhul võrdne 3-ga ja teiste rull-laagrite puhul 3,33-ga.

$$L_{hc} = 10^6 \cdot \left(\frac{C}{F_i}\right)^p \cdot \frac{1}{60n}$$

Vastupidavuse nõue on täidetud, kui järgmine väide on tõene.

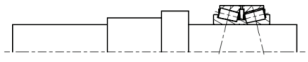
$$L_{hc} \geq L_h$$

Kui L_{hc} väärtus on palju suurem (rohkem kui 5 korda) kui L_h, väärtus, siis tuleb rakendada vähemalt üht allpool nimetatud modifikatsioonidest:

- Sama läbimõõduga võllile tuleb valida väiksema välise läbimõõduga laager (siis on *C* väärtus väiksem)
- Võlli materjali tuleks muuta sellise vastu, millel on suuremad tugevuse parameetrid, et vähendada selle läbimõõtu, laagri läbimõõtu ja selle *C* väärtust.
- Rihmaratta või hammasratta materjali tuleks muuta võlli tugede reaktsioonide vähendamiseks.

5.4 Enesekontroll

1. Millisel laagritüübil esineb kõige suuremat hõõrdumist?
    a. Määrdelaager
    b. Magnetlaager
    c. Tavaline laager/liugelaager
    d. Kuullaager
    e. Silindriline rull-laager
2. Millised neist laagritest on kõige ebasobivamad raskete radiaalkoormuste jaoks?
    a. Tavalised laagrid/liugelaagrid
    b. Kuullaagrid
    c. Silindrilised rull-laagrid
3. Milline avaldus silindriliste rull-laagrite kohta on õige?
    a. Need on palju kompaktsemad kui tavalised laagrid.
    b. Need võivad kanda väiksemaid radiaalkoormusi kui kuullaagrid.
    c. Need on palju odavamad kui kuullaagrid.
    d. Need võivad kanda väiksemaid aksiaalkoormusi kui kuullaagrid.
4. Laagreid, mis võimaldavad võlli nurkhälvet nimetatakse:
    a. Hammasrataslaagrid
    b. Sfäärilised rull-laagrid
    c. Nõellaagrid
    d. Tavalised laagrid/liugelaagrid
5. Kuigi radiaalkoormused on teljekoormustega võrdsed, on parim laagrite tüübi valik:
    a. Silindrilise rull-laagri tüüp
    b. Hammasrattalaagri tüüp
    c. Koonus rull-laagri tüüp
    d. Nõellaagri tüüp
6. Allpool toodud laager on:



    a. O-stiil
    b. X-stiil

c. Mõlemad ülalmainitud
d. Mitte kumbki ülalmainitutest

7. Võlli lukustuse meetod laagrite vahel, mis ei vähenda lõtku võimalust, on:
   a. Lukustamine kruvi ja seibiga
   b. Laagritevahelise laiema osa projekteerimine
   c. Lukustamine lukustusmutri ja paindotsaga lukustusseibiga
   d. Lukustamine vedrurõngaga
   e. Lukustamine lukustuskruviga
8. Mille arvu näitab L_h?
   a. Töötsüklite
   b. Töötsüklite arvu miljonites
   c. Töötundide
   d. Töötundide arvu miljonites

TEADMISTE KONTROLLI KÜSIMUSTE TULEMUSED

Tabelist leiate õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele õppeaines **Mehhaanika ja masinaelemendid**. Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimused									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1. Mehhaanika alused	D	B	C	A	A	E	C	B	-	-
2. Materjalide põhiline tugevus	C	C	C	C	E	C	A	-	-	-
3. Ajamite komponendid	C	D	B	E	D	B	B	C	-	-
4. Võllid	C	A	B	B	C	D	B	A	C	C
5. Laagrid	C	B	D	B	C	A	A	C	-	-

VIITED

[1] Kurmaz, Leonid W., and Oleg L. Kurmaz. *Projektowanie węzłów i części maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2006.
[2] Rea, Wydawnictwo, ed. *Poradnik mechanika*. Wydawnictwo Rea, 2008.
[3] Bijak-Żochowski, Marek, ed. *Wytrzymałość konstrukcji: praca zbiorowa*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2004.
[4] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2e/Lead_and_pitch_in_screws.png
[5] https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Hooke%E2%80%99a#/media/File:Wykres_rozciagania_tensioning_stress.svg
[6] https://c1.staticflickr.com/4/3667/33325702131_ca4ea7d1fe_b.jpg
[7] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/Hammelmann_Stationary_unit_with_electric_motor.jpg
[8] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Torque_cylinder.jpg
[9] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Terms_involute_gears.PNG
[10] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/42/Gears_large.jpg
[11] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/Helical_Gears.jpg
[12] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Bevel_gear.jpg
[13] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gear-kegelzahnrad.svg
[14] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/ca/Hypoid_gear.jpg/726px-Hypoid_gear.jpg
[15] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Hourglass_Panta_Rhei%2C_Ybbsitz_-_worm_gear_detail.jpg
[16] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Rack_and_pinion.png
[17] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d5/Epicyclic_gear_ratios.png
[18] https://en.wikipedia.org/wiki/Gear#/media/File:Harmonic_drive_animation.gif
[19] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/73/HagleyBeltDrive01.jpg
[20] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Multiple-V-belt_drive_001.jpg
[21] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c9/Ford_Cosworth_BDR_002.jpg/640px-Ford_Cosworth_BDR_002.jpg
[22] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/98/Tensioner.jpg
[23] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tokos_tengelykapcsol%C3%B3.svg
[24] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beam_Coupling_-_Helical_Standard.jpg
[25] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Gear_coupling.png
[26] https://en.wikipedia.org/wiki/Coupling#/media/File:Klauenkupplung_1.jpg
[27] https://en.wikipedia.org/wiki/Coupling#/media/File:Klauenkupplung_3.jpg
[28] https://en.wikipedia.org/wiki/Constant-velocity_joint#/media/File:Universal_joint.gif
[29] https://en.wikipedia.org/wiki/Key_(engineering)#/media/File:Parallel_keys.png
[30] https://en.wikipedia.org/wiki/Key_(engineering)#/media/File:Woodruff2.png
[31] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Roughness_rus.png
[32] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Plain-bearing_DIN-ISO4379_Type-F.png
[33] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/Spherical_plain_bearing.jpg
[34] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a7/Radial-insert-ball-bearing_din626-t1_type-yen_120.png
[35] https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling-element_bearing#/media/File:Cylindrical-roller-bearing_din5412-t1_type-n_ex.png
[36] https://en.wikipedia.org/wiki/Spherical_roller_bearing#/media/File:Spherical-roller-bearing_double-row_din635-t2_120.png
[37] https://en.wikipedia.org/wiki/Gear_bearing#/media/File:Gear_bearing_view.jpg
[38] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/6/69/Tapered-roller-bearing_din720_ex.png/800px-Tapered-roller-bearing_din720_ex.png
[39] https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling-element_bearing#/media/File:Needle_bearing.jpg

[40] https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_bearing#/media/File:Hydrostatic_bearing_diagram.svg
[41] https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing#/media/File:Magneticbearings.jpg
[42] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Thrust-ball-bearing_din711_120-ex.png
[43] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Radial-deep-groove-ball-bearing_din625-t1_2rs_120.png

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 02: ELEKTROTEHNIKA JA ELEKTROONIKA ALUSED [M002ET]

ÕPIK

AUTOR

PROF. LAURI KÜTT, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)

2018

Teave selle dokumendi kohta

Seda dokumenti kasutatakse õpikuna õppeaines „**Elektrotehnika ja elektroonika alused“**.

Sisukord

Teave selle dokumendi kohta 3
Jooniste loetelu 6
Tabelite loetelu 7
1 Elektri- ja elektroonikaahelad, alusmõisted ja struktuur 9
1.1 Energia ja selle muundamine 9
1.1.1 Energialiigid 9
1.1.2 Energia muundamine, ülekanne ja juhtimine elektrilises süsteemis 11
1.1.3 Ülekande- ja juhtimissüsteem 14
1.2 Elektrilaengud, vool ja pinge energia ülekandel 17
1.2.1 Laetud osakesed 17
1.2.2 Laengute vahelised jõud 18
1.2.3 Elektrivool 19
1.3 Pinge ja potentsiaal 20
1.3.1 Vaade võimsuse ja energia seostele ahelas läbi pinge ja voolu mõistete 22
1.4 Takistus 24
1.4.1 Oomi seadus 24
1.4.2 Joule Lenzi seadus – soojuskaod 25
1.4.3 Materjalide takistus 25
1.4.4 Elektrijuhid 27
1.4.5 Isolaatorid ja pooljuhid 28
1.5 Enesekontrolliks 29
2 Elektriahela osad, komponendid ja mõisted 32
2.1 Juhtmete ja ühenduste märkimine 32
2.1.1 Skeemisümbolid ja nende tähistamine 33
2.1.2 Juhtiva ahela katkestamine ja lülitid 36
2.2 Elektriahelate topoloogia ja tööpõhimõtted 40
2.2.1 Suletud ahel ja lihtsõlm 40
2.2.2 Harud ja keerulised sõlmed 42
2.3 Elektriliste põhisuuruste pinge ja vool mõõtmine 43
2.3.1 Elektrivoolu tugevuse mõõtmine 45
2.3.2 Pinge mõõtmine 47
2.3.3 Takistuse mõõtmine 48
2.4 Enesekontrolliks 50
3 Kirchhoffi vooluseadus 54
3.1 Kirchhoff'i seadus sõlmpunkti kohta 54
3.2. Rööpühendus 56
3.3. Voolujagur 59
3.4. Enesekontrolliks 61
4. Kirchhoffi pingeseadus 64
4.1. Vool ja pinge jadaahelas 64
4.2. Takistuse, võimsuse ja pinge proportsionaalsuse reeglid 67
4.3. Kirchhoffi pingeseadus 69
4.3.1. Kirchhoffi seaduse rakendamise näide jadaahelas 70
4.3.2. Kirchhoffi pingeseaduse rakendamise näide rööpahelale 72
4.4. Jadaahela ekvivalentne takistus 73
4.4.1. Pingejagur 74
4.5. Enesekontrolliks 76
Enesekontroll – vastused 79

JOONISTE LOETELU

Joonis 1-1. Energiahulga 1 J ekvivalendid koos potentsiaalse, kineetilise ja soojusliku energia näidetega (g - gravitatsiooni kiirendus ($g \sim 9{,}81$ m/s^2 maapinnal), c – aine erisoojus, T – temperatuur. 10
Joonis 1-2. Elektrilise potentsiaalse energiahulga 1 J ekvivalent laetud osakeste vastastikmõju näitel, k_C – Kuloni konstant ($k_C \sim 9{,}0 \cdot 10^9$ N·m^2/C^2); pane tähele, et elektronil on laengu märk negatiivne. 10
Joonis 1-3. Päikeseenergia toimel liikuva sõiduki energiasüsteemi (näites objekti) ülevaade. Arvutusnäitena vaata eelmise peatüki näidet 1.1.A. 12
Joonis 1-4. Energia ülekandmise ja muundamise skeem, kus on näidatud kasuliku energia ja soojuskadude hulka. (Pane tähele, et ülekande ja koormuse komponentidel (vt joonis 1-3) näidatud kasutegurite väärtused on realistlikud väärtused, kuid elektriallika kasutegurina on näidatud 80% ehk oluliselt kõrgem kui reaalne päikesepaneeli kasutegur, milleks on umbkaudselt 20% (monokristalliline tüüp)). 13
Joonis 1-5. Lihtsa juhtimissüsteemi struktuur, mis kontrollib juhitava lüliti abil ülekantava energia kogust. 16
Joonis 1-6. Lihtsustatud visand alumiiniumi aatomist, mis sisaldab 13 prootonit, 14 neutronit ja 13 elektroni aatomi kohta. 17
Joonis 1-7. Jõudude vastastikmõju samamärgiliselt laetud osakeste vahel (vasakul) ja erimärgiliselt laetud osakeste vahel (paremal) ja selgitus jõudude arvutamise kohta (paremal). 18
Joonis 1-8. Vasakul: voolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt positiivse laengu suunda, mis on vastupidine elektronide liikumissuunale. Paremal: voolu suunda võib tähistada vastupidiselt tegelikule voolusuunale, sellisel juhul tuleb arvestada voolu märgiga. 20
Joonis 1-9. Pinge, potentsiaali ja maanduse selgitus. 21
Joonis 1-10. Elektrilise takistuse sisuline seletus ja Oomi seadus. 24
Joonis 1-11. Takistuse selgitus ja võrdlus 1 m^3 kuubi ning 1 mm^2 ristlõikepindalaga juhtme vahel. 26
Joonis 2-1. Lihtne patareitoitega ahel ja seda kirjeldav skeem. 32
Joonis 2-2. Lüliti ahelas, lahutatud ehk avatud (paremal ülal) ja ühendatud ehk suletud (vasakul ülal) kontaktidega. Alumine joonis: sama ahela kujutamine elektriskeemina. 37
Joonis 2-3. Ühepooluselise lihtlüliti ja ühepooluselise ümberlüliti ehitus. 39
Joonis 2-4. Lihtne suletud vooluring 2 LED-iga (*light emitting diodes* ehk valgust kiirgavad dioodid ehk valgusdioodid) ja ahela kujutis skeemina, milles on näidatud voolu suund suletud ahelas. Pane tähele, et üks LED on valge ja teine rohelise valgusega, mis võimaldab neid ühendada ahelasse ilma voolutugevust piirava takistuseta. 41
Joonis 2-5. Ahelas eristatavad sõlmed. 42
Joonis 2-6. Näide rööp- ja jadaühendustega ahelast. Ahela voolud on kujutatud skeemil ülal paremal. Selgituseks on all samaväärsed skeemid, veidi teistsuguses esituses. 43
Joonis 2-7. Joonis 2-6 kujutatud ahela skeem koos sõlmede tähistusega (vasakul) ja harude tähistusega (paremal). 43
Joonis 2-8. Multimeetri ülevaade. 44
Joonis 2-9. Näited analoogmõõteriistadest: amper- ja voltmeetrist. 45
Joonis 2-10. Multimeeter ahelas jadamisi ehk voolutugevuse mõõtmiseks (vasakul) ja skeemi kujul (paremal). 46

Joonis 2-11. Näide ampertangidest voolutugevuse mõõtmiseks ahelas. 46
Joonis 2-12. Multimeeter ahelas pinge mõõtmiseks (vasakul) ja skeemi kujul (paremal). 47
Joonis 2-13. Pinge ja voolutugevuse mõõtmine ühes ahelas. 48
Joonis 2-14. Multimeeter takistuse mõõtmisel (vasakul) ja skeem (paremal). 49
Joonis 3-1. Voolutugevus juhtme mingis punktis. Vool siseneb ja väljub punktist erineva märgiga voolutugevusega (vasakul ülal), sama ahel voolude teisendatud kujutisega (vasakul all); mitme ühendusega punkti selgitus (paremal). 54
Joonis 3-2. Näide ahelast, kus on rööbiti harudes 3 takistit (vasakul) ja ekvivalentse ahela skeem, kus takistid on teisendatud ahela kogutakistuseks (paremal). 57
Joonis 3-3. Voolujaguriga ahela skeem. 59
Joonis 3-4. Voolujaguri arvutusreegli selgitus. 60
Joonis 3-5. Näiteülesande voolujaguri skeem. 60
Joonis 4-1. Jadaühenduses ahel Kirchhoff'i pingeseaduse selgitamiseks. 64
Joonis 4-2. Näiteahela (vt Joonis 4-1) esitus elektriskeemis koos mõõteriistadega (üleval) ja selle lihtsustatud kuju (all). 65
Joonis 4-3. Skeem Joonis 4-2 koos mõõte- ja arvutustulemustega. 67
Joonis 4-4. Kontuuride määramine jadaahelas Kirchoffi seaduse põhjal. 70
Joonis 4-5. Kontuuride määramine rööpahelas Kirchoffi seaduse rakendamiseks rööpahelas. 72
Joonis 4-6. Näidisahel jadamisi ühendatud takistitega (vasakul) ja lihtsustatud kujul skeem (paremal) 73
Joonis 4-7. Pingejaguri skeem. 75

TABELITE LOETELU

Tabel 1-1. Tüüpiliste voolujuhi materjalide näited 27
Tabel 2-1. Tavalisemad ühenduste ja juhtmete tähistamise viisid skeemides. 33
Table 2-2. Enimlevinud skeemisümbolid (IEC 60617 alusel) ja nende tähised. 33
Tabel 2-3. Valik sagedamini kasutatavatest lülititest, nende tähistamine ja kontaktide konfiguratsioonid. 39
Tabel 3-1. Valemid ja arvutustulemused rööpahela parameetrite määramisel 57
Tabel 4-1. Mõõtetulemused Joonis 4-2 kujutatud ahela kohta. 65
Tabel 4-2. Näiteülesande lahenduse arvutustulemused. 67
Tabel 4-3. Mõõtmistulemused ja arvutustulemused, tuginedes eelnevalt toodud näitele (vt Joonis 4-3). 68

1 ELEKTRI- JA ELEKTROONIKAAHELAD, ALUSMÕISTED JA STRUKTUUR

Selles peatükis juhatatakse lugeja elektri- ja elektroonikasüsteemide sisemaailma. Alustatakse põhilistest ja kõige olulisematest terminitest, mille abil elektri- ja elektroonikaahelatega tegeledes kokku puutume. Terminid seotakse kokku kõikide elektriliste süsteemide üldise põhistruktuuri kirjelduses.

1.1 Energia ja selle muundamine

Mistahes süsteemis võime rääkida teatud parameetrite abil defineeritud olekust (sh asukoht, kiirus, temperatuur jpm), mille määrab süsteemil olemasolev kindlat liiki energiakogus. Näiteks keha liikumine tähendab, et kehal peab olema mingi kindel kogus kineetilist energiat.

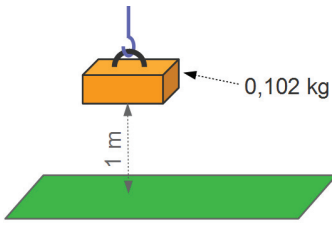
Mehhatroonilise süsteemi töö peaeesmärk on tagada süsteemi parameetrite juhtimine selliselt, et olek vastab eesmärgiks kinnitatud seadesuurusele. Enamasti saavutatakse see, jälgides ja juhtides täiturkomponentide tööd. Selliste täiturite tööd juhitakse elektrienergiaga ja samal ajal võrreldakse nende olekuparameetreid seadesuuruse väärtusega. Täiturseadmete töömehhanismi kindla väärtusega oleku jaoks tuleb tagada viimase varustamine täpse energiakogusega.

Mehhatroonikasüsteemis ongi elektri- ja elektroonikasüsteemide eesmärgiks sõlmede olekute jälgimine ja nendeni toite-energia viimine ja selle reguleerimine. Energia viiakse elektrienergia vormis selle sõlmeni, millises toimub energia muundamine mingit muud liiki väljundenergiaks (näiteks täitur/mootor). Elektrienergia eeliseks on tema ülisuur paindlikkus ja mitmekülgsus, sest elektrienergiat saab muundada toiteenergiaks üheaegselt nii juhtsüsteemide kui ka mootorite ja täiturite jaoks. Seega, elektrienergiat saab kasutada mitte ainult täiturite juures väljundenergia muundamiseks, aga ka juhtseadmetes info edastamiseks ja töötlemiseks, sealjuures ka erinevate keskkonnaparameetrite ja olekute tajumiseks.

1.1.1 Energialiigid

Mehhatroonikasüsteemide eesmärgiks on tagada mitmekülgne masinate ja nende komponentide juhtimine ning manipuleerimine keskkonnas. Üheks reaalsete kehade ja objektide oleku juhtimise viisiks on nendega seotud energia haldamine ja muundamine. Näiteks, kasutades elektrimootorit saame tööobjekti liikuma panna või ruumis ümber paigutada. Elektrimootor muundab elektrienergia (sisendenergia) mehaaniliseks energiaks. Viimane teostub kas objektide liikumisenergiana (st ***kineetiline energia***) või siis ümberpaigutamisega süsteemis (st ***potentsiaalne energia***).

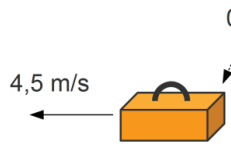
Energiaühikuks on J (džaul) ja potentsiaalse energia näitel, 1 J on võrdne energiakogusega, milline on kehal, kui selle mass on 0,102 kg ja see asub 1 m kõrgusel maapinnast (vt ka teisi näiteid Joonisel 1-1).



Keha massiga m = 0,102 kg kõrgusel h = 1 m maapinnast.

$$W_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

(g = 9,81 m/s^2)



Keha massiga m = 0,1 kg liikumas kiirusega v = 4,5 m/s.

$$W_{kin} = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

1 cm^3 vett (m = 1 g)

Toatemperatuurist ΔT = 0,24°C kõrgem

Näiteks:
T_{vesi} = 20,00°C
$T_{keskkond}$ = 20,24°C
c_{vesi} = 4200 J/(kg·K)

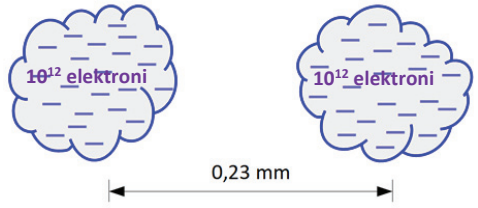
$$W_{soojus} = m \cdot c \cdot \Delta T = m \cdot c \cdot (T_{keha} - T_{keskkond})$$

Joonis 1-1. Energiahulga 1 J ekvivalendid koos potentsiaalse, kineetilise ja soojusliku energia näidetega (g - gravitatsiooni kiirendus (g ~ 9,81 m/s^2 maapinnal), c – aine erisoojus, T – temperatuur.

Soojusenergia (ka keha siseenergia) avaldub näiteks erinevate omadusena omada erinevat temperatuuri. Mida rohkem soojusenergiat keha omab, seda kõrgem on tema temperatuur.

Üks paindlikumaid ja iniversaalsemaid energialiike on elektrienergia, mis avaldub läbi erinevate laenguga osakeste – prootonite ja elektronide – omavaheliste mõjude (vt Joonis 1-2).

Ühe biljoni (10^{12}) elektroniga ainekogum



Teine ainekogum biljoni (10^{12}) elektroniga

Ühe biljoni (10^{12}) elektroni laeng = $Q_1 = Q_2 = -10^{12} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

$$W_{el,pot} = \frac{k_C \cdot Q_1 \cdot Q_2}{r}$$

Joonis 1-2. Elektrilise potentsiaalse energiahulga 1 J ekvivalent laetud osakeste vastastikmõju näitel, k_C – Kuloni konstant (k_C ~ 9,0 · 10^9 N·m^2/C^2); pane tähele, et elektronil on laengu märk negatiivne.

Elektrienergia on salvestatud laetud osakeste vahelistes mõjuväljades ja edastatakse nende väljade muutmise ja ümbrkujundamise kaudu. Elektrienergia on väga paindlikult rakendatav energialiik, mida saab juhtida ja muundada teistesse energialiikisesse lihtsate meetodite ja vahenditega. Näiteks, elektrienergiat võib lihtsalt muundada

- soojusenergiaks, kasutades takistuslikke kompoente;
- mehaaniliseks energiaks, kasutades elektrimootoreid;
- valgusenergiaks, kasutades hõõg- ja leed-lampe (LED-lampe);
- teiste parameetritega elektrienergiaks, kasutades toitemuundureid

ja paljudeks teisteks.

Näide 1.1.A. Keha massiga 4 kg liigub kiirusega 1 m/s. Kui keha kiirust on vaja suurendada 2 meetrini sekundis, siis kui palju peame suurendama selle keha kineetilist energiat?

Lahendus: Algselt kehal olev kineetiline energia

$$W_{alg} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{4 \cdot 1^2}{2} = 2\ \text{J}$$

Keha kineetiline energia lõppkiirusel

$$W_{lõpp} = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{4 \cdot 2^2}{2} = 8\ \text{J}$$

Seega, saavutamaks keha liikumiskiiruse suurenemist, peame lisama kineetilist energiat

$$W_{lisa} = \Delta W = W_{lõpp} - W_{alg} = 8 - 2 = 6\ \text{J}.$$

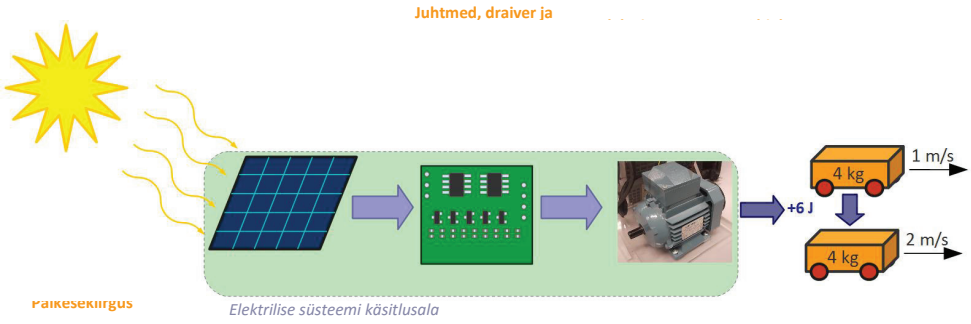
Tuleb rõhutada, et teatud liiki energia kindlal tasemel olemasolu on paratamatu, et kehal või süsteemil oleks teatud seisund/olek. Ülaltoodud näites 1.1.A oleval kehal on kiirus 1 m/s ainult juhul, kui selle keha kineetilise energia hulk on võrdne 2 J-ga (vastavalt, 2 m/s liikumisel peab keha kineetilise energia hulk olema 8 J).

Energiataseme muutmine tähendab energia ülekandmist ja/või muundamist teist liiki energialiigist. Näiteks, mehaanilise liikumisega seotud süsteemides on üks tavaliseim energiamuundur elektrimootor. Elektromootor on energiamuundur, mis muundab elektri-energia mehaaniliseks energiaks.

1.1.2 Energia muundamine, ülekanne ja juhtimine elektrilises süsteemis

Energia jäävuse seadus sõnastab, et energia ei teki ega kao vaid muundatakse ühest liigist teise. Seega ka elektrimootori väljundis edasi antav mehaaniline energia on ikkagi elektri-energia muundamise tulemus.

Elektrilises süsteemis energiat süsteemi andvaks osaks elektriallikas, mis muundab teist liiki energia elektrienergiaks. See edastatakse ülekande- ja juhtsüsteemi abil elektrilisele koormusele, mis muundab elektrienergi mõnda muud liiki energiaks (vt ka Joonis 1-3).



Joonis 1-3. Päikeseenergia toimel liikuva sõiduki energiasüsteemi (näites objekti) ülevaade. Arvutusnäitena vaata eelmise peatüki näidet 1.1.A.

Viidates näitele 1.1.A, peab igal kehal olema kindel hulk teatud liiki energiat, et omada ja püsida teatud (talitlus)olekus/seisundis. Elektrilisel süsteemil (vt.

Joonis 1-3 on ülesandeks tagada energia ülekanne ja juhtimine selliselt, et vaadeldava objekti kineetilise energia hulk kasvaks tasemelt 2 J tasemele 8 J. Seeläbi suureneks objekti liikumiskiirus 1 m/s tasemelt 2 m/s-ni. Selleks muundatakse esmalt lähteenergia (sisend-energia, siin näites päikeseenergia) elektrienergiaks, juhitakse selle ülekandmist mootorini ja seejärel muundatakse mehaaniliseks energiaks. Objektil olev kineetiline energiat võib käsitleda ka objektiga seotud salvestatud energiana.

Tavapärane energia muundamist, ülekannet ja rakendamist kirjeldav mõiste on võimsus (ühikud: vatt, W; 1 W = 1 J/s). Võimsus iseloomustab ühe sekindi jooksul üle kantud või muundatud energiahulka

$$P = \frac{W_{lõplik} - W_{alg}}{t_{lõpp} - t_{alg}} = \frac{\overbrace{\Delta W}^{\text{energiahulga muutus}}}{\underbrace{\Delta t}_{\text{ajavahemiku pikkus}}},$$

ja kui algne energiahulk on 0 või energiahulga arvestust alustatakse nullist

$$P = \frac{\overbrace{W_{lõplik} - W_{alg}}^{=0}}{t_{lõpp} - t_{alg}} = \frac{W_{lõplik}}{\underbrace{\Delta t}_{\text{ajavahemiku pikkus}}}.$$

Näide. 1.1.B. Kehale antakse 3 s pikkuse ajavahemiku vältel juurde 6 J energiat. Kui suur on keha tarbitav keskmine võimsus selles ajavahemikus?

Lahendus. Võimsus ajavahemiku Δt = 3 s vältel, kui energiahulga muutus selle aja jooksul on ΔW = 6 J, on

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = \frac{6}{3} = 2\ \text{W}.$$

Näide 1.1.C. 10 minutilise ajavahemiku jooksul muundati 12 kJ energiat. Mis on kirjeldatud süsteemi keskmine võimsus?

Lahendus. Esiteks, alustame ühikute tuleb teisendamisega SI-süsteemi.

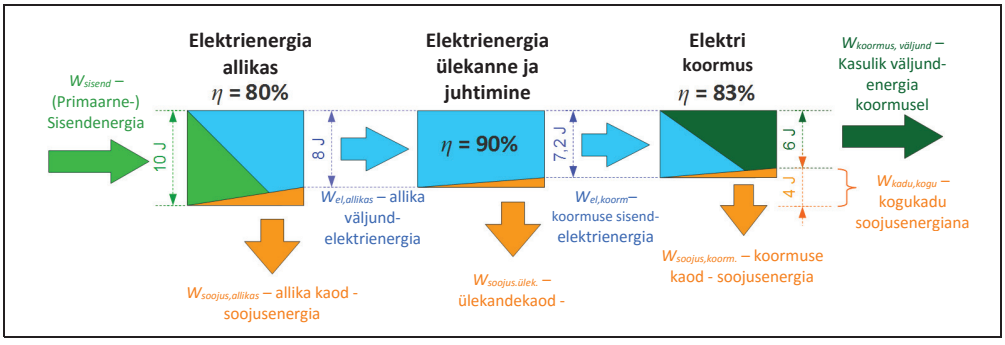
10 minutiline ajavahemik tähendab $\Delta t = 10 \cdot 60 = 600$ s.

12 kJ = 12 000 J.

Võimsus tähendab 1 s jooksul muundatud energiahulka. Antud näites on süsteemi võimsus

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{12000}{600} = 20\ \text{W}.$$

Vaadeldes sisendenergia ja väljundenergia hulka ja arvestades energia jäävuse seadust selgub, et sihtotstarbeliseks väljundenergiaks õnnestub muundada ainult osa sisendisse antud energiast. Igal juhul jääb järgi teatud osa energia hulgast, mida ei õnnestu vajalikul kujul väljundenergiaks muundada. Nimetatud osa energiast käsitletakse energiakaona ja enamikel juhtudel väljendub kadu soojuse (so soojusenergia eraldumisega). Kui seda soojust ei rakendata, hajutatakse see ümbritsevas keskkonnas ja käsitletakse pöördumatult kadununa (vt. Joonis 1-4).



Joonis 1-4. Energia ülekandmise ja muundamise skeem, kus on näidatud kasuliku energia ja soojuskadude hulka. (Pane tähele, et ülekande ja koormuse komponentidel (vt joonis 1-3) näidatud kasutegurite väärtused on realistlikud väärtused, kuid elektriallika kasutegurina on näidatud 80% ehk oluliselt kõrgem kui reaalne päikesepaneeli kasutegur, milleks on umbkaudselt 20% (monokristalliline tüüp)).

Kokkuvõttes, ilma komponendis salvestatud energiat vaatlemata, võime lugeda kasutatavaks (muundamise/ülekandmise sihtotstarbeliseks) väljundenergiahulgaks sisendenergiahulga, millest on lahutatud energiakadude hulk

$$W_{väljund} = W_{sisend} - W_{kadu},$$

ja ülaltoodud struktuuri jaoks (vt Joonis 1-4)

$$W_{koormus,väljund} = W_{sisend} - W_{kadu,kokku}.$$

Üldine termin, mis iseloomustab energiamuunduse edukust, on **kasutegur**. Kasutegur iseloomustab suhet energiamuundus/-ülekandeprotsessi jaoks antud sisendenergiahulga ja väljundist saadava kasuliku (sihtotstarbelise) energia vahel. Kasutegur on leitav kui

$$\eta = \frac{W_{väljund}}{W_{sisend}} \xrightarrow{W_{väljund}=W_{sisend}-W_{kadu}} \eta = \frac{W_{sisend} - W_{kadu}}{W_{sisend}}$$

kus $W_{väljund}$ on kogu väljundist saadav kasulik energia ja W_{sisend} on protsessi sisendiks antud energia, eesmärgiga see muundada või üle kanda. Näite jaoks (vt Joonis 1-4),

$$\eta = \frac{W_{väljund,koormus}}{W_{sisend}} = \frac{W_{sisend} - W_{kadu,kokku}}{W_{sisend}}.$$

Näide 1.1.D. Süsteemi väljundenergiaks mõõdeti 40 kJ. Samal ajal sisendenergia oli 60 kJ. Kui palju energiat saab lugeda kadudeks?

Lahendus. Süsteemi sisendenergia oli W_{sisend} = 60 kJ = 60 000 J = $6 \cdot 10^4$ J. Kasulik väljundenergia oli $W_{väljund}$ = 40 kJ = 40 000 J = $4 \cdot 10^4$ J. Kaod leiame

$$W_{kadu} = W_{sisen} - W_{väljund} = 60\,000 - 40\,000 = 20\,000\ \text{J} = 6 \cdot 10^4 - 4 \cdot 10^4 = 2 \cdot 10^4 = 20\ \text{kJ}.$$

Näide 1.1.E. Mootori väljundis edastatud koguenergiaks mõõdetakse 100 J. Samas oli mootori sisendisse antud elektrienergia hulk 150 J. Kui suur on kirjeldatud mootori kasutegur?

Lahendus. Siin ülesandes oli mootori sisendenergia 150 J = W_{sisend} ning väljundenergia 100 J = $W_{väljund}$. Kasutegur kirjeldatud olukorras on

$$\eta = \frac{W_{väljund}}{W_{sisend}} = \frac{100}{150} \cdot 100\% = 66,7\%.$$

Sarnaselt energiahulkadega kirjeldatavale kasuteguri seosele on kasutegur kirjeldatav läbi võimsuse väärtuse. Kasuteguri seos võimsuste järgi on näiteks kasutatav, et iseloomustada kasutegurit teatud ajahetkel

$$\eta = \frac{P_{väljnud}}{P_{sisend}} \xrightarrow{P_{väljund}=P_{sisend}-P_{kadu}} \eta = \frac{P_{sisend} - P_{kadu}}{P_{sisend}}.$$

1.1.3 Ülekande- ja juhtimissüsteem

Väga sageli talitlevad elektrienergi allikas ja elektriline koormus nendele kasutada oleva energialiigi ja –hulga alusel

- Kui sisendenergia on allika jaoks saadaval ja allika väljundenergiat (elektrienergiat) tarbitakse, elektriallikas muundab sisendenergia väljundenergiaks;
- Kui elektrienergia on koormuse jaoks saadaval, muudnab elektriline koormus elektrienergia sihtotstarbeliseks väljundenergiaks.

Näiteks, elektrimootor hakkab pöörlema niipea kui tema sees olevatest mähisetest elektrivool läbi liikuma hakkab ja elektrienergia seeläbi mootorisse suunatakse. Kohe, kui elektrienergia voog mootorisse peatatakse, mootor seiskub.

Ülekande- ja juhtimissüsteem on elektrilise süsteemi osaks, mis muuhulgas juhib ka energiahulka, milline allikast koormusesse suunatakse/läbi lastakse. Võttes aluseks näite 1.1.A (eelmises peatükis

Joonis 1-3), siis antud osa on vajalik selleks, et peatada objektile energia juurde kandmine sel hetkel, kui objekt on saavutanud kiiruseks 2 m/s. Tuleb märkida, et juhtimissüsteem reeglina jälgib objekti/keha olekut ja talitlust kirjeldavaid parameeterid, mitte konkreetselt objekti energiataseme väärtust. Juhtimissüsteemi hooleks jääb ka nimetatud olekuparameetrite korrektne mõõtmine ja jälgimine ja energiavoo peatamine.

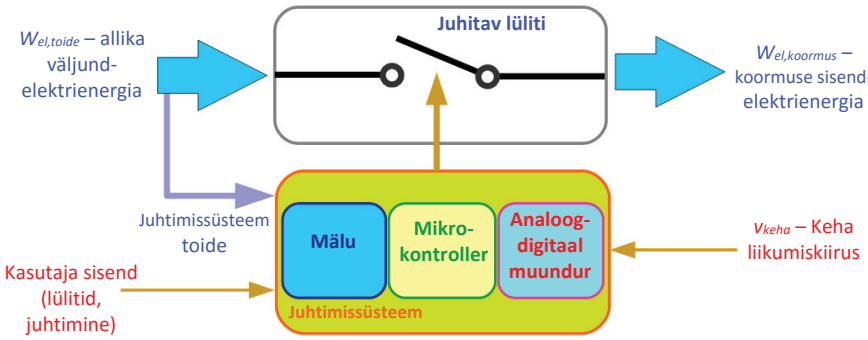
Tüüpilised juhtimissüsteemi eesmärgid on tagada

- ohutus;
- täpsus ja kiirus;
- autonoomsus ja /või hõlpsam ohjamine operaatori(te) poolt.

Objektide ja süsteemide olekute/talitluse juhtimine elektrienergia voo reguleerimise läbi on üldiselt kõige paindlikum ja tõhusam, võrreldes teiste juhtimismeetoditega. Näiteks enamike täiturite jaoks elektrienergiaga varustamise läbi saab juhtida täituri talitlussuurusi (sh mootori väljund-väändemomenti, pöörlemiskiirust, võlli asendit jpm). Nii on enamike seadmete ja kompontide tõhusaks juhtimiseks kasutuses elektrienergiavoo sisse ja välja lülitamine ning elektriahela parameetrite vahepealsete väärtustega manipuleerimine (vt

Joonis 1-5).

Praegused juhtimissüsteemid tuginevad digitaalsetele süsteemidele, kus juhtimisstrateegia on programmeeritud mikrokontrollerisse. Analoog-digitaalmuundurite abil teisendatakse reaalse maailma füüsikalised (analoog) suurused numbrilisteks väärtusteks. Juhtseadmete töö põhineb samuti energiakasutusel, siin on pidevalt kasutatav kuigi võrdelmisi miniatuurne energiamuundamine rakendatud infotöötluseks. Infotöötluseks rakendatav elektrienergia põhimõtteliselt muundatakse täies ulatuses soojuseks. See tähendab, et osa elektrienergia allika poolt muundatud energiast läheb kasutusse ka süsteemi enda juhtimiseks.



Joonis 1-5. Lihtsa juhtimissüsteemi struktuur, mis kontrollib juhitava lüliti abil ülekantava energia kogust.

Viidates näitele 1.1.A, juhtimissüsteem (vt.

Joonis 1-5) võiks näiteks sooritada järgmiseid infotöötlustegevusi:

1) Analüüsib kasutaja poolt seatud sisendsuurusi, et tuvastada seadeparameetrite väärtused; algselt tuvastab objekti kiiruse seadesuuruse 1 m/s.
2) Mõõdab ja jälgib objekti hetkkiiruse väärtust (mõõtetulemus 1 m/s).
3) Tuvastades kasutajapoolse seadete muutmise 2 m/s väärtuseni, teeb otsuse elektri-energiavoo ülekandmise alustamiseks, eesmärgiga tõsta objekti liikumise kiirust.
4) Elektrienergiavoo ülekandmise alustamiseks juhib lüliti kontaktid sulgemiseni, et tavada elektrivoolu jaoks ülekandeahel, so energia ülekande teekond elektrienergia allikast elektrilise koormuseni.
5) Mõõdab objekti liikumise kiirust, kui kiirus kasvab.
6) Tuvastades, et objekt on saavutanud liikumise kiirusse 2 m/s, suunab lüliti kontaktid taas avanemisele, et peatada energia ülekanne elektrilise koormuseni ja ühtlasi objektini.

Tuleb rõhutada, et üldjuhul objekti olekuparameetreid ei tõlgendata juhtimisel teatud liiki energiahulga absoluutse väärtusena (antud näite puhul jälgitavaks olekuparameetriks oli objekti kiirus). Olekuparameetritena jälgitakse tegelikke füüsikalisi suuruseid ja neid suurusi ka juhitakse. Kuigi paljudel juhtudel juhtimissüsteemide loomisel seda otseselt sellisena ei arvestata, olekuparameetrite säilitamine või muutmine saavutatakse ikkagi läbi energia-voogude (ühe sagedseimana elektrienergia) juhtimise.

1.2 Elektrilaengud, vool ja pinge energia ülekandel

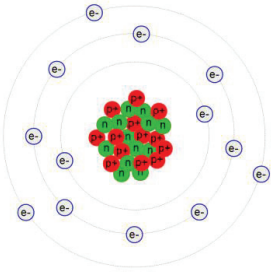
Elektriline laeng on omane igale laenguga osakesele, millisteks on iga aatomi koosseisus olevad elektronid ja prootonid. Elektrienergia on seotud laetud osakeste või suurema laenguga kehade omavaheliste jõududega.

- Suuremate kehade elektrilise laengu suurus on määratud sellel kehal olevate laengut kandvate osakeste arvuga. Kui sellel kehal on elektronide arv suurem prootonite arvust, on kehal negatiivne laeng. Vastupidisel juhul, kui prootonite arv kehal on suurem elektronide arvust, on keha laeng positiivne.
- Elektrivool on parameter, mis iseloomustab laetud osakeste liikumist läbi juhtme või mõne keha. 1 ampriline (1 A) vool tähendab, et keha läbib laeng suurusega 1 kulon (1 C) ajavahemiku 1 sekund (1 s) jooksul.

1.2.1 Laetud osakesed

Laenguga osakesed on tüüpiliselt väga väikesed ja nendevahelistes seostes hoitav energiahulk on samuti väga väike. Elektriliselt laetud osakesete – prootonite (positiivse polaarsusega laenguga) ja elektronide (negatiivse laenguga) vahelised jõud, kui neid üksikuna vaadelda, on nii väikesed, et neid võiks tihti lugeda nulliks. Samas on energia ülekande/muundamisega seotud süsteemides neid liikuma tohutult suurtes numbrites ja nende kogumõju on väga tugev. **Elektrilise laengu ühik on** C (kulon) ja see võib esmapilgul tunduda kolossaalne, kui arvestada, et ühe elektroni laeng on $Q_{e^-} = -1{,}6 \cdot 10^{19}\ \mathrm{C}$ ja prootoni jaoks $Q_{p+} = 1{,}6 \cdot 10^{19}\ \mathrm{C}$. Seega, kui tahaksime saavutada laengut suurusega $-1\ \mathrm{C}$, tuleb kokku koguda $6{,}25 \cdot 10^{18}$ elektroni (see on 6,25 miljardit miljardit elektroni)!

Siiski, kõiki võimalikke elektrone elektrienergia ülekandeks ei rakendata. Näiteks alumiiniumi aatomis olevatest 13 prootonist ja 13 elektronist (vt Joonis 1-6), ainult mõned osakesed on saadaval elektrienergia ülekandeks. Nimelt on kõik aatomi tuumas olevad prootonid seotud jäigalt väga väikese mõõduga tuuma koosseisu ja liiguksid kõik koos. Ainult aatomi väliskihi elektronid on võimelised elektriliste jõudude mõjul lihtsalt aatomite vahel liikuma. 1 g alumiiniumis on umbes $2{,}2 \cdot 10^{22}$ aatomit, samas koguses aines kokku $6{,}6 \cdot 10^{22}$ elektroni on saadaval elektrilise mõju ülekandmiseks. Kokku on 1 g of alumiiniumis $28{,}6 \cdot 10^{22}$ elektroni.

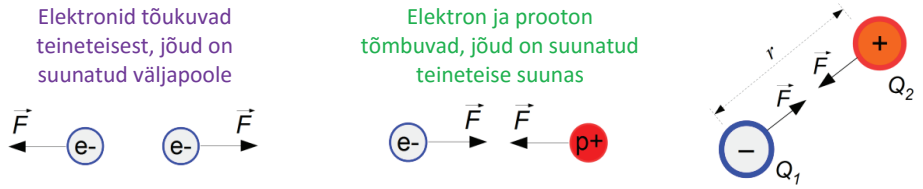


Al: 13 p+; 14 n; 13 e-

Joonis 1-6. Lihtsustatud visand alumiiniumi aatomist, mis sisaldab 13 prootonit, 14 neutronit ja 13 elektroni aatomi kohta.

1.2.2 Laengute vahelised jõud

Energia laetud osakeste vahel on jälgitav läbi nendevaheliste jõudude, mis esinevad tänu laetud osakeste konkreetse asukoha ruumis. Mistahes asukohas olevate laetud osakeste vahel kehtivad reeglid: samamägilise laenguga osakesed tõukuvad, erimärgilise laenguga osakesed tõmbuvad (vt Joonis 1-7).



Joonis 1-7. Jõudude vastastikmõju samamärgiliselt laetud osakeste vahel (vasakul) ja erimärgiliselt laetud osakeste vahel (paremal) ja selgitus jõudude arvutamise kohta (paremal).

Laetud osakest vahelise jõu suurus on leitav Kuloni seaduse alusel

$$F = k_C \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} ,$$

kus Q_1 and Q_2 on elektriliste punktlaengute suurused, mis paiknevad teineteisest kaugusel r (vt Joonis 1-7). k_C on Kuloni konstant väärtusega $9{,}0 \cdot 10^9$ N · m^2 / C.

Näide. Kujutades ette kahte ainekogumit, mis kumbki sisaldab 10^{12} elektroni ning mille vahemaa teineteisest on r = 0,23 mm (näidatud ka Joonis 1-2). Kui suur jõud esineb süsteemide vahel ja millisesse suunda on jõud suunatud?

Lahendus. Elektroni laeng on $-1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C. Ühe ainekogumi kogulaeng on $Q_1 = 10^{12} \cdot -1{,}6 \cdot 10^{-19} = -1{,}6 \cdot 10^{7}$ C.

$$F = k_C \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{10^{12} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{12} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}}{0{,}00023^2} = 4355 \text{ N}.$$

Kuna mõlemad kogumid omavad samamärgilist laengut, siis ainekogumite vahelised jõud on suunatud väljapoole. Seega kogumid tõukuvad teineteisest.

Elektrienergia on seotud osakestevaheliste asendiga

$$W_{pot,el} = \varphi_{el} = k_C \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r}$$

Elektriahelas laengutevahelised tõmbe- ja tõukejõud avaldavad mõju suurematele laetud osakeste-kettidele. Näiteks, kui üks laetud osake tõukab teist osakest, siis kandub esimese osakese mõju edasi ka järgmisele teise osakese tagusele osakesele, lükates ka viimast edasi

jne. Selliselt kantakse ka elektrienergiat üle osakeste vahel ahelas, kuna iga osakese asend mõjutab järgnevalt ka edasisi.

Üksikud prootonid juhtivates materjalides iseseisvalt oma tuumast lahkuda ei saa, need on tuumaga väga tugevalt seotud. Liikuma ja elektrilist mõju edasi andma saab suunata elektrone. Elektriallika toimet võime kirjeldada ka suruva mõjuna elektronidele, neid üksteisele lähemale pressivalt. Selliselt sunnitakse elektronid ka liikumisse. Elektronide vahelised jõud muutuvad koormuses, kus elektronile mõjuva jõu suund ka muutub ja nüüd tiritakse elektrone tagasi allika suunas (positiivsele klemmile). Selline jõu muutumine avaldub ja energia muundamises koormuses.

1.2.3 Elektrivool

Iga laenguga osake, mis osaleb elektrienergia ülekandmise protsessis – elektron, saab süsteemis üle kanda ikkagi lõplikku energiahulka. Allika mõjuga antud elektrienergia vabastatakse koormuses. Selleks, et koormusele jõuaks pidev energiavoog, peame tagama järjest uute energiat kandvate elektronide läbimineku koormusest. Elektriliste laengute liikumist nimetatakse ka **elektrivooluks**.

Kokkuleppeliselt vaadeldakse elektriahelas, kuid kasutatakse ka arvutustes, **oletust, et kõik ahelas liikuvad laetud osakesed/laengud on positiivse polaarsusega**. *Elektriliste mõjude kontekstis on sellisete laengute võimalik mõju identne elektronide mõjule, kui need liiguksid elektronide liikumissuuna suhtes vastupidises suunas.*

Seega, elektrivoolu suurus on määratud virtuaalsete positiivsete laengu(kandja)te hulgale, mis liiguvad läbi komponendi, ühe ajaühiku jooksul

$$I = \frac{Q}{\Delta t},$$

kus Q on vaatlusajavahemiku Δt jooksul juhist läbi liikunud laetud osakeste arv. Laengu ühikuks on amper (A), mis vastab laengu suurusega 1 C juhist läbi liikumisele 1 s jooksul. Arvestades, et elektroni laengu väärtuseks on $Q_{e^-} = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C, siis juhet läbivate elektronide arv 1 s jooksul 1 A voolu korral on $6{,}25 \cdot 10^{18}$. Siit saame tuletada voolu väärtuse arvutamise reegli, kui võtame arvesse loendatud liikuvate elektronide arvu

$$I = \frac{n_e}{6{,}25 \cdot 10^{18}} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Näide. 3 sekundi pikkuse aja kestel läbis juhet 1,8 C suurune laeng. Kui suur vool läbib juhet keskmiselt selle aja jooksul?

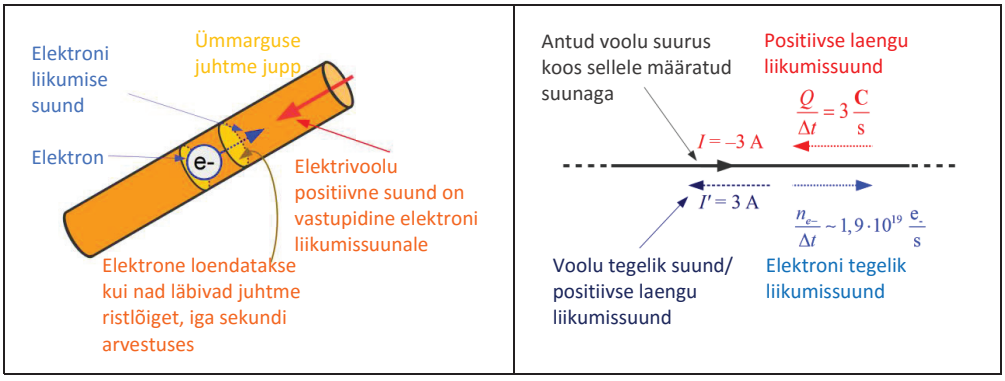
Lahendus. On teada, et Q = 1,8 C läbis juhet Δt = 3 s kestel. Seega keskmine voolutugevus selle aja vältel on

$$I = \frac{Q}{\Delta t} = \frac{1{,}8}{3} = 0{,}6\ \mathrm{A}$$

Näide. 2 sekundi jooksul läbis juhet $1{,}9 \cdot 10^{18}$ elektroni. Kui suur on keskmine voolutugevus juhtmes selle aja jooksul?

Lahendus. Kuna juhet läbis Δt = 2 s jooksul n_{e^-} = 1,9 · 10^{18} elektroni, siis keskmine voolutugevus on

$$I = \frac{n_{e^-}}{6{,}25 \cdot 10^{18}} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{1{,}9 \cdot 10^{18}}{6{,}25 \cdot 10^{18}} \cdot \frac{1}{2} \sim 0{,}15\ \text{A}$$



Joonis 1-8. Vasakul: voolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt positiivse laengu suunda, mis on vastupidine elektronide liikumissuunale. Paremal: voolu suunda võib tähistada vastupidiselt tegelikule voolusuunale, sellisel juhul tuleb arvestada voolu märgiga.

Voolu suurusele lisaks märgitakse lisaks voolu väärtusele alati ka voolu suund. Voolu polaarsus (positiivne või negatiivne) iseloomustab samuti voolu suunda. Voolu väärtust juhis käsitletakse positiivsena, kui see on märgitud skeemi samas suunas olevana tegelikule voolu suunale (vt Joonis 1-8). Üldisel juhul negatiivne vool tähendab lihtsalt seda, et voolu tegelik suund on vastupidine voolu märgitud suunale (vt Joonis 1-8).

1.3 Pinge ja potentsiaal

Pinge on parameeter, mis kirjeldab laetud osakeste vaheliste mõjudega seotud (potentsiaalset) energiahulka. Arvuliselt **pinge kirjeldab** laengutevahelises süsteemis olevat **potentsiaalse energia hulka** laenguühiku kohta

$$U = \frac{W_{pot,el}}{Q},$$

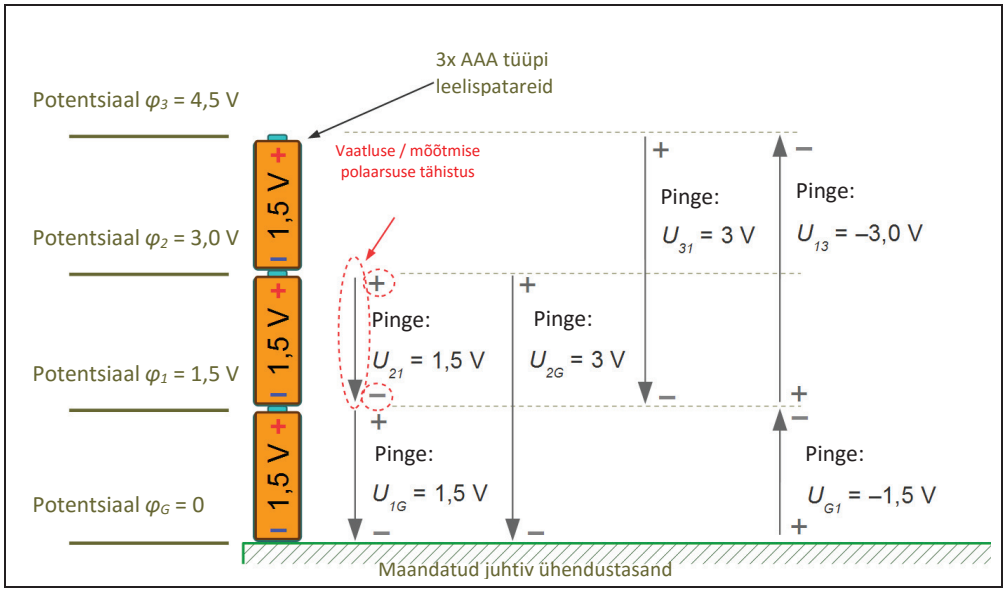
kus $W_{pot,el}$ kirjeldab koguenergiahulka, mida kannab laeng suurusega Q. Pinge ühik on volt (V), mis on võrdne 1 džauliga (1 J) ühe kuloni kohta (1 C), so 1 V = 1 J / C. Potentsiaalse energia mõistele viidates, iseloomustab pinge osakeste vahelisest paigutusest (asendist) tingutud mõjudes rakendatud energiahulka. Selle kirjeldamiseks kasutatakse ka terminit **elektriline potentsiaal**, mis viitab absoluutsele potentsiaalse energia tasemele.

Tegelikkuses on absoluutset elektrilise potentsiaali φ_{el} väärtust väga keeruline hinnata, kuid kahe erineva keha/punkti elektrilise potentsiaali erinevust saame suhteliselt hõlpsalt mõõta. Termin ”pinge” väljendab alati kahe erineva asukoha vahelise elektrilise potentsiaali võrdlust

$$U = \varphi_{el2} - \varphi_{el1}.$$

Pinge väärtusega kaasneb alati polaarsuse määramise vajadus ja mõõtmisel on alati vaja määrata, kummas kahest mõõtepunktis asuvast potentsiaalidest on kõrgem. Ka pinge mõõtmisel skeemis tuleb tähistada mõõteriista või skeemiosas esineva pinge oodatav polaarsus. Pinge polaarsuse tähistamine peab olema selgelt ja üheselt märgitud, kasutades erinevaid polaarsusmärke või muid tähiseid (vt Joonis 1-9).

Insenerivaldkonna rakendustes võetakse arvesse, et maandus/maa on kokkuleppeliselt loetud tegelikuks nullpotentsiaali tasemeks. See hõlbustab muuhulgas elektriliste ühenduste käsitlemist ja ka ohutusprintsiipide kavandamist. Maanduse/maa skeemis null-potentsiaalitasandina vaatlemisel võib erinevate sõlmede pingetasemete iseloomustamiseks tähistada skeemis lihtsamalt potentsiaalide väärtustena maa suhtes (vt Joonis 1-9). Samuti ka paljudes süsteemides nimetatakse üldist võrdlus/nulltasandit ”maaks” (”ground” / ”GND”).



Joonis 1-9. Pinge, potentsiaali ja maanduse selgitus.

Elektriline potentsiaal on kirjeldatud potentsiaalse energiana, mis omakorda on osakeste-vaheliste jõudude väljas olev energiahulk. Potentsiaali erinevus viitab ka erinevatele jõudude tasemetele, mis erinevas asukohas samale laengule mõjuksid. Seetõttu, kui süsteemis on ka null/võrdlustasand, siis pinge olemasolul kahe laengu vahel on ka nende laengute pinge null/võrdlustasandi suhtes erinev. Samamoodi on võimalik järeldada laengule mõjuvate jõudude kohta, et nullist erinev pinge laengute vahel tähistab ka nullist erinevat jõudu laengute vahel. Mida suurem on pinge, seda suurem on ka laengute vahel mõjuv jõud, mis laengut ühelt potentsiaali tasandilt teisele suunab.

Ülaltoodut kasutades võib piltlikult öelda, et elektrienergia allikas töötavad jõud, mis viivad laengu mingilt algselt potentsiaali tasemelt kõrgemale potentsiaali tasemele. Sellisel juhul on pinge allika klemmidel vaadeldav allika töö tulemusega, so allika poolt laengutele juurde antud energiahulgana. Protsessi, kus laengule antakse potentsiaalset energiat juurde tuntakse ka elektromotoorjõuna. Elektromotoorjõu töö tulemusena antakse laengule juurde mingi kindel kogus energiat, mida laengult hiljem ülekandmise järel rakendada saab. Allika klemmipinge on elektromotoorjõu (emj) tulemus.

1.3.1 Vaade võimsuse ja energia seostele ahelas läbi pinge ja voolu mõistete

Elektrilise ahela töö põhineb elektrivoolu liikumisel läbi ahelas olevate komponentide. Siin tähendab see, et laetud osakesed liiguvad pidevalt teekonnal elektriallikast koormuseni ja tagasi. Laenguid liikuma motiveeriv jõud pärineb elektriallikast ja allika võimsus kirjeldab, millise potentsiaalse energia taseme iga laenguühik allikat läbides juurde omandab

$$P = U \cdot I = \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}\right] \cdot \left[\frac{\mathrm{C}}{\mathrm{s}}\right] = [\mathrm{V}] \cdot [\mathrm{A}] = [\mathrm{W}] = \frac{[\mathrm{J}]}{[\mathrm{s}]} .$$

Kuna võimsus kirjeldab energia muundamist 1 s pikkuse ajavahemiku jooksul, siis pikema aja jooksul kasutatud energiahulka saame kirjeldada kui kõikide sekundipikkuste lõikude võimsuste summat

$$W = P_{t=1\mathrm{s}} + P_{t=2\mathrm{s}} + P_{t=3\mathrm{s}} + \ldots + P_{t=n\cdot\mathrm{s}} = \sum_{i=1}^{n} P_{t=i\cdot s}$$

või, juhul kui pikema aja jooksul on võimsus püsiva suurusega, saame energia arvutada kui

$$W = P \cdot t = U \cdot I \cdot t ,$$

kus *t* on vaadeldava ajavahemiku pikkus.

Energia SI-süsteemi ühik on džaul (J), kuid elektriliste süsteemide vaates sageli on kasutusel mitmeid teisigi suurusi, näiteks

- vatt-sekund (Ws), kus 1 Ws = 1 W · 1 s = 1 J;
- vatt-tunnid (Wh),kus 1 Wh = 1 W · 3600 s = 3600 J;
- kilovatt-tunnid (kWh), kus 1 kWh = 1 kW · 3600 s = 3,6 MJ.

Võttes arvesse, et

$$W = U \cdot I \cdot t \xrightarrow{I = \frac{Q}{t}} U \cdot \frac{Q}{\cancel{t}} \cdot \cancel{t} = U \cdot Q ,$$

mis kirjeldab energia seost läbi elektrilise laengu suuruse.

Tuleb märkida, et osade elektriallikate võimekuse tähistamiseks on kasutusel ka kogulaengu väärtus, mis on kirjeldatav ühikutega amper-tunnid (Ah). Sellisteks on näiteks keemilised energiaallikad, sh akud ja patareid. 1 Ah on laeng suurusega

$$Q_{1\mathrm{Ah}} = I \cdot t = 1\ \mathrm{A} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 3600\ \mathbf{C} .$$

Selle alusel saab akusse salvestatud energiahulga arvutada kasutades aku pinge väärtust

$W_{aku,kokku} = Q_{Ah,nimi} \cdot 3600 \cdot U_{aku,nimi}$.

Näide. Lamp töötab konstantse võimsusega 50 W. Kui palju energiat tarbib lamp, kui see jääb sisse lülitatud 40 minutiks? Vastus anda nii J kui ka kWh ühikutes.

Lahendus. Et leida tarbitud energiakogust, tuleb kõigepealt märkida, et tarbitud võimsus oli konstantne. Teiseks, 40 minutit tähendab

$t = 40 \cdot 60 = 2400 \text{ s}$.

Seejärel saame rakendada valemit

$W = P \cdot t = 50 \cdot 2400 = 120\,000 \text{ J} = 120 \text{ kJ}$.

Et leida tulemust kWh ühikutes, peame täpsustama, et 1 kWh = 3,6 · 10^6 J.

Seega

$$W = P \cdot t = \frac{50 \cdot 2400}{3,6 \cdot 10^6} = 0,033 \text{ kWh.}$$

Näide. 12 V nimipingega patarei on mahtuvus on 10 Ah. Kui palju energiat on salvestatud sellises patareis? Vastus näidata Wh ühikutes.

Lahendus. Kuna patarei nimipinge ja laeng on teada ($U_{patarei,nimi}$ = 12 V; $Q_{Ah,nimi}$ = 10 Ah), siis koguenergia on avaldatav valemist

$W_{patarei,kokku} = Q_{Ah,nimi} \cdot 3600 \cdot U_{patarei,nimi} = 10 \cdot 3600 \cdot 12 = 432\,000 \text{ J} = 432 \text{ kJ}$.

Et anda vastest Wh-des, peame arvestama, et 1 Wh = 3600 J, mis tähendab, et

$$W_{[Wh]patarei} = W_{patarei,kokku} \cdot \frac{1 \text{ Wh}}{3600 \text{ s}} = \frac{432\,000}{3600} = 120 \text{ Wh}.$$

Vastus. Patareis salvestatud energiakogus on 120 Wh.

Näide. Aku salvestusmahuks nõutakse energiakogust 24 kWh. Milline on vajaliku aku nimimahutavus Ah-des, eeldades, et aku nimipinge on 360 V?

Lahendus. Kõigepealt leiame salvestatud energiakoguse džaulides. 24 kWh on

$$W_{aku,kokku} = W_{[kWh]aku} \cdot \frac{3\,600\,000 \text{ J}}{1 \text{ kWh}} = 24 \cdot \frac{3\,600\,000}{1} = 86\,400\,000 \text{ J} = 86,4 \text{ MJ}.$$

Aku vajalik hoitav laeng on seega leitav kui

$$Q_{aku,nimi} = \frac{W_{aku,kokku}}{U_{aku,nimi}} = \frac{86\,400\,000}{360} = 240\,000 \text{ C}.$$

Teades, et 1 Ah = 3600 C

$$Q_{[Ah]aku,nimi} = Q_{aku,nimi} \cdot \frac{1 \text{ J}}{3600 \text{ J}} = 240\,000 \cdot \frac{1}{3600} = 66,7 \text{ Ah.}$$

1.4 Takistus

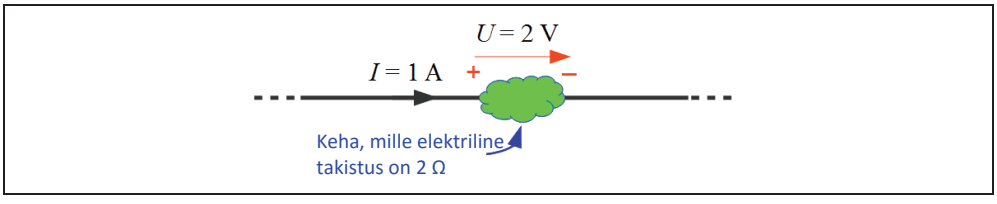
Takistus on elektriline suurus, mis kirjeldab vajalikku tööd, et viia teatud hulk elektrone läbi mingi reaalse keha sama ajavahemiku jooksul. Elektrilise takistuse selgituseks võib võtta elektronide hõõrdumise seda keha läbides.

1.4.1 Oomi seadus

Energiahulk, mis on vajalik laengu läbiviimiseks teatud elektrilist takistust (tähistus R) omavast kehast avaldub läbi elektrilise potentsiaali muutumise (ühtlasi pinge) selle keha erinevates asukohtades. Veelgi enam, nimetatud pinge suurus on võrdeline voolu suurusega läbi seose

$$U = I \cdot R .$$

Seda seost tuntakse ka Oomi seadusena. See kirjeldab, et ühikulise voolutugevuse (1 A) tagamiseks läbi juhtme tuleb rakendada energiahulk, mis on võrdeline elektrilise takistuse väärtusega (ühikud Ω – oom, tähistades 1 V = 1 J energiavajadust 1 C laenguhulga kohta, kui see liigub läbi juhtme 1 s jooksul), vt Joonis 1-10. Samuti on Oomi seadus sõnastatav ka voolutugevuse vaates: kui keha otstele rakendatakse teatud suurusega pinge, on seda keha läbiv vool võrdeline rakendatud pinge väärtuse ja takistuse suhtega. Rakenduste jaoks annab viimane vihje selle kohta, kuidas piirata voolutugevuse väärtust või tagada kindla suurusega voolutugevus mingis kehas, läbi erinevate takistust omavate komponentide ahelasse lisamise.



Joonis 1-10. Elektrilise takistuse sisuline seletus ja Oomi seadus.

Praktilises käsitluses kasutatakse tihti ka terminit **elektriline juhtivus**, mis on pöördvõrdeline takistuse väärtusega

$$G = \frac{1}{R} .$$

Juhtivuse ühikutena on kasutuse ka siimens (S), mho või ℧.

Elektriahelas esineb pinge takistust omavatel komponentidel alati, kui neid läbib vool. Elektriahela vaates räägitakse komponentidel voolu tõttu esinevast pingest kui ”pinge-langust”, tähistades seda kui pinge muutust ΔU tavapärase pinge tähistuse U asemel. Sellist terminikasutust kohtame ka hilisemates peatükkides, kui erinevad elektriahelad lähemale vaatlusele tulevad. Siiski, Oomi seaduse vaates ei ole vähimatki vahet, kas ahela/liini/juhtme otstel olevat pinget käsitletakse pingena U või pingelanguna ΔU.

1.4.2 Joule Lenzi seadus – soojuskaod

Mistahes tugevusega elektrivoolu korral on sellega materjalist läbi minemisel seotud teatud energiahulga kasutamine, mis muundatakse soojuseks. Sellise kao tunnuseks on ahela osade (sh takistite ja juhtmete endi) kuumenemine kui vool neid läbib.

Vaadeldes võimsuse seost

$$P = U \cdot I ,$$

siis igal kehal, mida läbib elektrivool kahe punkti vahel, toimub teatud energia muundamise protsess nende kahe vaadeldava punkti vahel laengu ülekandel. Eespoolkirjeldatud takistuse analoogina hõõrdumise käsitlemisel on selge, et selline lähenemine kirjeldab pidevat muundusprotsessi. Kasutades võimsuse seose juures Oomi seaduse abil kahe punkti vahel esineva pinge väärtuse avaldamist läbi voolu ja takistuse

$$U = I \cdot R$$

ning asendades selle võimsuse seosesse, saame Joule-Lenzi seose soojusliku kao kohta, mis esineb voolu kehast läbiminekul.

$$P = U \cdot I \xrightarrow{U = I \cdot R} P = I^2 R .$$

See seos kirjeldab täpselt, et soojusliku energia muundamise protsessi intensiivsus on seotud keha läbiva voolu ruuduga. Siinkohal tuleb silmas pidada, et voolu 20% kasv toob kaasa 41% kõrgema soojusvõimsuse.

Pinge ja võimsuse seostest väärib välja toomist ka avaldis, mille saame kui asendame võimsuse seoses voolu väärtuse

$$P = U \cdot I \xrightarrow{I = \frac{U}{R}} P = \frac{U^2}{R} .$$

Siingi on viide sellele, et rakendades komponendile 20% kõrgema pinge väärtuse, kasvab sellel kehal eralduv võimsus 41%.

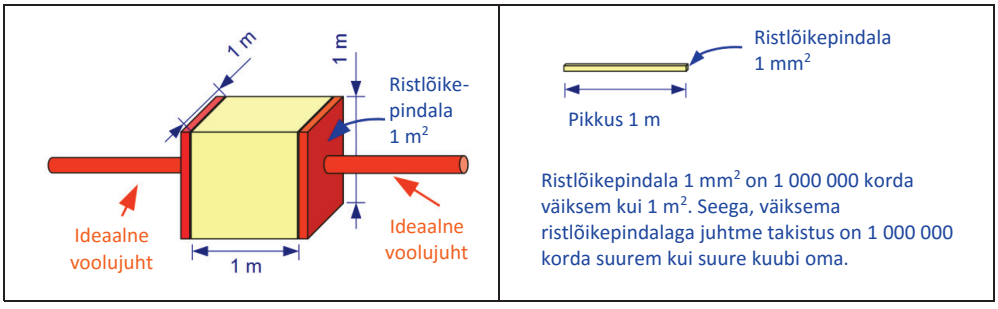
1.4.3 Materjalide takistus

Igal materjalil on teatud elektrilise takistuse väärtus. Selle alusel, millise pingutuse tulemusena saame viia teatud väärtusega voolu läbi juhtmete, kirjeldatakse erinevaid materjale kas elektrijuhtidena, pooljuhtidena või isolaatoritena. Materjalide elektrilise takistuse kirjeldamiseks kasutatakse suurusena **eritakistus**t, mis iseloomustab materjali takistust sõltumatult keha mõõtmetest ja kujust. Siiski on selge, et erinevatel kehadel on erinev takistuse väärtus. Tähelepanuks ka, et esineb terve rida ülijuhtmaterjale, mille eripära on põhimõtteliselt nullise väärtusega eritakistuse väärtus (eritingimustel, üldiselt väga madalatel temperatuuridel).

Tavalisemate kujuga kehade ja elektrijuhtide jaoks saab eritakistust kasutada nende kehade ja juhtide elektrilise takistuse määramiseks läbi seose

$$R_{wire} = \frac{\rho_{mat} \cdot L_{wire}}{A_{wire}},$$

kus ρ_{mat} on materjali eritakistus, L_{keha} on keha pikkus (voolu liikumissihis) ja A_{keha} on voolu läbiva juhi ristlõike pindala. Tähelepanuks, et ristlõike pindala on ristsihis voolu liikumise suunaga ja see seos eeldab ka püsivat ristlõike pindala kogu vaadeldava pikkuse *l* jooksul. Antud valem viitab sellele, et kui meil oleks ühikmõõtudega materjalikuup (suurusega 1 x 1 x 1 m), oleks selle takistus võrdne eritakistuse väärtusega (vt Joonis 1-11 ja Tabel 1-1).



Joonis 1-11. Takistuse selgitus ja võrdlus 1 m³ kuubi ning 1 mm² ristlõikepindalaga juhtme vahel.

Arvestada tuleb ka seda, et eritakistuse väärtus sõltub temperatuuri väärtusest. Enamus voolujuhte omavad positiivset temperatuuritegurit, mis tähendab, et temperatuuri kasvades kasvab ühtlasi ka juhtmete takistus. Tavapärane materjalide kirjeldusviis esitab eritakistuse väärtuse 20°C (ρ_0) juures ning samuti temperatuuriteguri α väärtuse. NB! Mõlemad väärtused on igal materjalil erinevad.

Kasutades α ja ρ_0 väärtuseid, on eritakistus 20°C temperatuurist leitav kui

$$\rho_{T1} = \rho_0 \left[1 + \alpha \cdot \left(T_1 - 20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right],$$

kus T_1 on temperatuuri väärtus, millisel eritakistuse väärtust arvutatakse. Kuna keha takistuse väärtus on proportsionaalne eritakistuse väärtusega, siis ka takistuse väärtuse leidmiseks sobib sama ülesehitusega seos

$$R_{T1} = R_0 \left[1 + \alpha \cdot \left(T_1 - 20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right],$$

kus R_0 on takistuse väärtus temperatuuril 20°C. Kui teame, millest taksitust omav komponent on valmistatud, siis saame kasutada siin temperatuuriteguri väärtuseks sama väärtust, mis on ka materjalil. Tihtipeale on erinevatel komponentidel (näiteks üldlevinud takistid) neile spetsiifiline temperatuuritegur toodud nende tooteinfos ja andmelehtedel.

1.4.4 Elektrijuhid

Kõige sagedamini kasutatavad elektrijuhtide materjalid on vask ja alumiinium. All olevas tabelis (vt Tabel 1-1), on esitatud sagedamini elektrijuhtidena kasutatavate materjalide eritakistuste väärtused ja nende temperatuuritegurid.

Tabel 1-1. Tüüpiliste voolujuhi materjalide näited

Materjal ja tema eritakistus temperatuuril 20°C, Ω·m	Ühikulise suurusega materjalikuubi takistus	Juhtme takistus, millel on 1 mm² ristlõike pindala ja 1 m pikkus	Temperatuuri-tegur α, 1/K	Märkused
Vask $\rho_{Cu} = 1{,}68 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{Cu,1x1x1m}$ = = $1{,}68 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{Cu,juhe}$ = 0,0168 Ω	α_{Cu} = 0,0040 1/K	
Alumiinium $\rho_{Al} = 2{,}65 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{Al,1x1x1m}$ = = $2{,}65 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{Al,juhe}$ = 0,0265 Ω	α_{Al} = 0,0039 1/K	
Hõbe $\rho_{Ag} = 1{,}59 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{Ag,1x1x1m}$ = = $1{,}59 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{Ag,juhe}$ = 0,0159 Ω	α_{Ag} = 0,0038 1/K	
Pronks $\rho_{BR} = 5{,}9 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{BR,1x1x1m}$ = = $5{,}9 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{BR,juhe}$ = 0,59 Ω	α_{BR}= 0,0015 1/K	53% Cu
Joodis $\rho_{SL} = 15 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{SL,1x1x1m}$ = = $15 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{SL,juhe}$ = 1,5 Ω		
Valuteras $\rho_{ST} = 6{,}2 \cdot 10^{-8}$ Ω·m	$R_{ST,1x1x1m}$ = = $6{,}2 \cdot 10^{-8}$ Ω	$R_{ST,juhe}$ = 0,62 Ω		http://eddy-current.com/conductivity-of-metals-sorted-by-resistivity/

Näide. Kahe seadme ühendamiseks kasutatakse vaskjuhet. Milline on juhtme takistus, kui tema pikkus on 9 m ja ristlõike pindala 1,5 mm²?

Lahendus. Kuna juhtme pikkus, ristlõike pindala ja materjal on teada, siis saame leida juhtme takistuse väärtuse

$$R_{juhe} = \frac{\rho_{mat} \cdot L_{juhe}}{A_{juhe}}$$

Tuleb tähele panna, et 1 mm² on 1/1000000 m² = 10^{-6} m² ehk 1,5 mm² = $1{,}5 \cdot 10^{-6}$ m².

$$R_{juhe} = \frac{\rho_{mat} \cdot L_{juhe}}{A_{juhe}} = \frac{1{,}68 \cdot 10^{-8} \cdot 9}{1{,}5 \cdot 10^{-6}} = 0{,}101\,\Omega \sim 0{,}1\,\Omega .$$

Näide. Alumiiniumist 35 m pikkune juhe on 4 mm² ristlõike pindalaga. Kui suur on juhtme takistus, kui juhtme temperatuur on 50°C?

Lahendus. Temperatuuridel, mis erinevad 20°C-st, tuleb takistus leida järgmiselt

$$\rho_{T1} = \rho_0 \left[1 + \alpha \cdot \left(T_1 - 20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right],$$

See tähendab, et alumiiniumi eritakistus temperatuuril 50°C on

$$\rho_{T1} = \rho_0 \left[1 + \alpha \cdot \left(T_1 - 20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right] = 2{,}65 \cdot 10^{-8} \cdot \left[1 + 0{,}0039 \cdot (50 - 20)\right] = 2{,}96 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \mathrm{m},$$

mis on

$$\frac{\rho_{T1}-\rho_0}{\rho_0}=\frac{2,96\cdot10^{-8}-2,65\cdot10^{-8}}{2,65\cdot10^{-8}}=11,7\,\%$$

suurem kui alumiiniumi eritakistus temperatuuril 20°C.

Asendades selle juhtme takistuse arvutamise valemisse, saame

$$R_{juhe}=\frac{\rho_{mat}\cdot L_{juhe}}{A_{juhe}}=\frac{\left(\rho_0\cdot\left[1+\alpha\cdot\left(T_1-20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right]\right)\cdot L_{juhe}}{A_{juhe}}=$$

$$=\frac{\left(2,65\cdot10^{-8}\cdot\left[1+0,0039\cdot\left(50-20\right)\right]\right)\cdot35}{4\cdot10^{-6}}=0,26\,\Omega$$

Näide. Vaskjuhe on 1 Ω takistusega, kui mõõtmine tehakse temperatuuril 20°C. Mitme protsendi võrra suureneb takistus, kui juhet kuumutatakse temperatuurini 100°C?

Lahendus. Kui temperatuur erineb 20°C-st, siis arvutatakse materjali eritakistus järgmiselt

$$R_{T1}=R_0\left[1+\alpha\cdot\left(T_1-20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right],$$

Teades vase temperatuurikoefitsenti (vt Tabel 1-1), leiame juhtme takistuse

$$R_{T1}=2\left[1+0,004\cdot\left(100^{\circ}\mathrm{C}-20^{\circ}\mathrm{C}\right)\right]=2,64\,\Omega$$

Protsentuaalse erinevus leiame

$$\frac{R_{T1}-R_0}{R_0}=\frac{2,64-2}{2}\cdot100\%=\frac{0,64}{2}\cdot100\%=32\%$$

Seega, kui juhtme temperatuur jõuab 100°C-ni, siis juhtme takistus on umbes 1/3 võrra kõrgem kui 20°C juures.

1.4.5 Isolaatorid ja pooljuhid

Isolaatorid on materjalid, mis ei juhi hästi elektrit, sest vajalik pingutus juhtmest elektrivoolu läbi viimseks on tohutult suur. Selliseid materjale saab kasutada näiteks selleks, et hoida ära elektrilaengute liikumine ühelt juhilt teisele, kui juhtide potentsiaalid on erinevad; samuti elektriohutuse tagamiseks.

Tänapäevased kaablid koosnevad kaabli välisümbrisest ja eraldi juhtmetest selle sees. Juhtmed on koostatud voolujuhist juhtme keskel ja isolatsioonist, mis ümbritseb kogu voolujuhti. Kuigi erinevate juhtmete voolujuhid on erineva potentsiaaliga, siis isolatsioon hoiab laengud liikumast ühelt voolujuhilt teisele, kuni kaabli lõpuni välja. Kui isolatsioon peaks saama kahjustatud, siis see enam ei suuda hoida eri potentsiaaliga laenguid üksteisest eemal ja võimaldab lühiste tekkimist eri voolujuhtide vahel.

Üheks parimaks isolatsioonimaterjaliks peetakse näiteks vaakumit, kuna seal ei olegi osakesi, mis võiksid elektrilaengut ühest punktist teise üle kanda.

1.5 Enesekontrolliks

1. Keha massiga 2 kg liigub kiirusel 26 m/s. Keha asub kõrgusel 16,5 m. Mis on selle keha mehaanilise energia kogusumma? (g = 9,81 m/s^2)

   Vali vastus:

   A) 100 J

   B) 676 J

   C) 1 kJ

   D) 324 J

2. 1 h pikkuse ajavahemiku vältel muundati kokku 36 kJ energiat. Kui suur oli süsteemi keskmine võimsust antud ajavahemikul?

   Vali vastus:

   A) 100 W

   B) 10 W

   C) 20 W

   D) 10 kW

3. Töövahendi liigutamiseks vajalik võimsus on 100 W. Vahendi liigutamiseks kasutatava mootori kasutegur on 90,9 %. Kui suurt sisendvõimsust vajab mootor?

   Vali vastus:

   A) 110 W

   B) 100 W

   C) 1 kW

   D) 115 W

4. Kujutlegem 2 ainekogumit, kummaski 106 elektroni. Ainekogumite vahel on distants r = 21,47 nm. Kui suur on kahe süsteemi vaheline jõud?

   A) 1 N

   B) 0,5 N

   C) 200 mN

   D) 1 mN

5. Juhet läbib 10 A voolutugevus. Kui suur laeng läbib juhet 10 s jooksul?

Vali vastus:

A) 1 C

B) 10 C

C) 100 C

D) 1000 C

6. Lambil on 3 võimsustaset. Lamp töötab 1 tunni 10 W võimsustasemel, 21 minutit 30 W tasemel ja 9 minutit 50 W võimsusel. Kui palju energiat tarbib lamp keskmiselt tunni aja jooksul?

   Vali vastus:

   A) 23 Wh

   B) 10 Wh

   C) 23 kJ

   D) 10 kJ

7. 14 V algpingega patareid laetakse tühjaks 10 A voolutugevusega. 2 tunni möödudes on pinge langenud 11 V tasemeni ja tühjaks laadimine lõpetati. Kui palju energiat kannab patarei, kui lugeda pingelang lineaarseks?

   Vali vastus:

   A) 125 Wh

   B) 280 Wh

   C) 250 Wh

   D) 220 Wh

8. Tarbija nõuab 20 kWh energiakogust. Mis on minimaalne arv patareisid, mis kataksid vajaduse, kui kasutatakse 12 V nimipingega 60 Ah patareisid?

   Vali vastus:

   A) 25

   B) 28

   C) 30

   D) 10

9. Kui juhtme ristlõikepindala suurendada, siis juhtme takistus…

Vali vastus:

A) suureneb

B) jääb samaks

C) väheneb

D) on 10 Ω

10. Vali õige Oomi seaduse kuju.

Vali kõik sobivad vastused:

A) $U = I \cdot R$

B) $I = U \cdot R$

C) $R = U / I$

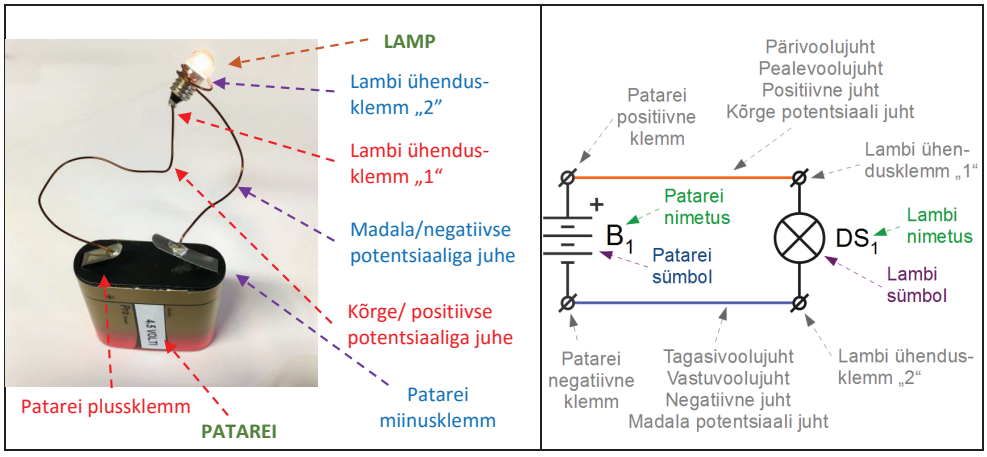
D) $R = I / U$

E) $P = U \cdot I$

F) $I = U / R$

2 ELEKTRIAHELA OSAD, KOMPONENDID JA MÕISTED

Elektrilise ahela planeerimisel on kriitiline ühendada erinevad komponendid viisil, et nende talitlus vastaks soovitule. Alustame järgmise näitega, kus on kokku ühendatud patarei ja väike hõõglamp, kasutades ühendusjuhtmeid (vt Joonis 2-1).



Joonis 2-1. Lihtne patareitoitega ahel ja seda kirjeldav skeem.

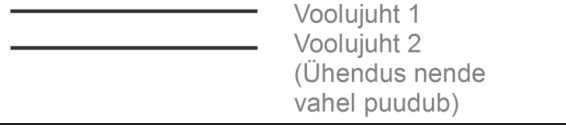
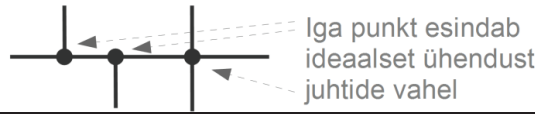
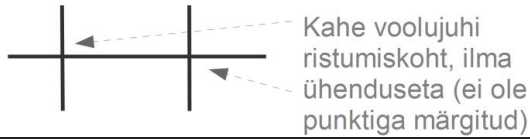
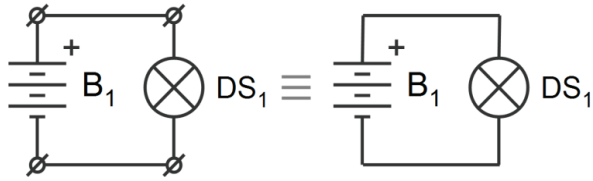
Sellist ahelat saab kirjeldada elektriskeemiga, millel on näidatud erinevate komponentide skeemitähised (loogilised sümbolid), milles iga erinev sümbol tähistab kindlat osa/asjaolu. Sellises elektriahelas ja vastavas skeemis (vt Joonis 2-1) oleme rakendanud 4 komponenti: patarei, 2 juhet ning elektriline koormus.

2.1 Juhtmete ja ühenduste märkimine

Tavapärane praktika juhtmete ja juhtmeühenduste skeemis kujutamisel põhineb oletusel, et nende omadused võrreldes muude komponentidega on suhteliselt ideaalsed ja et nende lisamine ühel või teisel moel skeemi tööd olulisel määral ei mõjuta. Samuti ei kajasta skeemil olevad ühendused tingimata seda, milliselt on ühendused teostatud geomeetriliselt päris juhtmetega. Juhtmeühenduste markeerimise peamine eesmärk on selgelt ja üheselt edasi anda komponentide roll skeemis ja nende füüsikalise talitlusviisi kirjeldus (sh vooluteekonna iseloom läbi komponentide).

Tabel 2-1 loetleb kõige tüüpilisemad juhtmete ja ühenduste tähistamise sümbolid ja nende kasutamise.

Tabel 2-1. Tavalisemad ühenduste ja juhtmete tähistamise viisid skeemides.

Juhtmed märgitakse skeemi kui jooned	
Juhtmete ühendused (sõlmpunktid) märgitakse jämeda punktiga	
Juhtmed, mis ei ole ühenduses, märgitakse ülemineku teineteisest ilma jämeda punktita.	
Tavaliselt komponentide ühendusklemme eraldi välja ei tooda. Klemmid on esitatud ainult selleks, et näidata nendega seotud spetsiifikat.	

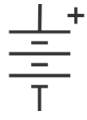
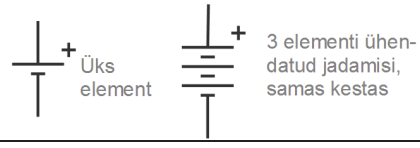
Kõik ülaltoodud ühendusjuhtmed loetakse skeemis ideaalseteks voolujuhtideks ($R = 0$).

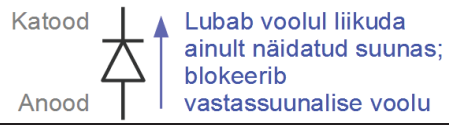
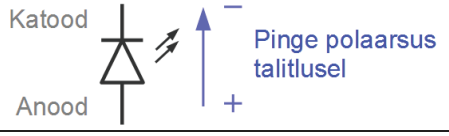
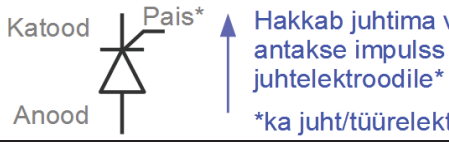
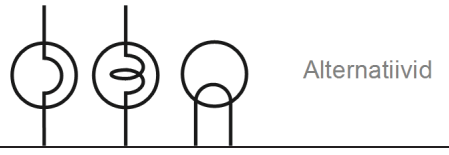
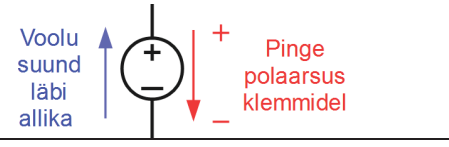
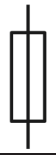
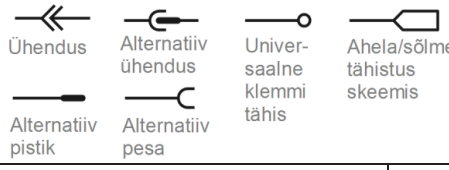
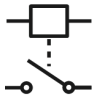
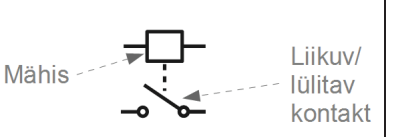
2.1.1 Skeemisümbolid ja nende tähistamine

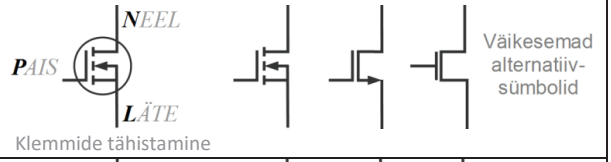
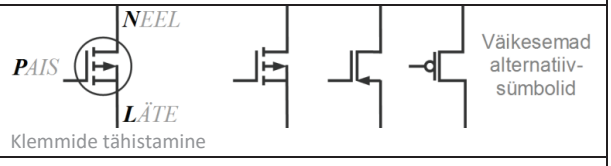
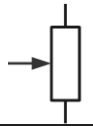
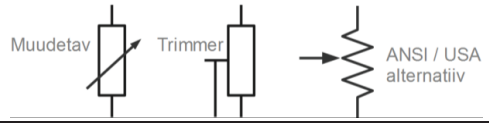
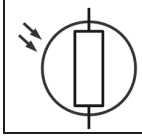
Komponentide loogilisi skeemisümboleid tähistatakse väga sageli neid selgelt identifitseeriva tähisega (ik *reference designator* ja *refdes*), mis on komponendi nimeks selles skeemis. Skeemis on tähiseks tavaliselt ladina tähestiku täht(tähed), millele järgneb identifitseeriv number, sama süsteemiga kantakse need ka dokumentatsiooni.

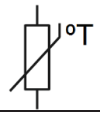
NB! Komponentide tähistes kasutatakse skeemisümbolile tüüpilisi tähti, näiteks “B” on kasutuses patarei tähisena. Enimkasutatavate skeemisümbolite tähised on loetletud ka alltoodud tabelis (vt Table 2-2).

Table 2-2. Enimlevinud skeemisümbolid (IEC 60617 alusel) ja nende tähised.

Sümbol	Tähis	Komponent	Märkused
	B	Patarei	
	C	Kondensaator	

	D	Diood (üldine)	
	D	LED – valgusdiood (ik *light emitting diode*)	
	D	Türistor	
	DS	Valgusallikas	
	E, ε	Elektromotoorjõu allikas	
	F	Kaitse	
	G	Juhtivus	Sama sümbol takistiga. Skeemis on vahe tähistuses (juhtivus = G; takistus = R)
	J	Pistikühendus	
	K	Relee	 Relee kontaktide tähistamine ja sümbolid on identsed lülitite omadega

	L	Induktiivsus	
	M	Mootor	
	Q	NPN transistor	
	Q	PNP transistor	
	Q	N-kanaliga väljatransis-tor (*N-FET*)	
	Q	P-kanaliga väljatransis-tor (*P-FET*)	
	R	Takisti	
	R	Potentsio-meeter	
	R	LDR – valgustund-lik takisti (ik *light*	

		dependent resistor)		
	R	Termistor		
	S	Lüliti		Vt ka lülitite peatükk alljärgnevalt
	T	Trafo		

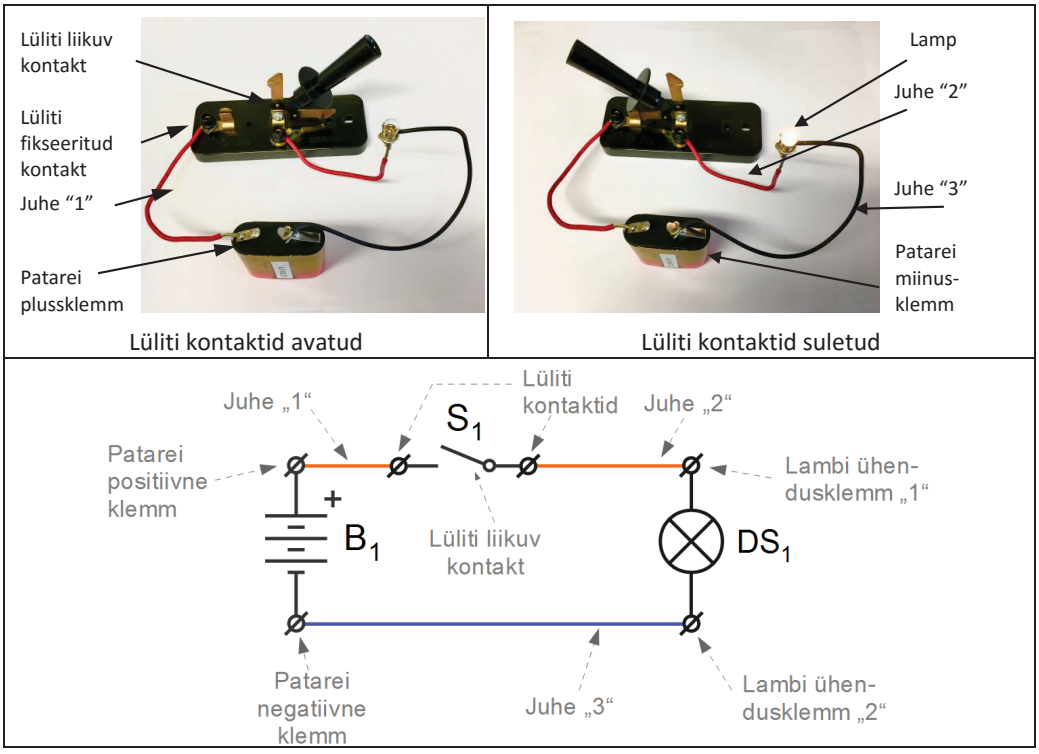
Elektriskeemide detailsus rõhub funktsiooni edasiandmisele ja kõik detailid komponentide kohta alati ei ole välja toodud. Näiteks, komponentide ühendusklemme juhtmete ühendamiseks ei ole tavaliselt märgitud. Klemme käsitletaksegi samamoodi nagu juhtmeid – nende lisamine või eemaldamine skeemist skeemi enda tööd ei mõjuta.

2.1.2 Juhtiva ahela katkestamine ja lülitid

Voolu liikumise tagamiseks allikast koormusesse, ning selle ringlemise võimaldamiseks tuleb tagada headest voolujuhtidest koosnev teekond mis moodustab terve ringi – suletud kontuur. Selle saavutamiseks tuleb voolujuhid katkematult teineteisega liita, et laengute liikumine oleks võimalik madala takistusega teekonna kaudu.

Eelnevalt oli teemaks ka see, et juhtide takistus on sõltuvuses materjali eritakistusest ja pikkusest. Siiski, see kehtib ühe katkematu juhi kohta, kui juhi materjal on üks katkematu tükk. Kui materjalis esineb vähimgi pragu, mille tulemusena on 2 eraldiseisvat juhi osa, on ka juhi elektrilise takistuse väärtus koheselt ülisuur. Suur takistus tuleneb sellest, et õhu elektriline takistus on väga suur, isegi juhul, kui pragu on kasvõi 1 μm laiune. Kõrge takistus piirab koheselt voolu taseme ahelas.

Säärane juhi katkestamise printsiip suure takistusega lõigu tekitamisega ahelasse on üks tüüpilisemaid ja elementaarsemaid voolu liikumise juhtimise võtteid. Nimelt on peale juhi katkestamist ahela takistus nii kõrge, et isegi kõrge klemmipingega allika korral on ahelas liikuv vool praktiliselt nullise väärtusega.



Joonis 2-2. Lüliti ahelas, lahutatud ehk avatud (paremal ülal) ja ühendatud ehk suletud (vasakul ülal) kontaktidega. Alumine joonis: sama ahela kujutamine elektriskeemina.

Lülitite tüüpe, need klemmide konfiguratsioone ja kombinatsioone on tohutult palju. Järgnev lülitite iseloomustus kirjeldab lülitite mõistmiseks vajalikku baasmaterjali; tuleb silmas pidada, et esitatud on kõige põhilisemad lülitite variandid, mida kohtame erinevates seadmetes ja elektripaigaldistes.

Mehaanilisel lülitil (näiteks vt Joonis 2-1) on lüliti kontaktide hulgas üks liikuv ja vähemalt üks (või ka mitmed) liikumatu(d) kontakt(id). Ühendus juhtide vahel teostatakse paigutades/surudes liikuva kontakti pinna vastu liikumatu kontakti pinda. Sellist tegevust nimetatakse kontakti loomiseks. Ahelas voolu peatamiseks liikuv kontakt eemaldatakse fikseeritud kontaktist sellisele kaugusele, et kontaktide materjal ei puuduta teist kontakti. Sellist tegevust nimetatakse kontakti katkestamiseks.

Tüüpilistes variantides üks ühine kontakt (liikuv kontakt) “teenindab” ühte või mitut liikumatut kontakti. ”Teenindamine” tähistab siin kontakti liigutamist selliselt, et see ühenduks ühe kindla liikumatu kontaktiga. Sellist kontaktide komplekti, kus on üks liikuv kontakt ja temaga seotud liikumatud kontaktid, nimetatakse ka **lüliti pooluse**ks. Lüliti kesta sees võib olla üks või mitu kontaktikomplekti, viimasel juhul on tegemist mitmepooluseliste lülititega. Erinevaid pooluseid võib juhtida kas sama juhtdetailiga või siis eraldi juhtdetailidega.

Kontaktide erinevad võimalikud konfiguratsioone nimetatakse ka läbi lülituste kombinatsioonide võimaliku hulga, ühtlasi läbi liikumatute kontaktide arvu.

- ***Single throw*** **(ST)** (ingl k) e lihtlüliti viitab ühele liikumatule kontaktile (sulguv või avanev kontakt). Sellisel lülitil on kaks võimalikku asendit: kontaktid suletud (ON) või kontaktid avatud (OFF).
- ***Double throw*** **(DT)** (ingl k) e kahe positsiooniga ümberlüliti viitab vahetatavale kontaktidepaarile. Sellisel lülitil on kaks fikseeritud ja üks liikuv kontakt. Tüüpiliselt kasutatakse sellises lülitis varianti, kus liikuv kontakt on ühenduses kas esimese või teise liikumatu kontaktiga (ON-ON tüüpi lülitus); levinud on ka kolme positsiooniga ühendus (ON-OFF-ON), kus liikuv kontakt on ühenduses kas esimese või teise liikumatu kontaktiga, samas keskasendis on liikuv kontakt ühendamata kummagi liikumatu kontaktiga (kõik kontaktid isoleeritud).
- ***Triple throw*** **(3T)** (ingl k) e kolme liikumatu kontaktiga lüliti võimaldab liikuva kontakti ühendada vähemalt ühe liikumatu kontaktiga korraga.

Ülaltoodud lülititel on liikuv kontakt alati osaks ahelas, mis tähendab, et see kontakt on alati ühine mistahes ahela konfiguratsiooni jaoks. Sel põhjusel nimetatakse liikuvat lüliti kontakti ka *ühiseks* kontaktiks (ik *common*) ja tähistatakse **CO /** COM lüliti skeemisümbolil.

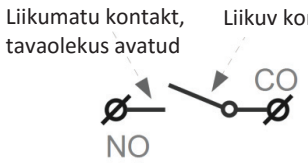
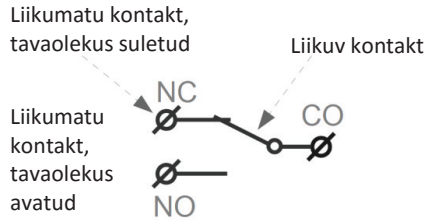
Lüliteid eristatakse ka sõltuvalt nende olekust, millisesse nad jäävad kui lülitit mõjutav jõud eemaldatakse (näiteks kui inimene juhtdetaili vajutab), kas **fikseeruv**ateks (ik *latching*) või **tagastuv**ateks (ka ennistuvateks, ik *momentary*).

- Tagastuvaks nimetatakse seda kontaktide asendit, milline on lülitil ainult juhul, kui juhtdetailile rakendatakse jõudu (näiteks uksekella lüliti). Kui juhtdetailit seda mõjutav jõud eemaldada, siis kontaktid tagastuvad normaalasendisse. Tagastuv kontaktide asend on tüüpiliselt märgitud sulgudesse ”( )”. Näiteks, uksekella lüliti asendite kirjeldus on ”(ON)-OFF”, mis viitab kontaktide sulgemisele ainult juhul, kui jõudu rakendatakse; lüliti juhtdetailile vajutamata on kontaktid avatud.
- Fikseeruvaks nimetatakse seda kontaktide asendit, mille lüliti säilitab ka peale lülitile mõjuva jõu eemaldamist (näiteks toas valgusti lüliti). Toa valgusti lüliti kontaktide asendite kirjeldus on ”ON-OFF”.

Ülal kirjeldatud kontaktide asendite kirjelduses on vaja ka täpsustada, milline on liikumatu kontakti ühendus. Infot on vaja eriti nende lülitite puhul, mis töötavad tagastuva kontaktiga.

- **Normaalolekus avatud** tähistab kontakti, mis on lüliti juhtdetailile jõu puudumisel lahti ühendatud liikuvast kontaktist (tähistus **NO** – ik *Normally Open*);
- **Normaalolekus suletud** tähistab kontakti, mis on juhtdetailile jõu rakendamisel ühendatud liikuva kontaktiga (tähistus **NC** – ik *Normally Closed*).

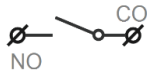
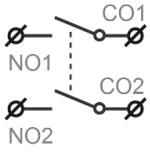
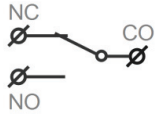
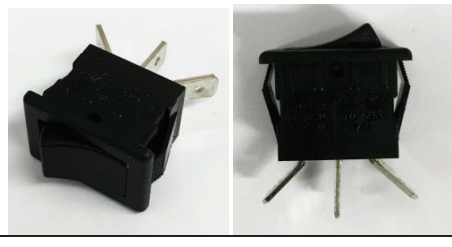
Mõned tüüpilisemad näited lülitite ja lüliti kontaktide konfiguratsioonidest on esitatud alloleval joonisel (vt Joonis 2-3).

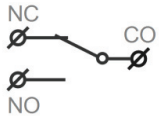
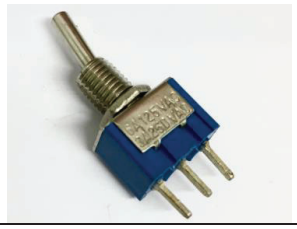
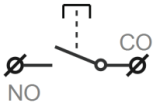
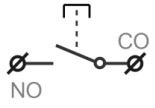
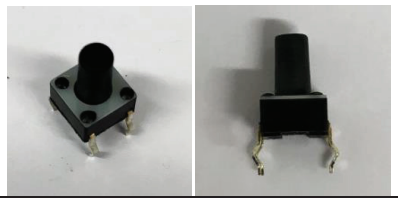
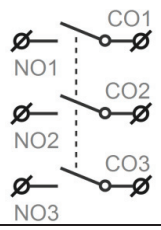
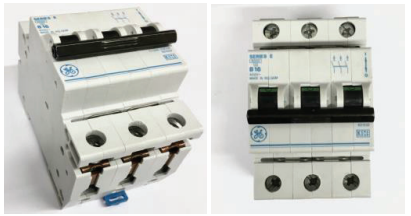
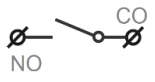
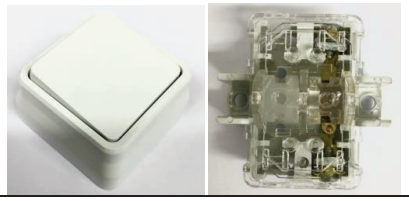
	
Ühepooluseline lihtlüliti - SPST	Ühepooluseline ümberlüliti - SPDT

Joonis 2-3. Ühepooluselise lihtlüliti ja ühepooluselise ümberlüliti ehitus.

Konkreetsed näited tüüpilisematest lülititest on esitatud allolevas tabelis (vt Tabel 2-3).

Tabel 2-3. Valik sagedamini kasutatavatest lülititest, nende tähistamine ja kontaktide konfiguratsioonid.

Lüliti tüüp	Elektriskeemi sümbol	Näidise füüsiline kuju
ON-OFF, SPST – ühepooluseline, ühe liikumatu kontaktiga Tüüpiline toite/valgustuse lüliti		
ON-OFF, DPST – kahe pooluse, ühe liikumatu kontaktiga Tüüpiline võrgutoitelüliti seadmetel		
ON-ON, SPDT – ühe poolusega, ümberlülitava kontaktiga Tüüpiline toite/valgustuse lüliti		

ON-ON, SPDT - ühe poolusega, ümberlülitava kontaktiga Elektroonikas tihti seadistuslüliti		
(ON)-OFF, SPST - ühe pooluse, ühe liikumatu ühendava kontaktiga Nupplülitid, uksekella lüliti		
(ON)-OFF, SPST - ühe pooluse, ühe liikumatu ühendava kontaktiga Elektroonikas ja väikeseadmetes kasutatav nupplüliti		
ON-OFF, 3PST – kolme poolusega fikseeruv lüliti, ühe liikumatu kontaktiga pooluse kohta Kaitselüliti elektrikilbis		
ON-OFF, SPST - ühe pooluse, ühe liikumatu kontaktiga Elektripaigaldistes valgusti lülitid		

2.2 Elektriahelate topoloogia ja tööpõhimõtted

2.2.1 Suletud ahel ja lihtsõlm

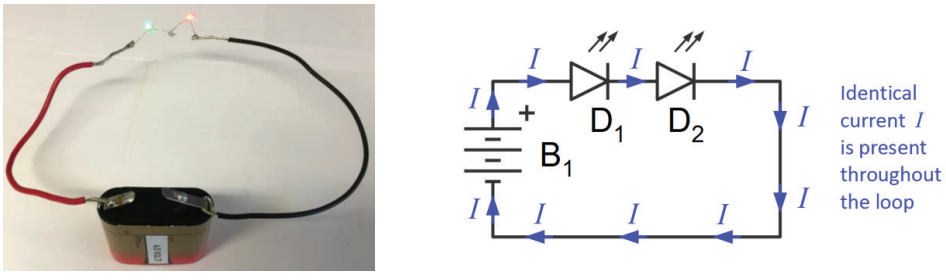
Laengute liikumise tagamiseks läbi ahela tuleb rakendada selleks spetsiaalselt ette nähtud elektrijuhtidest struktuuri. Elektriallikat ja koormust läbiva voolu võimaldamiseks tuleb elektrit juhtivad detailid ühendada katkematus jadas. Isegi vähim katkestus ahelas tähendab seda, et elektrivool ei saa liikuda läbi ahela kõrge efektiivsusega.

Sellega saame määratleda elektriahela mõiste sisu – see on hea juhtivusega teekond, mida mööda laeng saab liikuda tehes terve ringi. Laengu liikumine ahelas algab allika positiivselt

klemmilt ja laeng jõuab teekonna lõpuks sama allika negatiivsele klemmile. Sõltuvalt voolu liikumisest läbi ahelas olevate komponentide, saame eristada 3 erinevat ahela talitlusviisi.

- **Tühijooks** on juhul, kui allikas on ahelas väikese koormusega, ja hea juhtivusega tee koormusesse on katkestatud. Seetõttu ei läbi koormust märkimisväärse tugevusega vool. Olukorra näideteks on ahelas oleva lülitiga sisse teostatud ahela katkestus või siis mõne klemmi puudulik ühendus.
- **Suletud ahel** tähistab elektriahelate normaaltalitlust, st olukorda, kus koormusesse voolab ettenähtud suurusega vool. Hea juhtivusega ahel on katkematu allikast koormusesse ja võimaldab laengutel lihtsalt liikuda.
- **Lühis e. lühiühendus** on juhul, kui voolu jaoks on ahelas täiendav teekond, mis pakub laengute liikumiseks väga väikese takistusega teekonna, kuid täiendav teekond juhib elektrivoolu mööda ahela normaalsest koormusest.

Kui allikas ainult suunaks laenguid liikuma ja emiteeriks neid oma klemmidelt, siis allikas olevad elektrijuhtivuses osalemise võimelised laengukandjad saaksid kiirelt otsa. Allika töö tugineb pidevale laengute energiaga varustamisel ja selle püsiva voolu tagamiseks juhitakse laengukandjad/elektronid peale ahelas töö tegemist tagasi ahelasse, moodustades laengukandjate liikumiseks suletud ringi. Sellised suletud vooluringid on tuntud ka kui kontuurid, kus laengud saavad liikuda mööda ringi. Tühijooksu olukorras laengute jaoks ringi mööda liikumise võimalus puudub. Tuleb märkida, et reaalses olukorras ideaalne tühijooks ei ole võimalik, sest alati esineb mingi väga väikese suurusega vool läbi õhu või isolaator-materjalide.



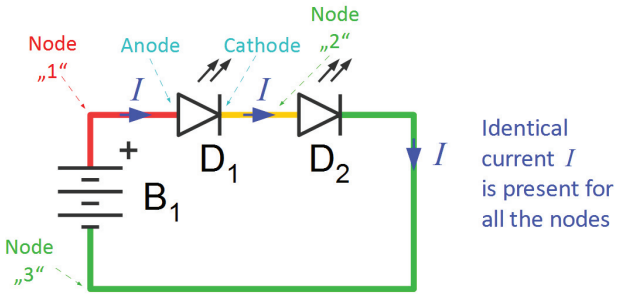
Joonis 2-4. Lihtne suletud vooluring 2 LED-iga (*light emitting diodes* ehk valgust kiirgavad dioodid ehk valgusdioodid) ja ahela kujutis skeemina, milles on näidatud voolu suund suletud ahelas. Pane tähele, et üks LED on valge ja teine rohelise valgusega, mis võimaldab neid ühendada ahelasse ilma voolutugevust piirava takistuseta.

Ülalkirjeldatud skeemis (vt Joonis 2-4) jälgides märgitud voolu liikumise suunda, võib laengute teekonda vooluringis kirjeldada järgmiselt. Laeng hakkab liikuma patarei B_1 positiivselt klemmilt läbi dioodi D_1, edasi dioodile D_2, mille järel laeng jõuab tagasi allikasse, seekord negatiivsele klemmile. Sellises ahelas on komponendid ühendatud jadamisi. Selline ühendus saab täpsema tähelepanu osaliseks Kirchhoffi pingeseaduse peatükis.

Sellises skeemis saab eristada 3 erinevat ühendust komponentide vahel, mis seovad rohkem kui ühte komponenti omavahel. Nendeks on:

1) Ühendus patarei B_1 positiivse klemmi ja diood (LED) D_1 anoodi vahel (märgitud punaselt, vt Joonis 2-4);
2) Ühendus dioodi (LED) D_1 katoodi ja dioodi (LED) D_2 anoodi vahel (märgitud oranžiga, vt Joonis 2-4);
3) Ühendus dioodi (LED) D_2 katoodi ja patarei B1 negatiivse klemmi vahel (märgitud rohelisega, vt Joonis 2-4).

Sõlm tähistab ideaalset ühendust, millega on seotud rohkem kui 1 ühenduskohta/klemmi. Praeguses vaadeldavas skeemis on kokku 3 sõlme (vt Joonis 2-5).



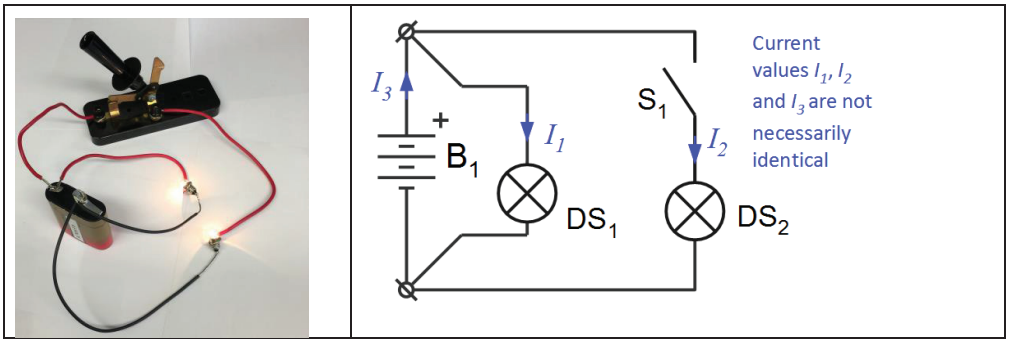
Joonis 2-5. Ahelas eristatavad sõlmed.

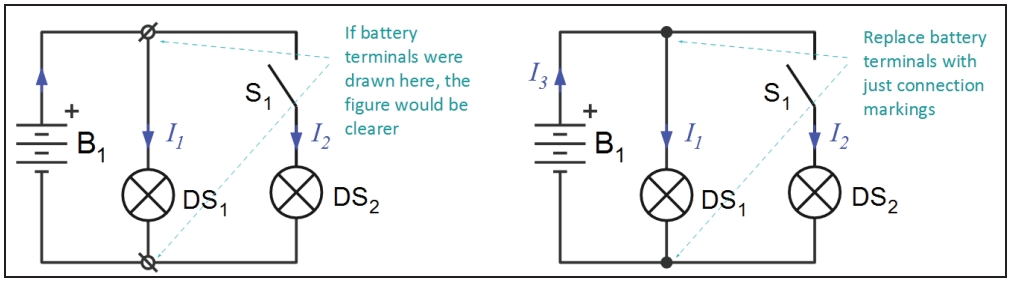
2.2.2 Harud ja keerulised sõlmed

Elektriahelates on tüüpiliselt enam kui 1 komponent. Näiteks auto elektrisüsteemi üks osa koosneb 2 esitulest, numbritulest ja tagumistest tuledest, mis on kõik ühendatud ühe ja sama akuga. Kõige elementaarseim viis rakendada kõik kirjeldatud tuled tööle on ühendada need ühel ja samal moel aku külge – kõikide lampide üks klemm tuleks ühendada aku positiivse ja teine klemm aku negatiivse klemmiga.

Järgnevas näites vaatleme ahelat, milles on 2 lampi, allikas, ja lüliti (vt Joonis 2-6). Üks lampidest on seejuures ühendatud püsivalt allika klemmidega; teine lamp on ühendatud lülitiga varustatud ahelasse, mis võimaldab seda lampi sisse ja välja lülitada.

Elektriskeem loogilise skeemi tasemel on esitatud ka alltoodud joonisel (vt Joonis 2-6).





Joonis 2-6. Näide rööp- ja jadaühendustega ahelast. Ahela voolud on kujutatud skeemil ülal paremal. Selgituseks on all samaväärsed skeemid, veidi teistsuguses esituses.

Ahelate analüüsi alustamisel märgime kõigepealt välja erinevad sõlmed. Siin saame eristada järgmisi sõlmi:

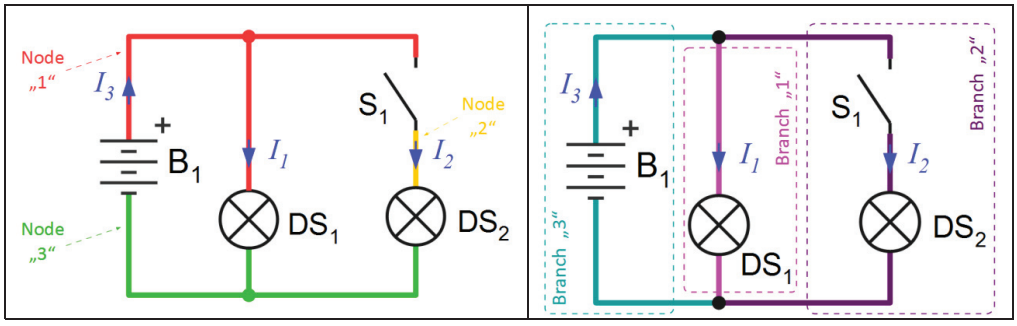
Sõlm 1: B_1 positiivne klemm – S_1 esimene klemm – DS_1 esimene klemm;

Sõlm 2: S_1 alumine klemm – DS_2 esimene klemm;

Sõlm 3: B_1 negatiivne klemm – DS_1 teine klemm – DS_2 teine klemm.

Loetletud sõlmede arv on sama, mis eelmises, valgusdioodidega näites. Kuid siin skeemis on talitlus märksa keerulisem ja vajab lähenemist voolu teekonna täpsemate omaduste arvestamisega, kuna erinevaid komponente läbiv vool võib olla erineva tugevusega. Sellise ahela töö põhimõtteid kirjeldatakse põhjalikumalt Kirchhoffi vooluseaduse peatükis.

Siin esitame selliste ahelate vaatlemise alusena hoopiski haru mõiste, mis tähistab unikaalset ühendust kahe erineva sõlme vahel. Viimases näiteskeemis toodud esituse juures saame eristada erinevad harud, nagu on selgitatud alltoodud joonisel (vt Joonis 2-7).



Joonis 2-7. Joonis 2-6 kujutatud ahela skeem koos sõlmede tähistusega (vasakul) ja harude tähistusega (paremal).

2.3 Elektriliste põhisuuruste pinge ja vool mõõtmine

Elektriahelate kõige olulisimaid talitlust kirjeldavaid parameetreid saab paljudel juhtudel mõõta suhteliselt lihtsalt. Nii saab pinget ja voolutugevust ahelas mõõta kaheklemmiliste mõõteriistadega, kuid võimsuse ja energia väärtuste mõõtmiseks on vaja kolme- ja enama-

klemmilisi ühendusi. Üks tavalisimaid mõõteriistu, millega elektriliste parameetrite väärtusi mõõta, on multimeeter, mille nimi viitab samuti ühe mõõteriistaga mitmete parameetrite mõõtevõimekusele.

Erinevate multimeetrite ülevaade on suhteliselt sama kui alltoodud näitel (vt Joonis 2-8). Turul olevate multimeetrite valik on väga lai ja palju on nii tootjaid kui ka mudeleid. Praegu on turul enamasti digitaalsed multimeetrid, mis kuvavad ekraanil konkreetse mõõtetulemuse koos mõõdetava ühikuga.

Joonis 2-8. Multimeetri ülevaade.

Analoogmõõteriistad on teisalt leitavad paljudes paigaldistes ja automaatikasüsteemides, ning on näidanud head töökindlust juba alates varajastest elektrialastest uurimistöödest. Analoogmõõteriistadel on mõõtetulemus tuvastatav skaalalt, millel oleva näidu lugemiseks on vaja jälgida mõõteriista osuti asendit (vt Joonis 2-9).

Joonis 2-9. Näited analoogmõõteriistadest: amper- ja voltmeetrist.

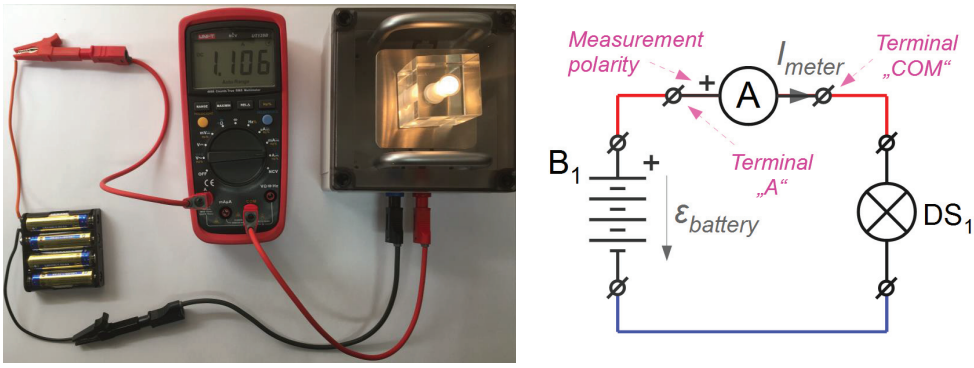
Igal mõõteriistal on mõõtefunktsioonide sooritamiseks oma viis ja mõõtmiste läbi viimiseks vajalikud korrektsed juhised on toodud mõõteriista kasutusjuhendis. Iga kord mõõtmistegevuse läbiviimisel tuleks kasutusjuhendit täpselt järgida, et tagada korrektne mõõteriista ühendusviis, õige mõõtefunktsiooni valik ja mõõteriista korrektne töö. Järgnevas ülevaates on kirjeldatud ainult kõige esmasemad ja üldisemad juhised ja ühendusviisid, mis on sarnased enamikule sarnastele mõõteriistadele.

Multimeetri kasutamisel on vaja esmalt aktiveerida mõõtefunktsioon, mille käivitamiseks peame valima mõõtefunktsiooni valiku lülitil asendi, millel on märgitud meie mõõtmise eesmärgiks oleva suuruse ühik. Näiteks, kui soovime mõõta pinget, peame valima lülitil asendi, mille juurde on märgitud “V”. Sarnane põhimõte kehtib ka voolu, takistuse jm mõõtmisfunktsioonide aktiveerimiseks.

2.3.1 Elektrivoolu tugevuse mõõtmine

Elektrivoolu tugevuse määramiseks tuleb hinnata, kui palju laengut liigub ajaühiku jooksul läbi juhtme. Füüsikalises võtmes tähendab see, et laenguhulga mõõtmiseks peab see liikuma ka läbi mõõteriista samal viisil, kui see läbiks juhet. Voolutugevuse mõõtmiseks on 2 peamist viisi.

A. Jadamõõtmine, kus on kasutuses ampermeeter kahe klemmidega: üks klemm voolu sisenemisteena ja teine voolu väljumisteena. Multimeetril on voolu mõõtmise ühendusklemmid väga sageli eraldiseisvad pinge mõõtmise klemmidest. Siiski, sarnaselt muude mõõtefunktsioonidega, on kasutuses ühine klemm (“COM”). Viimane on rakendatud ampermeetri funktsioonis negatiivse/voolu väljumise klemmina. Multimeeter tuleks ahelasse ühendada selliselt, et vool siseneb mõõteriista vooluklemmist ja väljub ühise klemmi kaudu (vt Joonis 2-10).



Joonis 2-10. Multimeeter ahelas jadamisi ehk voolutugevuse mõõtmiseks (vasakul) ja skeemi kujul (paremal).

Mõõtefunktsiooni käivitamiseks tuleb mõõtefunktsiooni valiku lüliti pöörata asendisse, mis on tähistatud voolu ühikuga (“A”). Kui mõõtetulemus ekraanil on negatiivse märgiga, siis on voolu tegelik suund läbi multimeetri vastupidine eeldatule.

Sageli on multimeetritel ka mõõtevõimekus väikesemate voolude mõõtepiirkondades, sh ühikutes milli- ja mikroamprid (mA or µA). Sellise tugevusega voolude mõõtmiseks võib mõõteriistal olla eraldi klemm, mis on erinev suurema vooluga ahela ühendusklemmist. Enne voolu mõõtmist tuleks veenduda, et oodatava voolutugevuse väärtus vastaks klemmi, mida soovite kasutada, võimekusele.

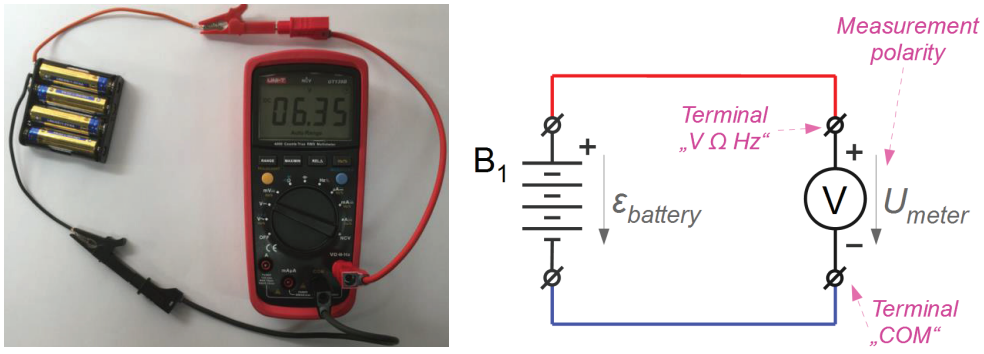
B. Voolutangidega mõõtmine

Voolutugevust saab mõõta ka kasutades nn tangidega mõõteriista, mis rakendatakse ümber juhtme. Sellised tangid on üldiselt avatavad ning mõõteriista ahelasse ühendamiseks tuleb tangid avada ja mõõdetava juhtme ümber paigutada. Sellised ampermeetrid mõõdavad tangide sisealast läbimineva voolu tugevust, ja on heaks alternatiiviks jadamõõtmistele. Nimelt saab selliselt mõõta voolutugevust ilma, et ahelat tuleks katkestada või ümber ühendada (vt Joonis 2-11).

Joonis 2-11. Näide ampertangidest voolutugevuse mõõtmiseks ahelas.

2.3.2 Pinge mõõtmine

Pinge mõõtmisel võrreldakse elektrilise potentsiaali väärtust (potentsiaali vahet) kahe punkti/juhtme vahel. Pinge mõõtmiseks peab olema kasutuses kaks ühendust. Multimeetriga pinge mõõtmiseks tuleb ühendused teha multimeetril oleva pinge mõõtmise klemmi (märgitud kui “V Ω Hz” allolevas näites) ja multimeetri üldise klemmi vahel. Pinge mõõtmisel tuleb tähele panna ka multimeetri polaarsust, nimelt on ühine klemm kasutuses kui voltmeetri negatiivne klemm ja “V Ω Hz” kui positiivne klemm (vt Joonis 2-12).

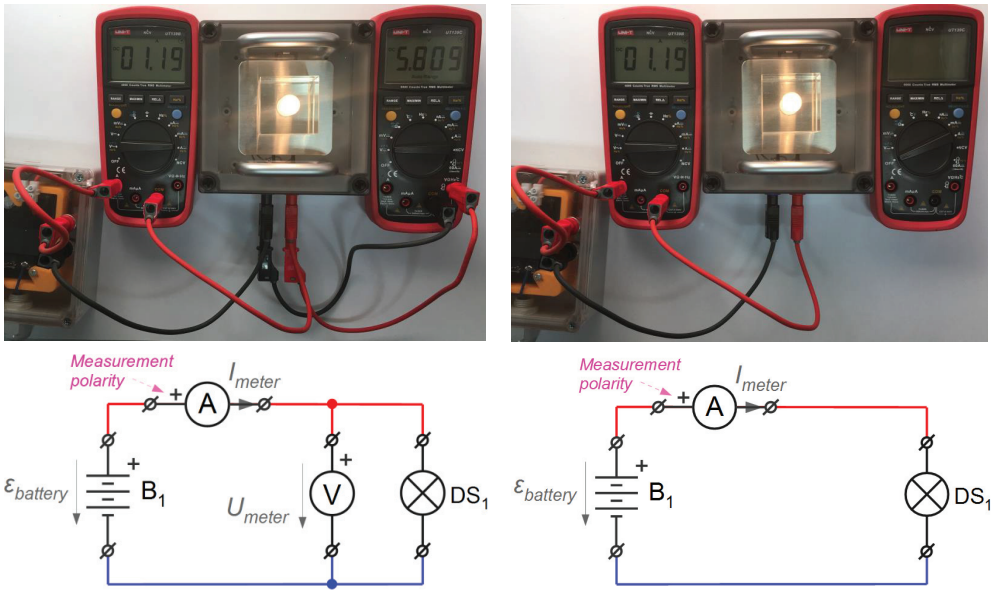


Joonis 2-12. Multimeeter ahelas pinge mõõtmiseks (vasakul) ja skeemi kujul (paremal).

Pinge mõõtmiseks tuleb mõõtefunktsiooni lüliti keerata asendisse, mis on märgitud pinge ühikuga “V”. Kui mõõtetulemus on positiivne, siis on mõõdetava pinge polaarsus sama, kui multimeetri klemmidel.

Multimeetritel on sageli ka funktsioonid väikesemate pingete väärtuste mõõtmiseks, ühikutes milli-voldid (mV). Kasutades multimeetrit väikeste pingete mõõtmiseks, tuleb veenduda, et kasutatavad klemmid on ette nähtud väikeste pingesuuruste mõõtmiseks.

Multimeetriga pinge mõõtmist võib vaadelda kui peaaegu ideaalset koormuseta olekut. Siin tähendab see, et pinge mõõtmisel kahe punkti vahel liigub läbi voltmeetri mõõteklemmide mõne mikro- või mõnesaja nanoampri suurune vool (st voolutugevus läbi voltmeetri on peaaegu 0). Seetõttu enamikel juhtudel võime pinge mõõtmisel arvestada, et multimeetri kasutamises ei ole ahela talitlusel näha pea mingit mõju. Seda iseloomustab ka alljärgneval näitel toodud juhtum (vt Joonis 2-13), kus mõõdetavad suurused ahelas (pinge ja vool) ei muutu, kui ahelasse lisada rööbiti veel täiendav voltmeetri funktsioonis multimeeter.



Joonis 2-13. Pinge ja voolutugevuse mõõtmine ühes ahelas.

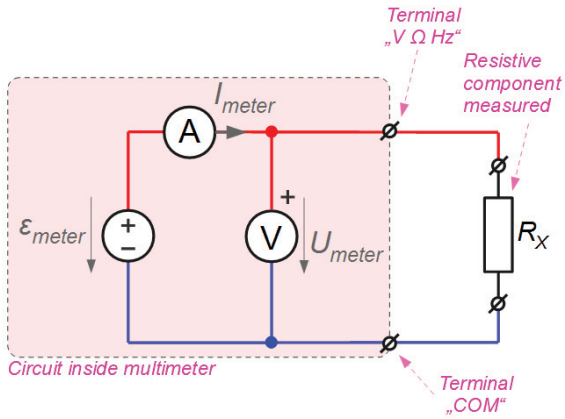
2.3.3 Takistuse mõõtmine

Elektriline takistus on suurus, mis iseloomustab komponendi klemmidel esineva pinge ja komponenti läbiva voolu tugevuse vahelist suhet. See tähendab, et takistuse määramiseks tuleb nüüd mõõta korraga nii pinge suurust kui ka voolutugevuse väärtust samal ajal.

Takistuse mõõtmise funktsiooniga multimeetrid kasutavad nende endi sisemisi patareisid selleks, et töötada mõõdetava komponendi jaoks vooluallikana. Ühendades komponendid multimeetri klemmidega, hakkab sellest allika töö tõttu läbi liikuma elektrivool. Mõõtes nüüd komponendi klemmidel oleva pinge väärtuse samal ajal ja teades voolu väärtust, arvutatakse mõõtetulemuseks saadud takistuse väärtus kui

$$R_{mõõdetud} = \frac{U_{mõõdetud}}{I_{mõõdetud}} .$$

Lihtsaima takistuse mõõtmise teostamiseks tuleks ühendada multimeetri klemmid otse mõõdetava komponendiga (vt Joonis 2-14). Peale takistuse mõõtefunktsiooni käivitamist hakkab tööle multimeetri sisemine vooluallikas, voolu läbiminekul komponendist esineb selle klemmidel pinge. Multimeeter mõõdab pinge väärtuse läbi välisahela ja pinge multimeetri klemmidel, ning kuvab ekraanil otse takistuse väärtuse.

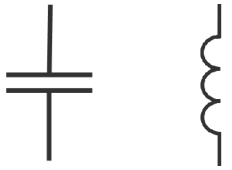


Joonis 2-14. Multimeeter takistuse mõõtmisel (vasakul) ja skeem (paremal).

2.4 Enesekontrolliks

1. Missugused komponendid vastavad allpool kujutatud tingmärkidele:

   1) 2)



   Vali vastus:

   A) 1 – Induktiivpool, 2 – Kondensaator

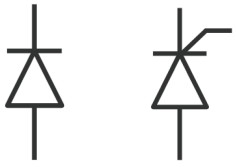
   B) 1 – Kaitse, 2 – Diood

   C) 1 – Kondensaator, 2 – Takisti

   D) 1 – Kondensaator, 2 – Induktiivpool

2. Missugused komponendid vastavad allpool kujutatud tingmärkidele:

   1) 2)



   Vali vastus:

   A) 1 – Diood, 2 – Türistor

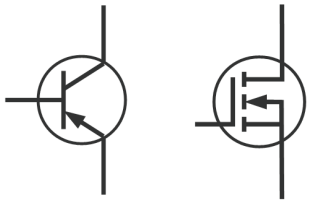
   E) 1 – LED / valgusdiood, 2 – Türistor

   F) 1 – Türistor, 2 – Diood

   G) 1 – Diood, 2 – LED / valgusdiood

3. Missugused komponendid vastavad allpool kujutatud tingmärkidele:

   1) 2)



Vali vastus:

A) 1 – PNP-transistor, 2 – N-kanaliga väljatransistor

B) 1 – PNP-transistor, 2 – P-kanaliga väljatransistor

C) 1 – NPN-transistor, 2 – P-kanaliga väljatransistor

D) 1 – NPN-transistor, 2 – N-kanaliga väljatransistor

4. Missugused komponendid on vajalikud, et koostada toimiva vooluringiga elektriahel?

Vali vastus:

A) Allikas, koormus ja maandus

B) Allikas, koormus ja juhtmed

C) Koormus, juhtmed ja lüliti

D) Valgusallikas, juhtmed ja takisti

5. Kuidas kutsutakse olukorda, mil voolul on ahelas liikumiseks täiendav haru, mis juhib nii hästi voolu, et koormuse läbimise asemel liiguvad laengud hoopis läbi selle haru?

Vali vastus:

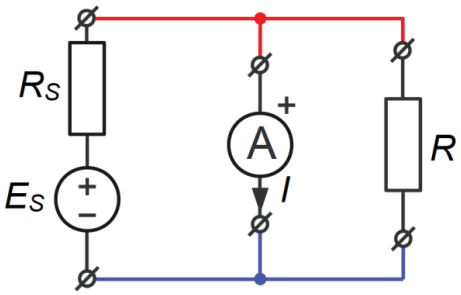
A) Lühis

B) Suletud ahel

C) Lülitus

D) Avatud vooluring

6. Ahel koosneb allikast elektromotoorjõuga E_s = 12 V ja sisetakistusega R_S = 1 Ω ning takistist R = 9 Ω. Missuguse väärtusega voolutugevuse I_m näitu saab lugeda ampermeetri ekraanilt?



Vali vastus:

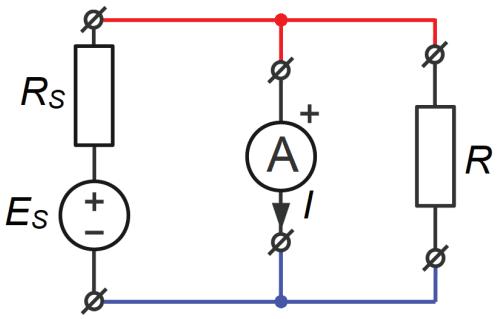
A) 5 A

B) 1,2 A

C) 12 A

D) 0

7. Ahel koosneb allikast elektromotoorjõuga E_s = 12 V ja sisetakistusega R_S = 1 Ω ning takistist R = 9 Ω. Missuguse väärtusega pinge U_m näitu saab lugeda voltmeetri ekraanilt?



Vali vastus:

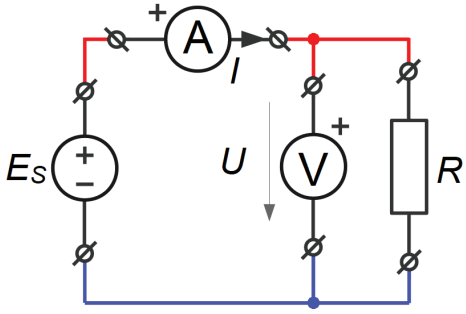
A) 0

B) 12 V

C) 10 V

D) 5 V

8. Ahel koosneb allikast E_s ja takistist R, mis on jadamisi ampermeetriga ning rööbiti voltmeetriga. Mis on mõõdetava takistuse väärtus, kui voltmeetri näit on U_m = 10 V ja ampermeetri näit on I_m = 5 mA?



Vali vastus:

A) 2 Ω

B) 0,5 Ω

C) 1 kΩ

D) 2 kΩ

9. Kuidas nimetatakse seadet, mis suudab mõõta mitmeid erinevaid elektriahela parameetreid?

   Vali vastus:

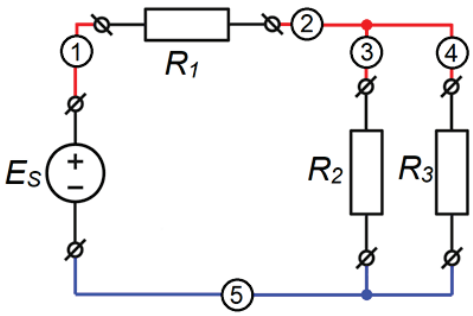
   A) Ampermeeter

   B) Voltmeeter

   C) Potentsiomeeter

   D) Multimeeter

10. Kuhu peaks ahelas ühendama ampermeetri, et mõõta voolutugevust läbi takisti R3?



   Vali vastus:

   A) 1

   B) 2

   C) 3

   D) 4

   E) 5

3 KIRCHHOFFI VOOLUSEADUS

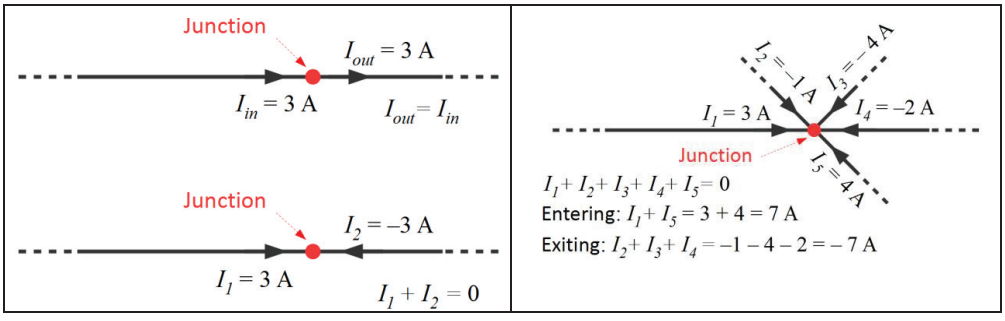
Tuleb arvestada, et elektronid ei saa liikumisel koguneda kokku lõpmata suureks kogumiks, kuna nad tõukuvad teineteisest samamärgilise laengu tõttu. Suures kogumis on vaja väga suurt välist jõudu, mis hoiaks elektrone koos (seda selgitatakse hiljem ka mahtuvusest rääkides) ja sellega kaasneb suur energiakulu. Pane tähele, et sellises kogunemise protsessis elektronide arv süsteemis ei muutu (elektronide loomiseks või kaotamiseks oleks tarvis tuumareaktsiooni).

3.1 Kirchhoff'i seadus sõlmpunkti kohta

Kirchhoff'i voolu seadus määrab laengute (ja ka ühtlasi voolutugevuste) suuruste muutumatuse ahela iga sõlme kohta. Juhtme igat punkti võime samuti vaadelda kui lihtsat sõlme, milles on kaks ühendust. Loomulikult igas juhtme punktis peab sinna sisenevate elektronide arv võrduma samast kohast väljuvate elektronide arvuga. See kehtib iga ajahetke kohta, mis ühtlasi tähendab, et vool, mis siseneb juhtme antud punkti, on võrdne sellest punktist väljuva vooluga (vt Joonis 3-1). Seda saab suuremas plaanis vaadelda sõlmede kohta käivana, ja selle matemaatiline avaldis on

$$\sum_{i=1}^{N_{sisse}} I_{sisse,i} = \sum_{j=1}^{N_{välja}} I_{välja,j} \ ,$$

kus N_{sisse} on sõlme sisenevate vooludega ühenduste arv ja $N_{välja}$ on sõlmest väljuva suunaga vooludega ühenduste arv. $I_{sisse,i}$ on i-s sõlme siseneva vooluga ühendus ja $I_{välja,j}$ on j-s sõlmest väljuva vooluga ühendus.



Joonis 3-1. Voolutugevus juhtme mingis punktis. Vool siseneb ja väljub punktist erineva märgiga voolutugevusega (vasakul ülal), sama ahel voolude teisendatud kujutisega (vasakul all); mitme ühendusega punkti selgitus (paremal).

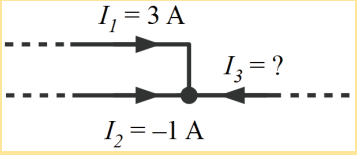
Eelnevast on teada, et voolutugevuse märk näitab ka tema suunda, seega sõlme siseneval ja sõlmest väljuval voolul on vastupidised märgid (vt Joonis 3-1). Kui voolutugevuste väärtused on võrdsed, siis nende summa on alati 0.

Kui me vaatleme lähemalt, siis see kehtib ka rohkemate ühenduste korral ühe sõlme kohta. Siit saamegi Kirchhoff'i vooluseaduse püstituse – sõlmega seotud ühenduste voolutugevuste summa on alati võrdne 0 (vaata Joonis 3-1).

$$\sum_{i=1}^{N} I_i = 0,$$

kus *N* on erinevate ühenduste arv sõlmes ja I_i on voolutugevus läbi *i*-nda ühenduse.

Näide. Sõlmpunkt ühendab 3 juhet. Kahe ühenduse voolutugevused mõõdetakse. Milline on kolmanda voolujuhi voolutugevus?



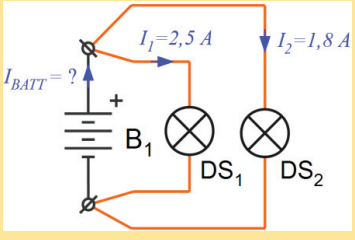
Lahendus: Kirchhoffi vooluseadus ütleb, et sõlme koonduvate juhtmete voolutugevuste summa peab olema 0. See tähendab, et

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

Kuna I_1 ja I_2 voolutugevused on mõõtmisest teada, siis on vaja arvutada I_3 väärtus. Avaldades ülaltoodud valemi, saame

$$I_3 = -I_1 - I_2 = -3 + 1 = -2 \text{ A}.$$

Näide. Patarei toidab kahe lambipirniga ahelat. Vool läbi esimese lambi on 2,5 A ja läbi teise 1,8 A. Leia patareid läbiv koguvoolutugevus.



Lahendus. Ülal skeemil patarei klemmid on sõlmpunktid, millesse sisenev vool on patareid läbiv koguvool ning väljuvad voolud on kummagi lambi haru suunas. Väljuvate voolude summa on seega

$$I_{välja} = I_1 + I_2.$$

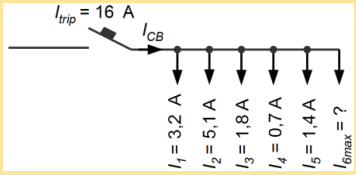
Sisenevate ja väljuvate voolude summa sõlmpunktis peab olema 0. Kuna patareid läbiv vool on ainus sisenev vool sõlmpunkti, siis

$$I_{sisse} = I_{välja} \Rightarrow I_{BATT} = I_1 + I_2.$$

Seega

$$I_{BATT} = 2,5 + 1,8 = 4,3 \text{ A}.$$

Näide. Erinevad koormused saavad toite elektrikilbist, milles on kaitselüliliti nimivooluga 16 A (st voolutugevus, mille korral kaitselüliti ahela katkestab ehk kaitselüliti rakendub). Koormused väärtustega 3,2 A; 5,1 A; 1,8 A; 0,7 A ja 1,4 A on juba kaitselülitiga ühendatud ja tahetakse lisada veel koormust. Kui suur voolutugevus võib lisatavat koormust läbida, ilma et kaitselüliti rakenduks ja ahelat katkestaks?



Lahendus. Ülaltoodud joonisel on ahela skeem, millel kõik koormused on kujutatud ühel liinil, ent erinevates sõlmpunktides. Kuna sõlmpunktide vahel on vaid juhe, siis võib lugeda liinil olevaid sõlmpunkte üheks suureks sõlmpunktiks, millesse sisenev vool on kaitselülitit läbiv vool I_{CB} ja väljuvad voolud on kõikide koormuste voolud I_1 … I_6.

$$I_{sisse} = I_{välja} \Rightarrow I_{CB} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Ühendus toimib, kui $I_{CB} <= I_{rak}$ (väiksem või võrdne rakendumisvooluga). Maksimaalne võimalik voolutugevus on $I_{CB} = I_{rak}$,

$$I_{rak} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6 .$$

Voolutugevused I_1 … I_5 on teada ja seega on ainsaks tundmatuks I_6. Avaldades ülaltoodud valemit, saame

$$I_6 = I_{rak} - \left(I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5\right)$$

Seega maksimaalne lubatud voolutugevus I_6, mille korral kaitselüliti ei rakendu, on

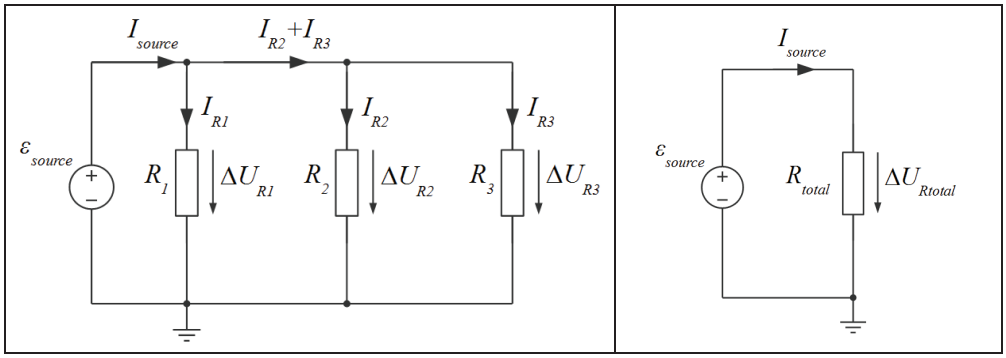
$$I_6 = 16 - \left(3{,}2 + 5{,}1 + 1{,}8 + 0{,}7 + 1{,}4\right) = 16 - 12{,}2 = 3{,}8\ \text{A} .$$

3.2. Rööpühendus

Rööpühendus ehk paralleelühendus on ahela topoloogias osa, milles mitu erinevat haru on ühendatud kahe sõlme vahele. Sellise ahela näide on esitatud allolevas näiteskeemis (vt Joonis 3-2), kus 3 erinevat haru takistitega R_1, R_2 ja R_3 on ühendatud täpselt samal viisil punkti/sõlme vahele. See tähendab, et pingete väärtused kõigi nimetatud takistite klemmidel on omavahel võrdsed ($\Delta U_{R1} = \Delta U_{R2} = \Delta U_{R1}$). Iga takistit selles ühenduses võib vaadelda kui otse allika klemmidele ühendatud takistit, mille pinge on $\Delta U_{Rx} = \mathcal{E}_{allikas}$. Takistit läbiva voolutugevuse saab leida Oomi seaduse alusel seosega

$$I_x = \frac{\mathcal{E}_{allikas}}{R_x}$$

Vaatleme ahelat ja tema parameetreid lähemalt.



Joonis 3-2. Näide ahelast, kus on rööbiti harudes 3 takistit (vasakul) ja ekvivalentse ahela skeem, kus takistid on teisendatud ahela kogutakistuseks (paremal).

Järgnevas mõttekäigus on takistite takistuste väärtused:

R_1 = 6 Ω;

R_2 = 6 Ω;

R_3 = 3 Ω.

Valemid ja arvutustulemused ahela parameetrite määramisel on esitatud Tabel 3-1.

Tabel 3-1. Valemid ja arvutustulemused rööpahela parameetrite määramisel

Allika emj $\varepsilon_{allikas}$, V	Vool I_1, A	Vool I_2, A	Vool I_3, A	Allika vool $I_{allikas}$, A	Ahela kogutakistus R, Ω
	$I_1 = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_1}$	$I_2 = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_2}$	$I_3 = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_3}$	$I_{allikas} = I_1 + I_2 + I_3$	$R_{ekv} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{I_{allikas}}$
6	1	1	2	4	1,5
12	2	2	4	8	1,5
18	3	3	6	12	1,5

Tulemused Tabel 3-1 näitavad, et ahela kogutakistuse väärtus (1,5 Ω) on konstantne, olenemata allika elektromotoorjõu (emj) ja voolutugevuse muutuvatest väärtustest. Kogutakistus (ekvivalentne takistus) kirjeldab sellist ahela komponenti, mida läbib sama voolutugevus, kui ahela klemmidele ühendatud takistite kogumit, kui nende klemmidele rakendatakse sama emj väärtus (vt Joonis 3-2). Selles mõttekäigus peitub hea meetod ahela, milles on suur arv takisteid (komponente), analüüsimiseks.

Rööpühenduses takistite summaarne takistus ehk kogutakistus on alati väiksem kui kõige väiksema väärtusega takisti antud rööpühenduses. Kogutakistuse väärtust saab rööpahelates arvutada välja järgmise valemi abil

$$\frac{1}{R_{ekv}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_N},$$

kus summa sisaldab kõiki takisteid, mis on omavahel rööbiti ühendatud (st ühendatud täpselt samade 2 sõlme vahele), alates R_1 kuni N-nda takistini.

Kui rööbiti on ühendatud vaid kaks takistit, siis nende summaarse takistuse leidmiseks on olemas lihtne valem

$$R_{ekv} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

Pane tähele, et viimane valem kehtib vaid kahe rööbiti takistuse summaarse takistuse leidmiseks.

Samuti, kui rööbiti on ühendatud N identset takistit takistusega R, siis nende takistite summaarne takistust on

$$R_{ekv} = \frac{R}{N}.$$

Näide. Takistid takistustega 4 Ω, 6 Ω ja 10 Ω on ühendatud rööbiti. Kui suur on antud ahela kogutakistus?

Lahendus. Kuna takistuste väärtused on antud, siis saame kasutada alljärgnevat valemit

$$\frac{1}{R_{ekv}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

Arvutame

$$R_{ekv} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = \frac{1}{\frac{1^{(\cdot 15}}{4} + \frac{1^{(\cdot 10}}{6} + \frac{1^{(\cdot 6}}{10}} = \frac{1}{\frac{15+10+6}{60}} = \frac{60}{31} \sim \mathbf{1,94\ \Omega}.$$

Näide. Ahelas on vaja saavutada kogutakistus 17 Ω. Kasutada on ainult 100 Ω takistid. Mitu 100 Ω takistit peaksime ühendama rööbiti, et saavutada ahelas nõutud 17 Ω takistuse koguväärtus?

Lahendus. Kuna rööbiti ühendatud takistitel on alati summaarne takistus väiksem kui kasutatud kõige madalama takistuse väärtus, siis on võimalik ülal nõutud tulemus saavutada. Ühendades takisteid rööbiti, saame kogutakistuseks

$$R_{ekv} = \frac{R_{takisti}}{N}$$

Antud valemist saame tuletada vajamineva 100 Ω takistite arvu

$$N = \frac{R_{resistor}}{R_{required}} = \frac{100}{17} \sim 5,9$$

Leitud vastus on ligilähedane 6-le, seega ümardame vastuse 6-ks, sest kasutada saame vaid täisarvu takisteid. Kontrollime tulemust 6 rööbiti takistuse korral

$$R_{ekv} = \frac{R_{takisti}}{N} = \frac{100}{6} = 16,7\ \Omega.$$

Siin vastus erineb nõutust $\Delta R = R_{ekv} - R_{nõutud}$ = 0,3 Ω võrra. Protsentuaalselt erineb vastus

$$\frac{\Delta R}{R_{nõutud}} \cdot 100\% = \frac{0,3}{17} \cdot 100\% = 1,8\%$$

Selline kõrvalekalle nõutud takistuse väärtusest on paljudel juhtudel aktsepteeritav.

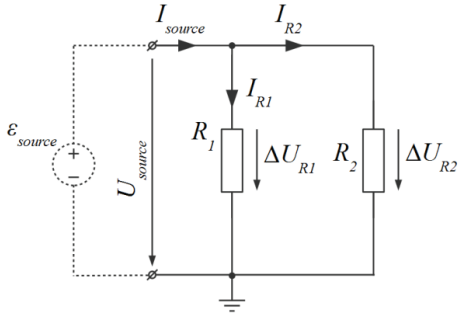
3.3. Voolujagur

Voolujaguriks nimetatakse ahelat, kus on 2 või enam rööbiti ühendatud takistit (vt Joonis 3-3). Ahel saab toite allikast, mida allikat läbib vool $I_{allikas}$ ja see jaguneb rööbiti harude vahel vastavalt takistustele R_1 (vool I_{R1}) ja R_2 (vool I_{R2}),

$$I_{allikas} = I_{R1} + I_{R2}$$

Vaatleme näidet arvuliste väärtusega. Eeldame, et takistite ja allika pinge väärtused on:

- R_1 = 5 Ω;
- R_2 = 15 Ω;
- $\varepsilon_{allikas}$ = 10 V



Joonis 3-3. Voolujaguriga ahela skeem.

Kuna allikas on ühtmoodi ühendatud mõlema takisti klemmidega, siis pinge takistitel on võrde allika pingega $U_{allikas} = \varepsilon_{allikas}$ ja voolutugevused saab leida Oomi seadust rakendades

$$I_{R1} = \frac{U_{allikas}}{R_1} = \frac{10}{5} = 2,0 \text{ A}; I_{R2} = \frac{U_{allikas}}{R_2} = \frac{10}{15} \sim 0,7 \text{ A}.$$

Seejuures

$$I_{allikas} = I_{R1} + I_{R2} = 2,0 + 0,7 = 2,7 \text{ A}.$$

Teisiti lähenedes, rööpühenduse üldistest reeglitest lähtudes (vt üleval) saame kasutada rööpühenduse kogutakistuse leidmise valemit

$$R_{total} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow I_{allikas} = \frac{U_{allikas}}{R_{ekv}} = \frac{U_{allikas} \cdot (R_1 + R_2)}{R_1 \cdot R_2} = \frac{10 \cdot (5+15)}{5 \cdot 15} = \frac{200}{75} \sim 2,7 \text{ A}$$

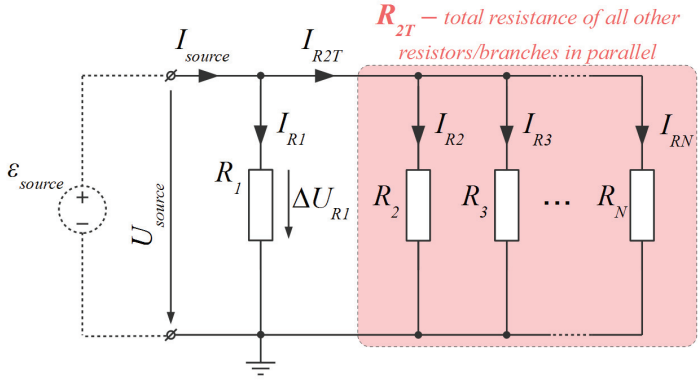
Vooluosa läbi takisti R_1 on võrdne

$$\frac{I_{R1}}{I_{allikas}} = \frac{\frac{U_{allikas}^{1}}{R_1}}{\frac{U_{allikas}^{1}\cdot(R_1+R_2)}{R_1\cdot R_2}} = \frac{\frac{1}{R_1}}{\frac{(R_1+R_2)}{R_1\cdot R_2}} = \frac{\frac{R_1^{1}}{R_1}\cdot R_2}{\frac{R_1^{1}}{R_1}(R_1+R_2)},$$

kus I_{R1} määramiseks saame kasutada valemit

$$I_{R1} = \frac{R_2}{R_1+R_2} I_{allikas} = \frac{15}{5+15}\cdot 2{,}67 = 2{,}0\ \text{A}.$$

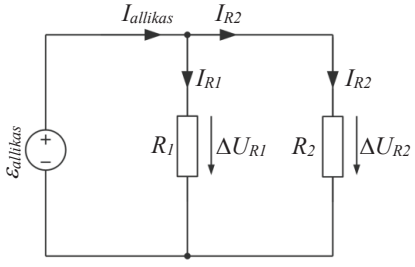
Sealjuures, teades $I_{allikas}$ väärtust, saame määrata I_{R1} väärtuse kasutades ainuüksi takistuste väärtusi ühes lihtsas avaldises. Pane tähele, et keerulisemates ahelates R_2 takistuse väärtus on kõikide teiste rööpühenduses olevate takistite/ harude summaarse takistuse väärtus.



Joonis 3-4. Voolujaguri arvutusreegli selgitus.

$$I_{R1} = \frac{R_{2T}}{R_1+R_{2T}}\cdot I_{allikas}.$$

Näide. Joonisel 3-5 toodud ahela allika vooluks mõõdetakse $I_{allikas}$ = 4 A. Takisti R_1 on 3 Ω ja teine takisti on 5 Ω. Kui suur vool läbib takistit R_1?



Joonis 3-5. Näiteülesande voolujaguri skeem.

Lahendus. Ülesande saab lahendada kui vaatleme skeemi kui voolujagurit. On teada takistuste väärtused ja allikat läbiva voolutugevuse väärtus. Seega saame voolutugevuse leidmiseks rakendada voolujaguri valemit

$$I_{R1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I_{allikas} = \frac{5}{3+5} \cdot 4 = 2{,}5\ \text{A}.$$

Seega takistit R_1 läbib voolutugevus (I_{R1}) 2,5 A.

3.4. Enesekontrolliks

1. Kirchhoffi vooluseadus ütleb, et …

   Vali vastus:

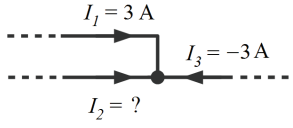
   A) igasse sõlmpunkti peab olema ühendatud vähemalt kaks voolujuhti

   B) energiat ei teki ega kao, vaid muundatakse ühest liigist teise

   C) igas juhtme osas peab sõlme kohta sisenevate elektronide arv võrduma sõlmest väljuvate elektronide arvuga

   D) vool saab eksisteerida vaid elektriliselt juhtivates materjalides

2. Sõlmpunkt ühendab kolme erinevat juhet, kusjuures kahe juhtme voolutugevused on teada. Mis on voolutugevus läbi 2. juhtme?



   Vali vastus:

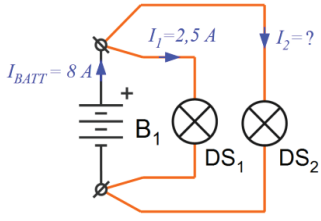
   A) 6 A

   B) 0

   C) 3 A

   D) - 6 A

3. Patarei toidab kahe lambipirniga ahelat. Vool esimeses lambis on 2,5 A ja allikat läbib voolutugevus 8 A. Leia teist lampi läbiv voolutugevus?



Vali vastus:

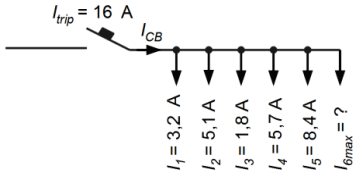
A) 5,5 A

B) 1,8 A

C) 8 A

D) 0

4. Erinevad koormused saavad toite elektrikilbist, milles on kaitselüliti nimivooluga 16 A (st voolutugevus, mille korral kaitselüliti ahela katkestab ehk kaitselüliti rakendub). Koormused voolutugevuste väärtustega 3,2 A; 5,1 A; 1,8 A; 5,7 A ja 8,4 A on juba kaitselülitiga ühendatud ja tahetakse lisada veel koormust. Kui suur voolutugevus võib lisatavat koormust läbida, ilma et kaitselüliti ahelat katkestaks?



Vali vastus:

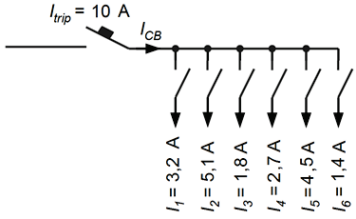
A) 8,2 A

B) 1,1 A

C) 16 A

D) 0 (kaitselüliti rakendub igal juhul)

5. Erinevad koormused saavad toite elektrikilbist, milles on kaitselüliti nimivooluga 10 A (st voolutugevus, mille korral kaitselüliti ahela katkestab ehk kaitselüliti rakendub). Koormused väärtustega 3,2 A; 5,1 A; 1,8 A; 2,7 A; 4,5 A ja 1,4 A on kaitselülitiga ühendatud. Mitu erinevat koormust võib maksimaalselt korraga sisse lülitada, ilma et kaitselüliti ahelat katkestaks?



Vali vastus:

A) 1

B) 2

C) 3

D) 4

E) 5

F) 6

6. Takistid väärtustega 100 Ω, 25 Ω ja 5 Ω on ahelas rööbiti. Mis on antud ahela summaarne takistuse väärtus?

   Vali vastus:

   A) 4 Ω

   B) 0,25 Ω

   C) 25 Ω

   D) 1 Ω

7. Ahelas on vaja saavutada kogutakistus 5,5 Ω. Kasutada on ainult 50 Ω takistid. Mitu 50 Ω takistit peaksime ühendama rööbiti, et saavutada ahelas nõutud 5,5 Ω takistuse koguväärtus?

   A) 7

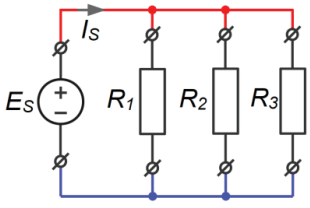
   B) 8

   C) 9

   D) 10

   E) 11

8. Takistid väärtustega R_1 = 20 Ω, R_2 = 15 Ω ja R_3 = 12 Ω on ühendatud rööbiti allikaga, mille emj on E_s = 10 V. Mis on allikat läbiva voolutugevuse I_s väärtus?



   A) 50 A

   B) 2 A

   C) 0,2 A

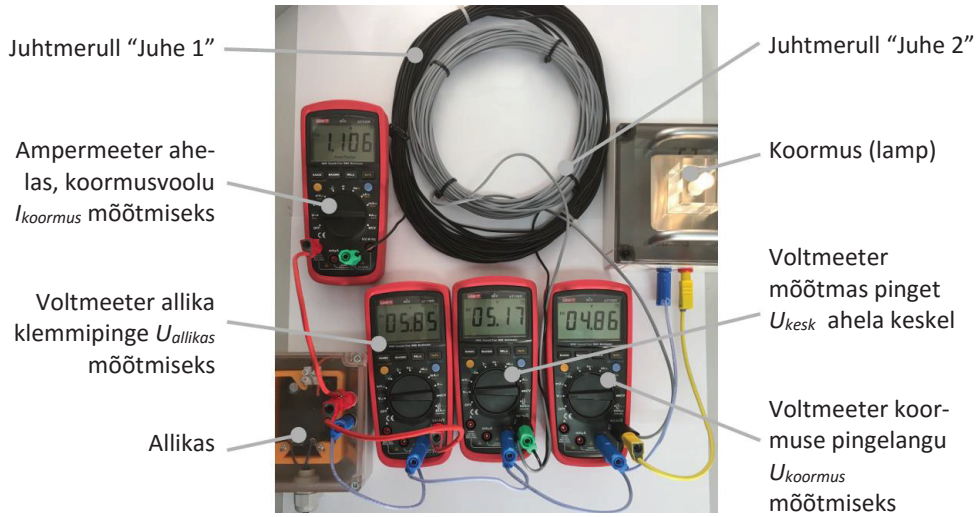
   D) 5 A

4. KIRCHHOFFI PINGESEADUS

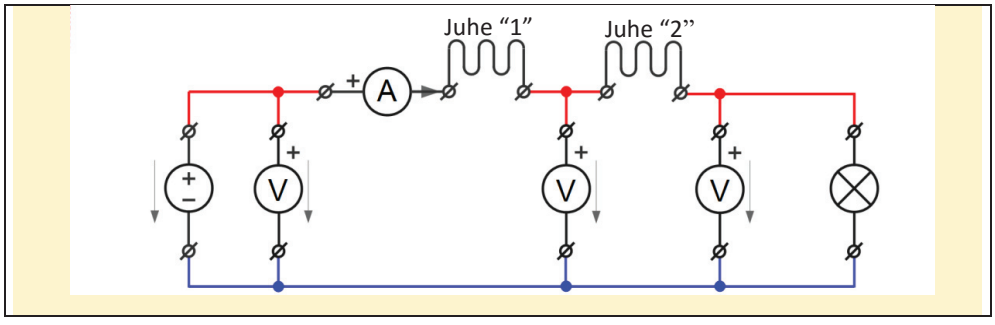
4.1. *Vool ja pinge jadaahelas*

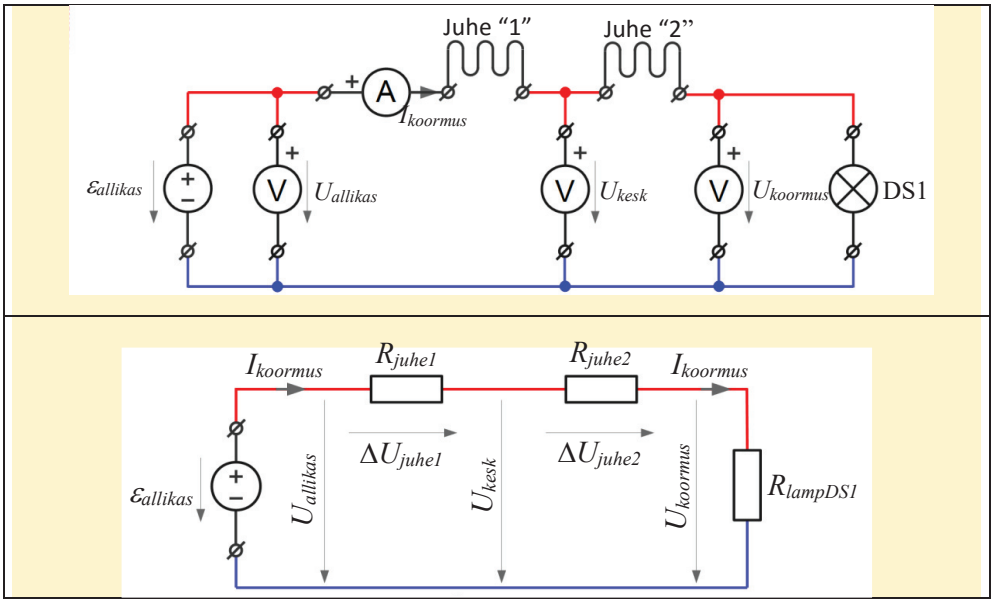
Kirchhoffi pingeseaduse selgitamiseks, vaatleme esmalt jadaahelat, milles on ühendatud järjestikku allikas, koormus ja juhtmed.

Näide. Ahela tegelik kuju on Joonis 4-1 koos mõõtetulemustega, selle elektriskeem on esitatud Joonis 4-2.



Joonis 4-1. Jadaühenduses ahel Kirchhoff'i pingeseaduse selgitamiseks.





Joonis 4-2. Näiteahela (vt Joonis 4-1) esitus elektriskeemis koos mõõteriistadega (üleval) ja selle lihtsustatud kuju (all).

Mõõtetulemused on toodud allpool tabelis (vt

Tabel 4-1).

Leida: juhtmete takistused R_{juhe1} ja R_{juhe2}, pingelang juhtmetel (ΔU_{juhe1} ja ΔU_{juhe2}), ja koormuse takistus $R_{koormus}$. Lisaks määra võimsused ahela erinevatel komponentidel: allika koguvõimsus $P_{allikas}$, juhtmetel eralduv võimsus P_{juhe1} and P_{juhe2}, ja koormuse võimsus $P_{koormus}$.

Tuleb märkida, et positiivne osa ahelast koosneb takistavatest juhtmetest (“Juhe “1” ja “Juhe “2””), ent ahela negatiivne osa tuleb lugeda ideaalseks ühenduseks. Seega saame lugeda ahela negatiivset osa ehk allika miinusklemmilt kuni koormuse klemmini kui ühte punkti.

Tabel 4-1. Mõõtetulemused Joonis 4-2 kujutatud ahela kohta.

Suurus	Mõõtetulemus	Suurus	Mõõtetulemus
$I_{koormus}$	1,11 A (1,106 A ümardamata)	$U_{allikas}$	5,85 V
		U_{kesk}	5,17 V
		$U_{koormus}$	4,86 V

Lahendus. Algandmetena saame kasutada mõõteseadmetelt saadud mõõtetulemusi, vt

Tabel 4-1. Kõigepealt aga kirjeldame pingete väärtuste määramise üldiseid põhimõtteid.

- Pingelang “Juhtmel 1” on pingete erinevus selle juhtme otspunktide vahel. Allikapoolne otspunkt on pingega $U_{allikas}$ ja teise otsa pinge on U_{kesk}

$$\Delta U_{juhe1} = U_{allikas} - U_{kesk}.$$

- Pingelang “Juhtmel 2” on pingete erinevus selle juhtme otspunktide vahel. Allikapoolne otspunkt on pingega U_{kesk} ja teise otsa pinge on $U_{koormus}$

$$\Delta U_{juhe2} = U_{kesk} - U_{koormus}.$$

Teades pingete väärtuseid juhtmete otspunktidel ja voolutugevust juhtmes, saame leida juhtme takistuse väärtuse, kasutades Oomi seadust. Loeme voltmeetrid ideaalseteks mõõteseadmeteks ja voolutugevus voltmeetrites on seega 0. Seega voolutugevus $I_{koormus}$, mis läbib allikat, läbib sama tugevusega ka juhtmeid ja koormust.

- “Juhtme 1” takistuse väärtuse R_{juhe1} leidmiseks saame kasutada ülal kirjeldatud pingelangu ja Oomi seadust

$$R_{juhe1} = \frac{\Delta U_{juhe1}}{I_{koormus}}.$$

- “Juhtme 2” takistuse väärtuse R_{juhe2} leidmiseks saame samuti kasutada ülal kirjeldatud pingelangu ja Oomi seadust

$$R_{juhe2} = \frac{\Delta U_{juhe2}}{I_{koormus}}.$$

Koormuse takistuse väärtuse $R_{koormus}$ leidmiseks kasutama voltmeetri näitu $U_{koormus}$ ja Oomi seadust

$$R_{koormus} = \frac{U_{koormus}}{I_{koormus}}.$$

Et leida komponendis eralduvat võimsust, peame rakendama Joule Lenz’i seadust voolu ja takistusega või kasutama pinge ja voolutugevuse korrutist.

Allika võimsuse määramiseks peab korrutama allikat läbiva voolutugevuse ja allika elektromotoorjõu väärtuse. Kuna antud näites loetakse allika sisetakistuseks 0, siis elektromotoorjõu väärtus $\varepsilon_{allikas}$ on võrdne klemmipingega $U_{allikas}$

$$P_{allikas} = \varepsilon_{allikas} \cdot I_{koormus} = U_{allikas} \cdot I_{koormus}.$$

Koormuse võimsuse leidmiseks kasutame voltmeetri näitu $U_{koormus}$ ja ampermeetrilt voolutugevuse näitu $I_{koormus}$

$$P_{koormus} = U_{koormus} \cdot I_{koormus}.$$

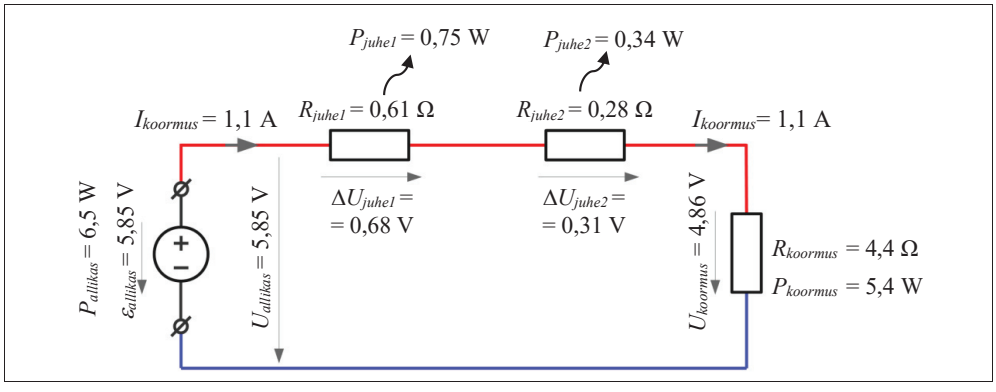
Takistil eraldunud võimsuse leidmiseks kasutame ampermeetri näitu $I_{koormus}$ ja juhtme takistuse R_{juhe} väärtust või juhtme pingelangu ΔU_{juhe} ja voolutugevuse $I_{koormus}$ korrutist

$$P_{juhe1} = I_{koormus}^{\ 2} \cdot R_{juhe1} = \Delta U_{juhe1} \cdot I_{koormus}$$
$$P_{juhe2} = I_{koormus}^{\ 2} \cdot R_{juhe2} = \Delta U_{juhe2} \cdot I_{koormus}$$

Arvutustulemused on esitatud Tabel 4-2 ja Joonis 4-3.

Tabel 4-2. Näiteülesande lahenduse arvutustulemused.

Arvutatud suurus	Arvutatud väärtus	Arvutatud suurus	Arvutatud väärtus
ΔU_{juhe1}	$U_{allikas} - U_{kesk} = 5,85 - 5,17 =$ $= 0,68$ V	$P_{allikas}$	$P_{allikas} = \varepsilon_{allikas} \cdot I_{koormus} =$ $= 5,85 \cdot 1,11 = 6,5$ W
ΔU_{juhe2}	$U_{kesk} - U_{koormus} = 5,17 - 4,86 =$ $= 0,31$ V	P_{juhe1}	$P_{juhe1} = I_{koormus}^{\ 2} \cdot R_{juhe1} =$ $= 1,11^2 \cdot 0,61 = 0,75$ W
R_{juhe1}	$R_{juhe1} = \frac{\Delta U_{juhe1}}{I_{koormus}} = \frac{0,68}{1,11} = 0,61\,\Omega$	P_{juhe2}	$P_{juhe2} = I_{koormus}^{\ 2} \cdot R_{juhe2} =$ $= 1,11^2 \cdot 0,28 = 0,34$ W
R_{juhe2}	$R_{juhe2} = \frac{\Delta U_{juhe2}}{I_{koormus}} = \frac{0,31}{1,11} = 0,28\,\Omega$	$P_{koormus}$	$P_{koormus} = U_{koormus} \cdot I_{koormus} =$ $= 4,86 \cdot 1,11 = 5,4$ W
$R_{koormus}$	$R_{koormus} = \frac{U_{koormus}}{I_{koormus}} = \frac{4,86}{1,11} = 4,38\,\Omega$		



Joonis 4-3. Skeem Joonis 4-2 koos mõõte- ja arvutustulemustega.

Tuletame meelde, et hargnemisteta jadaahelas on vool läbi kõikide komponentide võrdne. Elektrivoolu moodustavate laengute hulk liikumisel jääb samaks, laengukandjad ei saa tekkida ega kaduda, ja komponenti sisenevate ja sealt väljuvate laengute arv ajaühikus (so elektrivool) on täpselt samasuured.

4.2. Takistuse, võimsuse ja pinge proportsionaalsuse reeglid

Vaatleme eelmises näites eitatud tulemusi ja sisu veidi teises järjekorras (vt Tabel 4-3).

Tabel 4-3. Mõõtmistulemused ja arvutustulemused, tuginedes eelnevalt toodud näitele (vt Joonis 4-3).

	Pinge klemmidel	Osa ahela kogu-pingest	Võimsus	Osa ahela kogu-võimsu-sest	Takistus	Osa ahela kogu-takistu-sest
Sisendenergia allikad: 1 allikas						
Allikas	$\mathcal{E}_{allikas}$ = 5,9 V	100%	$P_{allikas}$ = 6,5 W	100%	-	-
Sisend kokku	**5,9 V**	**100%**	**6,5 W**	**100%**	**-**	**-**
Energiat ahelast välja viivad komponendid: juhtmed ja koormus						
Juhe "1"	ΔU_{juhe1} = 0,68 V	11,6%	P_{juhe1} = 0,75 W	11,6%	R_{juhe1} = 0,61 Ω	11,6%
Juhe "2"	ΔU_{juhe2} = 0,31 V	5,2%	P_{juhe2} = 0,34 W	5,2%	R_{juhe2} = 0,28 Ω	5,2%
Koormus	$U_{koormus}$ = 4,9 V	83,2%	P_{juhe2} = 5,4 W	83,2%	$R_{koormus}$ = 4,4 Ω	83,2%
Väljund kokku	**5,9 V**	**100%**	**6,5 W**	**100%**	**5,3 Ω**	**100%**

Igas elektriahelas allikas poolt ahelasse antud energiahulk on alati võrdne ahelast tarbitud energiahulgaga. Siin näeme seda selgelt:

- ahela sisendenergia hulk ühe laenguühiku kohta on sama hulk, mis tarbitakse (pinge) – allika elektromotoorjõud on võrdne takistuslike komponentide klemmidel olevate pingete summaga.
- Igas ajaühikus, ahealasse antava sisendenergia hulk (võimsus) on sama, mis energiat tarbivate komponentide ahelast võetava energia hulk, vt veerg "võimsus".

Tuleb rõhutada, et esineb otsene proportsionaalne seos komponendi takistuse osa, komponendi võimsuse osa ja komponendi pinge osa suhtest vastavalt ahela kogutakistuse, koguvõimsuse ja kogupinge suhtes. See võimaldab viia sisse terve rea lihtsustusi ahela talitlussuuruste määramisel:

- Teades ahela kogutakistust R_{kogu} ja allika elektromotoorjõu väärtust (see on võrdne ahela kogupingega) $\mathcal{E}_{allikas} = U_{kogu}$, saame määrata komponendi pinge(langu) ΔU_x väärtuse, kasutades komponendi takistuse R_x ja ahela kogutakistuse suhet

  $$\frac{\Delta U_x}{U_{kogu}} = \frac{R_x}{R_{kogu}},\ \Delta U_x = U_{kogu} \cdot \frac{R_x}{R_{kogu}}$$

  (näiteks: 10% takistusest ahela kogutakistusega võrreldes = komponendil on pinge, mille väärtus on 10% ahela kogupingest)

- Teades ahela kogutakistust R_{kogu} ja ahela koguvõimsust P_{kogu}, saame määrata komponendi poolt tarbitava/hajutatava võimsuse P_x väärtuse. Näiteks, juhtmete kadu on leitav kasutades juhtme takistuse R_x ja ahela kogutakistuse suhet

$$\frac{P_x}{P_{kogu}} = \frac{R}{R_{kogu}},\ P_x = P_{kogu} \cdot \frac{R_x}{R_{kogu}}$$

(näiteks: 10% takistusest ahela kogutakistusega võrreldes = komponendil on pinge, mille väärtus on 10% ahela kogupingest)

Näide. Haru kogutakistus on 120 Ω ja pinge haru otstes on 48 V. Kui suur pingelang esineb 5 Ω takistusega juhtmetel?

Lahendus. Kuna kogutakistus on teada, saab arvutada pingelangu, kasutades proportsionaalsuse printsiipi

$$\Delta U_x = U_{kogu} \cdot \frac{R_x}{R_{kogu}} = 48 \cdot \frac{5}{120} = 2\ \text{V}.$$

Näide. Ahelas kogutakistusega 75 Ω kasutatakse juhet takistusega 10 Ω. Kui palju võimsust eraldub kadudena sellel juhtmel, kui allika väljundvõimsus on 150 W?

Lahendus. Kuna kogutakistus on teada, saab arvutada pingelangu, kasutades proportsionaalsuse printsiipi

$$P_x = P_{kogu} \cdot \frac{R_x}{R_{kogu}} = 150 \cdot \frac{10}{75} = 20\ \text{W}.$$

4.3. Kirchhoffi pingeseadus

Kirchhoffi pingeseadus sõnastab ahelaga seotud oleva energiahulga jäävuse seaduse. Allika elektromotoorjõudude summa (so sisendenergia ühe laenguühiku kohta) peab olema võrdne kadusid ja koormuses ahelast tarbitavat energiat kirjeldavate pingete (so väljundenergia laenguühiku kohta) summaga.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \ldots + \varepsilon_N = U_1 + U_2 + \ldots + U_M\ ,$$

mis üldistatumal viisil kirjutades on

$$\sum_{N}^{i=1} \varepsilon_i = \sum_{M}^{j=1} U_j\ ,$$

kus ε_i on *i*-nda jadamisi kontuuris oleva allika (allikaid ahelas on kokku *N*) elektromotoorjõu väärtus, U_j on pinge *j*-nda jadamisi kontuuri ühendatud tarbija-komponendi klemmidel, kui jadaühenduses olevate komponentide arv on M.

Ühtlasi, kui võtame aluseks, et allika emj võib vaadelda negatiivse märgiga pinge väärtusena allikana töötavate komponentide puhul, siis on Kirchhoffi pingeseaduse kuju veelgi otse-kohesem

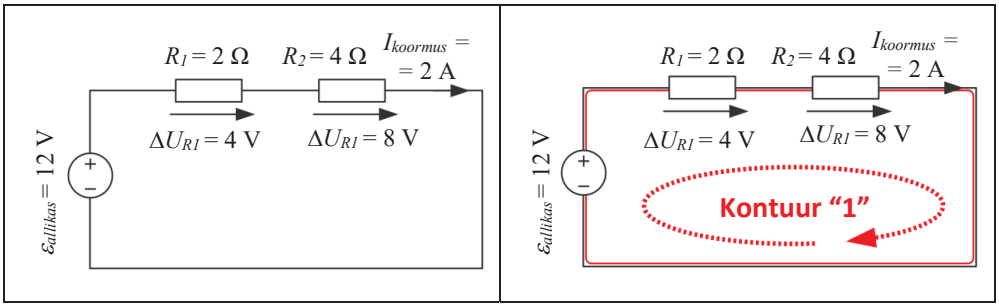
$$\sum_{M}^{j=1} U_j = 0\ ,$$

kus U_j on pinge *j*-nda jadamisi kontuuri ühendatud komponendi klemmidel (allikad ja tarbijad), samas *M* on jadamisi ühendatud komponentide koguarv.

Kirchhoffi pingeseadus kehtib tegelikult mistahes ahela osas, seda saab rakendada ja rööp-ahelate arvutamisel ja lahendamisel, kui oletame, et ahelas olevate takistitega ei ole otse ühendatud täiendavaid rööpallikaid.

4.3.1. Kirchhoffi seaduse rakendamise näide jadaahelas

Kirchhoffi seaduse rakendamisel on vajalik konkreetsed voolukontuurid, mille kohta saame kirjutada välja Kirchhoffi seaduse võrrandid (vt Joonis 4-4). Siin näites on tegemist ühe konkreetse jadaahelaga, mis ei hargne; vool käib läbi kõigist komponentidest.



Joonis 4-4. Kontuuride määramine jadaahelas Kirchoffi seaduse põhjal.

Näitena esitatud skeemis (vt Joonis 4-4) on kontuure (so ahela osi, mida määda vool saab liikuda allikast läbi koormuse tagasi allikale tehes peale täieliku ringi), ainult 1. Selle ahelas ei ole rööpharusid ega hargnemisi. Seetõttu on vool läbi kõikide komponentide sama tugevusega ja võrdne $I_{koormus}$ väärtusega. Selle ahela jaoks Kirchhoffi pingeseaduse võrrandite välja kirjutamiseks tuleb sooritada järgmised tegevused:

1. **Vali välja voolu teekond suletud ringis ja märgi see kontuurina** (märgitud jämeda punase joonega, vt Joonis 4-4). Kontuur peab olema moodustatud juhtivatest komponentidest (so allikas, juhtmed, takistid, induktiivpoolid jpm) alalisvooluüles-annetes – vahelduvvooluülesannetes tuleb arvestada ka ahelasse ühendatud kondensaatoreid. Alalisvooluülesannetes käsitleme induktiivpooli kui juhet.
2. **Märgi kõik voolud ja pinged skeemis**. Kasutades nooltähistust saab tagada kerge ja kiire jälgitavuse ja lihtsa positiivse ja negatiivse polaarsuse eristamise. Takistitel peab voolu ja pingelangu suund olema märgitud samas suunas.
3. **Vali ja märgi kontuuri positiivse voolu suund läbi komponentide**. See on näites märgitud punase punktiiriga ja noolega. Iga vool ja pinge(lang) noolega näidatud suunas tuleb arvesse võtta positiivse märgiga, vastupidises suunas suurused võetakse arvesse negatiivsena. Tähelepanuks, et kui allika elektromotoorjõudude suund on vastupidine voolu suunaga, siis võetakse elektromotoorjõu väärtus positiivsena.
4. **Selgita, millise polaarsusega ja suurusega on erinevate komponentide suurused,** alustades allikast ja liikudes kontuuri voolu suunas:

- Allikas $\varepsilon_{allikas}$ omab kontuuri suunale vastupidist elektromotoorjõu suunda, kuid kuna tegemist on allikaga, siis seda käsitletakse positiivsena;
- R_1 läbib vool $I_{koormus}$ samas suunas nagu on märgitud kontuuri suund, seega ka takistil olev pingelang ΔU_{R1} läheb kirja positiivsena;
- R_2 läbib vool $I_{koormus}$ samas suunas nagu on märgitud kontuuri suund, seega ka takistil olev pingelang ΔU_{R2} läheb kirja positiivsena.

5. **Kirjuta välja täielik Kirchoffi pingeseaduse avaldis**, paigutades allika ühele poole ja pinged/pingelangud teisele poole võrdust

$$\varepsilon_{allikas} = \Delta U_{R1} + \Delta U_{R2}$$

Toodud seos tähistab antud ahela Kirchhoffi pingeseaduse avaldist. Selle edasisel avaldisel saame näiteks lähtuda Oomi seadusest, mille kohaselt on pingelang võrdne komponenti läbiva voolu ja takistuse korrutisega

$$\Delta U_x = I_{koormus} \cdot R_x$$

millega saame ahela Kirchhoffi pingeseaduse järgi kirjutatud avaldise kujuks

$$\varepsilon_{allikas} = I_{koormus} \cdot R_1 + I_{koormus} \cdot R_2 .$$

Näide. Vaadeldes skeemi Joonis 4-2, kirjuta välja Kirchhoffi pingeseaduse alusel avaldis ahela kohta. Lisaks arvuta voolutugevus ahelas, rakendades mõõdetud pingeväärtusi ja kasutades allika elektromotoorjõu ning sisetakistuse väärtusi.

Lahendus. Vaadeldes skeemi Joonis 4-2, saab täheldada, et antud ahelas ei ole voolu hargnemiskohti ja voolutugevus $I_{koormus}$ läbib sama tugevusega kõiki ahela komponente. Antud ahelas on ainult üks elektromotoorjõu allikas ja 3 takistuslikku komponenti. Kirchhoffi avaldis antud ahela kohta on

$$\varepsilon_{allikas} = \Delta U_{juhe1} + \Delta U_{juhe2} + U_{koormus},$$

kus

$$\varepsilon_{allikas} = I_{koormus} \cdot R_{juhe1} + I_{koormus} \cdot R_{juhe2} + I_{koormus} \cdot R_{koormus}$$

ja seega

$$\varepsilon_{allikas} = I_{koormus} \cdot \left(R_{allikas} + R_{juhe1} + R_{juhe2} + R_{koormus} \right).$$

Selle võrrandi abil saab leida voolutugevuse ahelas

$$I_{koormus} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_{allikas} + R_{juhe1} + R_{juhe2} + R_{koormus}}.$$

Nüüd saame leida voolutugevuse ahelas, kui asendame muutujad väärtustega ($\varepsilon_{allikas}$ = 5,85 V; R_{juhe1} = 0,61 Ω; R_{juhe2} = 0,28 Ω; $R_{koormus}$ = 4,4 Ω)

$$I_{koormus} = \frac{5,85}{0,61+0,28+4,4} = \frac{5,85}{5,29} = 0,99 \text{ A}$$

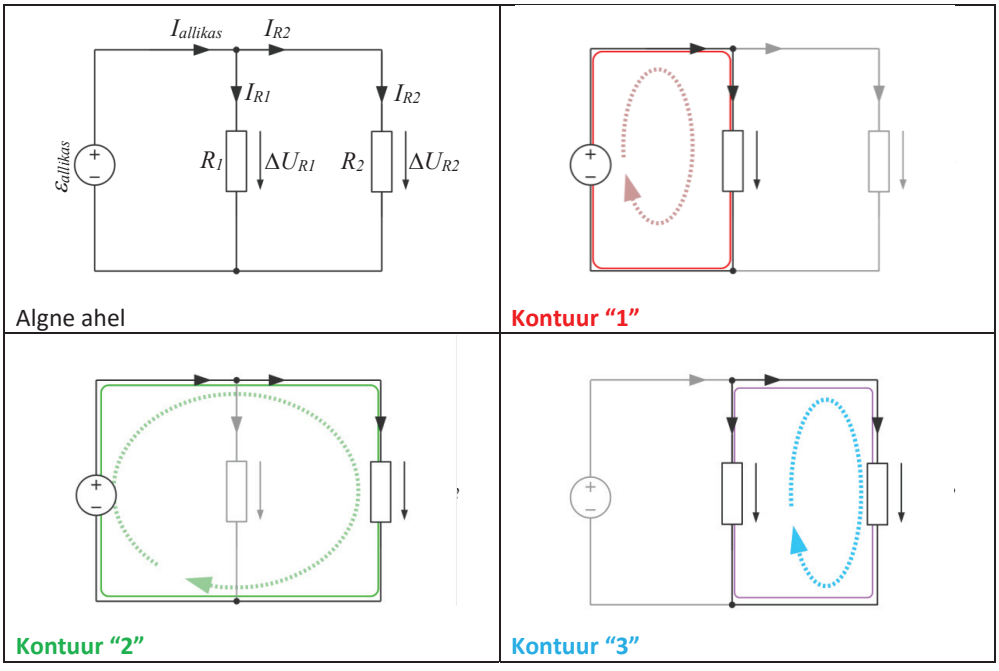
4.3.2. Kirchhoffi pingeseaduse rakendamise näide rööpahelale

Järgnevalt vaatleme Kirchhoffi pingeseaduse rakendamise näidet paralleelühenduse analüüsiks. Skeemis (vt Joonis 4-5) on üks allikas ja 2 takistit, ning viimases on ühendatud rööbiti allika klemmidega.

Siin skeemis saame välja kirjutada kokku 3 erinevat kontuuri, mis moodustavad tervikliku vooluringi:

- Esimene kontuur moodustub voolu teekonnal algusega allikast läbi takisti R_1 tagasi allikasse;
- Teine kontuur on sarnane esimesele, erinevus on selles, et vooluring on läbi takisti R_2.
- Kolmas kontuur on ilma allikata, kuid suletud vooluringi kulgemine käib läbi mõlema takisti R_1 and R_2.

Kirjeldatud kontuurid vaatame järgnevalt detailides läbi.



Joonis 4-5. Kontuuride määramine rööpahelas Kirchoffi seaduse rakendamiseks rööpahelas.

- Kontuur "1" saab alguse allikast $\mathcal{E}_{allikas}$, liigub edasi takistini R_1 ja seejärel tagasi allikasse $\mathcal{E}_{allikas}$. Eeldatava voolu suuna selles kontuuris saame valida üsna hõlpsa oletusega, kuna siin voolud $I_{allikas}$ ja I_{R1} on samas suunas mis kontuuril. Kuna I_{R1} on samas suunas kui kontuuri suund, läheb pingelang arvesse positiivse väärtusega. Selle kontuuri kohta saame kirjutada välja seosed Kirchhoffi seaduse alusel

$$\mathcal{E}_{allikas} = \Delta U_{R1} \Rightarrow \mathcal{E}_{allikas} = R_1 \cdot I_{R1}$$

- Kontuur “2” saab alguse allikast $\varepsilon_{allikas}$, liigub edasi takistini R_2 ja seejärel tagasi allikasse $\varepsilon_{allikas}$. Eeldatava voolu suuna selles kontuuris saame valida üsna hõlpsa oletusega, kuna siin voolud $I_{allikas}$ ja I_{R2} on samas suunas mis kontuuril. Kuna I_{R2} on samas suunas kui kontuuri suund, läheb pingelang arvesse positiivse väärtusega. Selle kontuuri kohta saame kirjutada välja seosed Kirchhoffi seaduse alusel

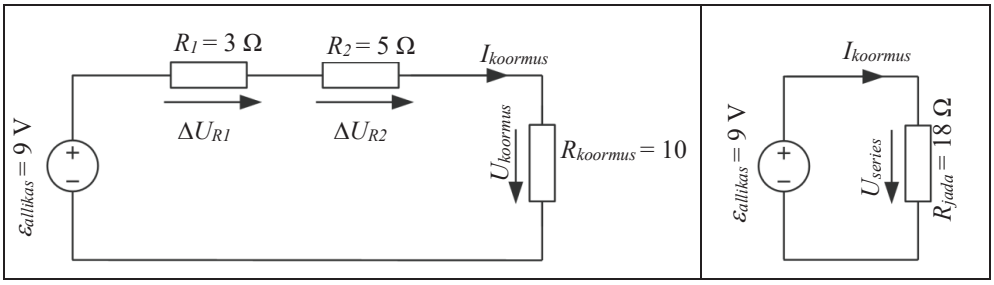
$$\varepsilon_{source} = \Delta U_{R2} \Rightarrow \varepsilon_{source} = R_2 \cdot I_{R2}$$

- Kontuur “3” moodustub voolu teekonnast läbi R_1 ja R_2. Kuigi selles ei sisalda allikat, siis Kirchhoffi pingeseaduse alusel saab seda siiski võrdsetel alustel analüüsida. Kontuuri jälgimisega alustame takistist R_1, kus vool/pingelang on märgitud samas kontuuri positiivsele suunale. Seega pingelang ΔU_{R1} võetakse arvesse positiivse märgiga. Teisena, vool/pingelang läbi takisti R_2 on märgitud vastassuunaline kontuuri positiivse suunaga. Seetõttu siin pingelang ΔU_{R1} võetakse arvesse negatiivse märgiga. Kuna kontuuris allikat ei ole, siis allika pool võrdusest on 0:

$$0 = \Delta U_{R1} - \Delta U_{R2} \Rightarrow 0 = R_1 \cdot I_{R1} - R_2 \cdot I_{R2}$$

4.4. Jadaahela ekvivalentne takistus

Jadaühenduses ahelas on võimalik mitme erineva jadamisi ühendatud takisti mõju ahela talitlusele vaadelda läbi ühe summaarse takistuse (põhimõte on sarnane rööpühenduses takistustele). Vaatleme siinkohal näitena lihtsat skeemi, milles on 2 takistit (R_1 = 3 Ω, R_2 = 5 Ω) ühendatud järjestikku ühe koormustakistusega ($R_{koormus}$ = 10 Ω, vt Joonis 4-6).



Joonis 4-6. Näidisahel jadamisi ühendatud takistitega (vasakul) ja lihtsustatud kujul skeem (paremal)

Selleks, et esitada jadaühenduses komponentide ekvivalentset väärtust, peame otsime komponenti, mille mõjul oleks ahelat läbimas täpselt samasugune koormusvoolu $I_{koormus}$ väärtus, sama elektromotoorjõuga allika $\varepsilon_{allikas}$ kasutamise korral. Seega otsime takistust R_{jada}, mille korral

$$I_{koormus} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_{jada}}$$

Sellise takistuse leidmiseks vaatleme toodud ahelat läbi Kirchhoffi pingeseaduse, kus saame seda ahelat kirjeldavaks avaldiseks

$$\varepsilon_{allikas} = \Delta U_{R1} + \Delta U_{R2} + U_{koormus},$$

mille saame avaldada kui

$$\varepsilon_{allikas} = I_{koormus} \cdot R_1 + I_{koormus} \cdot R_2 + I_{koormus} \cdot R_{koormus}$$

Viimase abil saame avaldada koormusvoolu väärtuse kui

$$I_{koormus} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_1 + R_2 + R_{koormus}},$$

Mille tulemus peab olema sama kui sama allikaga ühendatud ekvivalentsel jadatakistil

$$I_{koormus} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_1 + R_2 + R_{koormus}} = \frac{\varepsilon_{allikas}}{R_{jada}}$$

Kuigi antud näites on tegemist kolme takisti jadaühendusega, siis sama printsiip kehtib ka mistahes arvu jadatakistite korral. Seega võib ekvivalentse jadatakistuse leidmiseks kasutada üldistust: jadamisi ühendatud takistite summaarne ekvivalentne takistus on võrdne kõikide ahelas jadamisi ühendatud takistite takistuste summaga

$$R_{jada} = R_1 + R_2 + \ldots + R_N .$$

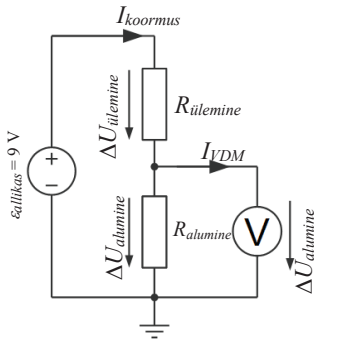
Kui ahelas on jadamisi *N* identse takistusega takistit R_i, siis ekvivalentseks jadatakistuseks on

$$R_{jada} = R_i \cdot N$$

4.4.1. Pingejagur

Pingejagur on takistite jadaühendus, mille väljundiks on pinge, mis on võrdne sellele jadaühenduse otsmistele klemmidele rakendatud pinge jagatisega. Pingejaguri töö põhineb otseselt proportsionaalsusreeglitele, milles võtame arvesse takisti osa ahela kogutakistusest (vt 4.2 Takistuse, võimsuse ja pinge proportsionaalsuse reeglid). Pingejagurid on praktilistes skeemides ühed lihtsaimad võimalused, et tagada lihtsate komponentide kasutamisega erinevaid pingetasemeid mõõtmisteks või võrdluseks.

Lihtsaim pingejagur koosneb 2 takistist, mis on ühendatud jadamisi ja sellise ühenduse välimistele klemmidele on ühendatud allikas (vt Joonis 4-7). Need takistid kannavad indekseid ”alumine” $R_{alumine}$ ja ”ülemine” $R_{ülemine}$, tähistades vastavalt, millise potentsiaaliga allika klemmi külge need on ühendatud. Pingejaguri väljundpinge mõõdetakse jadaühenduse keskelt. Pingejagur on täpne juhul, kui pingejaguri koormus I_{VDM} on nullilähedane, võrreldes jadaühenduses takisteid läbiva vooluga $I_{koormus}$. Mida suurem on koormus I_{VDM}, seda suurem on pingejaguri kõrvalekalle ideaalse pingejaguri arvutusega võrreldes.



Joonis 4-7. Pingejaguri skeem.

Pingejaguri takistuste summa on

$$R_{kokku} = R_{ülemine} + R_{alumine}.$$

Sellele takistusele on ühendatud pinge (e. takistitel olev kogupinge), mis on võrdne allika elektromotoorjõu väärtusega $\varepsilon_{allikas}$. Näiteskeemis on pingejaguri väljundpingeks takisti $R_{alumine}$ pinge. Kasutades proportsionaalsusreegleid, saame pingejaguri väljundpinge $U_{PJ} = U_{alumine}$ arvutatav seosega

$$U_{alumine} = \varepsilon_{allikas} \cdot \frac{R_{alumine}}{R_{kokku}} = \varepsilon_{source} \cdot \frac{R_{alumine}}{R_{ülemine} + R_{alumine}}.$$

Selle seose järgi saame avaldada pingejaguri arvutuse seose ka juhtumi jaoks, kui nõutud väljundpinge on antud koos $R_{alumine}$ väärtusega, kuid meil on vaja leida $R_{ülemine}$ väärtus

$$\frac{R_{alumine}}{R_{alumine} + R_{üleminne}} = \frac{U_{alumine}}{\varepsilon_{allikas}}, \text{ kus } R_{ülemine} + R_{alumine} = \frac{R_{alumine}}{\frac{U_{alumine}}{\varepsilon_{allikas}}} = \frac{R_{alumine} \cdot \varepsilon_{allikas}}{U_{alumine}},$$

mille järgi $R_{ülemine}$ väärtuse saame määrata kui

$$R_{high} = \frac{R_{low} \cdot \varepsilon_{source}}{U_{Rlow}} - R_{low}.$$

Näide. Pingejagur koosneb takistitest $R_{ülemine}$ = 10 kΩ ja $R_{alumine}$ = 2,5 kΩ. Pingeallika klemmidel on pinge $\varepsilon_{allikas}$ = 12 V. Kui suur on väljundpinge pingejaguris?

Lahendus. Esmalt, vaatleme jadaühenduse kogutakistust

$$R_{kokku} = R_{ülemine} + R_{alumine}$$

Et leida pingejaguri väljundpinget, kasutame valemit

$$U_{alumine} = \varepsilon_{allikas} \cdot \frac{R_{alumine}}{R_{ülemine} + R_{alumine}} = 12 \cdot \frac{3}{5+3} = 4{,}5 \text{ V}.$$

Näide. Kasutades pingeallikat klemmipingega $\varepsilon_{allikas}$ = 9 V ja takistit $R_{alumine}$ väärtusega 4,7 kΩ, milline peaks olema teise takisti väärtus, et pingejaguri väljundpinge oleks 5,0 V?

Lahendus. Et määrata otsitava takistuse väärtust, kasutame valemit

$$R_{ülemine} = \frac{R_{alumine} \cdot \varepsilon_{allikas}}{U_{PJ}} - R_{alumine} = \frac{4700 \cdot 9}{5} - 4700 = 3760 \sim 3{,}8\ \text{k}\Omega.$$

4.5. Enesekontrolliks

1. Kirchhoffi pingeseadus ütleb, et …

   Vali vastus:

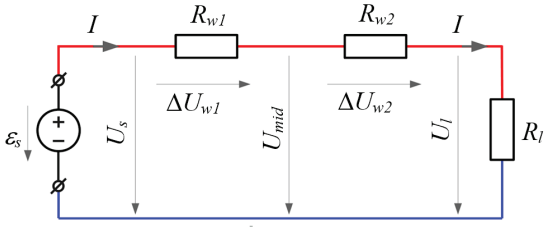
   A) elektriahel peab omama vähemalt ühte kontuuri, milles on vähemalt üks allikas ja üks koormus.

   B) allika elektromotoorjõud (e sisendenergia) ahelas peab olema võrdne kadude ja koormuse pingelangu summaga (e väljundenergia) vooluringis

   E) igas juhtme osas peab sõlme kohta sisenevate elektronide arv võrduma sõlmest väljuvate elektronide arvuga

   C) vool saab eksisteerida vaid elektriliselt juhtivates materjalides

2. Määra pinge U_l takistusel R_l kui juhtmete takistuste väärtused R_{w1} ja R_{w2} on vastavalt 0,7 Ω ja 0,3 Ω. Koormuse takistus R_l = 23 Ω allika pinge U_s = 12 V.



   Vali vastus:

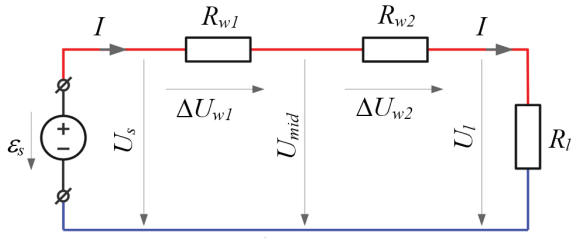
   A) 10 V

   B) 11,5 V

   C) 12 V

   D) 5 V

3. Määra allika koguvõimsus P_s kui juhtmete takistuste väärtused R_{w1} ja R_{w2} on vastavalt 0,7 Ω ja 0,3 Ω. Koormuse takistus on R_l = 23 Ω allika pinge U_l = 57,5 V.



Vali vastus:

A) 150 W

B) 100 W

C) 57,5 W

D) 50 W

4. Haru kogutakistus on 800 Ω ja pinge haru otste vahel on 400 V. Kui suur on pingelang selles harus paiknevatel juhtmetel takistusega 10 Ω?

   Vali vastus:

   A) 1 V

   B) 10 V

   C) 2 V

   D) 5 V

5. Ahelas, mille kogutakistuse väärtus on 55 Ω, on juhe takistusega 5 Ω. Kui palju võimsust kantakse üle koormuseni, kui allika väljundvõimsus on 247,5 W?

   Vali vastus:

   A) 200 W

   B) 247,5 W

   C) 150 W

   D) 225 W

6. Pingejagur koosneb takistitest $R_{ülemine}$ = 10 kΩ ja $R_{alumine}$ = 3 kΩ. Ahelas on pingeallikas klemmipingega $\varepsilon_{allikas}$ = 13 V. Milline on pingejaguri väljundpinge väärtus?

   Vali vastus:

   A) 3,9 V

B) 3 V

C) 13 V

D) 1 V

7. Kasutades pingeallikat $\mathcal{E}_{allikas}$ = 12 V ja takistit $R_{alumine}$ väärtusega 1 kΩ, milline peaks olema ülemise takisti väärtus, et pingejaguri väljundpinge oleks 3,0 V?

   Vali vastus:

   A) 10 kΩ

   B) 5 kΩ

   C) 3 kΩ

   D) 2 kΩ

8. Mis juhtub, kui pingejaguri väljundpinge väärtus arvutatakse eeldusel, et väljundis olevat koormust läbib voolutugevus 0 A, aga tegelikkuses koormusel on kõrgem voolu väärtus kui 0? Pingejaguri väljundpinge on sellisel juhul …

   A) madalam kui arvutatud

   B) kõrgem kui arvutatud

   C) võrdne arvutatuga

   D) 10 V

ENESEKONTROLL – VASTUSED

Peatüki nr.	Küsimus									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**
1. Elektri- ja elekt–roonikaahelad, alusmõisted ja struktuur	C	B	A	B	C	A	C	B	C	A,C,F
2. Elektriahela osad, komponendid ja mõisted	D	A	D	B	A	C	B	D	D	D
3. Kirchhoffi vooluseadus	C	B	A	D	D	A	C	B	-	-
4. Kirchhoffi pingeseadus	B	B	A	D	D	B	C	A	-	-

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 03. SIGNAALID, SÜSTEEMID JA JUHTIMINE MEHHATROONIKAS [M003ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

DRAGOMIR CHANTOV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
ELENA MONOVA, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)

2018

Teave selle dokumendi kohta

Seda dokumenti kasutatakse põhilise õpikuna moodulis „Signaalid, süsteemid ja juhtimine mehhatroonikas“.

Sisukord

Teave selle dokumendi kohta 3
Mõisted 7
Tabel 0.1 Põhimõisted 7
Sissejuhatus 8
1 Signaalid. Signaalide klassifitseerimine 9
1.1 Signaalide klassifitseerimine 9
1.1.1 Klassifitseerimine pidevuse järgi 9
1.1.2. Klassifitseerimine regulaarsuse järgi 12
1.1.3. Paaris-/paaritud signaalid 13
1.1.4. Klassifitseerimine perioodilisuse järgi 13
1.2 Signaalide põhitüübid juhtimissüsteemides 14
1.2.1. Ühikhüppefunktsioon 14
1.2.2. Ühik-impulssfunktsioon (Diraci deltafunktsioon) 15
1.2.3. Ühik-siinusfunktsioon 17
1.2.4. Polünoomi tüüpi signaalid 18
1.3 Enesekontroll 20
2 Süsteemid. Põhimõisted 21
2.1 Põhimõisted ja põhimõtted 21
2.2 Automaatjuhtimissüsteemide põhimõtted 22
2.2.1. Avatud kontuuriga juhtimissüsteemid 23
2.2.2. Häiringu põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid 23
2.2.3. Hälbe põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid. Tagasiside põhimõte 24
2.2.4. Korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid 25
2.2.5. Põhilisi juhtimisprintsiipe illustreeriv näide 25
2.3 Enesekontroll 30
3 Juhtimissüsteemide lühike klassifikatsioon 31
3.1 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine lineaarsuse järgi 31
3.2 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine juhtimisprintsiibi alusel 32
3.3 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine statsionaarsuse järgi 32
3.4 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine eesmärgi alusel 33
3.5 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine dünaamilisuse järgi 34
3.1 Enesekontroll 36
4 Lineaarsete süsteemide mudelite põhitüübid 37
4.1 Matemaatilised mudelid. Põhimõisted 37
4.2 Juhtimissüsteemide diferentsiaalvõrranditüüpi matemaatilised mudelid 39
4.3 Juhtimissüsteemide ülekandefunktsioonitüüpi matemaatilised mudelid 41
4.4 Enesekontroll 43
5 Elementaarsed dünaamilised süsteemid. Dünaamiliste süsteemide ühendamise reeglid 44
5.1 Elementaarsete dünaamiliste süsteemide põhitüübid 44
5.1.1 Proportsionaalne süsteem 44
5.1.2 Integreeriv süsteem 45
5.1.3 Esimest järku aperioodiline süsteem 46
5.1.4 Võnkuv süsteem 47
5.1.5 Diferentseeriv süsteem 48
5.1.6 Ideaalne hilistussüsteem 49
5.2 Dünaamiliste süsteemide ühendamise reeglid 50
5.2.1 Järjestikühendus 50
5.2.2 Paralleelühendus 50
5.2.3 Tagasisidega ühendus 51
5.2.4 Ekvivalentsed struktuursed teisendused 51
5.3 Enesekontroll 53
6 Lineaarsete süsteemide stabiilsus 54

6.1 Stabiilsuse definitsioon. Süsteemi stabiilsuse põhitingimus 54
6.2 Hurwitzi stabiilsuskriteerium 57
6.1 Enesekontroll 58
7 Juhtimissüsteemide kvaliteedinäitajad. Lineaarregulaatorite põhitüübid 59
7.1 Automaatjuhtimissüsteemide kvaliteedinäitajad 59
7.2 Automaatjuhtimissüsteemide regulaatorite põhitüübid 61
7.2.1 Proportsionaalregulaator (P-regulaator) 61
7.2.2 Integreeriv regulaator (I-regulaator) 62
7.2.3 Proportsionaal-integraalregulaator (PI-regulaator) 63
7.2.4 Proportsionaal-diferentsiaalregulaator (PD-regulaator) 63
7.2.5 Proportsionaal-integraal-diferentsiaalregulaator (PID-regulaator) 64
7.1 Enesekontroll 65
Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused 66
Viited 66

Mõisted

Tabel 1.1 Põhimõisted

Mõiste	**Selgitus**
Juhtimine	Juhtimine tähendab süsteemi suunatud mõjutamist selle tööomaduste üldiseks parandamiseks teatud aspektis.
Mudel	Süsteemi mudel on süsteemi teatud kujutis, mis peegeldab selle teatud omadusi.
Reguleerimine	Süsteemi tahtlik mõjutamine põhieesmärgiga hoida selle väljundväärtus mingis eelmääratud vahemikus.
Signaal	Füüsikaline protsess, mille parameetrid muutuvad ajas.
Süsteem	Komponentide kogum, mida võib teatud aspektis lugeda tervikuks.

Sissejuhatus

See moodul sisaldab lineaarsete statsionaarsete automaatjuhtimissüsteemide signaaliteooria ja juhtimisteooria põhiteemasid. Koolitusmaterjal sobib kasutamiseks tööstuses automaatika- ja mehhatroonikasüsteemidega tegelevatele inseneridele ja tehnikaülikoolide üliõpilastele.

Õppematerjali korralikuks omandamiseks on vaja tunda kõrgema matemaatika põhialuseid (nt lineaarsete diferentsiaalvõrrandite lahendamine, Laplace'i teisendus, tehted kompleksarvude ja maatriksitega jne) ning mõne näiteülesande mõistmiseks on vaja elektrotehnika ja mehaanika algteadmisi.

Õppematerjal on jagatud seitsmesse ossa.

Peatükk 1 määratleb mehhatroonikas kasutatavate signaalide põhitüübid. Signaalide klassifitseerimine on esitatud erinevate tunnuste alusel.

Peatükk 2 määratleb automaatjuhtimissüsteemi kontseptsiooni. Esitatud on automaatjuhtimissüsteemi koostamise neli põhiprintsiipi.

Peatükis 3 on esitatud juhtimissüsteemide klassifikatsioon erinevate tunnuste alusel – lineaarsus, dünaamilisus jne.

Peatükis 4 tutvustatakse klassikalise juhtimisteooria matemaatiliste mudelite põhitüüpe – diferentsiaalvõrrandit ja ülekandefunktsiooni.

Peatükk 5 tutvustab automaatjuhtimissüsteemi kujutamist lihtsate allsüsteemide (dünaamiliste elementaarsüsteemide) kogumina. Üksikasjaliselt vaadeldakse juhtimisteoorias kasutatavate dünaamiliste elementaarsüsteemide põhitüüpe. Peatüki teises osas tutvustatakse dünaamiliste süsteemide ühendamise kolme põhitüüpi.

Peatükk 6 käsitleb juhtimissüsteemide stabiilsuse teemat. Näidatakse süsteemi stabiilsuse üldtingimust. Tutvustatakse Hurwitzi stabiilsuskriteeriumi.

Peatükk 7 määratleb juhtimissüsteemide peamised kvalitatiivsed näitajad. Käsitletakse lineaarregulaatorite põhitüüpe P, I, PI, PD ja PID.

1 SIGNAALID. SIGNAALIDE KLASSIFITSEERIMINE

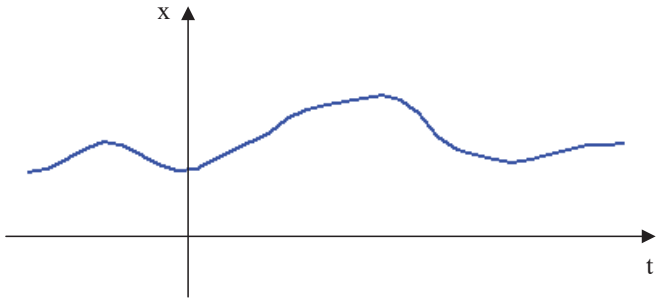
Termini „signaal“ kirjeldamiseks on erinevaid definitsioone. Üldiselt on signaal füüsikaline protsess, mille parameetrid muutuvad ajas. Signaale kasutatakse tavaliselt info edastamiseks nt sidesüsteemides. Signaalide info ülekandmine toimub ülekandekeskkonnas ja selleks kasutatakse erinevat tüüpi energiat – elektrilist, elektromagnetilist jne. Signaalide tüüpe väga palju. Selle peatüki eesmärk on tutvustada lugejale mehhatroonikas kasutatavate signaalide põhitüüpe. Siin tutvustatakse signaalide klassifitseerimist erinevate tunnuste alusel. Enimkasutatavaid pidev- ja diskreetsignaale tutvustatakse graafilisel ning analüütilisel kujul.

1.1 Signaalide klassifitseerimine

Signaale saab klassifitseerida erinevate tunnuste alusel. Allpool on esitatud signaalide lühike klassifikatsioon ainult kõige põhilisemate tunnuste alusel.

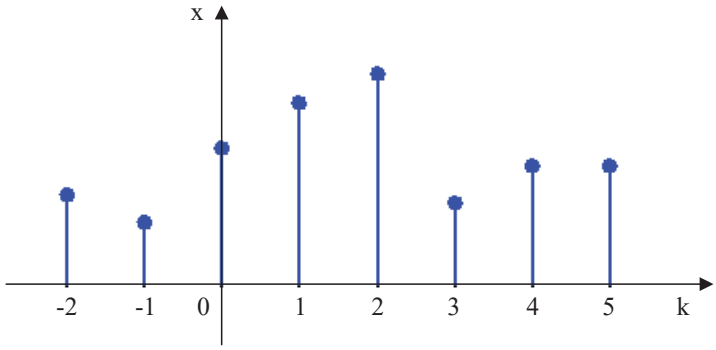
1.1.1 Klassifitseerimine pidevuse järgi

Selle tunnuse alusel jagatakse signaalid pidev- ja diskreetsignaalideks.
Pidevsignaal on pidev funktsioon ajas. Pidevsignaali $x(t)$ näide on esitatud joonisel 1.1.

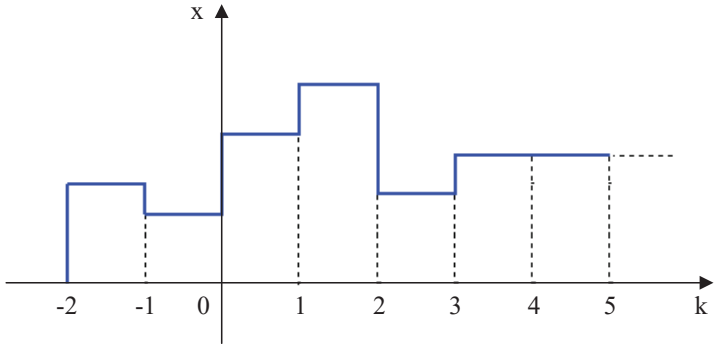


Joonis 1.1. Pidevsignaal

Diskreetsignaalide korral on olukord erinev. Need saadakse pidevsignaalide diskreetimisel ja nende tüüp sõltub sellest, kas diskreeditakse aja, nivoo või korraga nii aja kui ka nivoo järgi.
Kõige levinumad on aja järgi diskreeditud signaalid. Need kujutavad katkendlikku ajafunktsiooni. Kui konkreetne signaal saab muutuda ainult kindlatel diskreetsetel ajahetkedel, nimetatakse seda ajas diskreeditud signaaliks. Tavaliselt on need hetked diskreetimisaja T kordsed. Sageli on diskreetsignaal pidevsignaali analoog, mida on diskreeditud spetsiaalse diskreetimisseadmega. Joonisel 1.2 on näidatud ajas diskreeditud signaali $x(k)$ diskreetimisajaga T = 1. Diskreetsignaali matemaatilises kirjelduses ei ole muutujaks mitte aeg t, vaid k, mis on täisarv. Signaaliväärtused T-kordsetel ajahetkedel on võrdsed pidevsignaali väärtustega samadel ajahetkedel.
Tavaliselt läbib ajas diskreeditud signaal praktilistel põhjustel hoideseadme, kus hoitakse signaali väärtust muutumatuna iga diskreetimisintervalli algusest kuni intervalli lõpuni. Kui signaal jooniselt 1.2 läbib hoideseadme, teisendub see kujule, mida on näidatud joonisel 1.3.

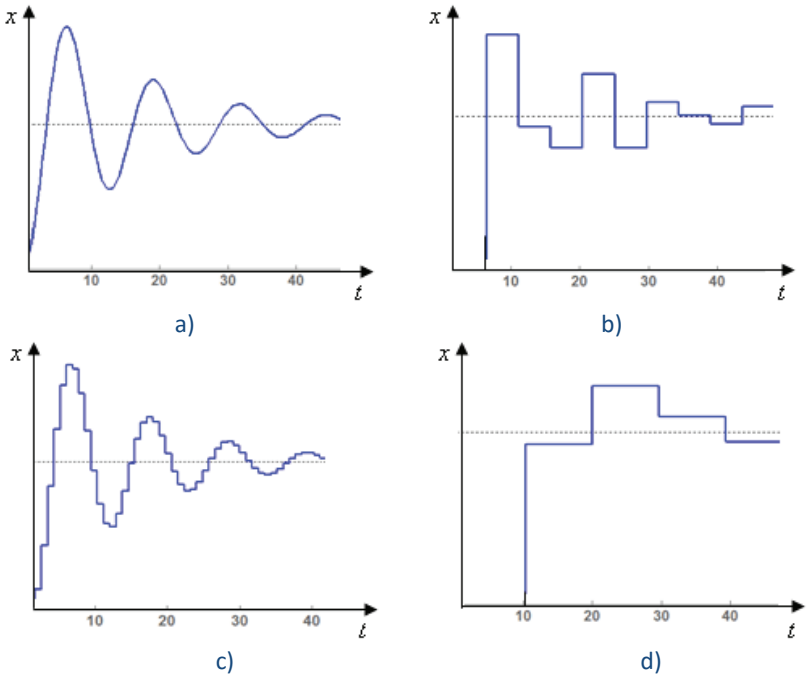


Joonis 1.2. Ajas diskreeditud diskreetsignaal



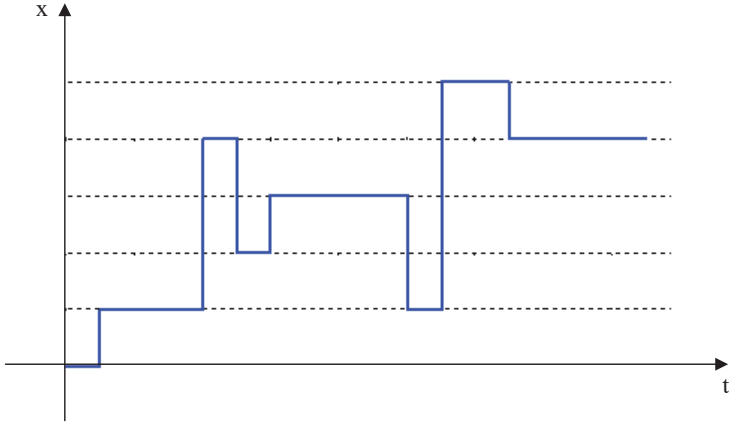
Joonis 1.3. Ajas diskreeditud diskreetsignaal pärast hoideseadme läbimist

Kui diskreetimisaeg on väiksem, on diskreetsignaal sarnasem oma pideva analoogiga ja vastupidi. Joonisel 1.4 a) on pidevsignaal, mida on vaja diskreetida. Joonisel 1.4. b) on esitatud 5 s diskreetimisväärtusega diskreetsignaali pärast hoideseadme läbimist. Signaal muutub ainult iga 5 s järel ja sellepärast järgib diskreetsignaal ainult kaudselt oma pideva analoogi kuju. Joonisel 1.4 c) kujutatakse diskreetsignaali, mis on saadud diskreetimis-väärtuse 1 s korral ja kordab seetõttu täpsemalt oma pidevat analoogi. Joonisel 1.4 d) näidatakse diskreetimisväärtusel 10 s saadud diskreetsignaali. Nagu näha, on infokadu nii suur, et diskreetsignaal praktiliselt üldse ei edasta oma pideva analoogi infot.



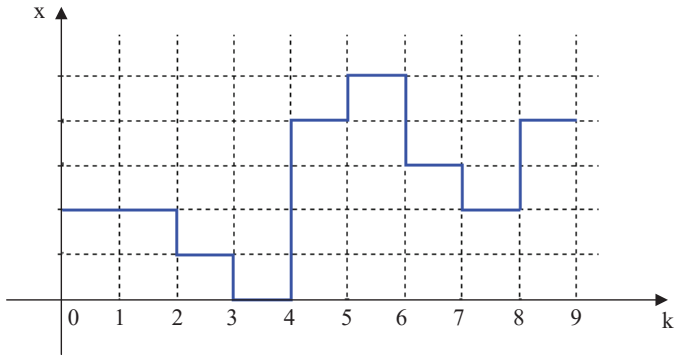
Joonis 1.4. Pidevsignaali ja selle diskreetsete analoogide näited, mis on saadud erinevate diskreetimisväärtustega

Peale ajas diskreetimise on ka muid signaali diskreetimise tüüpe. Kui signaal koosneb ainult kindlatest väärtustest, mis on etteantud arvu kordsed, kuid saadud juhuslikel ajahetkedel (puudub diskreetimisaeg), toimub diskreetimine nivoo järgi. Joonis 1.5. näitab nivoo järgi diskreeditud signaali. Seda tüüpi signaalidega süsteeme nimetatakse releesüsteemideks.



Joonis 1.5. Nivoo järgi diskreeditud signaali näide

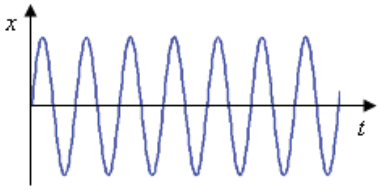
Kolmas signaali diskreetimise tüüp on korraga aja ja nivoo järgi diskreetimine. Diskreet-signaalid muutuvad ainult ajahetkedel, mis on diskreetimisaja kordsed ja vastavad ainult kindlatele väärtustele, mis on etteantud arvu kordsed. Joonis 1.5. näitab sellist signaali. Seda tüüpi signaalidega süsteeme nimetatakse digitaalsüsteemideks.



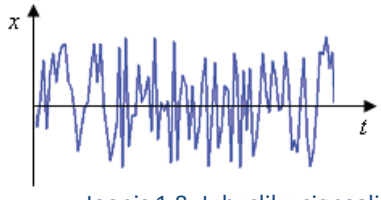
Joonis 1.6. Aja ja nivoo järgi diskreetimisega saadud diskreetsignaali näide

1.1.2. Klassifitseerimine regulaarsuse järgi

Selle tunnuse alusel jagatakse signaalid regulaarseteks ja juhuslikeks signaalideks.
Regulaarseid signaale iseloomustab, et nende käitumist ajas on võimalik ennustada nende matemaatilise mudeli analüütilise kirjelduse alusel. Joonisel 1.7 on esitatud sellise signaali näide – funktsiooniga $x(t) = A\sin(\omega t)$ kirjeldatud sinusoidne signaal. Seda funktsiooni kasutades saab arvutada signaali x täpse väärtuse igal ajahetkel t.
Kui signaal on juhuslik, ei ole võimalik signaali tulevikuväärtusi ka lühikeses ajaperspektiivis ennustada. Ainult mõnikord on võimalik määratleda intervall, millega võib oodata signaali tulevikuväärtusi. Joonis 1.8 esitab juhuslikku signaali näite.



Joonis 1.7. Regulaarse signaali näide

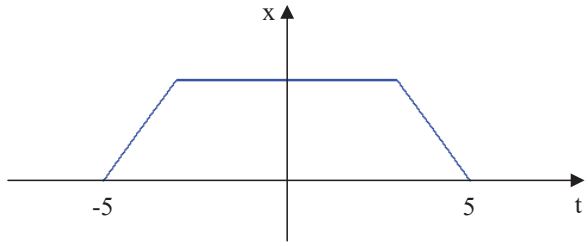


Joonis 1.8. Juhusliku signaali näide

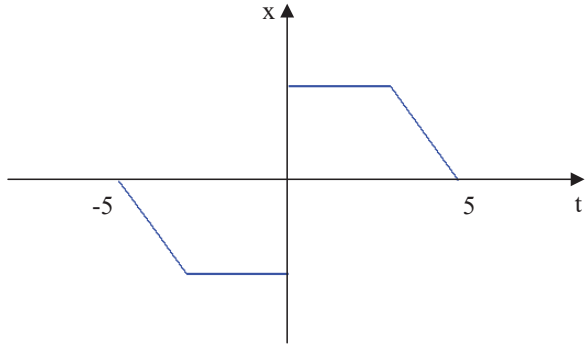
Klassikalises juhtimisteoorias käsitletakse peamiselt regulaarseid signaale ja süsteeme. Juhuslikke signaale kasutatakse mõnes juhtimisteooria osas, mis on aja jooksul muutunud eraldi distsipliiniks, nt süsteemide identifitseerimine.

1.1.3. Paaris-/paaritud signaalid

Signaal on paarissignaal, kui seda kirjeldab paarisfunktsioon, nt $x(t) = x(-t)$. Joonis 1.9 näitab paarissignaali. Signaal on paaritu signaal, kui seda kirjeldab paaritu funktsioon, nt $x(t) = -x(-t)$. Joonis 1.10 esitab paaritu signaali näite.



Joonis 1.9. Paarissignaali näide

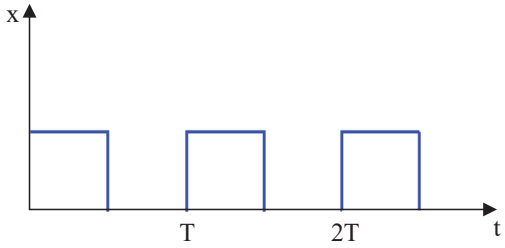


Joonis 1.10. Paaritu signaali näide

1.1.4. Klassifitseerimine perioodilisuse järgi

Signaal on perioodiline siis, kui seda kirjeldab perioodiline funktsioon. Perioodiline funktsioon on funktsioon, mille korral kehtib võrrand $x(t) = x(t+T)$, kus T on funktsiooni periood. Joonisel 1.11 on näidatud perioodiline signaal – ristkülikukujuliste impulsside jada. Tüüpilised perioodilised funktsioonid on ka trigonomeetrilised funktsioonid – $\sin, \cos, \tan, \sinh, \cosh$.

Kõik signaalid, mis ei vasta ülalnimetatud perioodilisuse nõudele, on mitteperioodilised signaalid.



Joonis 1.11. Perioodilise signaali näide

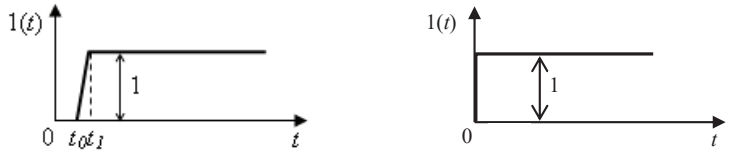
Signaale saab klassifitseerida ka muude tunnuste alusel, nt reaal- või kompleksignaalid sõltuvalt sellest, kas neid kirjeldatakse reaal- või kompleksfunktsiooniga jne.

1.2 Signaalide põhitüübid juhtimissüsteemides

Selle õpiku piiratud mahu tõttu määratletakse ainult pidevsignaalide põhitüübid.

1.2.1. Ühikhüppefunktsioon

See on kõige lihtsam ja juhtimissüsteemides kõige rohkem kasutatud signaal. Sisuliselt on see konstantne signaal amplituudiga 1, mis antakse süsteemi sisendisse. Joonis 1.12 a) näitab ühikhüppefunktsiooni üldkuju.



a) b)

Joonis 1.12. Ühikhüppefunktsiooni variandid

Joonisel 1.12 a) näidatud ühikhüppefunktsiooni matemaatiline määratlus on:

$$1(t)=\begin{cases}0 & for\ \ t<t_0,\\ 1 & for\ \ t>t_1.\end{cases} \tag{1.1}$$

Kui sellist tüüpi signaal antakse automaatjuhtimissüsteemi sisendisse, on aeg signaali sisestamishetkest t_0 kuni amplituudini 1 jõudmise hetkeni t_1 tõenäoliselt tühine. Samuti võib eeldada, et signaali alguspunkt $t_0=0$. Nendele eeldustele vastav ühikhüppefunktsioon on graafiliselt kujutatud joonisel 1.12 b), selle matemaatiline määratlus on:

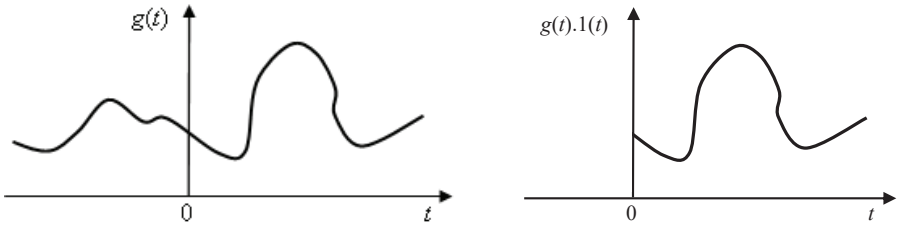
$$1(t)=\begin{cases}0 & \text{за}\ \ t<0,\\ 1 & \text{за}\ \ t>0.\end{cases} \tag{1.2}$$

Et ülalesitatud võrrandites on funktsiooni väärtus t_0 ja t_1 vahel (võrrand 1.1) ja on hetkel $t = 0$ määramata (võrrand 1.2), võib erinevate eesmärkide jaoks selle väärtuseks võtta 0, 1 või 1/2.

Tavaliselt on võrrandite (1.2) kasutamise korral funktsiooni eeldatav väärtus 1, kui $t \geq 0$, st hetkel $t_0 = 0$ $1(t) = 1$.

Ühikhüppefunktsioon on lihtne ja seda on signaalina kerge genereerida ning sellel on veel üks eelis. Signaali 1(t) Fourier'i teisendusega saab tõestada, et see signaal sisaldab tegelikult kogu pidevat sageduste spektrit. Sellest tuleneb, et kui selline signaal antakse süsteemi sisendisse, käivituvad kõik selle omasagedused või lihtsamalt öeldes, kui me jälgime süsteemi väljundsignaali, näitab see täielikult süsteemi dünaamika kõiki aspekte.

Juhusliku funktsiooni $g(t)$ korrutamine ühikhüppefunktsiooniga tähendab seda, et funktsioon $g(t)$ eksisteerib ainult juhul, kui $t \geq 0$, st see on reaalaja funktsioon (negatiivset aega põhimõtteliselt ei eksisteeri). Joonisel 1.13 on näidatud suvaline ajafunktsioon $g(t)$ ja selle korrutis ühikhüppefunktsiooniga $g(t).1(t)$.



Joonis 1.13. Reaalaja funktsiooni saamine

Ühikhüppefunktsioon on üks automaatjuhtimissüsteemide kõige tüüpilisematest sisendsignaalidest. Enamiku elektriliste ja elektromehaaniliste süsteemide korral tähendab ühikhüppefunktsiooni andmine sisendisse konstantse pinge andmist süsteemi sisendisse. Aeg t_0 alates pinge sisselülitamisest kuni hetkeni, mil see saavutab stabiilse väärtuse t_1 (stabiilset väärtust loetakse kokkuleppeliselt väärtuseks 1), on liiga lühike ja selle võib jätta arvestamata, st eeldatakse, et sisend muutub hetkeliselt nulltasemest täistasemeni. Veel üks ühikhüppefunktsiooni näide valdkonnas on veepaagi tüüpi süsteem. Paagi kohal on kraan, millest täidetakse paaki. Kraani avamine ja konstantse veevoolu tekitamine on praktiliselt ühikhüppefunktsioon, mis antakse süsteemi sisendisse. Erinevalt elektrisüsteemidest, on siirdeprotsess kraani avanemise alghetkest kuni maksimaalse voolu saavutamiseni palju pikem. Teisest küljest, kui paak on piisavalt suur, võtab selle täitmine palju rohkem aega, kui sisendi siirdeprotsess. Seega võib võtta eelduseks, et süsteemi sisendisse on rakendatud standardne ühikhüppefunktsioon.

1.2.2. Ühik-impulssfunktsioon (Diraci deltafunktsioon)

Ühik-impulssfunktsiooni võib lugeda ühikhüppefunktsiooni täielikuks vastandiks. See on väga lühikese kestusega signaal (ühikhüppefunktsioonis on signaal definitsiooni alusel lõputu kestusega), kuid väga suure amplituudiga (ühikhüppefunktsioonis on signaali amplituudiks kokkuleppeliselt 1). Ühik-impulssfunktsiooni nimetatakse ka Diraci deltafunktsiooniks.

Joonisel 1.14 a) on näidatud ühik-impulssfunktsiooni skemaatiline kujutis. Selle matemaatiline kirjeldus on:

$$\delta(t)=\begin{cases}0 & for\ \ t\neq 0,\\ \infty & for\ \ t=0.\end{cases} \tag{1.3}$$

a) b)

Joonis 1.14. Ühik-impulssfunktsioonide variandid

Joonis 1.14 b) näitab ühik-impulssfunktsiooni teist varianti, mida nimetatakse nihutatud ühik-impulsiks või nihutatud deltafunktsiooniks ja seda kirjeldab valem:

$$\delta(t-t_\delta)=\begin{cases}0 & for\ t\neq t_\delta,\\ \infty & for\ \ t=t_\delta.\end{cases} \tag{1.4}$$

Tegelikkuses ei oma ei nullkestus ega lõputu amplituud mingit mõtet. Seega eksisteerib ühik-impulssfunktsiooni füüsikaliselt realiseeritav versioon, mida nimetatakse reaalseks delta-impulsiks või reaalseks deltafunktsiooniks. Joonis 1.15 näitab reaalsete deltafunktsioonide variante, mis on joonisel 1.14 näidatud deltafunktsioonide analoogid.

a) b)

Joonis 1.15. Reaalsete deltafunktsioonide variandid

Joonisel 1.15 a) kujutatud reaalset deltafunktsiooni saab kirjeldada võrrandiga:

$$\delta_r(t)=\begin{cases}0 & for\ \ t<0,\\ \dfrac{1}{\lambda} & for\ \ 0\le t\le t_1,\\ 0 & for\ \ t>t_1.\end{cases} \tag{1.5}$$

Joonisel 1.15 b) kujutatud nihutatud deltafunktsiooni kirjeldab võrrand:

$$\delta_r(t-t_0)=\begin{cases}0 & for\ \ t<t_0,\\ \dfrac{1}{\lambda} & for\ \ t_0\le t\le t_1,\\ 0 & for\ \ t>t_1.\end{cases} \tag{1.6}$$

Reaalse deltafunktsiooni kestust tähistatakse tähega λ ja selle amplituud on võrdne λ pöördväärtusega. Seega, kui väärtus läheneb nullile, läheneb selle pöördväärtus lõpmatusele, st impulsi, kui ühik-impulssfunktsiooni kaks vajalikku tingimust on täidetud:

$$\lim_{\lambda\to 0}\delta_p(t)=\delta(t)\,. \tag{1.7}$$

1.2.3. Ühik-siinusfunktsioon

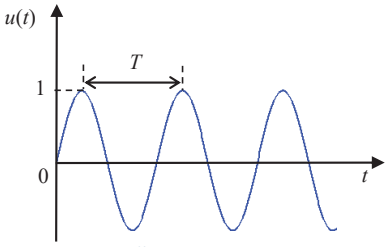
See signaal on sinusoidne baassignaal ühikamplituudiga, mida saab kirjeldada võrrandiga:

$$u(t)=\begin{cases}0 & for\ \ t<0,\\ \sin\omega t & for\ \ t\ge 0.\end{cases} \tag{1.8}$$

Et see on määratud ainult aja t väärtustega, võib ühik-siinusfunktsiooni kujutada ka lühemalt:

$$u(t)=\sin\omega t.1(t)\,. \tag{1.9}$$

Joonisel 1.16 on näidatud ühik-siinusfunktsiooni kuju. T on sinusoidse signaali periood ja selle nurksagedus on:



Joonis 1.16. Ühik-siinusfunktsioon

$$\omega=\frac{2\pi}{T},\ rad/s \tag{1.10}$$

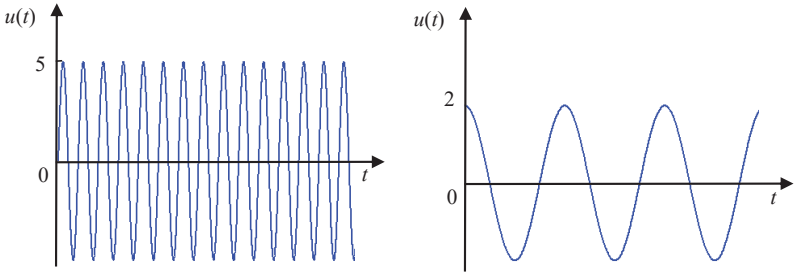
Üldisemal juhul võib sinusoidse signaali amplituud olla ühikust erinev number:

$$u(t)=U\sin\omega t.1(t), \tag{1.11}$$

kus U tähistab signaali amplituudi.
Teine levinud perioodiline funktsioon on koosinusoidne signaal:

$$u(t) = U\cos\omega t.1(t). \tag{1.12}$$

Siinus- ja koosinusfunktsioone tuntakse ka kui harmoonilisi signaale. Joonisel 1.17 a) on näidatud avaldise (1.11) tüüpi siinusfunktsioon amplituudiga $U = 5$. Võib näha, et selle sagedus on suurem kui joonisel 1.16 näidatud funktsioonil või, et joonise 1.17 a) funktsioonil on lühem periood T, kui joonise 1.16 funktsioonil. Joonisel 1.17 b) on näidatud koosinusoidne funktsioon amplituudiga $U = 2$.



a) b)

Joonis 1.17. Harmooniliste signaalide näited

Harmoonilised signaalid on juhtimissüsteemide sageduskarakteristikute aluseks. Konkreetse süsteemi sageduskarakteristikud võimaldavad kindlaks määrata süsteemi reageeringu selle sisendisse antavatele erinevat tüüpi harmoonilistele signaalidele.

1.2.4. Polünoomi tüüpi signaalid

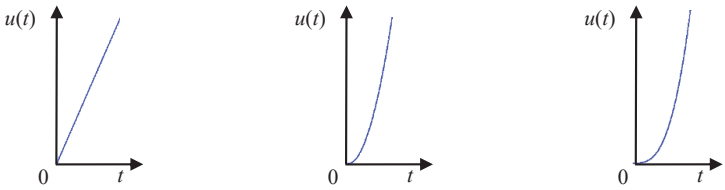
Süsteemide analüüsimisel kasutatakse mõnikord funktsioone, milles aeg t on erinevas astmes:

$$u(t) = Ut,\ u(t) = Ut^2,\ u(t) = Ut^3,\ldots.,\ u(t) = Ut^n. \tag{1.13}$$

Selliseid funktsioone nimetatakse astmefunktsioonideks. Tüüpiliselt on need funktsioonid määratletud ainult positiivsete ajaväärtuste jaoks. Konkreetsel juhul on need määratletud järgmiselt:

$$u(t) = Ut^n.1(t). \tag{1.14}$$

Mõned lihtsad astmefunktsioonid on esitatud joonisel 1.18. Funktsioon $u(t) = 3t.1(t)$ on näidatud joonisel 1.18 a), funktsioon $u(t) = t^2.1(t)$ on näidatud joonisel 1.18 b) ja funktsioon $u(t) = 0.1t^3.1(t)$ on näidatud joonisel 1.18 c).



a) b) c)

Joonis 1.18. Astmefunktsioonide näited

Polünoomi tüüpi signaalid on astmefunktsioonide lineaarsed kombinatsioonid:

$$u(t) = U_0 + U_1 t + U_2 t^2 + \ldots + U_n t^n. \tag{1.15}$$

Seda tüüpi signaale saab määratleda ainult positiivsete ajaväärtuste jaoks, korrutades neid ühikhüppefunktsiooniga, nagu on näidatud ülal eelnevate signaalitüüpide korral.
Ülalesitatud neli signaalirühma ei hõlma kõiki mehhatroonikas esinevate signaalide tüüpe. Siiski on selles valdkonnas enamikul juhtudel tegemist eespool käsitletud kategooriate sisendsignaalidega.

1.3 Enesekontroll

1. Millised signaalid on pidevad?
   a. signaalid, millised muutuvad ainult diskreetsetel ajamomentidel;
   b. Impulss-signaalid;
   c. Digitaalsed signaalid;
   d. signaalid, mis on ajas pidevad (katkematud)

2. Ühikhüppe funktsiooni kohane signaal on:
   a. Digitaalne signaal;
   b. Pidev signaal;
   c. Perioodiline signaal;
   d. Kompleksne signaal.

3. Ühik-siinusfunktsioon on:
   a. Digitaalne signaal;
   b. Praktiliselt teostamatu kujuga signaal;
   c. Perioodiline signaal;
   d. Kompleksne signaal.

4. Signaal on perioodiline kui on täidetud järgmised tingimused:
   a. $x(t) = x(t) - T$;
   b. $x(t) = x(t + T)$;
   c. $x(t) = x(t) * T$;
   d. $x(t) = 2 + T$.

5. Digitaalsed süsteemid on astmelised kui signaalid muutuvad:
   a. aja jooksul;
   b. Kindlaksmääratud signaali väärtuste astmete kaupa;
   c. Aja väärtuse kui ka sisu määratud väärtuse saavutamisel;
   d. astmefunktsiooni kohaselt.

2 SÜSTEEMID. PÕHIMÕISTED

Süsteeme võib vaadelda kui objekte, mis muundavad signaale ja genereerivad nende sisendisse antud originaalsignaali muudetud versiooni. Igat süsteemi saab esitada matemaatilise mudelina. Peatükis 2 on määratletud automaatjuhtimissüsteemide mõned põhimõisted ja aluspõhimõtted. Näidatud on negatiivse tagasisidega juhtimise põhimõtet, mis on automaatjuhtimise põhiprintsiip.

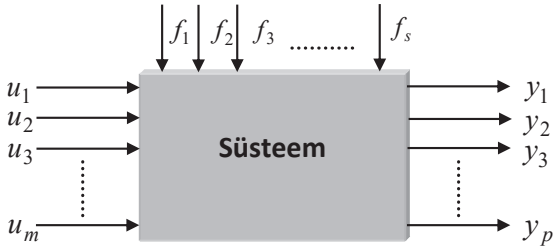
2.1 Põhimõisted ja põhimõtted

Üldiselt tähendab termin „süsteem" komponentide kogumit, mida võib teatud aspektis lugeda tervikuks. Ei ole olemas süsteemi, mis oleks ümbritsevast keskkonnast täielikult isoleeritud, st iga süsteem mõjutab mingil moel oma keskkonda ja võtab vastu selle mõjutusi. Ümbritseva keskkonna mõjusid süsteemile nimetatakse sisendmõjudeks ja reaktsioone, millega süsteem mõjutab keskkonda, nimetatakse väljundreaktsioonideks. Kui süsteemina mõistame seadet või protsessi, mille tööd tuleb automatiseerida, siis on vaja teha selgeks mõned asjad.

Osa süsteemi sisendmõjusid on teadlikult valinud ja rakendatud inimene: konkreetsel juhul seadme kasutaja või süsteemi töö eest vastutav insener. Neid sisendmõjusid nimetatakse juhtmõjudeks või lihtsalt juhtimiseks.

Ükski süsteem ei tööta ideaalsetes tingimustes, st ümbritsev keskkond mõjutab neid ühel või teisel viisil. Sisendmõjusid, mida süsteemile avaldab ümbritsev keskkond ja mida ei ole rakendatud tahtlikult (kasutaja), nimetatakse häiringuteguriteks. Tavaliselt on neil süsteemi tööle kahjulik mõju. Mõned häiringutegurid on mõõdetavad ja seega saab neid lihtsalt arvesse võtta erinevaid vahendeid kasutades. Teised ei ole mõõdetavad, kuid on olemas usaldusväärsed võimalused neid kaudselt neutraliseerida.

Joonisel 2.1 on näidatud süsteemi skemaatiline kujutis. Sisendisse on rakendatud juhtmõjud $u_i(t),\ i=1\div m$, süsteemile mõjuvaid häiringutegureid tähistatakse $f_j(t),\ j=1\div s$ ja süsteemi väljundreaktsioonid on $y_l(t),\ l=1\div p$.



Joonis 2.1. Süsteemi skemaatiline kujutis

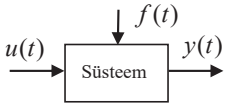
Mugavamaks käsitlemiseks võib sisendmõjud $u_1(t), u_2(t),....,u_m(t)$ grupeerida veeruvektorisse $\mathbf{u}(t)$ mõõtmega $m\times 1$:

$$\mathbf{u}(t)=\begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_m(t) \end{bmatrix}. \qquad (2.1)$$

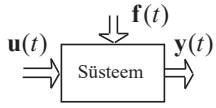
Samal moel saab grupeerida ka väljundreaktsioone ja häiringutegureid vektoritesse mõõtmetega vastavalt $p \times 1$ ja $s \times 1$:

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_p(t) \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{f}(t) = \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \vdots \\ f_s(t) \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

Süsteemi, millel on ainult üks sisend ja üks väljund, nimetatakse ühemõõtmeliseks süsteemiks. Süsteemi, millel on rohkem kui üks sisend või väljund, nimetatakse mitmemõõtmeliseks süsteemiks. Selles õpikus käsitletakse ainult ühemõõtmelisi süsteeme.
Juhtimisteoorias kasutatakse süsteemide kujutamiseks struktuurskeeme, kus süsteeme kujutatakse ristkülikukujulise plokiga. Sisendit või sisendeid kujutatakse tavaliselt ploki vasaku külje poole suunatud noolega ja väljund või väljundid on kujutatud ploki paremalt küljelt eemale suunatud noolega. Mitmest plokist koosnevas keerulisemas süsteemis võivad mõne ploki sisendid olla paremal ja väljundid vasakul pool. Häiringutegureid kujutatakse nooltega, mis osutavad süsteemi kujutava ploki ülaosa suunas. Kui süsteem on ühemõõtmeline, on kõik nooled ühekordsed, ja kui süsteem on mitmemõõtmeline, on nooled kahekordsed. Joonistel 2.2 ja 2.3 on näidatud vastavalt ühemõõtmeline ja mitmemõõtmeline süsteem.



Joonis 2.2. Ühemõõtmeline süsteem



Joonis 2.3. Mitmemõõtmeline süsteem

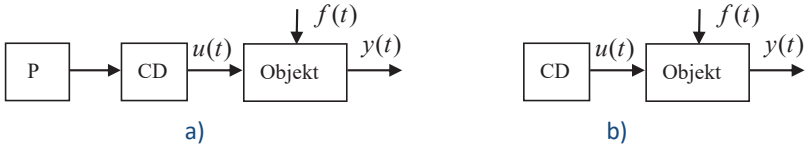
2.2 Automaatjuhtimissüsteemide põhimõtted

Enne juhtimise aluspõhimõtetest rääkimist tuleb määratleda kaks mõistet – reguleerimine ja juhtimine.
Reguleerimine on süsteemi tahtlik mõjutamine põhieesmärgiga hoida selle väljundväärtus mingis eelmääratud vahemikus. Automaatse reguleerimise korral täidetakse seda ülesannet ilma inimese otsese sekkumiseta. James Vatti tsentrifugaalregulaator on tüüpiline automaatne reguleerimissüsteem. Reguleeritav suurus, mis on tegelikult süsteemi (aurumasina) väljundreaktsioon, on masina võlli pöörlemiskiirus, mida tuleb hoida konstantsena, ja tahtlik mõju masinale on auruventiili automaatne avamine ning sulgemine tsentrifugaalregulaatori poolt.
Juhtimine on reguleerimisest üldisem mõiste ja tähendab süsteemi suunatud mõjutamist selle tööomaduste üldiseks parandamiseks teatud aspektis. Seega võib öelda, et reguleerimine on juhtimise erijuhtum ja enamiku automatiseerimisülesannete korral on need mõisted sünonüümid. Automaatjuhtimine on selline juhtimistegevus, mida tehakse ilma inimese otsese sekkumiseta.

On selge, et automaatreguleerimise või automaatjuhtimise ülesande lahendamiseks on vajalik projekteerida, valmistada ja juhitava objektiga ühendada spetsiaalne seade, mida nimetatakse regulaatoriks või juhtseadmeks.
Juhtseadme olemasolu on kõikide automaatjuhtimissüsteemide põhiline ja asendamatu tingimus. See on seade, mis edastab juhitavale objektile juhtimise eesmärgist sõltuvalt kindla eesmärgiga ja teatud reeglite kohaseid mõjutusi. Selleks eesmärgiks võib olla objekti väljundi hoidmine antud piires maksimaalse täpsusega, maksimaalne jõudlus, süsteemi maksimaalne tõhusus, minimaalne energiatarve jne.
Juhtseadme ja juhitava objekti kombinatsiooni nimetatakse automaatjuhtimissüsteemiks (AJ) või lühidalt juhtimissüsteemiks (S).
Juhtseadme tööpõhimõtete kohaselt jagunevad automaatjuhtimissüsteemid avatud kontuuriga juhtimissüsteemideks, häiringu põhimõttel töötavateks süsteemideks, hälbe põhimõttel töötavateks süsteemideks ning korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötavateks süsteemideks. Enne nende üksikasjalikku tutvustamist tuleb rõhutada, et nende automaatjuhtimissüsteemide tööpõhimõte ei sõltu ei juhitava objekti ega juhtseadme füüsikalisest olemusest. Põhimõte on sama elektriliste, elektrooniliste, mehaaniliste, elektromehaaniliste, termodünaamiliste, hüdrauliliste, pneumaatiliste ja isegi majanduslike süsteemide korral.

2.2.1. Avatud kontuuriga juhtimissüsteemid

Selle juhtimispõhimõtte sisuks on põhimõte, et juhtimisalgoritm on loodud ainult juhitava objekti (seadme, tehnoloogilise protsessi) soovitud tegevusalgoritmi alusel, võtmata arvesse selliseid tegureid, nagu objekti mõjutavad häiringud, või objekti väljundi tegelik seisund. Joonisel 2.4 on näidatud kahte avatud kontuuriga juhtimissüsteemi versiooni. Joonisel 2.4 a) tähistab P seadet, mida nimetatakse programmaatoriks ja mis genereerib tegevusalgoritmi. Seda algoritmi kasutatakse juhtseadmes. See on tehniline süsteem, mis rakendab programmaatori genereeritud käske objektile. Joonisel 2.4 b) esitatud skeemil on tegevusalgoritm otse juhtseadmesse sisse ehitatud. See süsteem saab teha ainult ühte tegevust, mis on eelmääratud juhtseadme projekteerimisel ja on esimese süsteemiga võrreldes vähem paindlik objekti võimalike erinevate tegevuste suhtes.

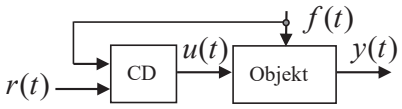


Joonis 2.4. Avatud kontuuriga juhtimissüsteem

2.2.2. Häiringu põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid

Seda juhtimispõhimõtet nimetatakse ka kompenseerimise põhimõtteks. Selle olemus seisneb järgmises. Kõik juhitavad objektid on rohkem või vähem häiringutegurite või häiringute mõju all (vt ptk 2.2). Kui häiringud on sellised, et avatud kontuuriga juhtimissüsteem ei suuda tagada juhtalgoritmi rakendamist soovitud täpsusega, võib olla mõistlik mõõta häiringutegureid või vähemalt põhilist häiringutegurit ja edastada see info juhtseadmele. Selle täiendava info põhjal tehakse juhtseadme juhtalgoritmi asjakohased

muudatused mõõdetud häiringu (häiringute) neutraliseerimiseks. Häiringu põhimõttel töötavat juhtimissüsteemi on näidatud joonisel 2.5. Suurust nimetatakse tugiväärtuseks – see on objekti väljundreaktsiooni soovitud väärtus või muutumise kuju ja $y(t)$ on selle suuruse tegelik väärtus või muutumise kuju. Juhtseadme genereeritud juhtsignaal objekti jaoks on mõõdetud häiringu funktsioon $f(t)$ - $u(t) = G\big(f(t)\big)$. Seda funktsiooni saab valida nii, et vahe $r(t) - y(t)$ hoitakse nullina, st väljund järgib tugiväärtust.

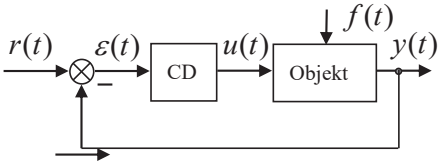


Joonis 2.5. Häiringu põhimõttel töötav juhtimissüsteem

Häiringu põhimõttel töötavatel juhtimissüsteemidel on üks oluline puudus. Need suudavad kompenseerida ainult mõõdetavaid häiringuid. Tavaliselt on juhitavat objekti mõjutavad häiringutegurid ainult osaliselt mõõdetavad. Kui teatud häiringut ei saa mõõta, ei ole võimalik muuta juhtseadme juhtalgoritmi selliselt, et häiringu mõju oleks neutraliseeritud.

2.2.3. Hälbe põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid. Tagasiside põhimõte

Seda tüüpi on valdav osa tööstuslikest automaatjuhtimissüsteemidest. Hälbe põhimõttel süsteemi juhtimist näitlikustab joonis 2.6.



Joonis 2.6. Hälbe põhimõttel töötav juhtimissüsteem

Selle printsiibi põhiidee on, et häiringutegurite mõõtmise asemel (mis ei ole alati edukas ja isegi kui on, ei saa kunagi olla kindel, et ei ole muid juhitava süsteemi dünaamikat mõjutavaid häiringutegureid) mõõdetakse otse objekti väljundreaktsiooni. Tugiväärtust märgitakse sümboliga $r(t)$. Väljundi mõõdetud reaktsioon $y(t)$ antakse tagasi juhtseadme sisendisse, kus arvutatakse tugiväärtuse ja tegeliku väärtuse erinevus.

$$\varepsilon(t) = r(t) - y(t)\,. \tag{2.3}$$

Seda erinevust nimetatakse automaatjuhtimissüsteemi veaks. See põhimõte töötab juhul, kui suurused $r(t)$ ja $y(t)$ on konstantsed või kui need muutuvad ajas sama seaduspärasuse järgi. Mõlemal juhul saab juhtseade reaalajas infot erinevuse kohta tugiväärtuse ja tegeliku väljundi vahel. Seega juhtseade või regulaator genereerib sobival ajahetkel objektile juhtsignaali $u(t)$, mis arvutatakse nii, et erinevus $\varepsilon(t)$ läheneks nullile.

Hälbe põhimõttel juhtimist nimetatakse ka tagasiside põhimõttel juhtimiseks. Tagasisideks nimetatakse mõõdetud väljundsignaali suurust, mis antakse tagasi juhtseadme sisendisse. Teoreetiliselt saab joonisel 2.6 kujutatud lahutuslülituses tekitada mitte ainult tugiväärtuse

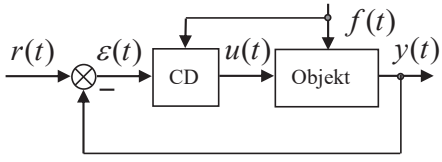
$r(t)$ ja mõõdetud väljundi $y(t)$ erinevust, vaid ka summat. Liitmise korral öeldakse, et juhtimissüsteemil on positiivne tagasiside Kui suurusi $r(t)$ ja $y(t)$ lahutatakse, nagu on näidatud joonisel, on juhtimissüsteemil negatiivne tagasiside. Positiivse tagasisidega juhtimissüsteeme kasutatakse praktikas äärmiselt harva. Negatiive tagasisidega süsteemid on aga peaaegu kõikide automaatjuhtimissüsteemide vältimatud osad.

Hälbe põhimõttel töötavate juhtimissüsteemide põhiline eelis häiringu mõõtmisel töötavate süsteemide ees on järgmine. Objektil on erinevaid häiringutegureid, mõned nendest on mõõdetavad, mõned mitte. Enamik nendest mõjutavad aga objekti väljundsuuruse $y(t)$ dünaamikat. Mõõdetakse $y(t)$ ja ei proovita mõõta häiringuid, seetõttu on kindel, et kõikide häiringutegurite mõju süsteemi dünaamikale neutraliseeritakse kaudselt. Juhtseade saab tagasiside kaudu info väljundsuuruse konkreetse hetke hälbe suuruse kohta (erinevus tugiväärtusest) ja genereerib juhtsignaali, mis püüab tuua süsteemi väljundi tagasi soovitud väärtusele. Seega, ilma et juhtseade saaks infot süsteemi mõjutavate häiringute kohta, töötab see kaudselt neid neutraliseerides.

2.2.4. Korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid

Häiringu põhimõttel töötavad juhtimissüsteemid on kiiremad, sest juhtseade saab infot mõõdetud häiringu kohta otse, kuid need süsteemid ei ole nii täpsed ja usaldusväärsed, nagu eespool näidatud.

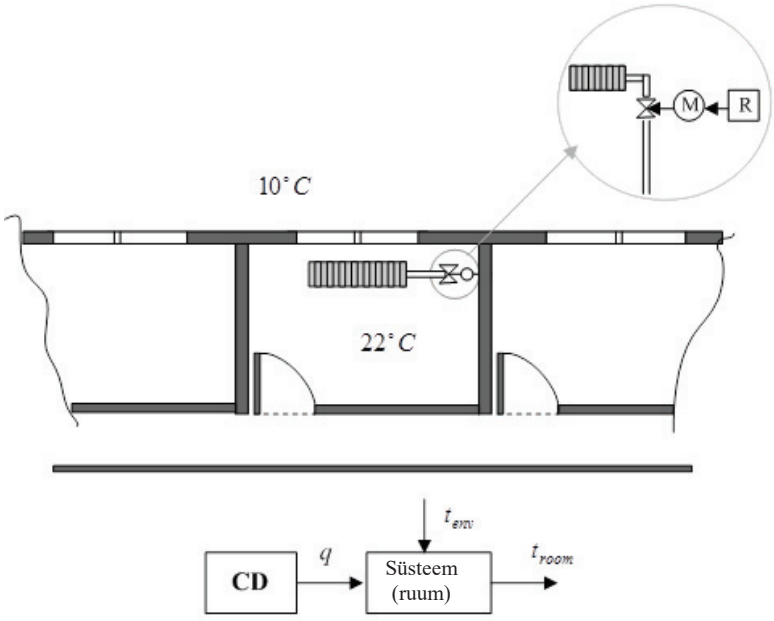
Juhtimissüsteemid, mis töötavad hälbe põhimõttel, on täpsemad, kuid mõnel juhul võivad olla märgatavalt aeglasemad. Selle põhjus on, et häiringutegurid nõuavad objektilt teisendamiseks siirdeaega, eriti juhul, kui objekti iseloomustavad suured ajakonstandid. Häiringuteguri objektile mõjumise hetkest kuni objekti väljundi muutumiseni selle mõju tõttu võib minna kaua aega ja info selle muutuse kohta liigub juhtseadmesse tagasiside kaudu. Sellepärast on mõnel juhul kohane kasutada automaatjuhtimissüsteeme, mis ühendavad mõlemat juhtimispõhimõtet. Joonisel 2.7 on esitatud korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötavat juhtimissüsteemi.



Joonis 2.7. Korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötav juhtimissüsteem

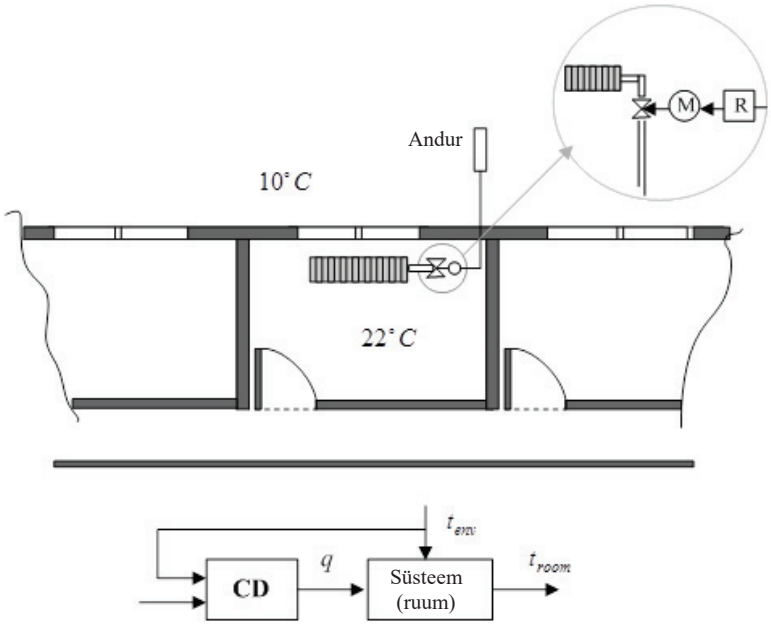
2.2.5. Põhilisi juhtimisprintsiipe illustreeriv näide

Järgmise näitega saab illustreerida nelja eespool käsitletud juhtimisprintsiipi. Võtame juhitavaks objektiks ruumi, mille temperatuuri tuleb hoida konstantsena – näiteks umbes $22\ ^{\circ}\mathrm{C}$. Ruumi küttesüsteemis on asjakohane kütteseade ja seda juhtiv regulaator, mis lülitab kütteseadet sisse või välja. Võttes ruumi juhtimisobjektina, võib öelda, et objekti sisendsignaal $u(t)$ on regulaatori edastatud käsud kütteseadme sisse ja välja lülitamiseks ning objekti väljundsignaal $y(t)$ on ruumi temperatuur.



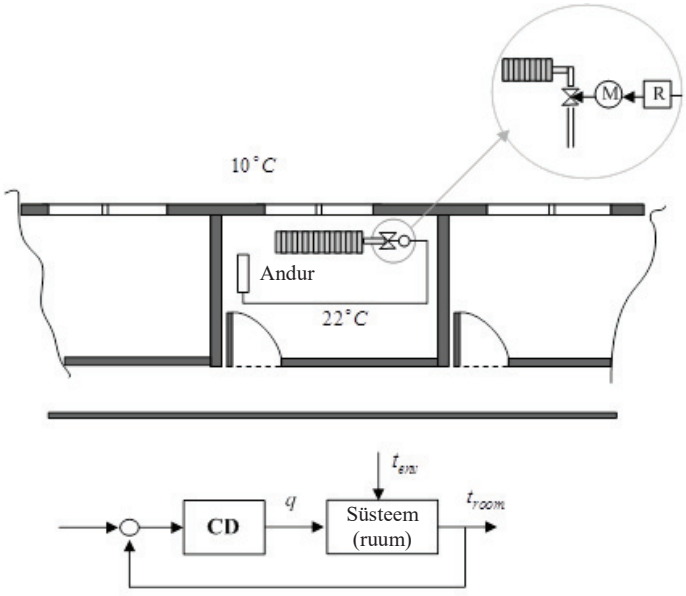
Joonis 2.8. Avatud kontuuriga juhtimissüsteemi näide

- Avatud kontuuriga juhtimissüsteemi (joonis 2.8) kasutamise korral tuleb teha varem arvutused selle kohta, millal ja kui kaua peaks kütteseade olema sisselülitatud, et ruumi temperatuur püsiks soovitud vahemikus. Seejärel, kasutades suhteliselt lihtsat taimeriga varustatud juhtseadet, saab korraldada selle algoritmi alusel automaatse sisse ja välja lülitamise. Avatud kontuuriga juhtimissüsteemide peamine puudus on, et juhtsignaali genereerimine objektile ei võta arvesse objektile mõjuvaid häiringuid. Ülalkirjeldatud algoritm töötab hästi ainult juhul, kui välistemperatuur ei muutu. Arvutused kütteseadme sisse ja välja lülitamiseks on tehtud teatud konstantse välistemperatuuri jaoks. Välistemperatuur on objekti mõjutav peamine häiring $f(t)$. Välistemperatuuri mistahes muutumine mõjutab ruumi temperatuuri olenemata kütte juhtimisalgoritmi tööst. Avatud kontuuriga juhtimissüsteem töötab sellise objekti korral hästi ainult juhul, kui ruum paikneb hoone sees ja sellel ei ole välisseinu.



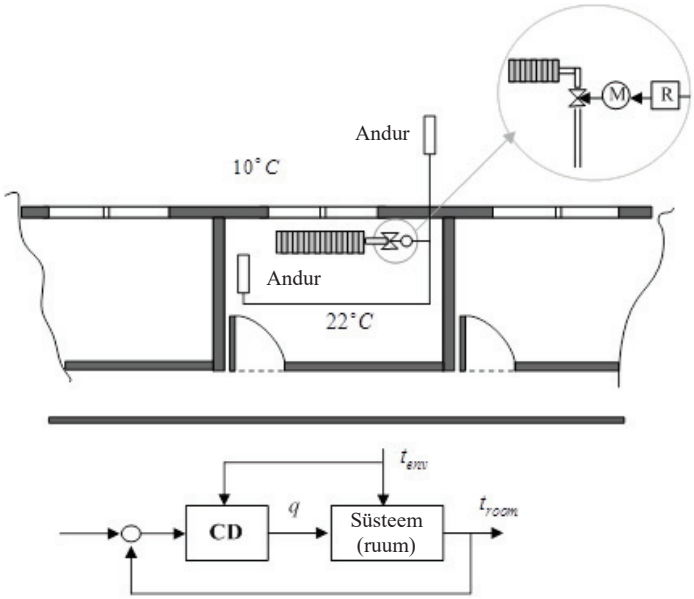
Joonis 2.9. Häiringu põhimõttel töötava juhtimissüsteemi näide

- Häiringu põhimõttel töötava juhtimissüsteemi (joonis 2.9) koosseisu kuulub selle objekti korral andur, mis mõõdab pidevalt peamise häiringuteguri (välistemperatuuri) väärtust. Info selle temperatuuri kohta edastatakse kütteseadme regulaatorisse. Regulaatori tegevusalgoritm peab olema selline, et loetakse häiringutegurit ja tehakse sellele vastavad muudatused kütteseadme juhtimises. Kuigi see süsteem töötab palju paremini, kui avatud kontuuriga süsteem, ei ole see ideaalne. Näiteks, kui ruumi ja koridori vahel on uks avatud ja koridor on külm, ei suuda välistemperatuuri andur seda uut häiringut arvestada, seega ei suuda juhtalgoritm tagada soovitud ruumitemperatuuri ja see saab olema soovitust madalam. Samuti olukorras, kui mingil põhjusel on ruumis sisse lülitatud ka teine kütteseade, tõuseb ruumi temperatuur soovitud temperatuurist kõrgemaks sõltumata kütte juhtalgoritmi tööst, mis mõjutab peamise häiringusignaali (välistemperatuuri) tuvastamise alusel ainult esimest kütteseadet.
- Hälbe põhimõttel töötava juhtimissüsteemi korral (joonis 2.10) tuleb kasutada tagasisidet (objekti väljundi jälgimiseks), st kirjeldatud juhul tuleb võtta arvesse ruumi sisetemperatuuri. Info selle temperatuuri kohta edastatakse juhtseadmesse. Võrreldes häiringu põhimõttel töötava süsteemiga ei ole muudatus tehniliselt suur. Sel juhul on temperatuuriandur paigaldatud ruumi sisse ja juhtalgoritmi on muudetud nii, et kütteseadme juhtsignaale saab rakendada ruumi soovitud ($r(t)$) ja tegeliku ($y(t)$) temperatuuri erinevuse alusel. Sellisel moel on neutraliseeritud kõikide häiringutegurite (välistemperatuuri muutus, koridoriukse avamine jne) mõju.



Joonis 2.10. Hälbe põhimõttel töötava juhtimissüsteemi näide

- Juhtimissüsteemil, mis töötab korraga häiringu ja hälbe põhimõttel (joonis 2.11), on kaks temperatuuriandurit. Kirjeldatud juhul on üks neist väline ja mõõdab peamist häiringutegurit – välistemperatuuri. Teine paikneb ruumis sees ja jälgib objekti väljundit – sisetemperatuuri. Kahest andurist liigub info regulaatorisse ja nende andmete alusel muudetakse kütteseadme juhtimise algoritmi. See süsteem suudab välistemperatuuri muutustele reageerida palju kiiremini, sest ei oota sisetemperatuuri muutumist, mis võib kesta tunde. Samal ajal reageerib süsteem adekvaatselt muudele häiringuteguritele, nagu näiteks koridoriukse avamisele.



Joonis 2.11. Korraga häiringu ja hälbe põhimõtetel töötava juhtimissüsteemi näide

2.3 Enesekontroll

1. Ühedimensioonilisel süsteemil on:
   a. Üks sisend ja mitu väljundit;
   b. Üks sisend ja üks väljund;
   c. Mitu väljundit kuid mitte ühtegi sisendit;
   d. Mitu sisendit ja mitu väljundit.

2. Juhtimissüsteemi väljundsignaali tähistatakse:
   a. $u(t)$;
   b. $y(t)$;
   c. $f(t)$;
   d. $x(t)$.

3. Kui juhtimissüsteem on üles ehitatud häiringuprintsiibile siis selle juhtimisseade saab infot:
   a. Häiringute mõjust juhitavale objektile;
   b. Objekti väljundsignaalist;
   c. Objekti sisendsignaalist;
   d. Objekti väljundsignaalist ja häiringutest, mis mõjutavad objekti.

4. Milline on selliste juhtimissüsteemide põhiline eelis kui need töötavad hälbe (kõrvalekalde) põhimõttel?
   a. Kiiretoimelisus;
   b. Kõik häiringud, millised mõjutavad objekti, on võetud vaatluse alla all;
   c. Nad neutraliseerivad vaid põhilisi häiringuid;
   d. Nad on kõige odavamad.

5. Mida tähistatakse tähisega $\varepsilon(t)$ automaatjuhtimissüsteemis?
   a. Väljundsignaali;
   b. Häiringusignaali;
   c. etteandesignaali;
   d. etteandesignaali (tugiväärtuse) ja väljundsignaali vahet (erinevust).

3 JUHTIMISSÜSTEEMIDE LÜHIKE KLASSIFIKATSIOON

Juhtimissüsteemid on oma olemuselt väga erinevad. Suur osa süsteemidest järgib siiski oma töös sarnaseid seaduspärasusi või on sarnased mõne funktsiooni poolest. Juhtimissüsteemide üksikasjalikku ja täielikku klassifikatsiooni on raske teha. Klassifitseerida saab erinevate tunnuste alusel. Juhtimissüsteemide erinevate tunnuste alusel klassifitseerimisest üldise ülevaate andmiseks on allpool kirjeldatud peamisi klasse.

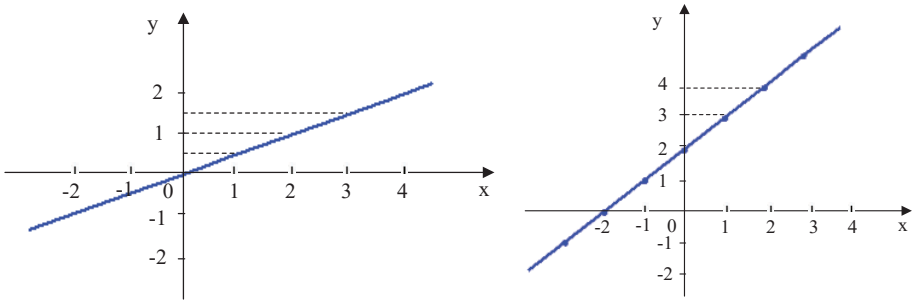
3.1 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine lineaarsuse järgi

Selle tunnuse alusel on automaatjuhtimissüsteemid jagatud lineaarseteks ja mittelineaarseteks.

Lineaarsed süsteemid järgivad matemaatikast tuntud superpositsiooni printsiipi. Lineaarsete süsteemidega on lihtne töötada ja nende jaoks on ammu välja töötatud üldine ja töökindel matemaatiline teooria. Seega on need eelistatud süsteemid ja mitte ainult juhtimisteooria raames. Lineaarsete juhtimissüsteemidega töötavaid protsesse kirjeldatakse matemaatiliselt lineaarvõrranditega, st et lineaarsete süsteemide sisend- ja väljundsuuruste suhe on lineaarne.

Mittelineaarsetes süsteemides on see suhe mittelineaarne. Mittelineaarsete süsteemide analüüsimiseks ei ole olemas üldist teooriat. Mittelineaarsete süsteemide teatud klasside analüüsimiseks on välja töötatud konkreetsed meetodid. Üldiselt on mittelineaarsete süsteemidega töötamine oluliselt keerulisem lineaarsete süsteemidega töötamisest. Lineariseerimise abil on aga teatud eeldustel võimalik mittelineaarset süsteemi kirjeldada lineaarse mudeliga ja seda lähenemismeetodit kasutatakse mittelineaarsete süsteemide analüüsimisel päris sageli.

Lineaarsuse/mittelineaarsuse omadust on võimalik illustreerida paari lihtsa näitega. Joonisel 3.1 on esitatud kaks lihtsat lineaarset funktsiooni: $y = 0.5x$ ja $y = x + 2$. Need kaks funktsiooni kirjeldavad sirgjoont tasandil (x, y). Joonisel 3.2 on esitatud kaks mittelineaarset funktsiooni: $y = x^2$ ja $y = x^3 - 3$. Nagu näha, kirjeldavad need funktsiooni kõverjoont tasandil (x, y). Sellepärast muudab matemaatilise mudeli muutujate väärtus astmel 2, 3 (jne) süsteemi mittelineaarseks.



Joonis 3.1. Lineaarsete funktsioonide näited

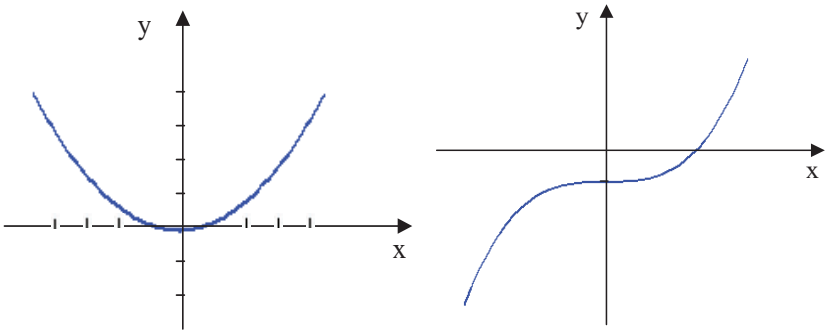
3.2 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine juhtimisprintsiibi alusel

Selle tunnuse kohaselt jagunevad automaatjuhtimissüsteemid avatud kontuuriga juhtimissüsteemideks, häiringu põhimõttel töötavateks süsteemideks, hälbe põhimõttel töötavateks süsteemideks ning korraga häiringu ja hälbe põhimõttel töötavateks süsteemideks. Neid põhimõtteid tutvustati täpsemalt peatükis 2.

3.3 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine statsionaarsuse järgi

Statsionaarsuse tunnus tähendab seda, kas juhtimissüsteemi parameetrid on konstantsed või muutuvad ajas.

Kui süsteemi kõik parameetrid on kindlalt määratud ja ei muutu süsteemi töötamise kestel, on süsteem statsionaarne. Kui vähemalt üks süsteemi parameetritest ei ole konstantne, vaid muutub ajas teatud seaduspärasuse järgi, on süsteem mittestatsionaarne. Mittestatsionaarseid süsteeme on oluliselt keerulisem analüüsida.



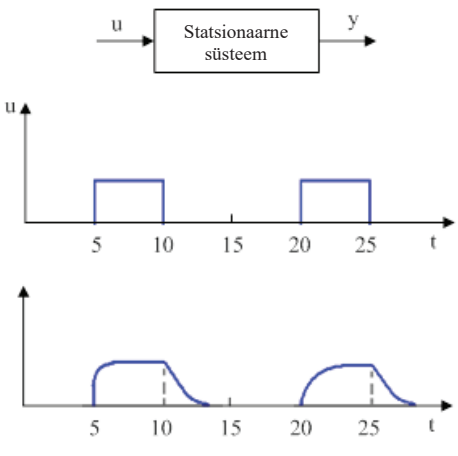
Joonis 3.2. Mittelineaarsete funktsioonide näited

Sageli on süsteemis muutuvaid parameetreid, kuid nende muutumisintervall on suurusjärgu võrra väiksem süsteemi peamistest ajakonstantidest või süsteemi siirdeprotsessist. Siirdeprotsess on protsess, mis toimub alates sisendsuuruse muutumisest kuni väljundsuuruse uue väärtuse kehtestamiseni. Sellistel juhtudel loetakse süsteemiparameetrite muutumine ebaoluliseks ja need võib jätta arvestamata. Seega võib nõrga mittestatsionaarsusega süsteeme lugeda statsionaarseteks süsteemideks.

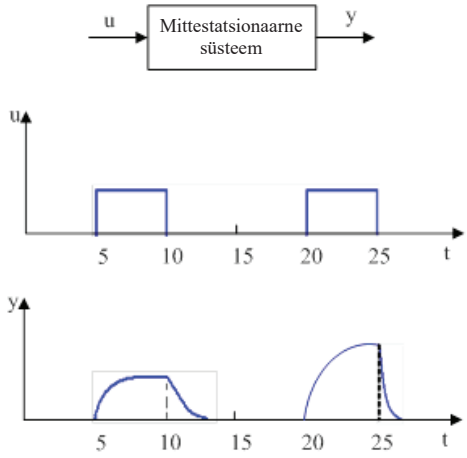
Joonisel 3.3 on esitatud statsionaarse süsteemi näide. Kui süsteemi sisendisse antakse identsed impulsid erinevatel ajahetkedel, reageerib süsteem samal moel, st väljundreaktsioonid on alati samasugused. Joonisel 3.4 on esitatud mittestatsionaarse süsteemi näide. Selle väljundreaktsioonid identsetele sisenditele on erinevad, sõltuvalt sisendsignaali rakendamise hetkest. Selle põhjus on mittestatsionaarse süsteemi mõne parameetri muutumine.

Mittestatsionaarsust saab illustreerida muutuva massiga süsteemi näite varal. Lennuk on muutuva massiga süsteemi tüüpiline näide: kütuse kogus võib olla 40% või rohkemgi lennuki kogumassist. Maksimaalse pikkusega lennu ajal väheneb lennuki mass oluliselt, seega võib massiparameetri järgi lugeda lennuki mittestatsionaarseks süsteemiks. Mittestatsionaarsus on väga ilmekas ja seda ei saa ignoreerida eelnevates arvutustes selle kohta, kui palju kütust peab laadima lennukisse selleks, et lennata teatud kaugusele lennuki konkreetse summaarse

stardimassi ja kindla kütusetarbe korral. Mõnel teistsugusel sõidukil, näiteks veokil, moodustab kütuse mass ainult 1–2% kogumassist. Seega on kütusetarbega seotud mittestatsionaarsus ja sellest tulenev kogumassi vähenemine väike ja selle võib jätta arvesse võtmata, kui arvutatakse vajalikku kütusekogust konkreetse koormuse ja sõidukauguse jaoks konkreetse kütusetarbe korral.



Joonis 3.3. Statsionaarne süsteem süsteem



Joonis 3.4. Mittestatsionaarne

3.4 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine eesmärgi alusel

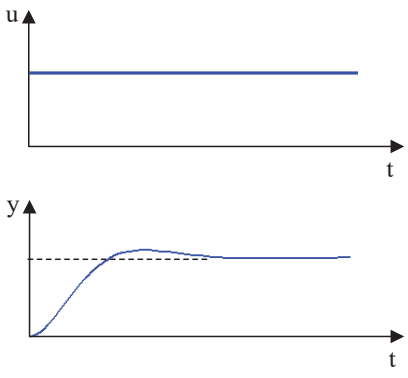
Automaatjuhtimissüsteeme saab eesmärgi alusel jagada stabiliseerimissüsteemideks, reguleerimissüsteemideks ja järgivsüsteemideks.

Stabiliseerimissüsteemid on tüüpilised automaatreguleerimissüsteemid. Nendes süsteemides on juhtimise (kirjeldatud juhul reguleerimise) eesmärk hoida väljundsuurust konstantsena, neutraliseerides häiringutegurite mõju objektile. Sisendmõju nendes süsteemides on samuti konstantne – see on tugiväärtus või suurus, mis tuleb saavutada ja säilitada süsteemi väljundis. See võib olla näiteks süsteem, mis tagab ettenähtud vedelikutaseme paagis või WC loputuskastis.

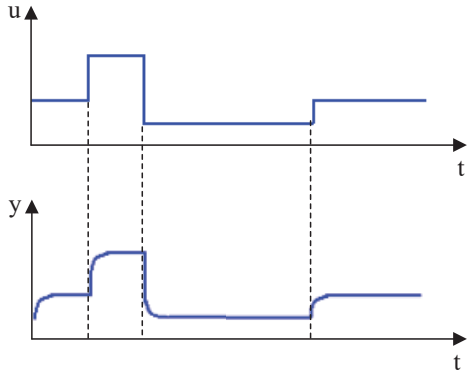
Reguleerimissüsteemid erinevad stabiliseerimissüsteemidest selle poolest, et sisendsuurus ei ole konstantne, vaid muutub etteantud seaduspärasuse järgi. See seaduspärasus on määratud tehnoloogilise protsessi nõuetega. Reguleerimissüsteemid on keerulisemad ja juhtseadet peab pidevalt mõjutama spetsiaalne programmseade, et tagada väljundi muutumine etteantud seaduspärasuse järgi. Reguleerimissüsteemi näide on automaatne pesumasin, kus trumli pöörlemissagedus (süsteemi väljundsuurus) muutub vastavalt programmile.

Automaatsetes järgivsüsteemides muutub sisendsuurus ajas samuti teatud seaduspärasuse järgi, kuid erinevalt reguleerimissüsteemi olukorrast, ei ole see seaduspärasus ette teada. Seetõttu peab automaatjuhtimissüsteem olema konstrueeritud ja häälestatud nii, et see jälgib pidevalt sisendsuuruse muutumist ning suudab nendele muutustele reageerida õigel ajal ja õigel viisil. Järgivsüsteemi näide on reaktiivhävitaja radar, kui see töötab sihtmärgi jälgimisrežiimis.

Joonis 3.5 näitab stabiliseerimissüsteemi sisend- ja väljundsignaali. Joonisel 3.6 on näidatud reguleerimissüsteemi sisend ja väljund. Automaatse järgivsüsteemi signaalid on sama-sugused kui reguleerimissüsteemil, erinevus on selles, et sisendsignaali väärtus ei ole ette teada.



Joonis 3.5. Stabiliseerimissüsteem



Joonis 3.6. Reguleerimissüsteem

Olenemata erinevatest ülesannetest, on nendel kolmel süsteemitüübil kaks ühist omadust. Esimene – kõigi kolme süsteemitüübi korral peab igal ajahetkel olema tagatud sisend- ja väljundsuuruste vastavus. Teine – kõik kolm süsteemitüüpi töötavad vastavuse säilitamiseks hälbe põhimõttel, st negatiivse tagasiside põhimõttel.

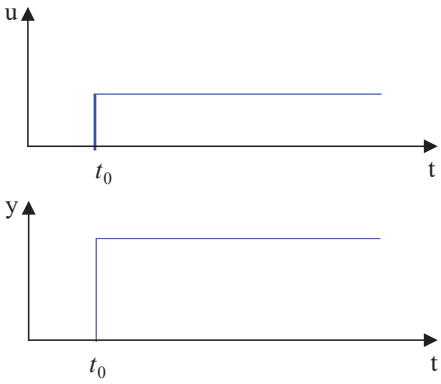
3.5 Automaatjuhtimissüsteemide klassifitseerimine dünaamilisuse järgi

Selle tunnuse järgi on juhtimissüsteemid jaotatud staatilisteks ja dünaamilisteks süstee-mideks.

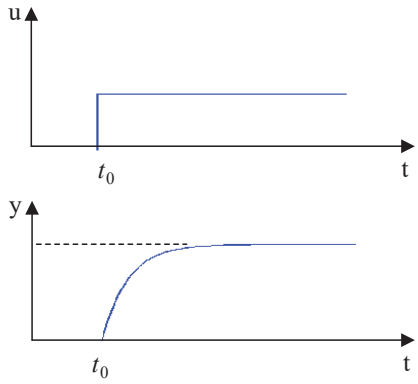
Staatilistes süsteemides järgib süsteemi väljundsuurus kohe ilma viivituseta sisendsuuruse igat muutust. Reaalsuses ei ole selliseid süsteeme olemas. Praktilistel põhjustel võib siiski juhul, kui keeruline süsteem on jagatud mitmeks alamsüsteemiks, lugeda staatilisteks selliseid alamsüsteeme, mille ajakonstant on oluliselt väiksem teiste alamsüsteemide ajakonstantidest. See võib oluliselt lihtsustada kogu süsteemi matemaatilist analüüsi, sest staatiliste alamsüsteemide matemaatilised mudelid on lihtsad algebravõrrandid, mitte diferentsiaalvõrrandid.

Dünaamilistes süsteemides on alati mingisugune hilistus alates momendist, kui signaal antakse süsteemi sisendisse kuni momendini, mil väljundsignaal saavutab muutunud sisendsignaali järgi uue taseme. Seda ajaperioodi nimetatakse süsteemi siirdeprotsessiks (siire) ja see on juhtimisteooria põhikontseptsioon. Siirdeprotsess näitab, et süsteemi väljund sõltub nii sisendsignaali hetkeväärtustest (nagu staatilise süsteemi korral) kui ka selle eelmistest väärtustest. Kui siirdeprotsess on pikem, tekib suur viivitus, kuni väljundsignaal saavutab uue taseme ehk süsteem reageerib sisendi muutustele aeglaselt. Sellepärast on soovitatav, et siirdeprotsess oleks võimalikult lühike. Kõik reaalsed süsteemid on dünaamilised süsteemid. Neid süsteeme nimetatakse ka mäluga süsteemideks, sest eeldatakse, et siirdeprotsess või objekti väljundsignaali dünaamika moodustavad selle

objekti „mälu“ ja selle järgi on võimalik tuvastada objekti mitmeid omadusi ilma seda üksikasjalikult tundmata (süsteemi identifitseerimine).
Joonis 3.7 näitab staatilise süsteemi sisend- ja väljundsignaale ning joonis 3.8 samu signaale dünaamilises süsteemis. Sisendsignaal rakendatakse süsteemile ajahetkel t_0. Staatilise süsteemi väljund saavutab kohe sisendsignaali amplituudile vastava stabiilse väärtuse. Dünaamilise süsteemi väljundväärtus saavutab oma stabiilse väärtuse pärast teatud siirdeprotsessi.



Joonis 3.7. Staatiline süsteem



Joonis 3.8. Dünaamiline süsteem

Automaatjuhtimissüsteeme saab klassifitseerida ka muude tunnuste alusel. Signaalide olemust ja peatükis 1 esitatud signaalide klassifikatsiooni arvestades võib süsteeme jaotada ka: pidevad/diskreetsed, määratud/juhuslikud, jne. Sisendite ja väljundite arvu järgi saab süsteeme jaotada ühemõõtmelisteks (millel on ainult üks sisend ja üks väljund) ja mitmemõõtmelisteks (millel on kaks või rohkem sisendit või väljundit).

3.1 Enesekontroll

1. Milline järgnevatest funktsioonidest on lineaarne?
   a. $y = 2 - x^2$;
   b. $y = 5x^4 - 1$;
   c. $y = x^3$;
   d. $y = 2x - 3$.

2. Kui süsteem on mittestatsionaarne, siis võivad toimuda muutused:
   a. selle süsteemi parameetrites;
   b. sisendsignaalis (väärtuses);
   c. väljundsignaalis (väärtuses);
   d. häiringutes mis mõjutavad süsteemi.

3. Dünaamilist süsteemi kutsutakse ka:
   a. stohhastiliseks süsteemiks;
   b. mitmemõõtmeliseks süsteemiks;
   c. mäluga süsteemiks;
   d. staatiliseks süsteemiks.

4. Süsteemi, milles sisendsignaal muutub vastavalt eelnevalt teada oleva seaduspärasuse kohaselt, kutsutakse:
   a. järgivsüsteemiks;
   b. programmsüsteemiks;
   c. stabiliseerivaks süsteemiks;
   d. stohhastiliseks süsteemiks.

4 LINEAARSETE SÜSTEEMIDE MUDELITE PÕHITÜÜBID

Mehhatroonikas lahendatakse süsteemi analüüsi, süsteemi disaini, regulaatori disaini jms ülesanded matemaatiliste mudelite abil. Nende ülesannete lahendamisel kasutatakse klassikalise ja tänapäevase juhtimisteooria vahendeid. See peatükk annab lühikese ülevaate lineaarsete süsteemide matemaatiliste mudelite põhitüüpidest.

4.1 Matemaatilised mudelid. Põhimõisted

Mudeli kontseptsioon on suhteliselt üldine ja mitmetähenduslik. Süsteemi mudel on süsteemi teatud kujutis, mis peegeldab selle teatud omadusi. Mudelid võivad olla füüsikalised ja matemaatilised.

- Süsteemi füüsikaline mudel kujutab selle tegelikult olemasolevat koopiat, tavaliselt väiksemate mõõtmetega (skaalakoopia). Näiteks uut tüüpi lennuki projekteerimise teatud etapil luuakse sellest väiksem mudel, mida seejärel testitakse aerodünaamikatorus tulevase lennuki kuju optimeerimiseks, et saavutada minimaalne aerodünaamiline takistus ja head lennukarakteristikud. Füüsikalisel modelleerimisel testitakse katseliselt reaalset süsteemi erinevates režiimides ja erinevates tingimustes, erinevate sisendsignaalidega, erinevat tüüpi ja arvu häiringuteguritega, jne. Füüsikalise mudeli katsetamisel võidakse avastada nähtusi, mida seejärel on vaja teoreetiliselt analüüsida.
- Juhtimissüsteemi matemaatiline mudel on süsteemi abstraktne kirjeldus matemaatiliste avaldiste abil – kõige sagedamini koosneb see ühest või mitmest diferentsiaalvõrrandist. Ilmselge on, et süsteemi matemaatiline mudel suudab leida ainult mõned süsteemi põhilised ja olulised omadused. Tuleb rõhutada, et matemaatiline mudel kirjeldab süsteemi dünaamikat tavaliselt ainult siirdeprotsessis – alates signaali andmisest (või muutmisest) süsteemi sisendisse, kuni hetkeni, mil väljundsignaal saavutab konkreetse sisendsignaali korral stabiilse taseme.

Ilma matemaatilise mudelita ei ole tänapäevast automaatjuhtimissüsteemi võimalik projekteerida, sest mistahes tänapäevase juhtimissüsteemi väljatöötamise oluline osa on teoreetiline analüüsi, mida ei ole võimalik teha ilma matemaatilise mudelita. Teisest küljest ei ole tänapäevase juhtimissüsteemi projekteerimisel tavaliselt füüsikalist mudelit vaja. Kõige sagedamini tehakse arvutisimulatsioone matemaatilise mudeli alusel. Tänapäevane arvutitehnoloogia on tasemel, mis võimaldab teha keerukaid matkemodelleerimisi laialt levinud ja käepärase matkemodelleerimistarkvaraga (näiteks Matlab), mis töötab tavalises arvutis.

Matemaatiliste mudelite alusel on juhtimisteoorias lahendatud palju põhiülesandeid. Need saab jagada kahte suurde rühma – analüüsi- ja sünteesiülesanneteks.

- Analüüsiülesannete lahendamisel on süsteemi täpne matemaatiline mudel ja selle algtingimused teada. Eesmärk on uurida süsteemi käitumist erinevate sisendsignaalide korral. Selle analüüsi alusel võib teha olulisi järeldusi, nt süsteemi stabiilsuse või selle kvalitatiivsete näitajate kohta.
- Sünteesiülesannete lahendamise korral määratletakse kõigepealt süsteemi soovitud käitumine konkreetse sisendsignaali korral. Eesmärk on koostada matemaatiline mudel ja selle alusel tegelik süsteem, mis käitub ettenähtud viisil.

Kuidas matemaatiline mudel välja töötatakse? Selleks on kaks lähenemisviisi – matemaatilise modelleerimise vahendite kasutamine ja süsteemi identifitseerimine. Need lähenemisviisid on teineteisest radikaalselt erinevad.

- Matemaatiline modelleerimine – süsteem jagatakse mõtteliselt erinevateks üksusteks, analüüsitakse, millised füüsikaseadused ja mis osas süsteemile kohalduvad, leitakse tuntud teoreetiliste seaduspärasuste alusel sõltuvused nende üksuste muutujate vahel ja lõpuks ühendatakse süsteemi üksuste kirjeldused üldiseks matemaatiliseks mudeliks. Selline lähenemine ei tööta alati. Süsteemi kohta ei pruugi hea matemaatilise mudeli koostamiseks olla piisavalt põhjalikke teadmisi. Teine piirang on, et mõned süsteemiparameetrid võivad olla tundmatud ja seega on saadud mudel kasutamiseks liiga üldine. Näiteks, kui on vaja luua süsteemile hea regulaator, ei hakka selle üldine matemaatiline mudel tööle.
- Kui matemaatilise modelleerimisega ei ole võimalik süsteemi kohta piisavalt head ja esinduslikku mudelit koostada, võib see olla võimalik süsteemi identifitseerimise abil. Identifitseerimise korral vaadeldakse mudeldatavat süsteemi nn musta kastina, st objektina, millega saab teha katseid, kuid millest midagi teada ei ole. Musta kasti sisendisse antakse kindlaid signaale ja seejärel salvestatakse musta kasti väljundreaktsioon. Ainult nende kahe signaali põhjal saab identifitseerimisalgoritmide abil koostada objekti abstraktse matemaatilise mudeli, mis jäljendab selle põhilisi omadusi.

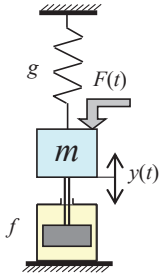
Juhtimisteoorias kasutatakse mitmeid matemaatiliste mudelite põhitüüpe – diferentsiaalvõrrandit, ülekandefunktsiooni, sageduskarakteristikuid, mudelit olekuruumis, universaalset regressioonimudelit.

- Diferentsiaalvõrrand on matemaatilise mudeli peamine tüüp. Ülalkirjeldatud süsteemi matemaatilise modelleerimise meetod annab tulemuseks tavaliselt matemaatilise diferentsiaalvõrrandite süsteemi. Tavaliselt on võimalik mudelit lihtsustada üheks kõrgema järgu diferentsiaalvõrrandiks, esitades süsteemi mõningaid muutujaid teiste muutujate kaudu.
- Ülekandefunktsioon on enim kasutatud matemaatilise mudeli tüüp klassikalises juhtimisteoorias. Töötamine diferentsiaalvõrranditega, eriti kui need on kõrgemat järku, võib olla keeruline. Ülekandefunktsioon on abstraktne matemaatiline mudel, mis on saadud algse diferentsiaalvõrranditega mudeli Laplace'i teisenduse abil. Seega sisaldab süsteemi matemaatiline mudel süsteemimuutujate tuletiste asemel ainult antud liitmuutuja astmeid. Sellisel moel teisendatud matemaatilise mudeliga töötamine on diferentsiaalvõrranditega töötamisest palju lihtsam.
- Sageduskarakteristikud on matemaatiliste mudelite kindel kogum, mis kirjeldavad süsteemi dünaamikat, kui süsteemi sisendisse antakse harmooniline signaal. Üks nende põhikasutusaladest on süsteemi stabiilsusanalüüsi sagedusmeetodid.
- Süsteemide matemaatilist kujutamist nn olekuruumis tehakse vektorite maatriksvõrrandite süsteemiga. Selle mudeli peamine eelis on väga hea sobivus sünteesiülesannetes kasutamiseks. Teiseks selle mudeli eeliseks on selle võrdne sobivus nii ühe- kui mitmemõõtmeliste süsteemide kujutamiseks.
- Universaalset parameetrilist mudelit, mida nimetatakse ka regressioonimudeliks, kasutatakse süsteemi identifitseerimiseks. Seda saab lihtsalt teisendada kõikideks muud tüüpi mudeliteks.

Käesoleva õpiku piiratud mahu tõttu on võimalik lühidalt tutvustada ainult diferentsiaal-võrrandite-tüüpi mudelit ja ülekandefunktsiooni.

4.2 Juhtimissüsteemide diferentsiaalvõrranditüüpi matemaatilised mudelid

Süsteemi matemaatilise mudeli koostamine on süsteemi põhiprotsesse kirjeldavate tuntud teoreetiliste seaduspärasuste rakendamine. Tavaliselt tekib selle lähenemisviisi kasutamise korral mitme diferentsiaalvõrrandiga matemaatiline süsteem. Näiteks illustreerib joonis 4.1 lihtsa mehaanilise vedrumass-võnkesummuti tüüpi süsteemi. Objekt massiga *m* on vedru abil ühendatud fikseeritud pinnaga, mille jõukonstant on *g,* ja summutiga, mille summutustegur on *f*. Objekti mõjutab välisjõud $F(t)$ (see on süsteemi sisendsignaal), mille tulemusena objekt liigub teatud vahemaa $y(t)$ võrra (süsteemi väljundreaktsioon).



Joonis 4.1. Lihtne mehaaniline süsteem

Rakendades Newtoni hästituntud seadust kehale mõjuvate jõudude tasakaalu kohta, saame järgmise võrrandi:

$$m\ddot{y}(t) + f\dot{y}(t) + gy(t) = F(t) \tag{4.1}$$

mis on lineaarne teise astme diferentsiaalvõrrand.

Üldiselt on juhtimissüsteemi diferentsiaalvõrrandite koostamine vastutusrikas ja keeruline ülesanne. Kui neid võrrandeid ei ole õigesti koostatud või kui neid on liigselt lihtsustatud, ei kirjelda võrrandid süsteemis tekkivaid protsesse õigesti ja ei täida seetõttu matemaatilise mudeli peamist eesmärki. Süsteemi analüüsimeetod võib olla väga hea, kuid siiski võib mudel jätta andmata õige vastuse vajalikele küsimustele ja ka viia valedele järeldustele süsteemis toimuvate protsesside kohta. Teisest küljest ei eeldatagi matemaatiliselt mudelilt tavaliselt süsteemi protsesside täielikku ja üksikasjalikku kirjeldust, vaid süsteemi kõige olulisemate omaduste kirjeldamist. Just need ongi juhtimisteooria huviorbiidis.

Üldiselt on ühemõõtmelise statsionaarse süsteemi (sisendsignaal $u(t)$ ja väljundsignaal $y(t)$) matemaatiline mudel mittelineaarne diferentsiaalvõrrand, mida saab kujutada järgmise üldvõrrandiga:

$$F\left(y(t),\ \dot{y}(t), \ddot{y}(t), \cdots, y^{(n)}(t),\ u(t), \dot{u}(t), \ddot{u}(t), \cdots, u^{(m)}(t)\right) = 0 \tag{4.2}$$

kus *F* on sisendsignaali, väljundsignaali ja nende tuletiste mittelineaarne funktsioon ning *n* on süsteemi järk, mis vastab süsteemi sõltumatute algtingimuste arvule.

Kui sisendsignaal $u(t)$ ja algtingimused $y(0), \dot{y}(0), \ddot{y}(0), \cdots, y^{(n)}(0)$ on võrrandiga (4.2) kirjeldatud süsteemi jaoks teada, on diferentsiaalvõrrandi (4.2) lahendamisega võimalik leida süsteemi väljundreaktsioon $y(t)$. Teiste sõnadega annab diferentsiaalvõrrandite (mis on tegelikult süsteemi matemaatiline mudel) lahendamine matemaatilise kirjelduse süsteemi reaktsioonile etteantud sisendi ja lähteandmete korral. Teistsuguse sisendsignaali korral võib lahendus olla täiesti teistsugune.

Võrrandi (4.2) lahendamisel saadud tulemus $y(t)$ jaoks on põhimõtteliselt süsteemi siirdeprotsessi analüütiline kirjeldus, st see kirjeldab süsteemi väljundi dünaamikat alates sisendsignaali andmisest, kuni süsteemi väljundi jõudmiseni etteantud väärtusele y_{set} (ainult stabiilse süsteemi korral, ebastabiilse süsteemi väljund läheneb lõpmatusele). Sama valemit (4.2) saab kasutada ka stabiliseerunud protsesside kirjeldamiseks süsteemis, st siis, kui analüüsi eesmärk on näha, mis juhtub väljundsignaaliga $y(t)$ pärast siirdeprotsessi lõppemist. Sisend- ja väljundsignaali vahelise seose leidmiseks on väljakujunenud püsiseisundis piisav nullida valemis (4.2) kõik $u(t)$ ja $y(t)$ tuletised:

$$F\big(y(t), 0, 0, \cdots, 0,\ u(t), 0, 0, \cdots, 0\big) = 0 \tag{4.3}$$

Võrrand (4.3) on tuntud kui süsteemi staatikavõrrand. Staatikavõrrand on lihtsalt algebravõrrand. Selle võrrandi lahendamine annab $y(t) = y_{set} = f\big(u(t)\big)$ väljundi stabiilse väärtuse. Võrrand (4.2) on tuntud, kui süsteemi dünaamikavõrrand. Vastupidi staatikavõrrandile, mille saab lahendada lihtsalt ja kergelt, võib dünaamikavõrrandi lahendamine olla väga raske ja mõnel juhul on selle analüütiline lahendamine isegi võimatu. Süsteemi väljundreaktsiooni $y(t)$ kindlaksmääramise analüütilise lähenemise korral tekitab põhiraskuse see, et diferentsiaalvõrrand (4.3) on mittelineaarne. Mittelineaarseid diferentsiaalvõrrandeid on palju keerulisem lahendada kui lineaarseid.

Automaatjuhtimissüsteemi lineaarset või mittelineaarset lineariseeritud mudelit saab kirjeldada üldistatud võrrandiga:

$$a_0 y^{(n)}(t) + \ldots + a_{n-1}\dot{y}(t) + a_n y(t) = b_0 u^{(m)}(t) + \ldots + b_{m-1}\dot{u}(t) + b_m u(t). \tag{4.4}$$

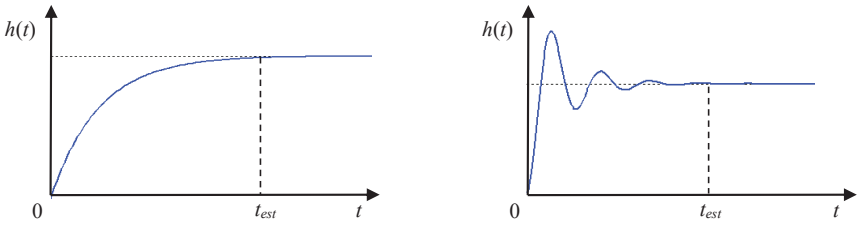
Avaldise (4.4) lahendus selle karakteristliku võrrandi kõige lihtsama reaal- ja lihtjuure korral on:

$$y(t) = c_1 e^{p_1 t} + c_2 e^{p_2 t} + \cdots + c_n e^{p_n t} + \eta(t), \tag{4.5}$$

kus p_i on süsteemi karakteristliku võrrandi $p^n + \ldots + a_{n-1}p + a_n = 0$ juured, c_i on konstandid, mis määratakse kindlaks algtingimustega ja $\eta(t)$ on erilahend, mille määrab sisendsignaal $u(t)$.

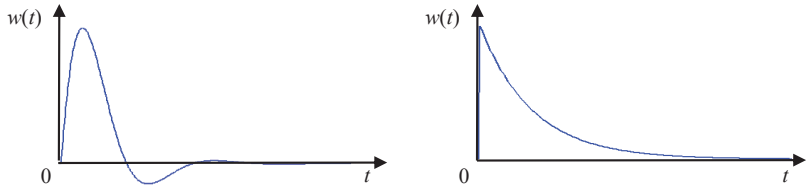
Kui süsteemi diferentsiaalvõrrand lahendatakse null-väärtusega algtingimuste korral ja kui sisendsignaaliks $u(t)$ on ühikhüppefunktsioon, nimetatakse saadud $y(t)$ lahendit süsteemi hüppekajaks (hüppefunktsioon, ülekandefunktsioon). Hüppekaja on iga juhtimissüsteemi oluline ajakarakteristik. See annab infot nii süsteemi siirdeprotsessi, kui ka pärast siirde-

protsessi väljakujunenud püsiseisundi kohta. Kui saadakse hüppekaja, tähistatakse süsteemi väljundit sümboliga $h(t)$. Joonisel 4.2 on esitatud hüppefunktsioonide näiteid.



Joonis 4.2. Hüppefunktsioonide näited

Funktsiooni $h(t)$ nimetatakse ka ülekandefunktsiooniks, sest see illustreerib süsteemi siiret ühest režiimist teise. Et peaaegu kõik süsteemid on dünaamilised süsteemid, võtab siirdeprotsess teatud aja. Joonisel 4.2 tähistatakse seda aega sümboliga t_{est} ja see näitab süsteemi siirdeprotsessi kestust. Süsteemi siirdeprotsess kestab signaali andmisest süsteemi sisendisse (praegusel juhul hetk $t = 0$) kuni väljundsignaali uue väärtuse väljakujunemiseni.



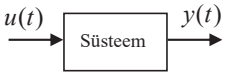
Joonis 4.3. Impulsskajade näited

Teine automaatjuhtimissüsteemide põhiline ajakarakteristik on impulsskaja – see on süsteemi reageering null-väärtusega algtingimuste korral sisendisse antavale ühikimpulsi funktsioonile $\delta(t)$. Kui saadakse impulsskaja, tähistatakse süsteemi väljundit sümboliga $w(t)$. Saab tõestada, et impulsskaja on võrdne hüppefunktsiooni esimese tuletisega. Joonisel 4.3 on esitatud impulsskaja näiteid.

4.3 Juhtimissüsteemide ülekandefunktsioonitüüpi matemaatilised mudelid

Seda tüüpi matemaatilised mudelid põhinevad Laplace'i teisendusel, mida tutvustatakse matemaatika kursusel. Ülekandefunktsioon on süsteemi abstraktne matemaatiline mudel, mida kasutatakse peamiselt mugavuse tõttu ja juhtimisteooria teatud tüüpi ülesannete lahendamise lihtsustamiseks.

Vaatleme ühemõõtmelist süsteemi sisendsignaaliga $u(t)$ ja väljundsignaaliga $y(t)$ - joonis 4.4.



Joonis 4.4. Ühemõõtmeline süsteem

Lineaarse ühemõõtmelise süsteemi ülekandefunktsiooniks nimetatakse süsteemi väljundi ja sisendi suhet, kui neile on rakendatud Laplace'i teisendus null-väärtusega algtingimuste korral. Ülekandefunktsiooni tähistatakse sümboliga $W(p)$. Null-väärtusega algtingimused tähendavad, et alghetkel $t=0$ eeldatakse süsteemi jõudeseisundit. Üldjuhul on lineaarse ühemõõtmelise statsionaarse süsteemi matemaatiline mudel lineaarne diferentsiaalvõrrand tavaliste (4.4)-tüüpi tuletistega. Pärast võrrandile (4.4) Laplace'i teisenduse rakendamist null-väärtusega algtingimuste korral saab leida väljundsignaali $y(p)$ ja sisendsignaali $u(p)$ Laplace'i kujutiste suhte, mis on tegelikult süsteemi ülekandefunktsioon. Seega on ülekandefunktsiooni üldine kuju:

$$W(p)=\frac{y(p)}{u(p)}=\frac{b_0p^m+b_1p^{m-1}+\ldots+b_{m-1}p+b_m}{a_0p^n+a_1p^{n-1}+\ldots+a_{n-1}p+a_n}, \tag{4.6}$$

kus $p=\alpha+j\omega$ on kompleksmuutuja.

Võrreldes algse matemaatilist tüüpi mudeli diferentsiaalvõrrandit (4.4) saadud uue matemaatilist tüüpi mudeliga (4.6), mida nimetatakse ülekandefunktsiooniks, võib näha, et ülekandefunktsiooni kujutise saab diferentsiaalvõrrandi abil väga kiiresti järgmiselt. Diferentsiaalvõrrandi vasak pool määrab ülekandefunktsiooni nimetaja, kus $y(t)$ tuletised on asendatud p vastavate astmetega – seega $y(t)$ asemele tuleb p^0, $\dot{y}(t)$ - p^1, $\ddot{y}(t)$ - p^2 jne ning konstandid a_i jäävad muutumatuks. Samal moel määrab diferentsiaalvõrrandi parem pool ülekandefunktsiooni lugeja – $u(t)$ iga tuletis asendatakse p vastava astmega ja konstandid b_i jäävad muutumatuks.

Näiteks juhtimissüsteemi ülekandefunktsioon, mis on kirjeldatud järgmise diferentsiaalvõrrandiga:

$$2\ddot{y}(t)+5\dot{y}(t)+10y(t)=\dot{u}(t)+5u(t), \tag{4.7}$$

on:

$$W(p)=\frac{p+5}{2p^2+5p+10} \tag{4.8}$$

Vastupidine ülesanne (saada diferentsiaalvõrranditüüpi matemaatiline mudel ülekandefunktsioonitüüpi mudelist) lahendatakse vastupidises järjekorras – diferentsiaalvõrrandi vasak pool saadakse ülekandefunktsiooni nimetajast, kusjuures p vastavad astmed muutuvad $y(t)$ tuletisteks. Diferentsiaalvõrrandi parem pool saadakse samal moel ülekandefunktsiooni lugejast, muutes p vastavad astmed $u(t)$ tuletisteks. Võrrandist (4.6) järeldub, et iga lineaarse ühemõõtmelise juhtimissüsteemi väljundi Laplace'i kujutis võrdub sisendsignaali kujutise ja süsteemi ülekandefunktsiooni korrutisega: $y(p)=W(p)u(p)$. See tähendab, et sisendsignaal ja ülekandefunktsioon koos määravad kindlaks süsteemi väljundi reaktsiooni.

Ülekandefunktsioon on lihtsalt süsteemi matemaatilise mudeli teine kujutamisvorm. Asjaolu, et seda tüüpi matemaatilisel mudelil ei ole tuletisi, vaid lihtsalt muutuja p astmed, muudab ülekandefunktsioonitüüpi mudelitega töötamise palju lihtsamaks, kui seda on diferent-

siaalvõrranditüüpi mudelitega töötamine. Peale selle võib näha, et kui ühe ülekandefunktsiooni nimetaja on võrdsustatud nulliga, saadakse süsteemi karakteristlik võrrand. Üldiselt võib ülekandefunktsiooni vaadata kui süsteemi diferentsiaalvõrrandi abstraktse kujutamise vormi.

4.4 Enesekontroll

1. Lineaarsetes diferentsiaalvõrrandites:
   a. ei ole sisendsignaali tuletisi;
   b. ei ole väljundsignaali tuletisi;
   c. Ei ole sisendsignaali ja väljundsignaali tuletisi;
   d. ei ole sisend ja väljundsignaalis astmeid (astendajaid) ja tuletisi peale esimese.

2. Juhtimissüsteemi väljundi reaktsiooni selle sisendisse antud ühikhüppe funktsioonile kutsutakse:
   a. hüppekaja;
   b. impulsikaja;
   c. ülekandefunktsioon;
   d. kompleksfunktsiooniks.

3. Juhtimissüsteemi reaktsiooni selle sisendisse antud ühikimpulsi funktsioonile kutsutakse:
   a. hüppekaja;
   b. impulsikaja;
   c. ülekandefunktsioon;
   d. sageduskarakteristik.

4. Süsteemi staatikavõrrand saadakse diferentsiaalvõrrandist:
   a. Sisendsignaali tuletiste väärtuse nullimisega (väärtus võrdub null-iga);
   b. Väljundsignaali kõigi tuletiste väärtuse nullimisega;
   c. Sisend- ja väljundsignaali tuletiste väärtuse nullimisega;
   d. Sisend- ja väljundsignaalide tuletiste väärtuse määramisega 1-ks.

5. Süsteemi väärtuse suhet süsteemi sisendisse, kui neile on rakendatud Laplace'i teisendust null-väärtusega algtingimuste korral kutsutakse:
   a. Impulsikaja;
   b. Hüppekaja;
   c. Ülekandefunktsioon;
   d. Kompleksfunktsioon.

5 ELEMENTAARSED DÜNAAMILISED SÜSTEEMID. DÜNAAMILISTE SÜSTEEMIDE ÜHENDAMISE REEGLID

Sageli on automaatjuhtimissüsteemide analüüsi- või sünteesiülesande lahendamisel aktsepteeritav nende tingimuslik jaotamine lihtsamateks komponentideks, mida kirjeldatakse kuni teist järku matemaatiliste mudelitega, mida nimetatakse elementaarseteks dünaamilisteks süsteemideks. Peatükis 5 on lühidalt kirjeldatud mõnd kõige tuntumat elementaarsüsteemi. Kui süsteemi kujutatakse mitme alamsüsteemi kombinatsioonina, mis võivad olla elementaarsed dünaamilised süsteemid, on tervet süsteemi kirjeldava mudeli saamiseks vaja teada, kuidas alamsüsteemid on omavahel seotud. Peatüki teises osas tutvustatakse dünaamiliste süsteemide ühendamise kolme põhitüüpi.

5.1 Elementaarsete dünaamiliste süsteemide põhitüübid

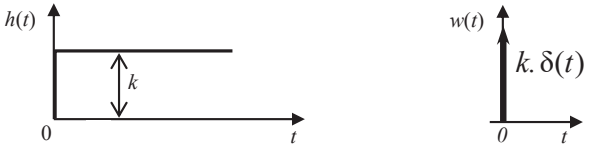
Elementaarsed dünaamilised süsteemid on klassifitseeritud nende matemaatilise mudeli, mitte füüsikalise olemuse järgi. Mõnikord saab täiesti erineva füüsikalise olemusega dünaamilisi süsteeme (nt elektriline, mehaaniline või hüdrauliline süsteem) kirjeldada identsete matemaatiliste mudelitega.

5.1.1 Proportsionaalne süsteem

Proportsionaalne süsteem on lihtsaim elementaarne dünaamiline süsteem. Seda süsteemi aegruumis kirjeldav võrrand ja selle vastav ülekandefunktsioon on:

$$y(t) = ku(t)\,, \qquad W(p) = k \tag{5.1}$$

kus k on proportsionaalsustegur.
Juhtimissüsteemides on proportsionaalsustegur tavaliselt positiivne arv. Kui süsteemi sisend ja väljund on sama ühikuga (nt pinge-pinge jne), on proportsionaalsustegur ühikuta suurus ja seda nimetatakse võimendusteguriks.
Proportsionaalse süsteemi hüppe- ja impulsskaja, nt selle reageering ühikuhüppe- ja impulssfunktsioonidele null-väärtusega algtingimuste korral on näidatud joonisel 5.1.



Joonis 5.1. Proportsionaalse süsteemi hüppe- ja impulsskajad

Joonistelt selgub ka põhjus, miks seda süsteemi nimetatakse ka mitteinertseks süsteemiks. Kui sisendisse antakse signaal, töötab süsteem ideaalse võimendina ja väljundsignaal muutub kohe. Süsteemis ei eksisteeri tegelikku siirdeprotsessi. Siirdeprotsessi puudumine on samuti selge fakt, et üksuse matemaatiline mudel on lihtsalt algebravõrrand, mitte diferentsiaalvõrrand.
Ilma siirdeprotsessita tehnilisi seadmeid ei ole olemas. Siiski, kui suurema automaatjuhtimissüsteemi osaks oleva seadme siirdeprotsessi kestus on palju lühem teiste süsteemi osade siirdeprotsesside kestustest, võib seadet lugeda proportsionaalseks süsteemiks.

Seetõttu saab terve süsteemi matemaatilist mudelit palju lihtsustada ja muuta lihtsamaks selle süsteemi analüüsi- ja sünteesiülesannete lahendamise. Matemaatilise mudeli lihtsustamine ei mõjuta lõpptulemust, kui on tehtud adekvaatne hindamine, milliseid alamsüsteeme võib lugeda proportsionaalseks ja milliseid mitte.
Proportsionaalne süsteem on näiteks elektrooniline võimendi, jõuülekanne jne. Joonisel 5.2 a) näidatakse jõuülekandemehhanismi, mis on proportsionaalse süsteemi tüüpiline näide mehaanikas. Joonisel 5.2 b) esitatud elektriskeem on samuti proportsionaalne süsteem.

a) b)

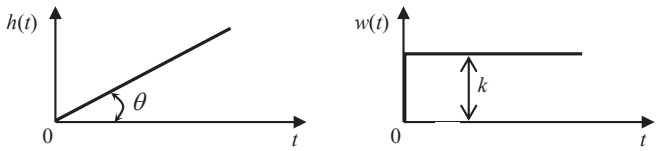
Joonis 5.2. Proportsionaalsete süsteemide näited

5.1.2 Integreeriv süsteem

Integreerivat süsteemi kirjeldav diferentsiaalvõrrand ja sellele vastav ülekandefunktsioon on:

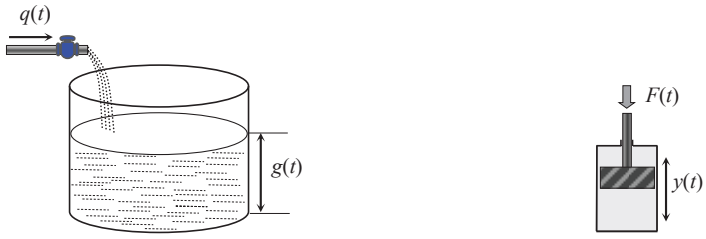
$$\dot{y}(t) = ku(t)\,, \qquad W(p) = \frac{k}{p} \tag{5.2}$$

kus k on proportsionaalsustegur (või võimendustegur, kui sisend- ja väljundsuurused on sama ühikuga).
Nagu võib näha võrrandist (5.2), on integreeriva süsteemi võtmeomaduseks asjaolu, et selle väljundsignaali (st $y(t)$ esimese tuletise füüsikaline tähendus) muutumise määr, mitte väljundsignaal ise, on proportsionaalne sisendsignaaliga. Joonis 5.3 illustreerib integreeriva süsteemi hüppe- ja impulsskaja üldist kuju.



Joonis 5.3. Integreeriva süsteemi hüppe- ja impulsskaja

Hüppekajast on näha selle elementaarse süsteemi kõige iseloomulikum omadus – kui süsteemi sisendisse antakse konstantne signaal, antud juhul ühikhüppefunktsioon, siis süsteemi väljundsuurus ei stabiliseeru, vaid suureneb lõpmatult.
Joonisel 5.4 on esitatud kaks tüüpilist näidet reaalsest süsteemist, mida saab lugeda integreerivaks süsteemiks.



Joonis 5.4. Integreerivate süsteemide näited

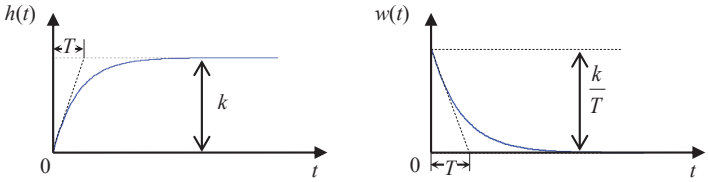
Joonisel 5.4 a) on näidatud veepaaki, mida täidetakse toru kaudu (vooluhulgaga $g(t)$). Kui vooluhulka $g(t)$ lugeda veepaagisüsteemi sisendsuuruseks ja veetaset $g(t)$ süsteemi väljundsignaaliks, on nendevaheline matemaatiline sõltuvus (5.2)-tüüpi. Seda, et nii valitud sisend- ja väljundsuurustega paak on integreeriv süsteem, saab kindlaks määrata ka intuitiivselt, matemaatilist mudelit koostamata. Kui $g(t)$ on konstant, on väljund $g(t)$ tegelikult süsteemi hüppekaja. Veetase $g(t)$ paagis tõuseb ühtlaselt, kui vesi voolab paaki konstantse vooluhulgaga, st saadakse integreeriva süsteemi tüüpiline hüppekaja, nagu on esitatud joonisel 5.3. Proportsionaalsusteguriks k võib võtta paagi ristlõikepindala pöördväärtuse. Mida suurem on pindala, seda aeglasemalt paak sama vooluhulga $g(t)$ korral täitub ja hüppefunktsioon kasvab aeglasemalt. Vastupidi, mida väiksem on paagi ristlõikepindala, seda kiiremini paak täitub ja hüppefunktsioon kasvab kiiremini. Joonisel 5.4 b) on näidatud hüdrauliline amortisaator. Selle sisendsuuruseks on amortisaatori kolvile mõjuv jõud $F(t)$. Väljundsuuruseks on kolvi liikumine $y(t)$. Kui sisend- ja väljundsuurused on selliselt valitud, võib amortisaatorit lugeda integreerivaks süsteemiks.

5.1.3 Esimest järku aperioodiline süsteem

Seda süsteemi kirjeldav diferentsiaalvõrrand ja sellele vastav ülekandefunktsioon on:

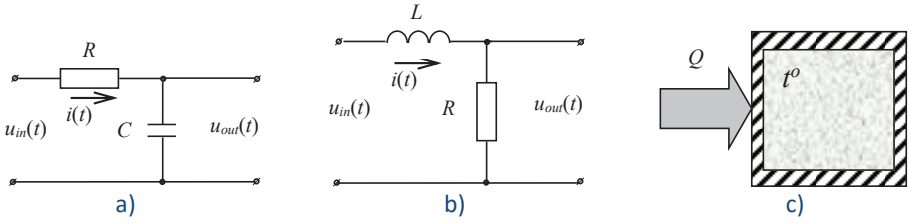
$$T\dot{y}(t) + y(t) = ku(t), \qquad W(p) = \frac{k}{Tp+1} \tag{5.3}$$

kus $k > 0$ on proportsionaalsustegur (või võimendustegur, kui $u(t)$ ja $y(t)$ ühikud on samad) ja $T > 0$ on süsteemi ajakonstant, sest selle mõõtühik on aeg.
Joonis 5.5 illustreerib esimest järku aperioodilise süsteemi hüppe- ja impulsskaja kuju. Hüppefunktsiooni väljakujunenud püsiväärtus on võrdne k-ga. Paljudes automaatjuhtimissüsteemides on ilmekas siirdeprotsess sellele järgneva väljundsignaali stabiliseerumisega tasemel k. Sellistes süsteemides nimetatakse suurust k staatiliseks võimendusteguriks. Esimest järku aperioodilise süsteemi matemaatiline mudel kuni väljundi väljakujunemiseni on (5.3) ja pärast väljundi väljakujunemist on mudel lihtsalt $y(t) = ku(t)$. Seda võrrandit nimetatakse süsteemi staatikavõrrandiks ja diferentsiaalvõrrandit (5.3) nimetatakse süsteemi dünaamikavõrrandiks.



Joonis 5.5. Esimest järku aperioodilise süsteemi hüppe- ja impulsskaja

Suurel osal automaatjuhtimissüsteemi moodustavatest elementidest on dünaamilised karakteristikud, mis vastavad esimest järku aperioodilisele süsteemile. Joonisel 5.6 on näidatud reaalseid süsteeme, mille matemaatiline mudel kirjeldab esimest järku aperioodilist süsteemi. Joonistel 5.6 a) ja 5.6 b) näidatud elektriahelad RC ja LC on esimest järku aperioodiliste süsteemide tüüpilised näited. Joonisel 5.6 c) on näidatud ahjutüüpi juhtimissüsteemi. Kui võtta ahju antavat soojushulka Q süsteemi sisendsignaalina ja ahju temperatuuri t^o väljundsignaalina, saab näidata, et nende suhe on (5.3)-tüüpi diferentsiaalvõrrand. Seda saab tuletada ka eksperimentaalselt. Kui Q on konstant ja temperatuuri muutumist ahjus jälgitakse ning registreeritakse pidevalt alates kütte sisselülitamisest, on saadav ajafunktsioon tüüpilise esimest järku aperioodilise süsteemi tüüpi, nagu on näidatud joonisel 5.5: temperatuur hakkab järk-järgult tõusma, kuni jõuab väljakujunenud püsiväärtuseni.



Joonis 5.6. Esimest järku aperioodiliste süsteemide näited

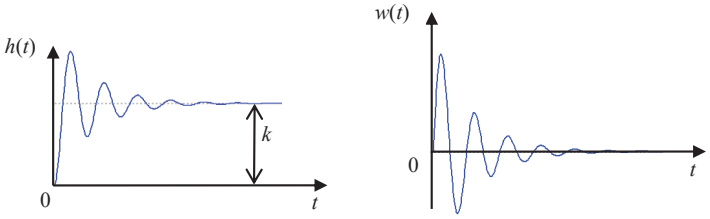
5.1.4 Võnkuv süsteem

Võnkuvat süsteemi kirjeldav diferentsiaalvõrrand ja sellele vastav ülekandefunktsioon on:

$$T^2\ddot{y}(t)+2\xi T\dot{y}(t)+y(t)=ku(t), \qquad W(p)=\frac{k}{T^2p^2+2\xi Tp+1} \tag{5.4}$$

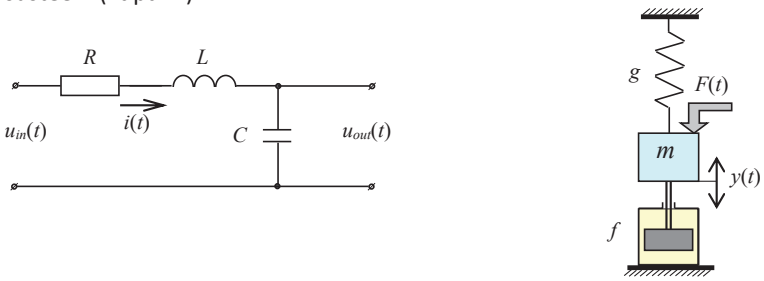
kus $k>0$ on proportsionaalsustegur, $T>0$ on ajakonstant ja $0<\xi<1$ on süsteemi sumbuvustegur.

Hüppe- ja impulssfunktsioonide üldine kuju võnkuvates süsteemides on näidatud joonisel 5.7. Süsteemi nimetatakse võnkuvaks, sest siirdeprotsess sumbub vastavalt võnkumisseadusele.



Joonis 5.7. Võnkuva süsteemi hüppe- ja impulsskaja

Joonisel 5.8 on näidatud reaalseid süsteeme, mille matemaatiline mudel on (5.4)-tüüpi võnkuv süsteem: RLC-elektrisüsteem ja vedrumass-võnkesummuti tüüpi mehaaniline süsteem (vt ptk 4).



a) b)

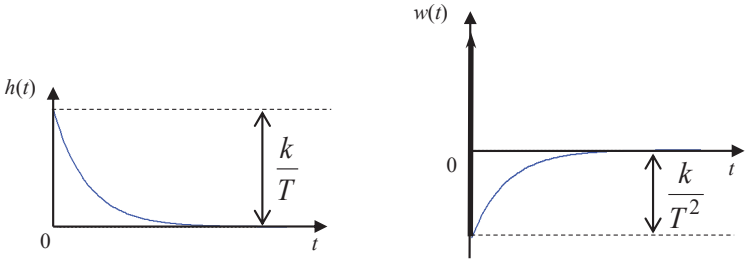
Joonis 5.8. Võnkuvate süsteemide näited

5.1.5 Diferentseeriv süsteem

Diferentseerivat süsteemi kirjeldav diferentsiaalvõrrand ja sellele vastav ülekandefunktsioon on:

$$T\dot{y}(t) + y(t) = k\dot{u}(t), \qquad W(p) = \frac{kp}{Tp+1} \tag{5.5}$$

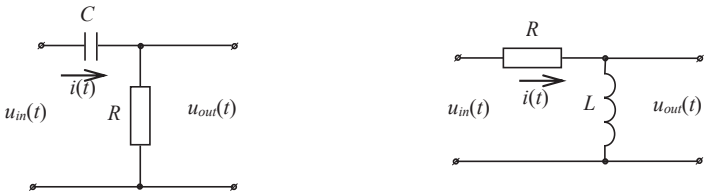
kus $k > 0$ on proportsionaalsustegur (või võimendustegur, kui $u(t)$ ja $y(t)$ ühikud on samad) ja $T > 0$ on süsteemi ajakonstant.



Joonis 5.9. Diferentseeriva süsteemi hüppe- ja impulsskaja

Diferentseeriva süsteemi hüppe- ja impulssfunktsioonide üldine kuju on esitatud joonisel 5.9.

Joonisel 5.10 on näidatud elektriahelaid, mille mudel on diferentseeriv süsteem.



Joonis 5.10. Diferentseerivate süsteemide näited

5.1.6 Ideaalne hilistussüsteem

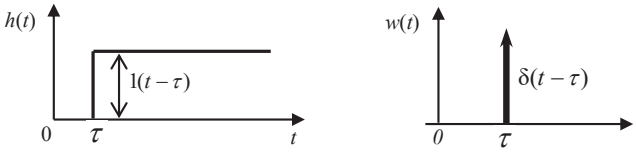
Ideaalset hilistussüsteemi nimetatakse ka edastamise hilistumiseks. Selle süsteemi väljund kordab täpselt sisendsignaali sõltumata selle tüübist, kuid teeb seda teatud ajalise viivitusega.

Ideaalse hilistussüsteemi matemaatiline mudel on põhimõtteliselt erinev süsteemide seni kirjeldatud mudelitest. Seda süsteemi kirjeldav võrrand ja selle ülekandefunktsioon on:

$$y(t) = u(t-\tau), \qquad W(p) = e^{-p\tau} \tag{5.6}$$

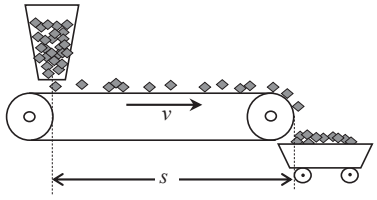
kus parameetrit τ nimetatakse hilistusajaks või lihtsalt hilistuseks ja sellel on aja mõõtühik.

Ideaalse hilistussüsteemi hüppe- ja impulssfunktsioonide üldist kuju on näidatud joonisel 5.11.



Joonis 5.11. Ideaalse hilistussüsteemi hüppe- ja impulsskaja

Ideaalse hilistussüsteemi tüüpilised näited on lint- või kettkonveierid, erinevad torustikud jne. Neid süsteeme iseloomustab, et süsteemi sisenev materjal (või vedelik) väljub süsteemist teatud aja pärast muutumatul kujul – sama koostise ja kogusega, kui sisenemisel. Joonisel 5.12 on näidatud lintkonveier, mida kasutatakse maagi või söe transportimiseks. Lindi vasakule otsale paigutatud maagi kogus jõuab selle paremasse otsa muutmata kujul ja laaditakse seal vagunitesse. Kui lint liigub konstantse kiirusega v ja selle pikkus on s, on süsteemi hilistusaeg $\tau = s/v$.



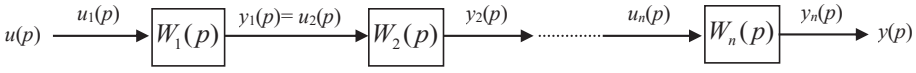
Joonis 5.12. Ideaalse hilistussüsteemi näited

5.2 Dünaamiliste süsteemide ühendamise reeglid

Iga automaatjuhtimissüsteemi saab kujutada teatud viisil üksteisega ühendatud alamsüsteemide kogumina. Need alamsüsteemid ei pea tingimata olema elementaarsed dünaamilised süsteemid. Alamsüsteemide ühendamise tüüpiline omadus on, et kuigi süsteem võib olla koostatud paljudest alamsüsteemidest, saab mistahes kaht alamsüsteemi ühendada ainult ühel viisil kolmest võimalikust – järjestikku, paralleelselt või tagasiside-ahelaga.

5.2.1 Järjestikühendus

Kahe või enama alamsüsteemi järjestikühenduseks nimetatakse ühendust, kus esimese alamsüsteemi väljund on teise sisendiks, selle väljund omakorda kolmanda sisendiks jne. Joonisel 5.13 on näidatud n alamsüsteemi järjestikühendust ülekandefunktsiooniga $W_i(p),\ \ i=1\div n$.



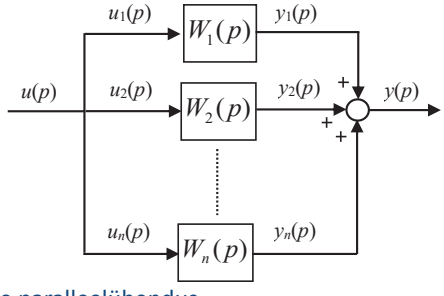
Joonis 5.13. Alamsüsteemide järjestikühendus

Järjestikku ühendatud n alamsüsteemi ekvivalentset ülekandefunktsiooni tähistatakse sümboliga $W(p)$. Sisendsignaal $u(p)$ langeb kokku esimese alamsüsteemi sisendsignaaliga $u_1(p)$ alamsüsteemide ahelas $W_1(p)$ ja selle väljundsignaal $y(p)$ langeb kokku viimase alamsüsteemi väljundsignaaliga $y_n(p)$. Järjestikku ühendatud n alamsüsteemi ekvivalentne ülekandefunktsioon on võrdne alamsüsteemide üksikute ülekandefunktsioonide korrutisega:

$$W(p)=W_1(p)W_2(p).....W_n(p)=\prod_{i=1}^{n}W_i(p)\,. \qquad (5.7)$$

5.2.2 Paralleelühendus

Kui kaks või enam alamsüsteemi on ühendatud paralleelselt, on kõikide alamsüsteemide sisendsignaal sama: $u_1(p)=u_2(p)=\ldots=u_n(p)=u(p)$ ja väljundsignaal on võrdne kõikide alamsüsteemide väljundsignaalide summaga $y_i(p),\ \ i=1\div n$. Joonisel 5.14 on näidatud n alamsüsteemi paralleelühendust ülekandefunktsiooniga $W_i(p),\ \ i=1\div n$.



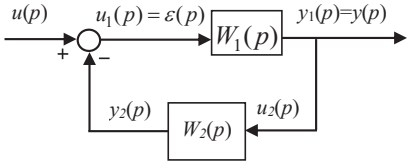
Joonis 5.14. Alamsüsteemide paralleelühendus

Paralleelselt ühendatud n alamsüsteemi ekvivalentne ülekandefunktsioon on võrdne alamsüsteemide üksikute ülekandefunktsioonide summaga:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \ldots + W_n(p) = \sum_{i=1}^{n} W_i(p). \qquad (5.8)$$

5.2.3 Tagasisidega ühendus

Joonis 5.15 illustreerib alamsüsteemide põhilist tagasisidega ühendust. Eeldatakse, et alamsüsteem on tagasisideahelas, kui selle väljundsignaal antakse otse või läbi teise alamsüsteemi tagasi selle sisendisse. $W_1(p)$ nimetatakse avatud kontuuriga ülekandesüsteemiks. $W_2(p)$ on tagasiside ülekandefunktsioon. Põhimõtteliselt võib tagasiside olla nii positiivne kui negatiivne, kuid nagu selgitati peatükis 2, kasutatakse automaatjuhtimissüsteemides ainult negatiivset tagasisidet.



Joon 5.15. Tagasisidega ühendus

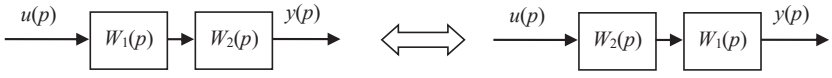
Negatiivse tagasisidega ühendatud kahe alamsüsteemi (joonis 5.15) ekvivalentne ülekandefunktsioon on:

$$W(p) = \frac{W_1(p)}{1 + W_1(p)W_2(p)}. \qquad (5.9)$$

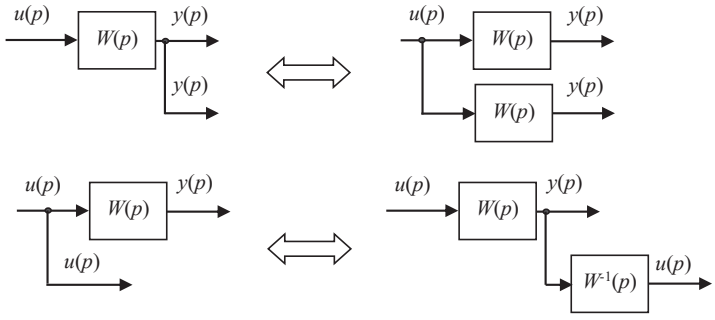
Ekvivalentset ülekandefunktsiooni $W(p)$ nimetatakse ka suletud kontuuriga ülekandefunktsiooniks.

5.2.4 Ekvivalentsed struktuursed teisendused

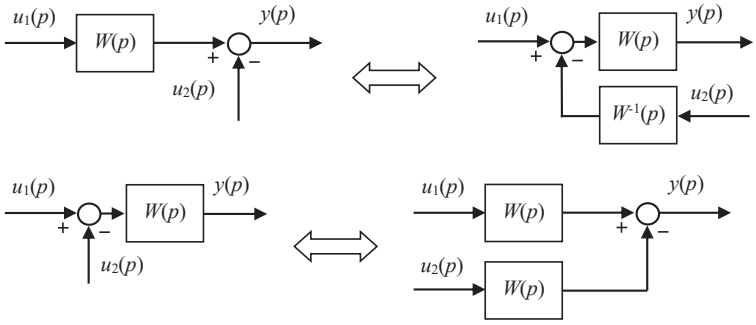
Kolme tüüpi ühenduste valemite (5.7), (5.8) ja (5.9) abil on võimalik samm-sammult lihtsustada automaatjuhtimissüsteemi keerulisi struktuurskeeme, kuni saadakse üks koondmudel. Vajaduse korral võib teha mõned ekvivalentsed teisendused. Joonistel 5.16, 5.17, 5.18 ja 5.19 on näidatud selliste teisenduste põhitüübid.



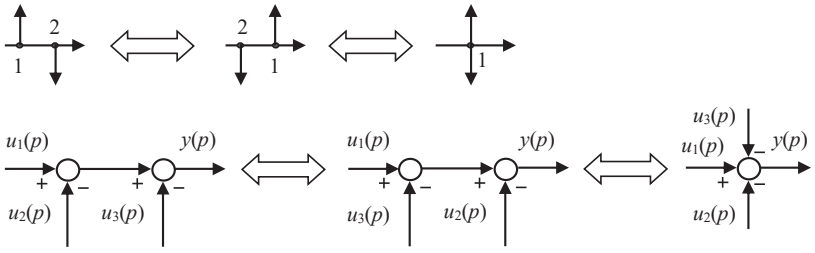
Joonis 5.16. Järjestikku ühendatud alamsüsteemide asukoha muutmine



Joonis 5.17. Harusõlme üleviimine



Joonis 5.18. Summaatori või lahutuslülituse üleviimine



Joonis 5.19. Sõlmede ja summaatorite/lahutuslülituste asukoha muutmine

5.3 Enesekontroll

1. Võrrand $\dot{y}(t) = ku(t)$ on matemaatiline mudel, mis kirjeldab:
   a. Võnkuvat süsteemi;
   b. Integreerivat süsteemi;
   c. Diferentseerivat süsteemi;
   d. Ideaalset viitega süsteemi.

2. Vedrumass-võnkesummuti tüüpi mehaaniline süsteem on tüüpiline näide:
   a. Võnkuvast süsteemist;
   b. Integreerivast süsteemist;
   c. Proportsionaalsest süsteemist;
   d. Diferentseerivast süsteemist.

3. Kahe järjestikku ühendatud alamsüsteemi ekvivalentne ülekandefunktsioon on:
   a. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide summa;
   b. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide erinevus;
   c. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide jagatis;
   d. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide korrutis.

4. Kahe paralleelselt ühendatud alamsüsteemi ekvivalentne ülekandefunktsioon on:
   a. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide summa;
   b. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide vahe;
   c. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide jagatis;
   d. alamsüsteemide individuaalsete ülekandefunktsioonide korrutis.

5. Lintkonveier on tüüpiline näide:
   a. Võnkuvast süsteemist;
   b. Integreerivast süsteemist;
   c. Diferentseerivast süsteemist;
   d. Ideaalsest viitega süsteemist.

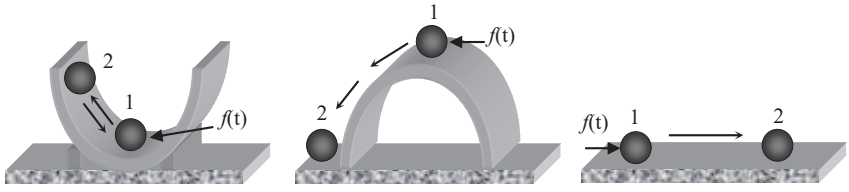
6 LINEAARSETE SÜSTEEMIDE STABIILSUS

Stabiilsus on iga automaatjuhtimissüsteemi põhiomadus. Korralikuks töötamiseks peab iga juhtsüsteem kõigepealt olema stabiilne. Peatükis 6 määratletakse lineaarsete süsteemide stabiilsuse põhinõuded. Lühidalt on tutvustatud süsteemi stabiilsuse tagamise levinud algebralist kriteeriumi – Hurwitzi stabiilsuskriteeriumi.

6.1 Stabiilsuse definitsioon. Süsteemi stabiilsuse põhitingimus

Kõiki automaatjuhtimissüsteeme mõjutavad erinevat tüüpi häiringud. Üldiselt võivad need häiringud rikkuda süsteemi tavatöörežiimi ja muuta selle töökõlbmatuks. Seega peab iga õigesti koostatud automaatjuhtimissüsteem suutma edukalt hakkama saada häiringutegurite mõjuga ja jätkama normaalset tööd olenemata häiringute olemasolust. Kui see tingimus on konkreetse süsteemi korral täidetud, nimetatakse seda süsteemi stabiilseks. Stabiilsus on juhtimisteooria põhikontseptsioon, sest see on automaatjuhtimissüsteemide tulemusliku töö kõige olulisem tingimus.

Stabiilsuse alusel saab määratleda stabiilse süsteemi, ebastabiilse süsteemi ja stabiilsuspiiril oleva süsteemi (marginaalselt stabiilne süsteem, neutraalselt stabiilne süsteem) kontseptsiooni. Lineaarne automaatjuhtimissüsteem on stabiilne, kui välise mõju tõttu tasakaaluseisundist väljaviidud süsteem püüab välise mõju kadumise korral taastada sama tasakaaluseisundit. Kui süsteem jätkab tasakaaluseisundist eemaldumist või võngub piiramatu amplituudiga, on see ebastabiilne. Süsteem on marginaalselt stabiilne, kui välise mõju tõttu tasakaaluseisundist väljaviiduna, liigub see välismõju kadumise korral uude tasakaaluseisundisse, mis erineb algsest tasakaaluseisundist.

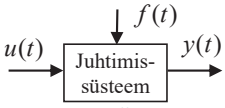


a) b) c)

Fig. 6.1. Stabiilse süsteemi, ebastabiilse süsteemi ja marginaalselt stabiilse süsteemi näide

Stabiilsuse tähenduse paremaks mõistmiseks tuuakse tavaliselt järgmine lihtne näide. Joonisel 6.1 a) on näidatud kera, mis on tasakaaluseisundis 1 nõgusa pinna põhjas. Teatud hetkel avaldati kerale lühikese aja jooksul jõudu $f(t)$. Kui jõud on piisavalt suur kera liigutamiseks, liigub kera ülespoole, nt asendisse 2. Pärast jõu $f(t)$ mõju lakkamist, naaseb kera gravitatsiooni mõjul asendisse 1. Seega on see juhtimisteooria kontseptsiooni järgi stabiilne süsteem. Joonisel 6.1 b) näidatud juhtumil on kera tasakaaluolukorras 1 kumera pinna tipus. Jõu $f(t)$ mõju põhjustab kera langemise pinnalt alla ja loomulikult ei naase kera iseenesest asukohta 1. See vastab ebastabiilsele süsteemile. Joonisel 6.1 c) näidatud juhtumil

on kera tasakaaluolukorras 1 lamedal pinnal. Jõu $f(t)$ rakendamine põhjustab kera liikumise tasakaaluseisundisse 2, mis vastab marginaalselt stabiilsele süsteemile.



Joonis 6.2. Ühemõõtmeline lineaarne automaatjuhtimissüsteem

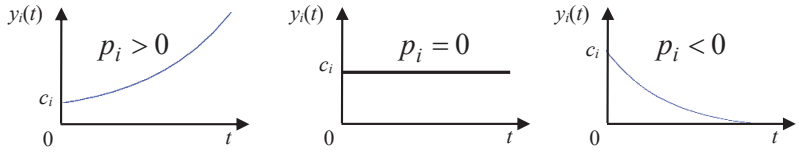
Joonisel 6.2 on näidatud ühemõõtmeline lineaarne juhtimissüsteem. Nagu teada, kehtib lineaarsetes süsteemides superpositsiooni põhimõte. Seda põhimõtet arvestades ei ole oluline, mitu juhtivat või häirivat tegurit süsteemi mõjutab. Seega võib lineaarsete süsteemide stabiilsust uurides eeldada, et häiriv tegur on võrdne nulliga ($f(t)=0$) ja süsteemil on ainult üks sisendsignaal $u(t)$. Nagu peatükis 4 kirjeldati, on lineaarse süsteemi matemaatiline mudel (4.4)-tüüpi diferentsiaalvõrrand, mille lahendiks selle karakteristliku võrrandi liht- ja reaaljuurte korral on avaldis (4.5). Võrrandi (4.5) võib kirjutada järgmisel lühendatud kujul:

$$y(t) = y_{\text{hom}}(t) + \eta(t), \tag{6.1}$$

milles $y_{\text{hom}}(t)$ on süsteemi vabaliikumine või selle dünaamika, mille on tekitanud mittenull-väärtusega algtingimused sisendsignaali puudumisel, ja $\eta(t)$ on süsteemi sundliikumine või süsteemi reaktsioon sisendsignaalile $u(t)$. Saab eeldada, et $u(t)=0$ ja süsteemil on mittenull-väärtusega algtingimused $y(0)\neq 0,\ \dot{y}(0)\neq 0\cdots$. Sellisel juhul $\eta(t)=0$ ja $y(t)=y_{\text{hom}}(t)$. Selle eelduse tähendus on järgmine. Kui süsteem on jõudeseisundis ($y(0)=0,\ \dot{y}(0)=0\cdots$) ja selle sisendisse antakse lühiajaline signaal, et viia süsteem sellest seisundist välja ning kui sisendsignaal muutub nulliks, on süsteemi algtingimused $y(t),\ \dot{y}(t)$ jne mittenull-väärtusega. Seda momenti võib süsteemi stabiilsuse analüüsis võtta kui alguspunkti $t=0$, st sellest hetkest alates süsteemile enam välismõjusid ei avaldata ja sellel juba on mittenull-väärtusega algtingimused. Sellisel juhul on süsteem stabiilsuse definitsiooni kohaselt stabiilne, kui:

$$\lim_{t\to\infty} y(t) = 0. \tag{6.2}$$

Uuritakse võrrandi (4.5) ühe liikme dünaamikat ajas: $y_i(t) = c_i e^{p_i t}$, mis vastab karakteristliku võrrandi p_i liht- või reaaljuurele. Juure p_i väärtusest sõltuvalt võib esineda kolm juhtumit. Kui $p_i > 0$, $c_i e^{p_i t}$ läheneb eksponentsiaalselt ∞, kui $t\to\infty$. Kui $p_i = 0$, $c_i e^{p_i t} = c_i e^{0t} = c_i$. Kui $p_i < 0$, $c_i e^{p_i t}$ läheneb eksponentsiaalselt nullile, kui $t\to\infty$. Kolm juhtumit on illustreeritud vastavalt joonistel 6.3 a), b) ja c).



а) б) в)

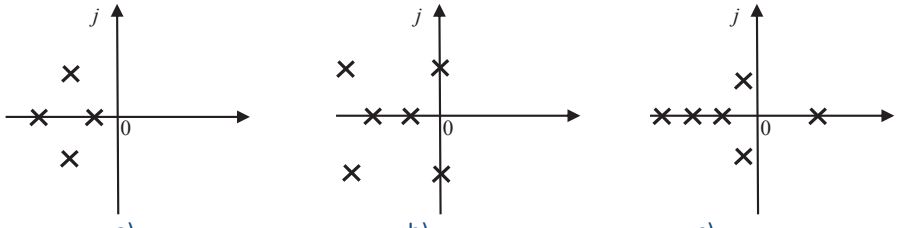
Joonis 6.3. Lahendi elemendi y_i dünaamika sõltuvalt juure p_i märgist

Jooniselt 6.3 on näha, et kui süsteemi karakteristliku võrrandi kõik juured on liht-, reaal- või negatiivsed juured, on süsteem stabiilne, sest on täidetud tingimus $\lim_{t\to\infty} y(t) = \lim_{t\to\infty} y_{\text{hom}}(t) = \lim_{t\to\infty} \sum_{i=1}^{n} y_i(t) = 0$. Kui kasvõi üks juurtest p_i on positiivne, on süsteem ebastabiilne, sest negatiivsete ruutudega seotud üksikud lahendid $y_i(t)$ lähenevad aja jooksul nullile ja lahend $y_i(t)$, mis vastab positiivsele juurele, jätkab kasvamist lõpmatusse. Et üldlahend $y(t)$ on (4.5)-tüüpi üksikute lahendite $y_i(t)$ summa, hakkab ka see kasvama lõpmatusse, mis on ebastabiilsuse tunnus. Sama loogika järgi, kui üks juurtest p_i on võrdne nulliga ja kõik teised juured on negatiivsed, on süsteem marginaalselt stabiilne. Aja jooksul lähenevad negatiivsete juurtega seotud üksikud lahendid $y_i(t)$ nullile ja $y_i(t)$ lahend, mis vastab null-astme juurele jääb võrdseks konstandiga c_i. Siis muutub vastavalt ka diferentsiaalvõrrandi $y(t)$ üldlahend võrdseks c_i-ga, kui $t \to \infty$. Samal moel saab tõestada, et kui karakteristlikul võrrandil on kompleksjuured, peab stabiilsustingimuse (6.2) täitmiseks olema nende reaalosa negatiivne.

Seega saab määratleda süsteemi stabiilsuse järgmise põhitingimuse.

Definitsioon. Lineaarse süsteemi stabiilsuse vajalik ja piisav tingimus on, et selle karakteristliku võrrandi kõik juured paiknevad komplekstasandi vasakul poolel.

Kui üks või mitu juurt paikneb komplekstasandi y-teljel ja ülejäänud sellest vasakul pool, on süsteem marginaalselt stabiilne. Kui üks või mitu juurt paikneb komplekstasandi paremal poolel, on süsteem ebastabiilne. Joonisel 6.4 on esitatud a) stabiilse süsteemi, b) marginaalselt stabiilse süsteemi ja c) ebastabiilse süsteemi näiteid, kus karakteristliku võrrandi juured on märgitud x-märgiga.



a) b) c)

Joonis 6.4. Karakteristliku võrrandi juurte paiknemine komplekstasandil a) stabiilse süsteemi, b) marginaalselt stabiilse süsteemi ja c) ebastabiilse süsteemi korral

6.2 Hurwitzi stabiilsuskriteerium

Et määrata, kas lineaarne süsteem on stabiilne, ei ole vaja arvutada selle karakteristliku võrrandi juurte täpseid väärtusi. Samuti ei ole isegi vaja lahendada süsteemi karakteristlikku võrrandit. Piisab võrrandi juurte reaalosa märgi hindamisest. Selle jaoks on välja töötatud lihtne kriteerium, mis võimaldab kaudselt hinnata süsteemi stabiilsust (karakteristlikku võrrandit lahendamata). Kõige levinum stabiilsuse kriteerium on Hurwitzi kriteerium. Saksa matemaatik Adolf Hurwitz tegi 1895. aastal ettepaneku koondada karakteristliku võrrandi koefitsiendid järgmisel moel ruutmaatriksisse (seda nimetatakse Hurwitzi maatriksiks):

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \cdots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}, \tag{6.3}$$

kus n on süsteemi järk.

Pärast Hurwitzi maatriksi kompileerimist arvutatakse järgnevalt selle peadiagonaali alam-determinandid, mida nimetatakse miinoriteks:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= a_1, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \\ \Delta_3 &= \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} .... \end{aligned} \tag{6.4}$$

Hurwitzi kriteerium määrab, et süsteemi stabiilsuse vajalik ja piisav tingimus on, et koefitsient a_0 ja diagonaalide miinorid Δ_1, Δ_2,...,Δ_n on positiivsed. Kui vähemalt üks diagonaali miinor on negatiivne, on süsteem ebastabiilne. Kui vähemalt üks diagonaali miinor on null ja muud miinorid on positiivsed, on süsteem marginaalselt stabiilne.

6.1 Enesekontroll

1. Süsteemi stabiilsus on määratud:
   a. selle kaaluga;
   b. karakteristliku võrrandi juurtega;
   c. ülekandefunktsiooni lugejaga;
   d. häiringu mõjudega.

2. Hurwitzi kriteeriumi kasutatakse stabiilsuse määramiseks:
   a. mittelineaarsetes süsteemides;
   b. mittestatsionaarsetes süsteemides;
   c. staatilistes süsteemides;
   d. lineaarsetes süsteemides.

3. Süsteem on stabiilne, kui pärast häiringu toimumist see:
   a. püüab saavutada oma vana tasakaaluolekut (punkti) kui häiriv mõju lõpeb;
   b. liigub uude tasakaaluolekusse kui häiriv mõju lõpeb;
   c. hakkab võnkuma;
   d. hakkab selle väljundsignaal kasvama lõpmatuse suunas.

4. Et süsteem oleks stabiilne, peab selle Hurwitzi maatriksi alamdeterminant olema:
   a. negatiivne;
   b. suurem kui üks;
   c. väiksem kui üks:’;
   d. positiivne.

5. Hurwitzi kriteeriumi stabiilsuse tingimused on kehtivad koefitsiendi ( ) positiivse väärtuse korral:
   a. a_0;
   b. a_1;
   c. a_n;
   d. a_{n-1}.

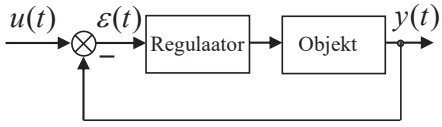
7 JUHTIMISSÜSTEEMIDE KVALITEEDINÄITAJAD. LINEAARREGULAATORITE PÕHITÜÜBID

Selles peatükis määratletakse automaatjuhtimissüsteemide sellised kvalitatiivsed põhinäitajad, nagu reageerimisaeg, väljakujunenud püsiseisundi viga jne. Juhtimissüsteemide heaks tööks vajalikke kvaliteedinäitajaid tagavate lineaarregulaatorite põhitüüpe kirjeldatakse selle peatüki teises osas.

7.1 Automaatjuhtimissüsteemide kvaliteedinäitajad

Automaatjuhtimissüsteemi korraliku töötamise primaarne tingimus on süsteemi stabiilsus. Kui süsteem ei ole stabiilne, ei suuda see töötada ja oma eesmärki täita. Kui süsteem on stabiilne, kehtivad tavaliselt mitmed tingimused nii siirdeprotsesside kui ka väljakujunenud püsiseisundite kohta. Üldiselt võib neid nõudeid siduda süsteemi tööomadustega, täpsusega väljakujunenud püsiseisundis jne. Selliseid nõudeid nimetatakse süsteemi kvaliteedinäitajateks. Kui süsteem on stabiilne, kuid selle viga väljakujunenud püsiseisundis on liiga suur või siirdeprotsess kulgeb liiga aeglaselt, ei ole see ikkagi praktikas kasutuskõlblik.

Kvalitatiivseid näitajaid võib jagada kahte põhirühma. Esimeses rühmas on nn otsesed kvaliteedinäitajad ehk otsesed kvaliteedihinnangud. Need on määratud süsteemi siirdeprotsessi kõveraga. Teine rühm koosneb üldistatud kvalitatiivsetest näitajatest, mis põhinevad kvaliteedi hindamise kaudsetel meetoditel ja iseloomustavad juhtimissüsteemi kvaliteedi üldistatud hinnangut. Selles peatükis kirjeldatakse ainult otseseid kvalitatiivseid näitajaid. Need määratletakse klassikalist tüüpi automaatjuhtimissüsteemide jaoks, mis koosnevad regulaatorist, juhitavast objektist ja negatiivsest tagasisidest, nagu on näidatud joonisel 7.1.

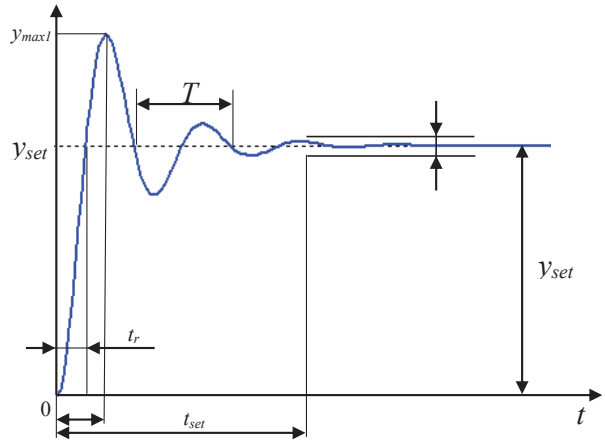


Joonis 7.1. Automaatjuhtimissüsteem

Otseste kvaliteedinäitajate definitsioonid on antud konstantse sisendsignaali $u(t)$ (hüppesignaal, täpsemalt ühikhüppefunktsioon) ja automaatjuhtimissüsteemi $y(t)$ väljundsignaali korral, mis on joonisel 7.2 näidatud tüüpi, st võnkuva siirdeprotsessiga. Eeldatakse ka, et süsteem on stabiilne ja väljundsignaal on väljakujunenud püsiväärtusel $t \to \infty$.

Kõige tähtsamad otsesed kvalitatiivsed näitajad on:

1. *Siirdeprotsessi kestus* t_{set}. See on aeg, mis kulub süsteemi sisendis ühikhüppefunktsiooni rakendamisest kuni väljundi jõudmise ja jäämiseni määratud vea piiresse. See on süsteemi tööomaduste näidik. See on süsteemi suutlikkuse mõõt kiiresti järgida sisendsignaali mistahes muutust. Siirdeprotsessi kestus on aeg süsteemile sisendsignaali esmarakendamisest kuni süsteemi väljundsuurus jõuab väärtuseni väljakujunenud püsiväärtuse läheduses määratud ribas $\pm\Delta$ ja jääb sellesse, kui $t \to \infty$.



Joonis 7.2. Stabiilse juhtimissüsteemi siirdeprotsess ja peamised kvaliteedinäitajad (märgitud)

2. *Tippaeg* $t_{\max 1}$. See on aeg, mille jooksul süsteemi väljund jõuab siirdeprotsessi kõvera esimese maksimumini $y_{\max 1}$.

3. *Ülereguleerimine* σ. See on süsteemi väljundväärtuse maksimaalne hälve väljakujunenud püsiväärtusest, mis ilmneb esimese maksimumi ajal. See arvutatakse protsentides valemiga:

$$\sigma = \frac{y_{\max 1} - y_{set}}{y_{set}} .100\% . \qquad (7.1)$$

Enamiku automaatjuhtimissüsteemide korral on soovitatav, et ülereguleerimine püsib 20–30% piires. Mõnes süsteemis on lubatud ülereguleerimise suurem väärtus, mõnes süsteemis ei ole ülereguleerimine üldse lubatud.

4. *Võnkeperiood T*. See on võnkuva siirdeprotsessi periood. Lineaarsetes süsteemides on see periood konstantne ja ei muutu siirdeprotsessi sumbumisel. Mõnikord loetakse võnkeperioodi asemel juhtimissüsteemi kvalitatiivseks näitajaks võnkesagedust $\omega = 2\pi / T$.

5. *Võnkumiste arv n väljakujunenud püsiväärtuse ümber.* See on väljundsuuruse täisvõngete arv väljakujunenud püsiväärtuse ümber siirdeprotsessi kestuse t_{set} jooksul.

6. *Esifrondi kestus* t_r. t_r on aeg, mille jooksul jõuab väljundsignaal esimest korda tasemeni y_{set} või siirdeprotsessi kõvera $y(t)$ ja väljakujunenud püsiväärtuse taseme esimese lõikumise väärtus x-teljel.

7. *Sumbuvuse logaritmiline vähenemine d.* See on süsteemi siirdeprotsessi sumbuvuse mõõdik. Arvutatakse valemiga:

$$d = \ln \frac{y_{extr1} - y_{set}}{y_{extr2} - y_{set}}, \qquad (7.2)$$

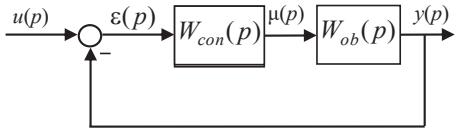
kus y_{extr1} ja y_{extr2} on siirdeprotsessi kõvera kaks kõrvuti ekstreemumit süsteemi väljundis $y(t)$. Tavaliselt valitakse ekstreemum y_{extr1} esimeseks maksimumiks $y_{extr1} = y_{\max 1}$, siis on y_{extr2} signaali $y(t)$ esimene miinimum. Sumbuvuse logaritmilise vähenemise suuremad väärtused tähendavad siirdeprotsessi kiiremat sumbumist.

8. *Püsiseisundi viga (viga väljakujunenud püsiseisundi korral).* Eespool defineeritud kvalitatiivsed näidikud kehtivad juhtimissüsteemide töö siirdeprotsesside kohta. Automaatjuhtimissüsteemide oluline kvalitatiivne näidik on ka püsiseisundi viga, mida nimetatakse ka staatiliseks veaks. See näidik ei ole seotud siirdeprotsessidega, vaid süsteemi väljundi väljakujunenud püsiseisundiga. Enamikus süsteemides ei suuda väljundsignaal tugiväärtust täpselt järgida ja pärast siirdeprotsessi jääb mõõdetud väljundsignaal tugiväärtusest erinema konstantse vea võrra. Seda nimetatakse püsiseisundi veaks. Selle vea arvutamiseks on mugav meetod süsteemi ülekandefunktsiooni abil, mida nimetatakse veatugisignaali ülekandefunktsiooniks.

On olemas ka mõned juhtimissüsteemide üldistatud näidikud, mida nimetatakse tervikhinnanguteks. Need annavad väljundsignaali sumbuvuse ja tugiväärtusest erinevuse määra kombineeritud hinnangu.

7.2 Automaatjuhtimissüsteemide regulaatorite põhitüübid

Enamik automaatjuhtimissüsteeme töötab hälbe põhimõttel. Selle põhimõtte kohaselt jälgib tagasisidesüsteem pidevalt süsteemi väljundsuuruse $y(t)$ dünaamikat, mille eesmärgiks on $y(t)$ kõrvalekaldumisel väljakujunenud püsiväärtusest y_{set} neutraliseerida need hälbed ja hoida väljundsuurust tasemel y_{set} määratud täpsusega. Selle ülesande võtmekomponent on juhtseade ehk regulaator, mis on iga automaatjuhtimissüsteemi oluline osa. Joonisel 7.3 on regulaatoriga tüüpilise juhtimissüsteemi skeem. $W_{ob}(p)$ tähistab juhitava objekti ülekandefunktsiooni ja $W_{con}(p)$ regulaatori ülekandefunktsiooni. Regulaatori sisendsuuruseks on viga $\varepsilon(p)$ ja selle väljundsuurust, mis samal ajal on ka objekti sisendsuuruseks, tähistatakse sümboliga $\mu(p)$.



Joonis 7.3. Regulaatoriga automaatjuhtimissüsteemi tüüpiline skeem

Lihtsuse tagamiseks vaadatakse ainult juhtumit, kui väljakujunenud püsiseisundis on juhtimissüsteemi väljundsignaal $y(p)$ võrdne tugisignaaliga $y_{set} = u(p)$.

7.2.1 Proportsionaalregulaator (P-regulaator)

Proportsionaalregulaator on lineaarregulaatori kõige lihtsam tüüp, mida saab kasutada tagasisidega automaatjuhtimissüsteemides. Seda saab kirjeldada ülekandefunktsiooni valemiga:

$$\mu(t) = k_c \varepsilon(t), \qquad W_{con}(p) = k_c, \tag{7.3}$$

kus $k_c > 0$ on regulaatori proportsionaalsustegur.

P-regulaatoris on genereeritud ja juhitavale objektile rakendatud juhtsignaal proportsionaalne vea määraga $\varepsilon(t)$. Kui k_c väärtus on fikseeritud, põhjustavad väikesed vead juhitavale objektile väikese ja vastupidi, suured vead põhjustavad suure juhtimisreaktsiooni. Juhtsignaali $\mu(t)$ märk on sama kui vea $\varepsilon(t)$ märk – kui viga on positiivne, on ka objektile rakendatav juhtsignaal positiivse märgiga ja väärtusega, mis on proportsionaalne vea suurusega. Negatiivse vea korral on juhtsignaal samuti negatiivne ja selle väärtus on proportsionaalne vea suurusega. Näiteks on automaatjuhtimissignaali sisendis olev tugiväärtus $u(t) = 10$ ühikut, eesmärgiks on väljakujunenud püsiseisundis sama suur väljundsignaal $y_{set} = 10$ ühikut ja P-regulaatori proportsionaalsustegur $k_c = 0.5$. Kui mingite süsteemile mõjuvate häiringutegurite toimel muutub väljundsignaal erinevaks väljakujunenud püsiväärtusest ja selle väärtuseks saab 9 ühikut, siis on viga $\varepsilon(t) = u(t) - y(t) = 10 - 9 = 1$ ja regulaator annab objektile vastava juhtsignaali $\mu(t) = k_c \varepsilon(t) = 0.5$. Kui tänu teisele häiringutegurile muutub süsteemi väljundsignaal seatud tasemest 10 vastassuunas ja väärtuseks saab näiteks 20 ühikut, on viga $\varepsilon(t) = u(t) - y(t) = 10 - 20 = -10$ ja regulaator rakendab objektile juhtsignaali $\mu(t) = k_c \varepsilon(t) = -5$. k_c teistsuguse väärtuse korral on objektile rakendatav juhtsignaal muidugi teistsuguse suurusega. Kui k_c väärtused on liiga suured, reageerib regulaator väljundsignaali hälvetele liiga suurte juhtsignaalide rakendamisega objektile ja juhtimissüsteem ei tööta korralikult. Vastupidi, k_c väga väikese väärtuse korral on regulaatori mõju objektile piisavaks juhtimiseks liiga nõrk. Sellepärast on seda tüüpi regulaatori kasutamisel automaatjuhtimissüsteemides vajalik rakendada parameetri k_c teatud kohandamismehhanismi, mis tagab konkreetse süsteemi korral k_c sobivaima väärtuse.

P-regulaatori peamised eelised on lihtne kasutuselevõtmine ja omadus, et mida suurem on viga, seda suurem on regulaatori mõju objektile. Samuti reageerib P-regulaator kiiremini, kui muud tüüpi regulaatorid.

P-regulaatori üks puudus on, et see küll minimeerib süsteemi väljundi võnkumised ümber seatud väärtuse, kuid ei suuda tavaliselt süsteemi täpselt stabiliseerida tugisignaali $u(t)$ soovitud tasemel. Teiste sõnadega on P-regulaatori kasutamise korral automaatjuhtimissüsteemi püsiseisundi viga peaaegu alati nullist erinev. P-regulaatori teine puudus on, et see põhjustab süsteemis suhteliselt suuri ülereguleerimisväärtusi ja siirdeprotsessi kestus on pikem, kui enamikul muud tüüpi lineaarregulaatoritel, mida kirjeldatakse allpool.

7.2.2 Integreeriv regulaator (I-regulaator)

I-regulaatori võrrand ja ülekandefunktsioon on:

$$\mu(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt, \qquad W_{con}(p) = \frac{1}{T_i p} \tag{7.4}$$

kus T_i on integreeriva regulaatori ajakonstant.

Kui I-regulaatori korral tekib tugisignaali ja objekti väljundsignaali väljakujunenud püsiväärtuse vahel positiivne viga, rakendatakse objektile suureneva väärtusega juhtsignaal ja negatiivse vea korral väheneva väärtusega juhtsignaal.
I-regulaatori eelis P-regulaatori ees on, et väljakujunenud püsiseisundis on viga null.
Kuid I-regulaatorid on oluliselt aeglasemad objektile juhtsignaali genereerimisel. Nende puudus on ka asjaolu, et I-regulaatoriga juhtimissüsteemi korral võib ülereguleerimine jõuda väga suurte väärtusteni ja kogu süsteem võib muutuda ebastabiilseks. Sellepärast kasutatakse I-regulaatoreid harva üksinda. Tavaliselt, kui väljakujunenud püsiseisundis on eesmärgiks null-viga, kombineeritakse integraalset juhtimispõhimõtet mõne muu juhtimispõhimõttega, näiteks proportsionaalsega.

7.2.3 Proportsionaal-integraalregulaator (PI-regulaator)

Nagu nimetusest näha, ühendab PI-regulaator endas proportsionaalse ja integreeriva reguleerimise põhimõtteid. PI-regulaatori võrrand ja ülekandefunktsioon on:

$$\mu(t) = k_c\left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t)dt\right], \qquad W_{con}(p) = k_c\left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \tag{7.5}$$

kus $k_c > 0$ on regulaatori proportsionaalsustegur ja T_i selle ajakonstant.
PI-regulaatori tööpõhimõte on summeerida hetke viga kõikide eelnevate veaväärtuste integraaliga ja genereerida objektile juhtsignaal, mis on selle summaga proportsionaalne proportsionaalsusteguri k_c korral.
PI-regulaator ühendab endas P- ja I-regulaatorite omadusi. Proportsionaalse komponendi lisamise tõttu on PI-regulaatori reageerimisaeg lühem kui I-regulaatoril. Siiski on PI-regulaatorid kuni 50% aeglasemad kui P-regulaatorid. PI-regulaatori ülereguleerimisväärtus on samaväärne P-regulaatori vastava väärtusega, st süsteemi väljundvõnked on väiksemad, kui I-regulaatoriga juhtimise korral. PI-regulaatori kasutamise korral automaatjuhtimissüsteemides on tänu integreerivale komponendile süsteemi viga väljakujunenud püsiseisundis null.

7.2.4 Proportsionaal-diferentsiaalregulaator (PD-regulaator)

PD-regulaator ühendab endas proportsionaalse ja diferentseeriva juhtimispõhimõtte. PD-regulaatori võrrand ja ülekandefunktsioon on:

$$\mu(t) = k_c\left[\varepsilon(t) + T_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right], \qquad W_{con}(p) = k_c\left(1 + T_d p\right) \tag{7.6}$$

kus $k_c > 0$ on regulaatori proportsionaalsustegur ja T_d selle ajakonstant.
Diferentseeriv komponent PD-regulaatori juhtalgoritmis võimaldab veafunktsiooni $\varepsilon(t)$ muutuse järgi ajas teatud määral ennustada väljundsignaali tulevast dünaamikat. Vea $\varepsilon(t)$ tuletise kasutamine juhtimisel tagab regulaatori tugevama mõju objektile, kui muutuse veamäär on suurem. See omakorda lühendab siirdeprotsessi ja kiirendab väljundsignaali stabiliseerumist. Seega on D-komponendil ka positiivne mõju süsteemi stabiilsusele. Üldiselt

saavutab süsteem PD-regulaatoriga juhtimise korral väljundi väljakujunenud püsiväärtuse kiiremini, kui sama süsteem P-, I- või PI-regulaatoriga juhtimise korral. Ka ülereguleerimine on kõige väiksem. Kuid PD-regulaatoriga juhtimissüsteemidel on jääkviga, kuigi see on väiksem kui P-regulaatori korral.

7.2.5 Proportsionaal-integraal-diferentsiaalregulaator (PID-regulaator)

PID-regulaator ühendab endas proportsionaalse, integreeriva ja diferentseeriva juhtimispõhimõtte. PID-regulaatori võrrand ja ülekandefunktsioon on:

$$\mu(t) = k_c\left[\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t)dt + T_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt}\right], \qquad W_{con}(p) = k_c\left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \tag{7.7}$$

kus $k_c > 0$ on regulaatori proportsionaalsustegur, T_i integreeriva komponendi ajakonstant ja T_d on diferentseeriva komponendi ajakonstant.

PID-regulaatoris rakendatakse eespool kirjeldatud kolme juhtimispõhimõtte kombinatsiooni, kasutades süsteemi veale $\varepsilon(t)$ reageerimisel proportsionaalset, integreerivat ja diferentseerivat põhimõtet. See tüüp ühendab endas eelkirjeldatud tüüpi regulaatorite eeliseid ja on seega kõige universaalsem regulaator ning tööstusrakendustes kõige laialdasemalt kasutusel. Süsteemi ülereguleerimine on PID-regulaatori korral kõige väiksem ja integreeriva komponendi mõju tõttu on jääkviga null. Diferentseeriv komponent annab vajalikud tööomadused, kuid integreeriva komponendi tõttu on siirdeprotsess veidi pikem kui PD-regulaatoriga juhitaval süsteemil.

7.1 Enesekontroll

1. Millise järgnevas loetelus esitatud kontrolleri tüübi kasutamise korral ei ole jääkviga süsteemis võrdne nulliga?
   a. P-kontroller;
   b. I-kontroller;
   c. PI-kontroller;
   d. PID-kontroller.

2. Millise järgneva kontrolleritüübi kasutamise korral sumbub siirdeprotsess kõige kiiremini?
   a. P-kontroller;
   b. PD-kontroller;
   c. PI-kontroller;
   d. PID-kontroller.

3. Paljudes automaatsetes juhtimissüsteemides jälgitakse, et ülereguleerimine ei ületaks soovitatud väärtust:

   a. 10%;
   b. 40%;
   c. 30%;
   d. 50%.

4. Kvaliteedi indikaatorid on otseselt määratud:
   a. süsteemi stabiilsusega;
   b. süsteemi nullkohtadega ja poolustega;
   c. süsteemi püsiseisundi mudeliga;
   d. süsteemi siirdeprotsessiga.

5. Milline järgnevatest kontrolleritest on kõige aeglasem?
   a. P-kontroller;
   b. I-kontroller;
   c. PI-kontroller;
   d. PID-kontroller.

TEADMISTE KONTROLLI KÜSIMUSTE TULEMUSED

Õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele **Õppeaine 03. Signaalid, süsteemid ja juhtimine mehhatroonikas**. Küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimuse nr. ja õige vastus				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1. Signaalid. Signaalide klassifitseerimine	D	B	C	B	C
2. Süsteemid. Põhimõisted	B	B	A	B	D
3. Juhtimissüsteemide lühike klassifikatsioon	D	A	C	B	-
4. Lineaarsete süsteemide mudelite põhitüübid	D	A	B	C	C
5. Elementaarsed dünaamilised süsteemid.	B	A	D	A	D
6. Lineaarsete süsteemide stabiilsus	B	D	A	D	A
7. Juhtimissüsteemide kvaliteedinäitajad. Lineaarregulaatorite põhitüübid	A	B	C	D	B

VIITED

[1] Astrom, K., R. Murray. *Feedback Systems - an Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton, Princeton University Press, 2008, 2012.

[2] Bakshi, U., M. Bakshi. *Modern Control Theory*. Pune, India, Technical Publications Pune, 2008.

[3] Baraniuk, R. *Signals and Systems*. The Connexions Project., Houston TX. 2014. http://web.itu.edu.tr/hulyayalcin/Signal_Processing_Books/2003_Richard_Baraniuk_Signals_and_Systems.pdf

[4] Bishop, R. *The Mechatronics Handbook*. CRC Press 2002.

[5] Dorf, R., R. Bishop. *Modern Control Systems*. New Jersey, Pearson Eduaction Inc., 2001, 2011.

[6] Engelberg, S. *A Mathematical Introduction to Control Theory*. London, Imperial College Press, 2005.

[7] Feindt, E. *Regeln mit dem Rechner*. Munchen, R. Oldenbourg Verlag, 1994.

[8] Jaschek, H., W. Schwinn. *Ubungsaufgaben zum Grundkurs der Regelungstechnik*. Munchen, R. Oldenbourg Verlag, 1993.

[9] Hsu, H. *Theory and problems of signals and systems*. McGraw Hill. 1995. https://electronicsbookcafe.files.wordpress.com/2015/08/signals-and-systems-2nd-edition-schaums-outline-series-hwei-hsu.pdf

[10] Kappos, E. *Classical Control Theory - a Course in the Linear Mathematics of Systems and Control*. University of Sheffield, 2002.

[11] Leonhard, W., E. Schnieder. *Aufgabensammlung zur Regelungstechnik*. Braunschweig, Vieweg, 1992.

[12] Ogata, K. *Modern Control Engineering*. New Jersey, Prentice-Hall, 1970,1997

[13] Polderman, J., J. Willems. *Introduction to Mathematical Systems Theory - a Behavioral Approach*. New York, Springer Verlag, 1998.

Euroopa tööstuslike väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete innovatiivse ja aruka kasvu strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas (MechMate)

ÕPPEAINE 04: DIGITAALSÜSTEEMID [M004ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

MICHAŁ SMATER, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
BOGUMIŁA WITTELS, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
PIOTR FALKOWSKI, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)

2018

Dokumendist

Seda dokumenti tuleks kasutada põhiõpikuna järgmises moodulis: Digitaalsüsteemid

Sisukord

Dokumendist 3
Jooniste loend 7
Tabelite loend 8
1 Sissejuhatus 9
1.1 Lühendid 9
1.2 Terminite sõnastik 9
1.3 Sissejuhatus 9
2 Analoog- ja digitaaltehnika 10
2.1 Sissejuhatus 10
2.2 Analoogsignaalid 10
2.3 Digitaalsignaalid 12
2.4 Analoog- ja digitaalsüsteemid 13
2.5 Kordusküsimused 16
3 Arvusüsteemid 17
3.1 Sissejuhatus 17
3.2 Kümnendsüsteem 17
3.3 Kahendsüsteem 18
3.4 Kaheksandsüsteem 19
3.5 Kuueteistkümnendsüsteem 19
3.6 Arvusüsteemid – mõned peamised terminid 19
3.6.1 Kahendsüsteem 19
3.6.2 Kümnendsüsteem 20
3.6.3 Kaheksandsüsteem 20
3.6.4 Kuueteistkümnendsüsteem 20
3.7 Arvu väljendamine kahendsüsteemis 20
3.7.1 Märgibiti suurus 20
3.7.2 Ühenitäiend 20
3.7.3 Kahenitäiend 20
3.8 Kümnendekvivalendi leidmine 21
3.8.1 Teisendus kahendsüsteemist kümnendsüsteemi 21
3.8.2 Teisendus kaheksandsüsteemist kümnendsüsteemi 21
3.8.3 Teisendus kuueteistkümnendsüsteemist kümnendsüsteemi 21
3.9 Teisendus kümnendsüsteemist kahendsüsteemi 22
3.10 Teisendus kümnendsüsteemist kaheksandsüsteemi 23
3.11 Teisendus kümnendsüsteemist kuueteistkümnendsüsteemi 24
3.12 Kahendsuuruste väljendamine 24
3.13 Kordusküsimused 27
4 Digitaallülitused/Loogikalülitused 28
4.1 Loogikaventiilid 29
4.1.1 VÕI-ventiil 29
4.1.2 JA-ventiil 31
4.1.3 EI-ventiil 32
4.1.4 VÄLISTAV-VÕI-ventiil 32
4.1.5 NING-EI (NAND) ventiil 34
4.1.6 VÕI-EI-ventiil 35
4.1.7 Universaalventiilid 36
4.2 Peamised integraallülitused 38
4.3 Kordusküsimused 41
5 Programmeeritavad loogikaseadmed 42
5.1 Püsiloogika ja programmeeritav loogika 42
5.2 Programmeeritavad püsimälud 44

5.3 Programmeeritava loogikaga maatriks 46
5.4 Programmeeritav maatriksloogika 47
5.5 Üldine maatriksloogika 48
5.6 Täisprogrammeeritav loogikaseade 49
5.7 Programmeeritav ventiilmaatriks 50
5.8 Programmeeritava loogikaga riistvara projekteerimine ja arendamine 51
5.9 Programmeerimiskeeled 52
5.10 ABEL riistvarakirjelduse keel 52
5.11 VHDL-VHSIC riistvarakirjelduse keel 52
5.12 Verilog 53
5.13 Java HDL 53
5.14 Kordusküsimused 54
6 Mikrokontroller, mikroprotsessor 55
6.1 Mikrokontrollerid 55
6.1.1 Rakendused 57
6.1.2 Mikrokontrolleri sisemus 57
6.1.3 Keskprotsessor (CPU) 58
6.1.4 Muutmälu (RAM) 59
6.1.5 Püsimälu (ROM) 59
6.1.6 Erifunktsiooniga registrid 59
6.1.7 Väliskomponendid 60
6.1.8 Välisseadmete liidestamine mikrokontrolleriga 65
6.2 Mikroprotsessorid 75
6.2.1 Mikroprotsessorite areng 78
6.2.2 Mikroprotsessori sisemus 79
6.2.3 Mälu adresseerimine 82
6.2.4 Mikroprotsessori valik 83
6.3 Kordusküsimused 85
Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused 86
Viited 87

JOONISTE LOEND

Joonis 2.1 Heli levimine õhus, a) õhurõhu muutumine, b) analoogkujutis 11
Joonis 2.2 Analoogväärtuse digiteerimine. a) temperatuuriteaseme „ümardamine", b) siinustaseme mõõtmine konkreetsel ajahetkel 12
Joonis 2.3 Analoogsignaali digiteerimine ja digitaalsignaali teisendamine analoogsignaaliks. 13
Joonis 2.4 Digitaalse temperatuuri täppisreguleerimissüsteemi plokkskeem. 14
Joonis 3.1 Digitaalne teave salvestatuna a) laserplaadile (CD), b) CD-le kirjutatud infobittidena 25
Joonis 3.2 (a) Tavapärased pinged digitaalsüsteemis; (b) tavapärase digitaalsignaali ajastuse skeem. 26
Joonis 4.1 Digitaallülituse vastus kahendsignaalile 28
Joonis 4.2 Kahe sisendiga loogikalülitus 29
Joonis 4.3 Kahe sisendiga VÕI-ventiili a) sümbol, b) tõesustabel, c) elektriskeem 30
Joonis 4.4 Näide 4.1 31
Joonis 4.5 Kahe sisendiga JA-ventiili a) sümbol, b) tõesustabel, c) elektriskeem 31
Joonis 4.6 Nelja sisendiga JA-ventiili rakendus, kasutades kahe sisendiga JA-ventiile 32
Joonis 4.7 a) EI-ventiili sümbol, b) tõesustabel ja c) elektriskeem. 32
Joonis 4.8 (a) Kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiili sümbol, (b) tõesustabel 33
Joonis 4.9 (a) Kolme sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil ja (b) nelja sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil. 34
Joonis 4.10 EI-lülituse teostus, kasutades VÄLISTAV-VÕI-ventiili. 34
Joonis 4.11 (a) Kahe sisendiga NING-EI teostus, kus kasutatakse JA-ventiili ning EI-lülitust, (b) kahe sisendiga NING-EI-ventiili sümbol ja (c) kahe sisendiga NING-EI-ventiili tõesustabel. ... 35
Joonis 4.12 a) Kahe sisendiga VÕI-EI teostus, kus kasutatakse VÕI-ventiili ning EI-lülitust, (b) kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili sümbol ja (c) kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili tõesustabel. 35
Joonis 4.13 NING-EI ja VÕI-EI-ventiilide kasutamine c), d) või b), e) JA ja a) d) EI-ventiilide loomiseks. 36
Joonis 4.14 Peamiste integraallülituste näited. 37
Joonis 4.15 Näite 4.5 võimalikud teostused 38
Joonis 5.1 Püsiloogikaskeem 43
Joonis 5.2 Lihtne programmeeritav loogikaskeem. 43
Joonis 5.3 Programmeeritava püsimälu sisearhitektuur. 46
Joonis 5.4 PLA-seadme sisearhitektuur. 47
Joonis 5.5 PAL-seadme sisearhitektuur. 48
Joonis 5.6 CPLD arhitektuur. 49
Joonis 5.7 FPGA arhitektuur. 50
Joonis 5.8 Programmeeritava loogika projekteerimis- ja arendusprotsess 51
Joonis 6.1 Mikroprotsessor ja mikrokontroller: (a) mikroprotsessori konfiguratsioon; (b) mikrokontrolleri konfiguratsioon. 56
Joonis 6.2 Mikrokontrolleril põhinev auto püsikiiruse hoidiku süsteem. 58
Joonis 6.3 Mikrokontrolleri sisemus. 58
Joonis 6.4 Taimeri alamsüsteem. 61
Joonis 6.5 Taimeri väljundalamsüsteem. 62
Joonis 6.6 Taimeri väljundalamsüsteem 62
Joonis 6.7 Ülema–alluva konfiguratsioon – üks I2C-ülemseade ja mitu alamseadet. 64

Joonis 6.8 Ülema–alluva konfiguratsioon – mitme ülemseadme toega süsteem. 64
Joonis 6.9 LED-seadmete liidestamine mikrokontrolleriga..... 66
Joonis 6.10 Elektromehaanilise relee liidestamine mikrokontrolleriga..... 67
Joonis 6.11 Kontakti värin. 68
Joonis 6.12 (a) Värina eemaldamine riistvara abil, kasutades RC-lülitust, ja (b) värina eemaldamine riistvara abil, kasutades Schmitti trigerit. 68
Joonis 6.13 16 klahviga maatriksklaviatuuri ühendamine mikrokontrolleriga. 69
Joonis 6.14 Võimalikud konfiguratsioonid CC-näidiku liidestamiseks mikrokontrolleriga. 70
Joonis 6.15 Otselülitusühendus CA-näidikule. 71
Joonis 6.16 Kahe CC-näidiku multiplekslülitus. 71
Joonis 6.17 Multiplekslülitus kahe CA-näidiku otseühenduseks. 72
Joonis 6.18 LCD-näidiku liidestamine mikrokontrolleriga..... 73
Joonis 6.19 A/D-muunduri liidestamine mikrokontrolleriga. 74
Joonis 6.20 D/A muunduri liidestamine mikrokontrolleriga..... 74
Joonis 6.21 Mikroprotsessoril põhinev süsteem..... 76
Joonis 6.22 Siiniliides mikroprotsessori ja selle välisseadmete vahel..... 78
Joonis 6.23 Tavapärane mikroprotsessori skeem. 80
Joonis 6.24 Kirjeldav mikroprotsessori plokkskeem. 82

TABELITE LOEND

Tabel 1.1 Põhiterminid 9
Tabel 4.1 Valitud integraalskeemid..... 39
Tabel 6.1 Mikroprotsessori omaduste kontroll-leht. 84

1 SISSEJUHATUS

1.1 Lühendid

DOF Vabadusaste

1.2 Terminite sõnastik

Tabel 1.1 Põhiterminid

Nimetus	Selgitus
signaal	Funktsioon, mis „edastab informatsiooni teatud nähtuse iseloomu või omaduste kohta.”
digitaalsed signaalid	Digitaalne signaal on signaal, mida kasutatakse andmete väljendamiseks diskreetsete väärtuste jadana; igal konkreetsel ajahetkel võib see sisaldada üksnes üht lõplikust väärtuste arvust analoogsignaalil, mis väljendab pidevaid väärtusi; igal ajahetkel väljendab see reaalset arvu pidevas väärtuste vahemikus.
analoogsignaal	Väljendab pidevaid väärtusi; igal ajahetkel väljendab see reaalset arvu pidevas väärtuste vahemikus.
Vabadusaste	Sõltumatute liigutuste arv, mida keha või süsteem võib teha.
Nihe	Vedavate ja veetavate elementide kiiruste vahe mõju.

1.3 Sissejuhatus

Termin „digitaalsed süsteemid“ tähistab elementaarüksuste rühma, mis töötavad digitaalsete signaalidega. Seevastu analoogsüsteemides kasutatakse analoogsignaale, mis on vastuvõtlikumad tootmishälvete, signaali sumbumise ja müra mõjule. Digitaaltehnikad on kasulikud, sest märksa lihtsam on panna elektroonikaseade lülituma ühte mitmest teadaolevast olekust kui reprodutseerida täpselt pidevat väärtuste vahemikku.

Tänapäeva maailmas on termin „digitaalne” saanud osaks meie igapäevasest sõnavarast tänu dramaatilisele ulatusele, kuidas digitaalsed süsteemid ja tehnikad on kasutusele võetud peaaegu kõikides eluvaldkondades: arvutid, automaatika, robotid, meditsiiniteadus ja -tehnoloogia, transport, telekommunikatsioon, meelelahutus, kosmoseuuringud jne. Alustate peagi põnevat haridusteekonda, millel avastad digitaalsete süsteemide põhialused, mõisted ja toimingud alates lihtsaimast lülitist kuni kõige keerukama arvutini. Õpik peaks andma teile põhiteadmised kõikide digitaalsete süsteemide tööst, mida peaksite suutma rakendada iga digitaalse süsteemi analüüsimisel ja veaotsingul.

Digitaalseid elektroonikasüsteeme valmistatakse tavaliselt suurtest loogikaventiilide sõlmedest (mis prinditakse sageli kiipidele), mis on Boole’i loogikafunktsioonide lihtsad elektroonilised väljendused.

2 ANALOOG- JA DIGITAALTEHNIKA

2.1 Sissejuhatus

Füüsilises maailmas on iga suurus, mis võib muutuda ajas või ruumis (näiteks pilt), võimalik signaal, mis võib muu hulgas anda informatsiooni füüsilise süsteemi oleku kohta või edastada sõnumit vaatlejate vahel. Allikas „IEEE Transactions on Signal Processing“ („Signaalitöötluse tehingud”) on märgitud, et termin „signaal“ hõlmab heli-, video-, kõne-, pildi-, side-, geofüüsilisi, sonari-, radari-, meditsiinilisi ja muusikalisi signaale. Hilisema signaali definitsiooni kohaselt on see „kvantifitseeritava üksuse täheldatav muutus“; siin on kõik, mis kujutab endast üksnes ruumifunktsiooni (näiteks pilt), signaalide kategooriast välja jäetud. Lisaks on märgitud, et signaal võib sisaldada või mitte sisaldada informatsiooni.

Looduses võivad signaalid esineda mistahes ühe organismi tegevusena, mida teised organismid suudavad tajuda, alates kemikaalide eritamisest taimede poolt, et hoiatada lähedal asuvaid sama tüüpi taimi ohu eest, kuni häälitsuste või liigutusteni, mida teevad loomad, et teavitada teisi loomi ohust või toiduallikast. Signaalide edastamine toimub organismides kuni rakutasandini (rakusignaalid). Evolutsioonilises bioloogias väidab signaaliteooria, et evolutsiooni oluline liikumapanev jõud on loomade võime üksteisega suhelda, kuna see arendab välja signaalide edastamise viise. Inimeste loodud tehnoloogias edastavad signaale tavaliselt andurid ning tihti teisendatakse signaali algne vorm muunduri abil teiseks energiavormiks. Näiteks mikrofon muudab helisignaali pingelaineteks ja kõlar toimib vastupidi.

Ametlik eriala, mis käsitleb signaalide teabesisaldust, on informatsiooniteooria. Signaalis oleva informatsiooniga kaasneb tavaliselt müra. Termin „müra” tähendab harilikult soovimatut juhuslikku häiringut, kuid sageli hõlmab see ka soovimatuid signaale, mis segavad soovitud signaali (näiteks läbikoste). Müra vältimist on osaliselt käsitletud signaalipuhtust käsitlevas lõigus. Soovitud signaalide eraldamine taustast kuulub signaalitaastuse valdkonda, mille üks haru on hinnanguteooria, mis on tõenäosusel põhinev meetod juhuslike häiringute kõrvaldamiseks.

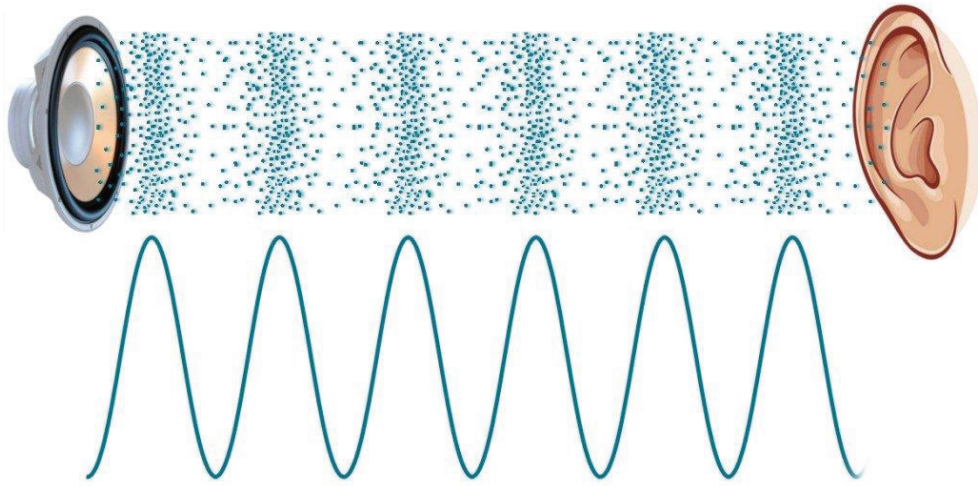
Insener-tehnilised erialad, nagu elektrotehnika, on sillutanud teed informatsiooni edastamist, hoidmist ja töötlemist hõlmavate süsteemide väljatöötamisele, uurimisele ja rakendamisele. 20. sajandi teisel poolel jagunes elektrotehnika mitmeks valdkonnaks, mis keskendusid füüsiliste signaalide töötlemise süsteemide koostamisele ja analüüsile. Vastavad näited on elektroonikatehnika ja arvutiteadus; konstrueerimistehnoloogia aga tegeles kasutajaliideste funktsionaalse ehitusega.

2.2 Analoogsignaalid

Me elame maailmas, mis on üleni pidevas liikumises. See tähendab, et iga kvantifitseeritava üksuse täheldatav muutus on ajas liikuva iseloomuga. Näiteks inimkõne on helilaine tüüp, mida võib kirjeldada kui õhurõhu pidevat muutumist ajas (Joonis 2.1). See on signaal, mis kannab inimeste vahel sõnumit.

a

b)



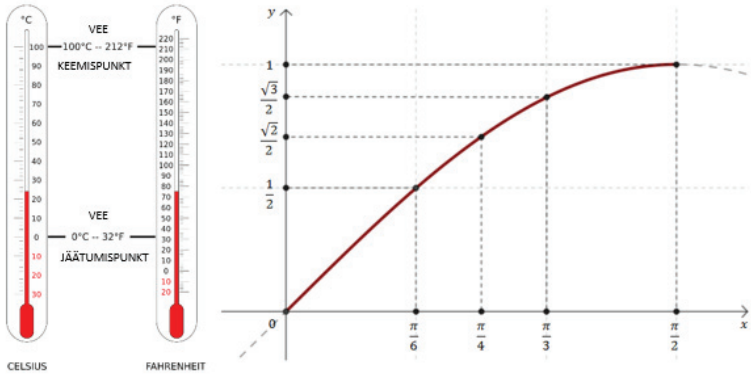
Joonis 2.1 Heli levimine õhus, a) õhurõhu muutumine, b) analoogkujutis

Terminite „analoog“ ja „signaal“ kombinatsioon tähendab ajas muutuva omaduse (muutuja) pidevat väljendust mingi teise ajas muutuva suuruse suhtes, st signaal on „analoogne“ teise ajas muutuva signaaliga. Analooghelisignaal on signaalipinge hetkeline muutumine helilainete rõhu muutuste alusel. See näide puudutab vahetult elektrotehnikat, kus ajas muutuvate füüsiliste nähtuste väljendamiseks kasutatakse ühe elektrilise omaduse analoogset muutust.
Suuruse analoogseks väljendamiseks võib kasutada aga erinevaid vahendeid – näiteks auto spidomeetrit, kus osuti liikumine on proportsionaalne auto kiirusega ja järgib kõiki muutusi, mis sõiduki kiirendamisel või aeglustamisel toimuvad. Vanematel autodel ühendas elastne mehaaniline võll ülekandesüsteemi armatuurlaual asuva spidomeetriga. Tasub märkida, et uuematel autodel kasutatakse endiselt tihti kiiruse analoogset väljendamist, kuigi kiirust mõõdetakse digitaalselt.
Temperatuuri mõõtmine on samuti hea näide füüsiliste nähtuste analoogsest väljendamisest. Kasutatava mõõtevedeliku maht järgib proportsionaalselt muutusi mõõdetud keskkonna temperatuuris. Vedeliku asemel kasutatakse termomeetrite valmistamiseks ka metallvedrusid.
Need kaks näidet näitavad, et füüsilist suurust saab analoogselt väljendada ka ainult mehaaniliste vahenditega. Ehkki sellised lahendused on töökindlad, täpsed ja vastupidavad, on neil üks vaieldamatu puudus: neid saab rakendada ainult lokaalselt. Tõsi, kiirus kantakse üle auto käigukastist armatuurlauale, kuid see vahemaa on üsna lühike. Enamik termomeetreid suudavad mõõta üksnes lähikeskkonna temperatuuri. Mehaanilised vahendid ei ole eriti mugavad, kui informatsiooni on tarvis edastada kaugemale või töödelda.
Miks me kasutame sellist füüsiliste nähtuste väljendamist? Näiteks temperatuuri hindamiseks on meil mitmeid sõnu, et kirjeldada, kas see on külm, jahe, soe või kuum. See pole just väga täpne. Termomeetril on numbritega skaala. Tänu sellele saame me temperatuuri täpselt näha ja edastada. Temperatuurinäitur võib paikneda mistahes punktis kõrval asuvate joonte vahel. Ümbritseva temperatuuri analoogne väljendus võib olla mistahes naturaalarv skaala vahemikus. See kajastab täpselt iga algväärtuse muutust. Selline väljendusviis annab mõõdetud nähtusele arvulise väärtuse, mis on meile kergesti mõistetav.

Tehnoloogia arenemisel tekkis inimestel soov signaale töödelda, et informatsiooni edastada ja salvestada. Selleks on kõige mugavam vahend elekter. Iga analoogsignaali saab kergesti elektrisignaaliks muuta ja seejärel suurtele kaugustele üle kanda, võimendada, kodeerida, salvestada vms.

2.3 Digitaalsignaalid

Digitaalses vormis ei väljenda suurusi pidevalt muutuvad näitajad, vaid sümbolid, mida nimetatakse numbriteks. Selle näitena võib võtta digitaalkella, mis näitab kellaaega numbritega nullist kümneni; need tähistavad tunde ja minuteid ning vahel ka sekundeid. Nagu me teame, muutub kellaaeg pidevalt, kuid digitaalkell ei ole pidevas muutumises; pigem muutub selle näit kord minutis või sekundis. Teisisõnu muutub kellaaja digitaalne näit diskreetsete intervallidega erinevalt näiteks analoogpäikesekellast, kus aega tähistav varju positsioon pidevalt muutub.
Digitaalse väljendussüsteemi diskreetse iseloomu tõttu ei esine digitaalse suuruse väärtuse lugemisel mitmetähenduslikkust, kuid analoogsuuruse väärtust on tihti võimalik mitmeti tõlgendada. Praktikas rakendatakse analoogsuuruse mõõdetud väärtuse korral alati „ümardamist" mugavale täpsusastmele, teiste sõnadega, suuruse digiteerimist.



Joonis 2.2 Analoogväärtuse digiteerimine. a) temperatuuritaseme „ümardamine", b) siinustaseme mõõtmine konkreetsel ajahetkel

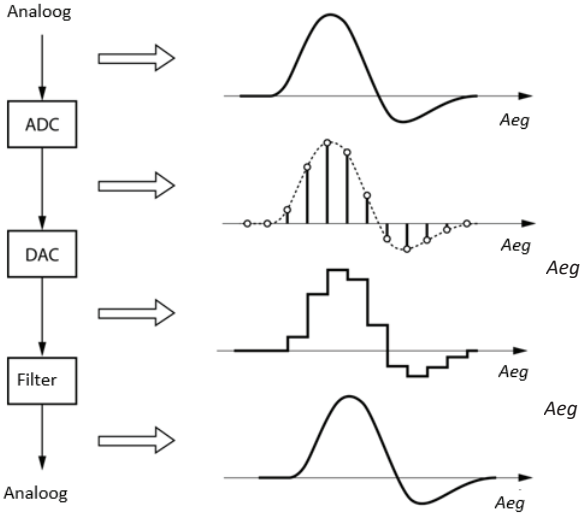
Digitaalne väärtus saadakse piiratud täpsusega arvu määramisel pidevalt muutuvale suurusele. Näiteks keha temperatuuri mõõtmisel (analoogse) elavhõbedatermomeetriga paikneb elavhõbedasammas tavaliselt kahe mõõtejoone vahel, kuid alati võetakse lähim joon ja vaadatakse selle numbrit, mis võib olla näiteks 36,6 °C.
Digitaalsignaal on signaal, mida kasutatakse andmete väljendamiseks diskreetsete väärtuste jadana; sellel võib igal ajahetkel olla ainult üks lõplik väärtus. See erineb analoogsignaalist, mis väljendab pidevaid väärtusi; igal ajahetkel väljendab see reaalset arvu pidevas väärtuste vahemikus.
Lihtne digitaalsignaal väljendab informatsiooni diskreetsetes analoogtasemete vahemikes. Kõik väärtusevahemiku tasemed väljendavad sama informatsiooni olekut. Enamikus

digitaalsüsteemides võib signaalil olla kaks võimalikku väärtust; seda nimetatakse binaarsignaaliks või loogikasignaaliks. Neid väljendavad kaks pingevahemikku: üks võrdlusväärtuse lähedal (seda nimetatakse tavaliselt maandus- või nullpingeks), teine aga toitepinge lähedasel väärtusel. Need vastavad kahele väärtusele „null“ ja „üks“ (või „vale“ ja „õige“) Boole'i loogikas, seega tähistab binaarsignaal igal ajahetkel üht binaarset numbrit (bitti). Sellise diskreetimise tõttu ei välju suhteliselt väikesed muutused analoogsignaali tasemes diskreetsetest raamidest ning signaali oleku andurisüsteem ei märka neid. Selle tulemusena on digitaalsignaalid müra suhtes immuunsed; elektrooniline müra (kui see pole liiga tugev) ei mõjuta digitaalsüsteeme, samas kui analoogsignaalide tööd mõjutab müra mingil määral alati.

2.4 Analoog- ja digitaalsüsteemid

Enamik füüsilisi suuruseid on iseloomult analoogsed ning sageli on need suurused sisendid ja väljundid, mida süsteem jälgib, kasutab ja juhib. Mõned näited on temperatuur, rõhk, asukoht, kiirus, vedelikutase, vooluhulk jne. Me oleme harjunud neid suurusi digitaalselt väljendama, öeldes näiteks, et temperatuur on 64° (või 63,8°, kui soovime täpsemad olla), kuid tegelikult tähendab see põhimõtteliselt analoogse suuruse digitaalset ümardamist. Digitaaltehnoloogia kasutamiseks analoogsisendite ja -väljundite korral tuleb järgida nelja etappi:

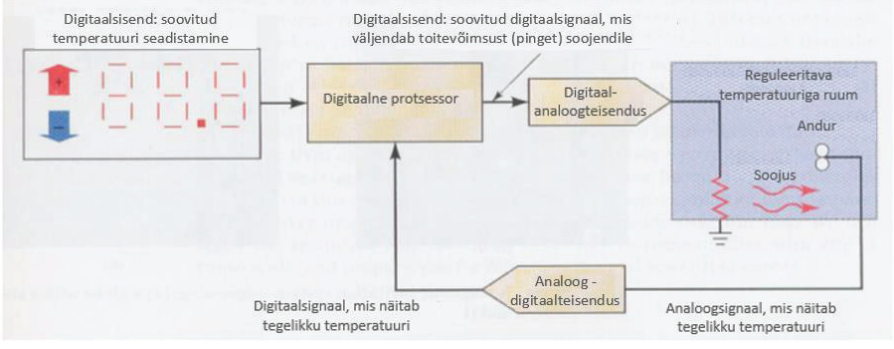
1. Füüsilise muutuja teisendamine elektriliseks (analoog)signaaliks.
2. Elektrilise (analoog)signaali teisendamine digitaalsele kujule.
3. Digitaalse informatsiooni töötlemine.
4. Digitaalväljundite teisendamine tagasi reaalse maailma analoogsele kujule.



Joonis 2.3 Analoogsignaali digiteerimine ja digitaalsignaali teisendamine analoogsignaaliks.

Kogu õppemoodul 9 hõlmab meetodite kirjeldust, mida rakendatakse ainult 1. etapi realiseerimiseks. Olemas on mitut tüüpi seadmeid, mis teisendavad erinevad füüsilised

muutujad elektrilisteks analoogsignaalideks (andurid). Neid kasutatakse parameetrite mõõtmiseks, mida esineb meie „reaalses" analoogmaailmas. Ainuüksi autol on andurid vedelikutaseme (kütusepaagis), temperatuuri (kliimaseadmes ja mootoris), kiiruse (spidomeeter), kiirenduse (turvapadja põrkeandur), rõhu (õlis, torustikus) ja vooluhulga (kütusel) mõõtmiseks, ning need on vaid mõned võimalikest.
Tavapärase süsteemi illustreerimiseks, milles seda lähenemisviisi kasutatakse, on joonisel 2.3 kujutatud temperatuuri täpse reguleerimise süsteemi. Kasutaja vajutab üles või alla suunatud nuppe, et seadistada soovitud temperatuuri 0,1" intervallidega (digitaalnäit). Temperatuuriandur köetavas ruumis teisendab mõõdetud temperatuuri proportsionaalseks pingeks. See analoogpinge teisendatakse digitaalseks suuruseks analoog-digitaalmuunduriga (ADC). Seejärel võrreldakse saadud väärtust soovitud väärtusega ning määratakse kindlaks digitaalne väärus, millisel määral on vaja soojust. Digitaalne väärus teisendatakse analoogsuuruseks (pingeks) digitaal-analoogmuunduriga (DAC). Seda pinget rakendatakse kütteelemendile, mis tekitab rakendatud pingele vastavat soojust ja mõjutab ruumi temperatuuri.



Joonis 2.4 Digitaalse temperatuuri täppisreguleerimissüsteemi plokkskeem.

Digitaalsüsteem on seadmete kombinatsioon, milles töödeldakse loogilist informatsiooni või füüsilisi suurusi, mida väljendatakse digitaalsel kujul; st suurustel võivad olla ainult diskreetsed väärtused. Need seadmed on sageli elektroonilised, ent võivad olla ka mehaanilised, magnetilised või pneumaatilised. Mõnede levinumate digitaalsüsteemide hulka kuuluvad digitaalarvutid ja -kalkulaatorid, digitaalsed audio- ja videoseadmed ning telefonisüsteem – maailma suurim digitaalsüsteem.
Analoogsüsteem sisaldab seadmeid, milles töödeldakse füüsilisi suurusi, mida väljendatakse analoogsel kujul. Analoogsüsteemis võivad suurused varieeruda pidevas väärtuste vahemikus. Näiteks väljundsignaali amplituudil raadiovastuvõtja kõlarisse võib olla mistahes väärtus nulli ja maksimumpiiri vahel. Teised levinud analoogsüsteemid on helivõimendid, magnetlintide salvestus- ja esitusseadmed ning lihtsad valguse hämardamise lülitid.
Nii elektroonikas kui ka enamikus teistes tehnoloogiates kasutatakse rakendustes üha rohkem digitaalseid tehnikaid toimingute teostamiseks, milleks varem kasutati analoogmeetodeid. Selle peamised põhjused on järgmised.
1. Digitaalsüsteeme on üldiselt lihtsam koostada. Digitaalsüsteemides kasutatavad ahelad on lülitusahelad, kus oluline pole täpne pinge või voolutugevuse väärtus, vaid üksnes selle vahemik.

2. Informatsiooni on lihtne salvestada. Selleks on olemas spetsiaalsed seadmed ja süsteemid, mis võivad hankida digitaalset informatsiooni ja hoida seda nii kaua kui tarvis, ning massisalvestustehnikad, mis võimaldavad salvestada miljardeid infobitte suhteliselt väikeses füüsilises ruumis. Analoogsalvestuse võimalused on seevastu äärmiselt piiratud.

3. Kogu süsteemis on lihtsam täpsust tagada. Pärast signaali digiteerimist ei kahjustu selles sisalduv informatsioon töötlemisel. Analoogsüsteemides võib pinge ja voolu signaale moonutada temperatuuri ja niiskuse mõju ning komponentide hälbed signaali töötlevates süsteemides.

4. Tööd on võimalik programmeerida. On üsna lihtne koostada digitaalsüsteeme, mille tööd juhib salvestatud käsustik, mida nimetatakse programmiks. Ka analoogsüsteeme saab programmeerida, kuid võimalike toimingute arv ja keerukus on väga piiratud.

5. Digitaalsüsteeme mõjutab müra vähem. Digitaalsüsteemides pole pinge kõikumine (müra) kriitilise tähtsusega, sest pinge täpne väärtus pole oluline, kui müra pole nii suur, et see takistaks kõrgete sageduste eristamist madalatest.

6. Üha rohkem digitaalsüsteeme saab teostada kiipidel. On tõsi, et ka analoogsüsteemide puhul on kiibitehnoloogia tormiline areng kasuks tulnud, kuid suhteline keerukus ja seadmete kasutamine, mida pole võimalik ökonoomselt integreerida (kondensaatorid, täppistakistid, induktorid, trafod), pole võimaldanud analoogsüsteemidega sama kõrget integreerituse taset saavutada.

Kuid digitaaltehnikatel pole üksnes oma eelised, vaid ka teatud piirangud. Reaalselt on digitaaltehnikate kasutamisel väga vähe probleeme, millest kaks suurimat on järgmised: reaalne maailm on analoogne ja pidev, ning digiteeritud signaalide töötlemine nõuab aega. Ent tänu digitaaltehnoloogia kiirele arengule ja töötlemiskiiruse järsule suurenemisele pole nimetatud teine puudus enam niivõrd probleemaatiline kui mõned aastad tagasi. Siiski, mida täpsemalt me soovime analoogsignaali digiteerida, seda rohkem on vaja „ruumi“ info salvestamiseks ja võimsust selle töötlemiseks.

2.5 Korduskü simused

1. Mida tähendab sõnade „analoog“ ja „signaal“ kombinatsioon?
    a. See on elektrisignaal
    b. See tähendab, et signaal muutub ajas
    c. See näitab hetketemperatuuri
    d. Signaal on analoogne teise ajas muutuva signaaliga
2. Mis on digiteerimine?
    a. See on meetod signaali väärtuse hindamiseks
    b. Elektroonikaseade signaali teisendamiseks analoogsest digitaalseks
    c. Signaali reaalse väärtuse määramine ajahetkel.
    d. Analoogsignaali muutmine elektriliseks signaaliks.
3. Mis on digitaalsignaal?
    a. Numbrilise väärtusega signaal
    b. Signaal, mis ei muutu ajas
    c. Diskreetsete väärtuste jada
    d. Spidomeetril näidatavad väärtused
4. Millised järgnevatest on seotud analoog- ja millised digitaalsete suurustega?
    a. Kümne positsiooniga lüliti
    b. Elektripistmikust väljuv vool
    c. Ruumi temperatuur
    d. Liivaterad rannal
    e. Auto kütusemõõdik
5. Kui palju väärtusi on enamikul digitaalsignaalidel?
    a. 2
    b. 5
    c. lõpmatult
    d. 3
    e. 10

3 ARVUSÜSTEEMID

3.1 Sissejuhatus

Nagu eelmises osas kirjeldatud, digiteeritakse analoogsignaale, et neid saaks lihtsalt edastada, muuta, salvestada jne. Selleks kasutatakse erinevaid arvusüsteeme. Erinevate arvusüsteemide käsitluse alguses kirjeldame me lühidalt parameetreid, mis on kõikidel arvusüsteemidel ühised. Nende parameetrite ja nende arvusüsteemidega seostumise tundmine on oluline eri süsteemide toimimise mõistmiseks. Eri omaduste hulka, mis võimaldavad arvusüsteemi määratleda, kuuluvad arvusüsteemis kasutatavate erinevate numbrite hulk, arvu moodustavate erinevate numbrite kohaväärtused ning maksimaalsed arvud, mida saab kirjutada antud arvu numbritega. Kolmest iseloomulikust parameetrist on kõige olulisem arvusüsteemis kasutatavate erinevate numbrite või sümbolite hulk. See on arvusüsteemi alus ehk raadiks. Kümnendsüsteemis, mis on meile kõigile tuntud, on süsteemi alus 10, kuna see sisaldab kümmet erinevat numbrit, st 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ja 9. Sarnaselt on kahendsüsteemis, mis sisaldab ainult kaht erinevat numbrit (0 ja 1), süsteemi alus 2. Kaheksand- ja kuueteistkümnendsüsteemides on raadiks (või alus) vastavalt 8 ja 16. Järgnevatest lõikudest võib näha, et arvusüsteemi alus määrab ka ülejäänud kaks omadust. Erinevate numbrite kohaväärtusi täisarvuosas tähistavad r^0, r^1, r^2, r^3 jne, alates komakoha kõrval asuvast numbrist. Murdarvuosas on need r^{-1}, r^{-2}, r^{-3} jne, jällegi alates komakoha kõrval asuvast numbrist. Siin on r arvusüsteemi alus. Lisaks on maksimaalsed arvud, mida saab kirjutada n numbriga arvusüsteemis, võrdsed r^n-ga.

3.2 Kümnendsüsteem

Kümnendsüsteemi alus on arv 10 ning seetõttu sisaldab see kümmet erinevat numbrit või sümbolit. Need on 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ja 9. Kõiki arve, mis on suuremad kui 9, väljendatakse ainult nende kümne numbri abil. Suuremate arvude kirjutamise protsessis pärast arvu 9 kirjutatakse esimesena jada teine number (st 1), millele järgnevad järjekorras teised numbrid, et saada järgmised kümme arvu 10 kuni 19. Järgmise kümne arvu 20 kuni 29 saamiseks tuleb kirjutada esimesena kolmas number (st 2), millele järgnevad ükshaaval numbrid 0 kuni 9. See protsess jätkub, kuni kõik võimalikud kahekohalised kombinatsioonid on ammendatud ja me jõuame arvuni 99. Siis algavad kolmekohalised kombinatsioonid. Esimene kolmekohaline arv koosneb kõige väiksemast kahekohalisest arvust, millele lisatakse 0 (st 100), ning protsess jätkub lõputult.

Erinevate numbrite kohaväärtused kümnendmurdarvus, alates komakohast, on 10^0, 10^1, 10^2 jne (täisarvuosas) ja 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3} jne (murdarvuosas). Seda kümnendarvu väärtust või suurust võib väljendada erinevate numbrite summana, mis on korrutatud nende kohaväärtuste või kaaludega.

Näitena võib kümnendmurdarvu 3586,265 korral täisarvuosa (st 3586) väljendada järgmiselt:

$$3586 = 6 \times 10^0 + 8 \times 10^1 + 5 \times 10^2 + 3 \times 10^3 = 6 + 80 + 500 + 3000 = 3586$$

ning murdarvuosa võib väljendada järgmiselt:

$$265 = 2 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2} + 5 \times 10^{-3} = 0{,}2 + 0{,}06 + 0{,}005 = 0{,}265$$

Oleme näinud, et kohaväärtused on vastava arvusüsteemi aluse ja numbrite positsiooni funktsioon. Allpool näidatakse lisaks, et põhimõte, mille kohaselt iga kohaväärtusega number sõltub numbri positsioonist ja arvusüsteemi alusest, kehtib samamoodi ka teistes asjakohastes arvusüsteemides.

3.3 Kahendsüsteem

Kahjuks pole võimalik kümnendsüsteemi mugavalt digitaalsüsteemides rakendada. Näiteks on väga raske koostada elektroonikaseadmeid, mis suudaksid töötada kümnel erineval pingetasemel (millest igaüks vastaks ühele kümnendsüsteemi numbrile, 0 kuni 9). Teisest küljest on aga väga lihtne ehitada täpseid ja lihtsaid elektroonikasüsteeme, mis töötavad üksnes kahel pingetasandil. Sel põhjusel kasutatakse peaaegu kõikides digitaalsüsteemides kahendsüsteemi (alusega 2) arvusüsteemina, millel nende töö põhineb. Teisi arvusüsteeme kasutatakse sageli kahendsuuruste tõlgendamiseks või väljendamiseks nende mugavuse huvides, kes neid digitaalsüsteeme kasutavad.

Kahendsüsteem on arvusüsteem alusega 2, mille kaks sõltumatut numbrit on 0 ja 1. Kõiki suuremaid kahendarve väljendatakse numbritega 0 ja 1. Protseduur suuremate kahendarvude kirjutamiseks arvu 1 järel sarnaneb sellele, mida on kirjeldatud kümnendsüsteemi korral. Näiteks esimesed 16 arvu kahendsüsteemis on 0, 1, 10, 11, 100, 101, 110,111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110 ja 1111. Järgmine arv 1111 järel on 10 000, mis on väikseim viiekohaline kahendarv. See tõestab ka eespool toodu põhjal, et nelja numbriga saab kirjutada maksimaalselt ainult 16 (= 2^4) arvu. Alates kahendarvu komakohast on erinevate numbrite kohaväärtused kahendmurdarvus 2^0, 2^1, 2^2 jne (täisarvuosas) ja 2^{-1}, 2^{-2}, 2^{-3} jne (murdarvuosas).

Näide 3.1

Arvusüsteemis kasutatavad numbrid on 0, 1 ja X. Mis on selle arvusüsteemi alus? Loetlege selle arvusüsteemi esimesed kümme arvu.

Lahendus

- Selle arvusüsteemi alus on 3.
- Selle arvusüsteemi esimesed 10 arvu on 0, 1, X, 10, 11, 1X, X0, X1, XX ja 100.

Loogikatehted on iga digitaalarvuti põhiosa, kuid probleemi lahendamine arvutis võib hõlmata ka aritmeetilisi tehteid. Loogika matemaatika kasutuselevõtt George Boole'i poolt pani aluse kaasaegsete digitaalarvutite ajastule. Boole taandas loogika matemaatika kahendmõistetele 0 ja 1. Kuna loogika matemaatika oli hästi välja arendatud ja osutunud rakendatavaks kõikvõimalike loogiliste probleemide lahendamisel, ning loogika matemaatika (mida nimetatakse ka Boole'i algebraks) oli taandatud kahendtähistusele, oli kahendsüsteemil selge eelis teiste arvusüsteemide ees arvutisüsteemides kasutamisel.

Veel üks nimetatud arvusüsteemi oluline eelis seisnes asjaolus, et kõikvõimalikke andmeid sai väljendada mugavalt numbrite 0 ja 1 abil. Lisaks saab riistvararakenduste jaoks mõeldud elementaarseid elektroonikaseadmeid kasutada mugavalt ja tõhusalt kahes selgelt erinevas

režiimis. Näiteks võib bipolaarne transistor töötada väga efektiivselt nii katkestus- kui ka küllastusrežiimis.
Lõpuks on süsteeme, mis on vajalikud aritmeetiliste tehete teostamiseks (näiteks liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine jt), lihtne kasutada, kui sellega seotud andmed on väljendatud numbritega 0 ja 1.

3.4 Kaheksandsüsteem

Kaheksandsüsteemi alus on 8 ja seetõttu sisaldab see kaheksat erinevat numbrit. Kõiki suuremaid arve väljendatakse nende kombinatsioonina samal põhimõttel nagu eespool kirjeldatud kahend- ja kümnendsüsteemide korral. Erinevad numbrid on 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 ja 7. Näiteks kümme arvu, mis järgnevad arvule 7, on 10, 11, 12,13, 14, 15, 16, 17, 20 ja 21. Tegelikult, kui jätta kümnendsüsteemist välja kõik arvud, mis sisaldavad numbreid 8 või 9, saame tulemuseks kaheksandsüsteemi. Kaheksandsüsteemis on erinevate numbrite kohaväärtused 8^0, 8^1, 8^2 jne (täisarvuosas) ja 8^{-1}, 8^{-2}, 8^{-3} jne (murdarvuosas).

3.5 Kuueteistkümnendsüsteem

Kuueteistkümnendsüsteemi alus on 16 ja selle 16 põhinumbrit on 0, 1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E ja F. Erinevate numbrite kohaväärtused või kaalud kuueteiskümnendarvus on 16^0, 16^1, 16^2 jne (täisarvuosas) ja 16^{-1}, 16^{-2}, 16^{-3} jne (murdarvuosas). A, B, C, D, E ja F-i ekvivalent kümnendsüsteemis on ilmsetel põhjustel vastavalt 10, 11, 12, 13, 14 ja 15.
Kuueteistkümnendsüsteem annab tihendatud võimaluse suurte arvutis salvestatud ja töödeldud kahendarvude väljendamiseks. Üks selline näide on aadresside väljendamine erinevates mälu asukohtades. Eeldame näiteks, et seadmel on 64K mälu. Sellisel mälul on 64K (= 2^{16}= 65 536) mäluasukohta ning see vajab 65 536 erinevat aadressi. Kümnendsüsteemis saab neid aadresse tähistada arvudega 0 kuni 65 535 ja kahendsüsteemis arvudega 00000000 00000000 kuni 11111111 11111111. Kümnendsüsteemi arvutites ei kasutata, siin näidatud kahendsüsteemi tähised on aga liiga kohmakad ja ebamugavad. Kuueteistkümnendsüsteemis saab 65 536 erinevat aadressi tähistada neljakohalistena, alates 0000 kuni FFFF. Sarnaselt on mälu sisu kuueteistkümnendsüsteemis väga mugav käsitleda.

3.6 Arvusüsteemid – mõned peamised terminid

Selles osas kirjeldatakse mõningaid erinevates arvusüsteemides sageli kasutatavaid termineid.

3.6.1 Kahendsüsteem

Bitt on lühend terminist „binaarnumber“ ning see on väikseim informatsiooniühik. See on 0 või 1. Bait on kaheksast bitist koosnev string. Bait on elementaarne andmeühik, mida kasutatakse arvutites ühe ühikuna. Arvutisõna on omakorda bittide string, mille suurus ehk „sõna pikkus“ on konkreetse arvuti jaoks kindlaks määratud, kuid see võib arvutite lõikes erineda. Sõna pikkus võib olla üks bait, kaks baiti, neli baiti või veelgi suurem.
Kahendarvu ühenditäiend saadakse selle kõigi bittide täiendamisel, st 0-de asendamisel 1-de ja 1-de asendamisel 0-dega. Näiteks $(10010110)_2$ ühenitäiend on $(01101001)_2$. Kahendarvu kahenitäiend saadakse, lisades selle ühenitäiendile ‘1’. $(10010110)_2$ kahenitäiend on $(01101010)_2$.

3.6.2 Kümnendsüsteem

Sarnaselt kahendsüsteemi üheni- ja kahenitäiendile on kümnendsüsteemis üheksani- ja kümnenitäiendid. Antud kümnendarvu üheksanitäiend saadakse, lahutades iga numbri 9-st. Näiteks $(2496)_{10}$ üheksanitäiend on $(7503)_{10}$. Kümnenitäiendi saamiseks lisatakse üheksanitäiendile '1'. $(2496)_{10}$ kümnenitäiend on $(7504)_{10}$.

3.6.3 Kaheksandsüsteem

Kaheksandsüsteemis on seitsmeni- ja kaheksanitäiendid. Kaheksandarvu seitsmenitäiendi saamiseks lahutatakse 7-st iga kaheksandnumber. Näiteks $(562)_8$ seitsmenitäiend on $(215)_8$. Kaheksanitäiendi saamiseks lisatakse seitsmenitäiendile '1'. $(562)_8$ kaheksanitäiend on $(216)_8$.

3.6.4 Kuueteistkümnendsüsteem

Kuueteistkümnendsüsteemis kasutatakse viieteistkümneni- ja kuueteistkümnenitäiendeid. Viieteistkümnenitäiend saamiseks lahutatakse 15-st iga kuueteistkümnendnumber. Näiteks $(3BF)_{16}$ viieteistkümnenitäiend on $(C40)_{16}$. Kuueteistkümnenitäiendeid saamiseks lisatakse viieteistkümnenitäiendile '1'. $(2AE)_{16}$ kuueteistkümnenitäiend on $(D52)_{16}$.

3.7 Arvu väljendamine kahendsüsteemis

Erinevate meetodite hulka, mida kasutatakse nii positiivsete kui ka negatiivsete kümnendarvude väljendamiseks kahendsüsteemis, kuuluvad märgibiti suuruse meetod, ühenitäiendi meetod ja kahenitäiendi meetod.

3.7.1 Märgibiti suurus

Positiivsete ja negatiivsete kümnendarvude väljendamisel märgibiti suurusega tähistab MSB (suurima kaaluga bitt) 'märki', kusjuures '0' tähistab plussmärki ja '1' miinusmärki. Ülejäänud bitid tähistavad suurust. Kaheksabitise väljenduse korral tähistab MSB märki, ülejäänud seitse bitti aga suurust. Näiteks +9 kaheksabitine kuju on 00001001 ning –9 korral 10001001. Kasutada võidakse n-bitist kahendvormi, et väljendada kümnendarve vahemikus -(2n-1-1) kuni +(2n-1-1). St kaheksabitist vormi võidakse kasutada kümnendarvude väljendamiseks vahemikus –127 kuni +127, kasutades märgibiti suuruse vormingut.

3.7.2 Ühenitäiend

Ühenitäiendi vormingu korral positiivsed arvud ei muutu. Negatiivsete numbrite saamiseks võetakse positiivsete vastete ühenitäiend. Näiteks kaheksabitises vormis on +9 kujul 00001001 ning –9 kuju 11110110, mis on 00001001 ühenitäiend. Jällegi võidakse kasutada n-bitist vormi arvude väljendamiseks vahemikus -(2n-1-1) kuni +(2n-1-1), kasutades ühenitäiendi vormingut. Ühenitäiendi vormingu kaheksabitist vormi võib kasutada kümnendarvude väljendamiseks vahemikus –127 kuni +127.

3.7.3 Kahenitäiend

Kahendarvude kahenitäiendi vormi korral tähistab MSB märki, kusjuures '0' tähistab plussmärki ja '1' miinusmärki. Ülejäänud bitid tähistavad suurust. Positiivseid suurusi

väljendatakse samamoodi nagu märgibiti või ühenitäiendi vormi korral. Negatiivseid suurusi väljendatakse nende positiivsete vastete kahenitäiendiga. Näiteks +9 kuju on 00001001 ja–9 kuju 11110111. Tuleb meeles pidada, et kui suuruse +9 kahenitäiend annab suuruse –9, kehtib sarnaselt ka vastupidine protsess, st suuruse –9 kahenitäiend annab +9. Kahenitäiendi vormingu n-bitist vormi võib kasutada kõikide kümnendarvude väljendamiseks vahemikus +(2n-1-1) kuni -(2n-1). Kahenitäiendi vorming on väga populaarne, sest kahendarvust on kahenitäiendit moodustada väga lihtne, ning lisaks on aritmeetilisi tehteid suhteliselt lihtsam teostada, kui arvud on väljendatud kahenitäiendi vormingus.

3.8 Kümnendekvivalendi leidmine

Arvu kümnendekvivalent teises arvusüsteemis saadakse kõikide numbrite summa korrutamisega nende vastavate kohaväärtustega. Arvu täisarvuosa ja murdarvuosa tuleb käsitleda eraldi. Allpool on kirjeldatud teisendusi kahendsüsteemist kümnendsüsteemi, kaheksandsüsteemist kümnendsüsteemi ja kuueteistkümnendsüsteemist kümnendsüsteemi koos näidetega.

3.8.1 Teisendus kahendsüsteemist kümnendsüsteemi

Kahendarvu $(1001,0101)_2$ kümnendekvivalent leitakse järgmiselt:

- Täisarvuosa = 1001
- Kümnendekvivalent = $1 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^3 = 1 + 0 + 0 + 8 = 9$
- Murdarvuosa = ,0101
- Seega kümnendekvivalent = $0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 0 \times 2^{-3} + 1 \times 2^{-4} = 0 + 0{,}25 + 0 + 0{,}0625 = 0{,}3125$

Seega $(1001,0101)^2$ kümnendekvivalent = $(9{,}3125)_{10}$

3.8.2 Teisendus kaheksandsüsteemist kümnendsüsteemi

Kaheksandarvu $(137,21)_8$ kümnendekvivalent leitakse järgmiselt:

- Täisarvuosa = 137
- Kümnendekvivalent = $7 \times 8^0 + 3 \times 8^1 + 1 \times 8^2 = 7 + 24 + 64 = 95$
- Murdarvuosa = .21
- Kümnendekvivalent = $2 \times 8^{-1} + 1 \times 8^{-2} = 0{,}265$

Seega $(137,21)_8$ kümnendekvivalent = $(95{,}265)_{10}$

3.8.3 Teisendus kuueteistkümnendsüsteemist kümnendsüsteemi

Kuueteistkümnendarvu $(1E0,2A)_{16}$ kümnendekvivalent leitakse järgmiselt:

- Täisarvuosa = 1E0
- Kümnendekvivalent = $0 \times 16^0 + 14 \times 16^1 + 1 \times 16^2 = 0 + 224 + 256 = 480$
- Murdarvuosa = 2A
- Kümnendekvivalent = $2 \times 16^{-1} + 10 \times 16^{-2} = 0{,}164$

Seega $(1E0,2A)_{16}$ kümnendekvivalent = $(480,164)_{10}$

Näide 3.2

Leidke järgnevate kahenitäiendi vormingus väljendatud kahendarvude kümnendekvivalent:

(a) 00001110;
(b) 10001110.

Lahendus

(a) MSB bitt on '0', mis näitab plussmärki.
Suurusebitid on 0001110.
Kümnendekvivalent = $0 \times 2^0 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^6 = 0 + 2 + 4 + 8 + 0 + 0 + 0 = 14$

Seega 00001110 on +14

(b) MSB bitt on '1', mis näitab miinusmärki.
Suurusebitid annab seega 0001110 kahenitäiend, st 1110010
Kümnendekvivalent = $0 \times 2^0 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^6$
$= 0 + 2 + 0 + 0 + 16 + 32 + 64 = 114$

Seega 10001110 on –114

3.9 Teisendus kümnendsüsteemist kahendsüsteemi

Nagu eespool märgitud, käsitletakse täisarvuosa ja murdarvuosa eraldi. Täisarvuosas võib kahendekvivalendi leidmiseks jagada järjest arvu täisarvuosa 2-ga ja märkida jääk üles, kuni jagatis on '0'. Vastupidises järjekorras kirjutatud jääk on kahendekvivalent. Murdarvuosas korrutatakse selle leidmiseks järjest kümnendarvu murdarvuosa 2-ga ja märgitakse ülekanne üles, kuni korrutamise tulemus on '0'. Edaspidi järjekorras kirjutatud ülekandejärjestus on kümnendarvu murdarvuosa kahendekvivalent. Kui korrutamise tulemus ei näi murdarvosa korral nulli poole liikuvat, võib protsessi jätkata ainult seni, kuni saadakse vajalik arv ekvivalentseid bitte. Sellist kümnendsüsteemist kahendsüsteemi teisendamise meetodit nimetatakse tihti nn *double-dabble*-meetodiks. Protsessi saab kõige paremini kirjeldada näite abil.

Näide 3.3

Leiame $(13,375)_{10}$ kahendekvivalendi.

Lahendus

• Täisarvuosa = 13

Jagaja	Jagatav	Jääk
2	13	-
2	6	1
2	3	0
2	1	1
-	0	1

$(13)_{10}$ kahendekvivalent on seega $(1101)_2$

• Murdarvuosa = ,375
• 0,375 × 2 = 0,75 ülekandega 0
• 0,75 × 2 = 0,5 ülekandega 1
• 0,5 × 2 = 0 ülekandega 1
$(0,375)^{10}$ kahendekvivalent = $(,011)^2$

Seega $(13,375)_{10}$ kahendekvivalent = $(1101,011)_2$

3.10 Teisendus kümnendsüsteemist kaheksandsüsteemi

Kümnendsüsteemist kaheksandsüsteemi teisendamise protsess on sarnane kümnendsüsteemist kahendsüsteemi teisendusega. Järjestikune jagamine täisarvuosa korral ja järjestikune korrutamine murdarvuosa korral toimub siin arvuga '8', mis on kaheksandsüsteemi alus. Jällegi käsitletakse kümnendarvu täisarvuosa ja murdarvuosa eraldi. Protsessi saab kõige paremini kirjeldada näite abil.

Näide 3.4

Leiame $(73,75)_{10}$ kaheksandekvivalendi.

Lahendus

• Täisarvuosa = 73

Jagaja	Jagatav	Jääk
8	73	-
8	9	1
8	1	1
-	0	1

$(73)_{10}$ kaheksandekvivalent = $(111)_8$

• Murdarvuosa = 0,75
• 0,75 × 8 = 0 ülekandega 6

$(0,75)_{10}$ kaheksandekvivalent = $(,6)_8$
Seega $(73,75)_{10}$ kaheksandekvivalent = $(111,6)_8$

3.11 Teisendus kümnendsüsteemist kuueteistkümnendsüsteemi

Kümnendsüsteemist kuueteistkümnendsüsteemi teisendamise protsess on samuti sarnane. Kuna kuueteistkümnendsüsteemi alus on 16, on järjestikuse jagamise ja korrutise tegur siin juhul 16. Protsessi saab kõige paremini kirjeldada näite abil.

Näide 3.5

Leiame $(82,25)_{10}$ kuueteistkümnendekvivalendi.

Lahendus

• Täisarvuosa = 82

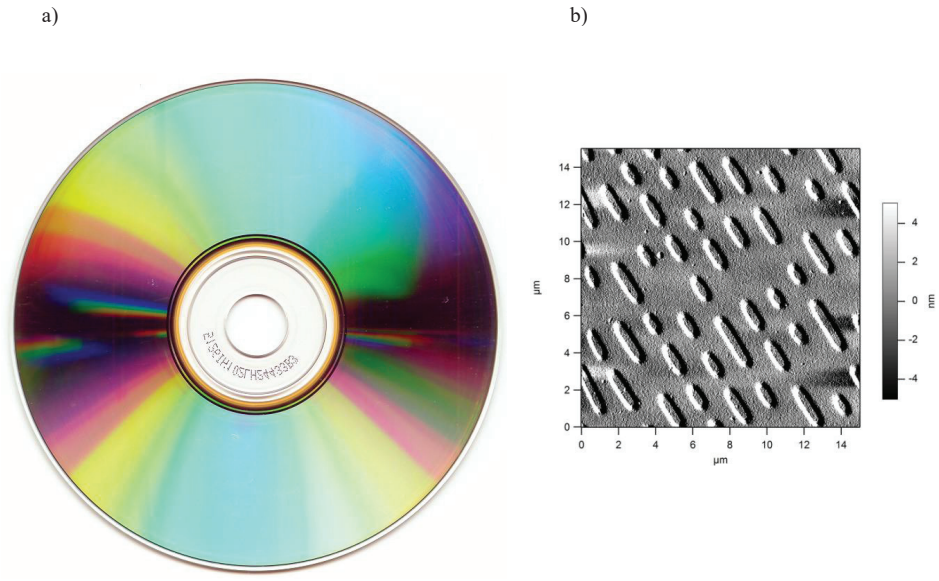
Jagaja	Jagatav	Jääk
16	82	-
16	5	2
-	0	5

$(82)_{10}$ kuueteistkümnendekvivalent = $(52)_{16}$
• Murdarvuosa = 0,25
• 0,25 × 16 = 0 ülekandega 4

Seega $(82,25)_{10}$ kuueteistkümnendekvivalent = $(52,4)_{16}$

3.12 Kahendsuuruste väljendamine

Digitaalsüsteemides esineb töödeldav informatsioon tavaliselt kahendvormis. Kahendsuurusi saab väljendada iga seadmega, millel on ainult kaks tööolekut või võimalikku tingimust.



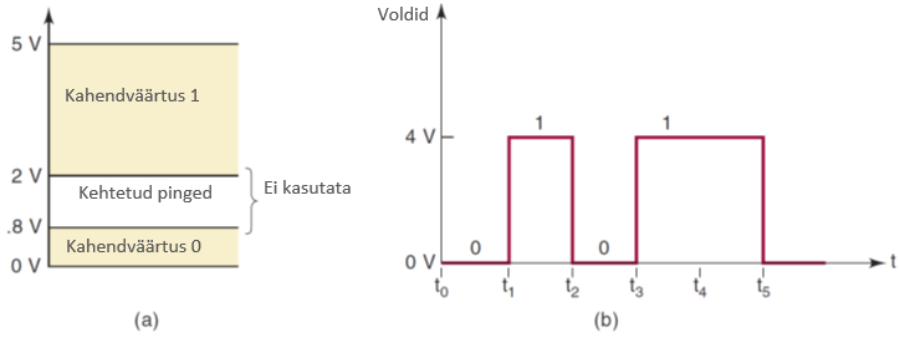
Joonis 3.1 Digitaalne teave salvestatuna a) laserplaadile (CD), b) CD-le kirjutatud infobittidena

Hea näide on toodud joonisel 4, kus kahendarvud on salvestatud CD-le. Sisepind (läbipaistva plastkihi all) on kaetud kõrgpeegeldava alumiiniumkihiga. Sellesse peegelkattekihti põletatakse avad, et moodustada „süvendid", mis ei peegelda valgust samamoodi nagu põletamata alad.

Alad, kuhu on põletatud süvendid, loetakse väärtusteks „1" ja peegelduvad alad väärtusteks „0". Olemas on arvukalt ka teisi seadmeid, millel on üksnes kaks tööolekut või mis võivad töötada kahes äärmustingimuses. Nende hulka kuuluvad: lambipirn (ere või pime), diood (juhtiv või mittejuhtiv), elektromagnet (aktiveeritud või desaktiveeritud), transistor (katkestatud või küllastunud), fotorakk (valgustatud või pime), termostaat (avatud või suletud), mehaaniline sidur (aktiveeritud või desaktiveeritud) ning punkt magnetkettal (magnetiseeritud või demagnetiseeritud).

Elektroonilistes digitaalsüsteemides väljendab kahendinformatsiooni pinge (või vool) erinevate lülituste sisenditel ja väljunditel. Tavaliselt väljendavad kahendväärtusi 0 ja 1 kaks nominaalset pingetaset. Näiteks null volti (0 V) võib tähistada kahendväärtust 0 ning 5 V kahendväärtust 1. Tegelikkuses väljendavad lülituste erinevuse tõttu väärtusi 0 ja 1 pingevahemikud. Seda on kujutatud joonisel 5, kus iga pinge vahemikus 0 kuni 0,8 V tähistab väärtust 0 ning iga pinge vahemikus 2 kuni 5 V väärtust 1. Kõik sisend- ja väljundsignaalid jäävad tavaliselt ühte nimetatud vahemikku, välja arvatud üleminekul ühelt tasemelt teisele.

Nüüd võime näha veel üht olulist erinevust digitaal- ja analoogsüsteemide vahel. Digitaalsüsteemides pole pinge täpne väärtus oluline; näiteks joonisel 1-8(a) näidatud pingete korral tähendab pinge 3.6 V sama, mida pinge 4.3 V.



Joonis 3.2. (a) Levinud pinged digitaalsüsteemis; (b) tavapärase digitaalsignaali ajastuse skeem.

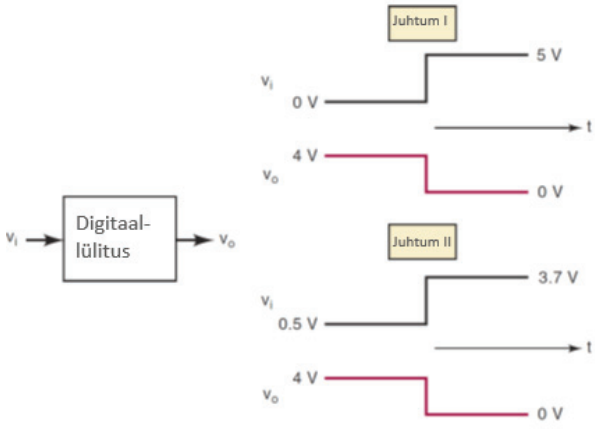
Analoogsüsteemides on pinge täpne väärtus oluline. Näiteks kui analoogpinge on proportsionaalne anduri mõõdetud temperatuuriga, tähistab 3.6 V erinevat temperatuuri kui 4.3 V. Teiste sõnadega sisaldab pinge väärtus olulist informatsiooni. See omadus tähendab, et täpse analoogsüsteemi ehitus on reeglina keerukam kui digitaalsüsteemi oma viisi tõttu, kuidas mõjutavad täpseid pingeväärtusi muutused komponentide väärtustes, temperatuuris ja müras (juhuslikud pingekõikumised).

3.13 Kordusküsimused

1. Mis on 1101011_2 kümnendekvivalent?
    a. 203
    b. 51
    c. 107
    d. 115
2. Mis on järgmine kahendarv pärast 10111_2 loendusjärjestuses
    a. 11111
    b. 11011
    c. 11000
    d. 125
3. Mis on 1111010_2 kuueteistkümnendekvivalent?
    a. 15
    b. AF
    c. FA
    d. 250
4. Milline on suurim kümnendväärtus, mida saab väljendada 12 bitiga?
    a. 7777
    b. FFF
    c. 4095
    d. 23045
5. Millised on sagedased pingevahemikud digitaalsüsteemis
    a. '0' – 1V, '1' – 2V
    b. '0' – -4V, '1' –20V
    c. '0' – 0V, '1' – 5V
    d. '0' - -15V, '1' – 15V

4 DIGITAALLÜLITUSED/LOOGIKALÜLITUSED

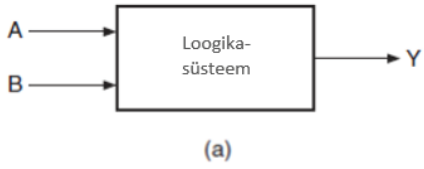
Digitaallülituste eesmärk on tekitada väljundpinge, mis jääb ettenähtud 0 ja 1 pingevahemikesse, nagu on kujutatud joonisel 1-8. Samuti on digitaallülituste ülesanne reageerida prognoositavalt sisendpingele, mis jäävad määratud 0 ja 1 vahemikesse. See tähendab, et digitaallülitus reageerib samal viisil kõikidele sisendpingetele, mis jäävad lubatud 0 vahemikku; sarnaselt ei eristata selles sisendpingeid, mis jäävad lubatud 1 vahemikku.
Joonisel 6 on kujutatud tavapärane digitaallülitus sisendiga v_i ja väljundiga v_o. Väljundit on kujutatud kahe erineva sisendsignaali kuju korral. Pange tähele, et v_o on mõlemal juhul sama, sest kaks sisendsignaali kuju on küll erineva täpse pingetasemega, kuid samal kahendtasemel.



Joonis 4.1 Digitaallülituse vastus kahendsignaalile

Viisi, kuidas digitaallülitus sisendile reageerib, nimetatakse lülituse loogikaks. Iga digitaallülituse tüüp järgib teatud loogikareegleid. Seetõttu nimetatakse digitaallülitusi ka loogikalülitusteks. Siin tekstis kasutatakse vaheldumisi mõlemaid termineid. Peatükis 3 vaadeldakse täpsemalt, mida lülituse „loogika" all mõeldakse.
Käsitleme kõiki loogikalülituste tüüpe, mida praegu digitaalsüsteemides kasutatakse. Alguses keskendume ainult loogikatehetele, mida need lülitused teostavad – st seosele lülituse sisendite ja väljundite vahel. Nende loogikalülituste siselülituste toimimist hakkame vaatlema alles siis, kui oleme nende loogilisest toimimisest aru saanud.
Peaaegu kõik tänapäeva digitaalsüsteemides kasutatavatest digitaallülitustest on integraallülitused ehk kiibid (IC). Loogikakiipide lai valik on võimaldanud koostada keerukaid digitaalsüsteeme, mis on väiksemad ja töökindlamad kui nende diskreetsetest komponentidest koosnevad ekvivalendid.
Digitaalkiipide valmistamiseks kasutatakse mitmeid tehnoloogiaid, millest levinumad on CMOS, TTL, NMOS ja ECL. Igaüks neist erineb soovitud loogikatehete teostamiseks kasutatava lülitusskeemi tüübi poolest. Näiteks TTL (transistorite vaheline loogika) kasutab peamise lülituselemendina bipolaarset transistorit, CMOS (komplementaarne metalloksiid-pooljuht) aga MOSFET-režiimi.

Kõikide võimalike loogikasüsteemi sisendbinaarmuutujate ja vastavate väljundite kombinatsioonide kirjeldamiseks kasutatakse nn tõesustabelit. Loogikasüsteemi väljundi võib leida loogikaavaldisest, mida nimetatakse tihti Boole'i avaldiseks, mis seostab väljundi loogikasüsteemi sisenditega.



(a)

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

(b)

Joonis 4.2 Kahe sisendiga loogikalülitus

Kui sisendbinaarmuutujate arv on ainult üks, on olemas ainult kaks võimalikku sisendit, st '0' ja '1'. Kui sisendite arv on kaks, on olemas neli võimalikku sisendikombinatsiooni, st 00, 01, 10 ja 11. Joonisel 4.1(b) on toodud joonisel 4.1(a) kujutatud kahe sisendiga loogikasüsteemi tõesustabel. Joonise 4.1(a) loogikasüsteemis Y = 0 ainult juhul, kui A = 0 ja B = 0. Kõigi teiste võimalike sisendikombinatsioonide korral väljund Y = 1. Sarnaselt on kolme sisendbinaarmuutuja korral võimalike sisendikombinatsioonide arv kaheksa, st 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 ja 111. Seda väidet võib üldistada öeldes, et kui loogikalülitusel on n binaarsisendit, on selle tõesustabelis 2n võimalikku sisendikombinatsiooni, ehk teiste sõnadega 2n rida. Joonisel 4.2 on toodud kolme sisendiga loogikalülituse tõesustabel ning sellel on 8 (= 23 rida. Nagu hiljem selles peatükist nähtub, on tegemist kolme sisendi JA-ventiili tõesustabeliga.

4.1 Loogikaventiilid

Elektroonikalülitusi, mida võib kasutada kõige elementaarsemate loogikaavaldiste rakendamiseks, mida tuntakse ka Boole'i avaldistena, nimetatakse loogikaventiilideks. Loogikaventiil on kõige elementaarsem kombinatsioonilise loogika komponent. Olemas on kolm peamist loogikaventiili, täpsemalt VÕI-ventiil, JA-ventiil ja EI-ventiil. Teised loogikaventiilid, mis on tuletatud neist peamistest ventiilidest, on NING-EI-ventiil, VÕI-EI-ventiil, VÄLISTAV-VÕI-ventiil ja VÄLISTAV-VÕI-EI-ventiil.

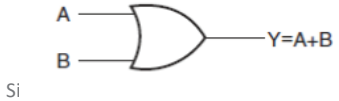
4.1.1 VÕI-ventiil

VÕI-ventiil teostab VÕI-tehte kahe või rohkem kui kahe loogikamuutujaga. VÕI-tehe kahe sõltumatu loogikamuutujaga A ja B kirjutatakse $Y = A + B$ ja loetakse „Y võrdub A VÕI B-ga", mitte „A pluss B". VÕI-ventiil on loogikalülitus kahe või enama sisendi ja ühe väljundiga. VÕI-ventiili väljund on VÄIKE ainult siis, kui kõik sisendid on MADALAD. Kõigi teiste võimalike sisendikombinatsioonide korral on väljund SUUR. Positiivse loogikasüsteemi korral tõlgendamisel tähendab see väide järgmist. VÕI-ventiili väljund on loogika '0' ainult juhul, kui kõik selle sisendid on loogikaga '0'. Kõigi teiste võimalike sisendikombinatsioonide korral on väljund loogikaga '1'. Joonisel 4.3 on toodud kahe sisendiga VÕI-ventiili sümbol, tõesustabel ja elektriline teostus. Kahe sisendiga VÕI-ventiili toimimist kirjeldab loogikaavaldis

Y = A + B

Näiteks kui meil on neli loogikamuutujat ja me soovime teada loogikaväljundit (*A + B + C + D*), on selleks nelja sisendiga VÕI-ventiili väljund, mille sisendid on *A*, *B*, *C* ja *D*.

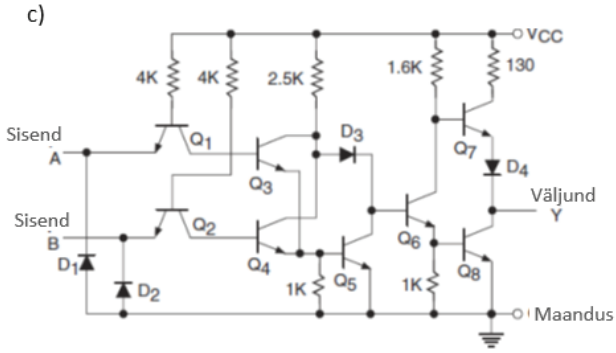
a)



b)

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

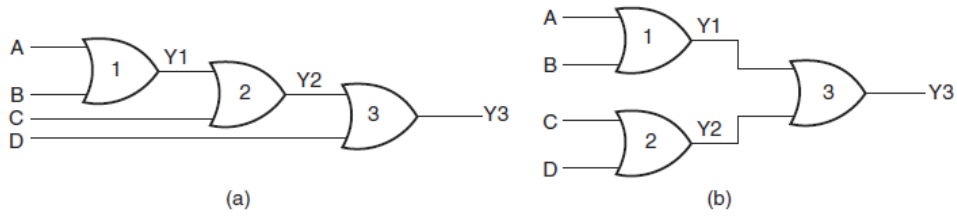
c)



Joonis 4.3 Kahe sisendiga VÕI-ventiili a) sümbol, b) tõesustabel, c) elektriskeem

Näide 4.1
Kuidas rakendada riistvaras nelja sisendiga VÕI-ventiili, kasutades ainult kahe sisendiga VÕI-ventiile?

Lahendus
Joonisel 4.4(a) on kujutatud üks võimalik kahe sisendiga VÕI-ventiilide skeem, mis simuleerib nelja sisendiga VÕI-ventiili. A, B, C ja D on loogikasisendid ning Y 3 on väljund. Joonisel 4.4(b) on kujutatud teine võimalik skeem. Joonise 4.4(a) korral on VÕI-ventiili 1 väljund *Y1 = (A + B)*. Teine VÕI-ventiil annab väljundi *Y2 = (Y1 + C) = (A + B + C)*. Sarnaselt on VÕI-ventiili 3 väljund *Y3 = (Y2 + D) = (A + B + C + D)*. Joonise 4.4(b) korral on VÕI-ventiili 1 väljund *Y1 = (A + B)*. Teine VÕI-ventiil annab väljundi *Y2 = (C+D)*. Kolmanda VÕI-ventiili väljund *Y3* on *(Y1 + Y2) = (A + B + C + D).*

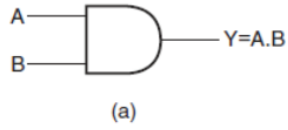


Joonis 4.4 Näide 4.1

4.1.2 JA-ventiil

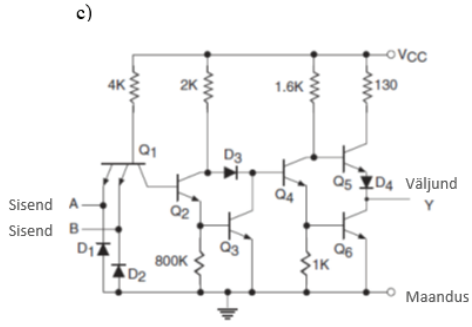
JA-ventiil on loogikalülitus kahe või enama sisendi ja ühe väljundiga. JA-ventiili väljund on SUUR ainult siis, kui kõik sisendid on KÕRGED. Kõigil muudel juhtudel on väljund MADAL. Positiivse loogikasüsteemi korral tõlgendamisel tähendab see, et JA-ventiili väljund on loogika '1' juhul, kui kõik selle sisendid on loogikaga '1'. Kõigil muudel juhtudel on väljund loogikaga '0'. Kahe sisendiga JA-ventiili loogika sümbol ja tõesustabel on toodud vastavalt joonistel 4.7(a) ja (b). JA-ventiili elektriskeem on toodud joonisel 4.7 c.

JA-tehe kahe sõltumatu loogikamuutujaga A ja B kirjutatakse $Y = A * B$ ja loetakse „Y võrdub A JA B-ga", mitte „A ja B korrutis". Siin on *A* ja *B* sisendloogikamuutujad ning *Y* on väljund. JA-ventiil teostab JA-tehte:



A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

(b)



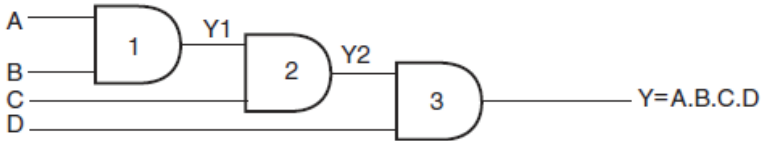
Joonis 4.5 Kahe sisendiga JA-ventiili a) sümbol, b) tõesustabel, c) elektriskeem

- kahe sisendiga JA-ventiili korral, $Y = A * B$;
- kolme sisendiga JA-ventiili korral, $Y = A * B * C$;
- nelja sisendiga JA-ventiili korral, $Y = A * B * C * D$.

Näide 4.2

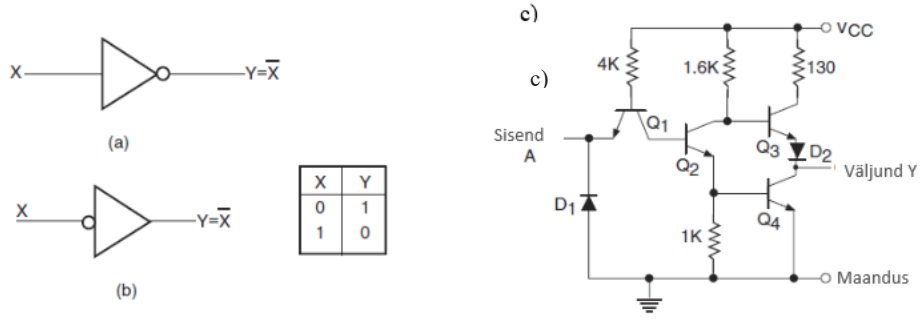
Leia loogikaskeem nelja sisendiga JA-ventiili rakendamiseks, kus kasutatakse ainult kahe sisendiga JA-ventiile.

Lahendus
Joonisel 4.6 on kujutatud nelja sisendiga JA-ventiili riistvararakendus, kus kasutatakse kahe sisendiga JA-ventiile.
JA-ventiili 1 väljund on *Y1 = A*B* Teine JA-ventiil annab väljundi *Y2* järgmiselt: *Y2 = Y1 * C = A * B * C*. Sarnaselt on JA-ventiili 3 väljund *Y = Y2 * D = A * B * C * D* ning lõpptulemus seega järgmine.



Joonis 4.6 Nelja sisendiga JA-ventiili rakendus, kus kasutatakse kahe sisendiga JA-ventiile

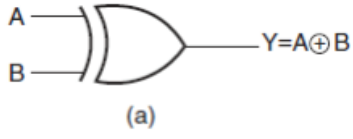
4.1.3 EI-ventiil
EI-ventiil on ühe sisendi ja ühe väljundiga loogikalülitus, mille väljund on alati sisendi täiend. St VÄIKE sisend annab SUURE väljundi ja vastupidi. Positiivse loogikasüsteemi korral tõlgendamisel annab loogika '0' sisendil tulemuseks loogika '1' väljundil ja vastupidi. Seda nimetatakse ka „komplementaarlülituseks" või „pöördlülituseks". Joonisel 4.10 on toodud lülituse sümbol ja tõesustabel.
EI tehet loogikamuutujaga *X* väljendatakse kujul $\overline{X}$ või *X'*. St kui *X* on EI-lülituse sisend, siis annab selle väljundi Y tehe $Y = \overline{X}$ või *X'*; ning seda loetakse „Y võrdub EI X-iga". Seega, kui *X = 0*, siis *Y = 1* ja kui *X = 1,* siis *Y = 0*.



Joonis 4.7 a) EI-ventiili sümbol, b) tõesustabel ja c) elektriskeem.

4.1.4 VÄLISTAV-VÕI-ventiil
VÄLISTAV-VÕI-ventiil, mida kirjutatakse sageli kujul EX-OR-ventiil, on kahe sisendi ja ühe väljundiga ventiil. Joonistel 4.8 (a) ja (b) on kujutatud vastavalt kahe sisendiga EX-OR-ventiili loogika sümbolit ja tõesustabelit. Nagu tõesustabelist näha, on EX-OR-ventiili väljund loogika '1', kui sisendid erinevad, ning loogika '0', kui sisendid on sarnased. Kuigi EX-OR-ventiilid on integraallülituses saadaval ainult kahe sisendiga ventiilidena (erinevalt teistest ventiilidest, mis on saadaval ka suurema hulga sisenditega), saab mitme sisendiga EX-OR-i loogika-funktsioone rakendada, kasutades mitut kahe sisendiga ventiili. Mitme sisendiga EX-OR-

funktsiooni tõesustabelit saab väljendada järgmiselt. Mitme sisendiga EX-OR-i loogikafunktsiooni väljund on loogika ‘1’, kui väärtuste ‘1’ arv sisendjärjestuses on paaritu, ning loogika ‘0’, kui väärtuste ‘1’ arv sisendjärjestuses on paaris, sealhulgas null. St sisendjärjestus, mis sisaldab ainult väärtusi ‘0’, annab ka väljundil tulemuseks loogika ‘0’. Joonisel 4.8(c) on toodud nelja sisendiga EX-OR-funktsiooni tõesustabel.
Kahe sisendiga EX-OR-ventiili väljundit väljendatakse järgmiselt:
$Y = (A \oplus B) = \overline{A}B + A\overline{B}$



(a)

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(b)

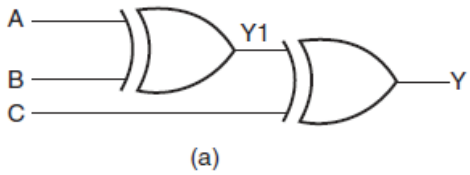
Joonis 4.8 (a) Kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiili sümbol, (b) tõesustabel

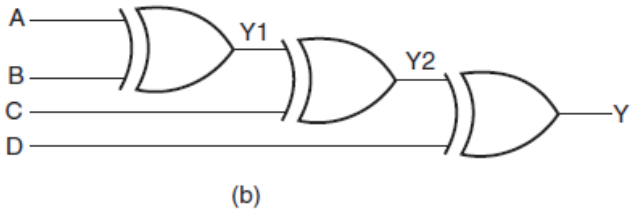
Näide 4.3
Kuidas rakendada kolme sisendiga ja nelja sisendiga EX-OR-i loogikafunktsioone kahe sisendiga EX-OR-ventiilide abil?

Lahendus

Joonistel 4.9 (a) ja (b) on kujutatud kolme sisendiga EX-OR-i loogikafunktsiooni ja nelja sisendiga EX-OR-i loogikafunktsiooni rakendus, kus kasutatakse kahe sisendiga loogikaventiile:

- Joonisel 4.9 (a) annab väljundi *Y1* tehe $A \oplus B$. Lõppväljundi *Y* annab $Y = Y1 \oplus C = (A \oplus B) \oplus C = A \oplus B \oplus C$.
- Joonist 4.19(b) saab selgitada sarnaselt.





Joonis 4.9 (a) Kolme sisendiga EX-OR-ventiil ja (b) nelja sisendiga EX-OR-ventiil.

Näide 4.4
Kuidas teostada EI-ventiili, kasutades kahe sisendiga EX-OR-ventiili?

Lahendus
Vt kahe sisendiga EX-OR-ventiili tõesustabelit joonisel 4.10 (a). Tõesustabelist on näha, et kui üks ventiili sisenditest on seotud püsivalt loogika '1' tasemega, siis teine sisend ja väljund teostavad EI-lülituse funktsiooni. Joonisel 4.10 (b) on toodud teostus.

A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(b)

Joonis 4.10 EI-lülituse teostus, kasutades EX-OR-ventiili.

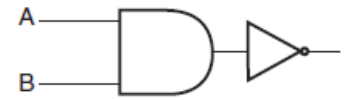
4.1.5 NING-EI (NAND) ventiil

NAND tähendab NING-EI. JA (AND) ventiil, millele järgneb EI- (NOT) lülitus, annab tulemuseks NING-EI- (NAND) ventiili [joonis 4.11(a)]. Joonisel 4.11(b) on toodud kahe sisendiga NING-EI-ventiili lülituse sümbol. NING-EI-ventiili tõesustabel saadakse JA-ventiili tõesustabelist väljundkannete täiendamisega [joonis 4.11(c)]. NING-EI-ventiili väljund on loogikaga '0', kui selle kõik sisendid on loogikaga '1'. Kõigi teiste sisendikombinatsioonide korral on väljund loogikaga '1'. NING-EI-ventiili väljundit väljendatakse loogiliselt järgmiselt:

Y = $\overline{A * B}$

Üldiselt võib rohkem kui kahe sisendiga NING-EI-ventiili Boole'i avaldist kirjutada järgmiselt:

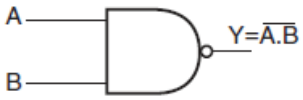
Y = $\overline{A * B * C * D \ldots}$



(a)

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

(c)



(b)

Joonis 4.11(a) Kahe sisendiga NING-EI teostus, kus kasutatakse JA-ventiili ja EI-lülitust, (b) kahe sisendiga NING-EI-ventiili sümbol ja (c) kahe sisendiga NING-EI-ventiili tõesustabel.

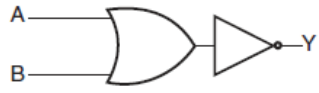
4.1.6 VÕI-EI-ventiil

NOR tähendab VÕI-EI. Kui VÕI-ventiilile järgneb EI-lülitus, on tulemus VÕI-EI-ventiil [joonis 4.12(a)]. VÕI-EI-ventiili tõesustabel saadakse VÕI-ventiili tõesustabelist väljundkannete täiendamisega. VÕI-EI-ventiili väljund on loogikaga '1', kui selle kõik sisendid on loogikaga '0'. Kõigi teiste sisendikombinatsioonide korral on väljund loogikaga '0'. Kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili väljundit väljendatakse loogiliselt järgmiselt:

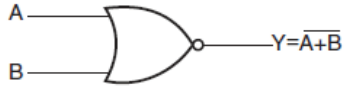
$$Y=\overline{(A+B)}$$

Üldiselt võib rohkem kui kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili Boole'i avaldist kirjutada järgmiselt:

$$Y=\overline{(A+B+C+D\ldots.)}$$



(a)



(b)

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

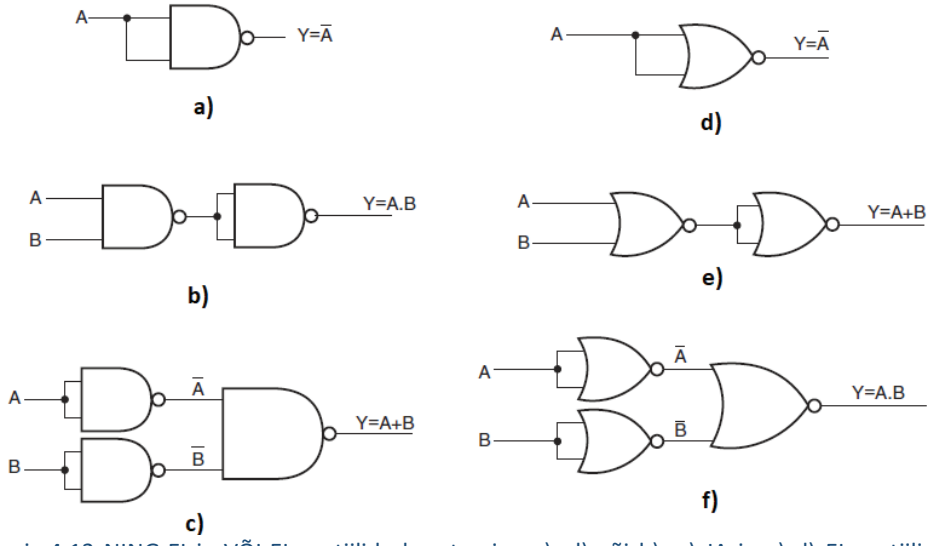
(c)

Joonis 4.12 a) Kahe sisendiga VÕI-EI teostus, kasutades VÕI-ventiili ning EI-lülitust, (b) kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili sümbol ja (c) kahe sisendiga VÕI-EI-ventiili tõesustabel.

4.1.7 Universaalventiilid

VÕI, JA ja EI-ventiilid on kolm peamist loogikaventiili, sest koos saab neid kasutada mistahes Boole'i avaldise loogikalülituse koostamiseks. VÕI-EI ja NING-EI-ventiile saab eraldi kasutada loogikalülituse tarkvarateostuse jaoks mistahes Boole'i avaldise alusel. St mistahes Boole'i avaldise teostamiseks on võimalik kasutada ainult NING-EI-ventiile või ainult VÕI-EI-ventiile. Seda võimaldab asjaolu, et NING-EI-ventiilide kombinatsiooni või VÕI-EI-ventiilide kombinatsiooni võib kasutada mistahes peamiste loogikaventiilide funktsioonide teostamiseks. Seetõttu on NING-EI ja VÕI-EI-ventiilid universaalventiilid.

Näitena on joonisel 4.13 kujutatud, kuidas kahe sisendiga NING-EI-ventiile saab kasutada EI-lülituse [joonis 4.13(a)], kahe sisendiga JA-ventiili [joonis 4.13(b)] ja kahe sisendiga VÕI-ventiili [joonis 4.13(c)] loomiseks. Sama tegevus VÕI-EI-ventiilide kasutamisega on kujutatud joonistel 4.13 d), e), f).

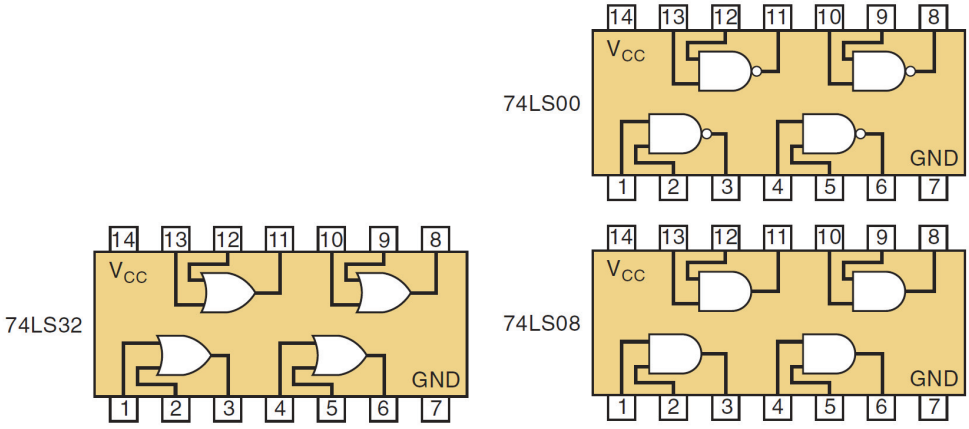


Joonis 4.13 NING-EI ja VÕI-EI-ventiilide kasutamine c), d) või b), e) JA ja a) d) EI-ventiilide loomiseks.

Näide 4.5

Tootmisprotsessis lülitatakse konveierilint konkreetsete tingimuste tekkimisel alati välja. Neid tingimusi jälgitakse ja kajastatakse nelja loogikasignaali olekuga järgmiselt: signaal A on SUUR alati, kui konveierilindi kiirus on liiga suur; signaal B on SUUR alati, kui kogumiskast lindi lõpus on täis; signaal C on SUUR alati, kui lint on liiga pingul; signaal D on SUUR alati, kui üleminek käsitsijuhtimisele on välja lülitatud.

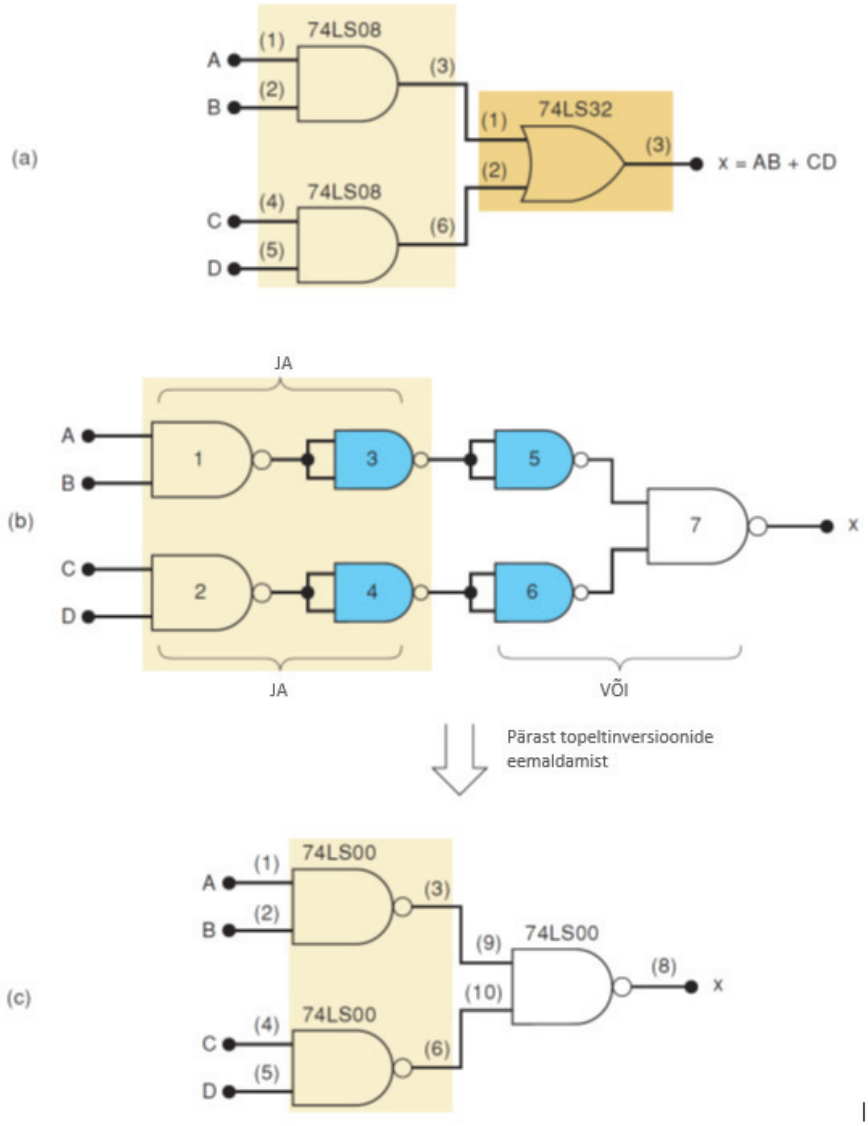
Loogikalülitust on tarvis, et tekitada signaal X, mis muutub SUUREKS alati, kui korraga esinevad tingimused A ja B või tingimused C ja D. On selge, et X loogiline väljendus on X = A * B + C * D. Lülitust tuleb teostada minimaalse arvu integraallülitustega. Saadaval on TTL-integraallülitused, mis on näidatud joonisel 4.14. Iga lülitus on kvadraat, mis tähendab, et see sisaldab nelja identset ventiili ühel kiibil.



Joonis 4.14 Peamiste integraallülituste näited.

Lahendus

Otseses meetodis antud avaldise teostamiseks kasutatakse kaht JA-ventiili ja üht VÕI-ventiili, nagu on näidatud joonisel 4.14(a). Selles teostuses kasutatakse kaht ventiili skeemilt 74LS08 ja üht ventiili skeemilt 74LS32. Iga sisendi ja väljundi juures toodud numbrid on vastava skeemi viikude numbrid. Need on alati märgitud iga loogikalülituse elektriskeemile.
Teise teostuse teostamiseks võib võtta joonisel 4.15(a) kujutatud skeemi ning asendada iga JA-ventiili ning VÕI-ventiili selle ekvivalentse NING-EI-ventiili teostusega joonisel 4.14. Tulemust on kujutatud joonisel 4.15(b).
Esmapilgul tundub, nagu vajaks uus lülitus seitset NING-EI-ventiili. Kuid NING-EI-ventiilid 3 ja 5 on ühendatud INVERTERINA järjestikku ja need võib lülitusest eemaldada, sest need teostavad NING-EI-ventiili 1 väljundsignaali topeltinversiooni. Sarnaselt võib eemaldada NING-EI-ventiilid 4 ja 6. Lõplik skeem pärast kahekordsete INVERTERITE eemaldamist on kujutatud joonisel 4.15(c). See lõppskeem on tõhusam kui joonisel 4.15(a) kujutatud skeem, kuna selles kasutatakse kolme kahe sisendiga NING-EI-ventiili, mida saab teostada ühe skeemi 74LS00 abil.



Joonis 4.15 Näite 4.5 võimalikud teostused

4.2 Peamised integraallülitused

Eespool kirjeldatud ventiile võib kasutada peaaegu kõikide vajalike lülituste koostamiseks, kuid keerukamad ülesanded nõuavad rohkem erinevate tüübinumbritega ventiile. Olemas on mitmeid integraalskeeme, mida saab kasutada keeruka riistvara koostamiseks, et täita

konkreetseid ülesandeid. Järgnevas tabelis on toodud näidetena levinud tüübinumbrid koos nende funktsionaalse kirjeldusega. See on vaid väike osa turul olevatest integraalskeemidest.

Tabel 4.1 Valitud integraalskeemid

Tüübinumber	Funktsioon	Loogika-perekond
7400	Kvadraatne kahe sisendiga NING-EI-ventiil	TTL
7401	Kvadraatne kahe sisendiga NING-EI-ventiil (avatud kollektor)	TTL
7402	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-EI-ventiil	TTL
7403	Kvadraatne kahe sisendiga NING-EI-ventiil (avatud kollektor)	TTL
7404	Heksinverter	TTL
7405	Heksinverter (avatud kollektor)	TTL
7408	Kvadraatne kahe sisendiga JA-ventiil	TTL
7409	Kvadraatne kahe sisendiga JA-ventiil (avatud kollektor)	TTL
7410	Kolme sisendiga NING-EI-kolmikventiil	TTL
7411	Kolme sisendiga JA-kolmikventiil	TTL
7412	Kolme sisendiga NING-EI-kolmikventiil (avatud kollektor)	TTL
7413	Nelja sisendiga Schmitti NING-EI-kaksikventiil	TTL
7414	Schmitti hekstrigerinverterr	TTL
7418	Nelja sisendiga Schmitti NING-EI-kaksikventiil	TTL
7419	Schmitti hekstrigerinverterr	TTL
7420	Nelja sisendiga NING-EI-kaksikventiil	TTL
7421	Nelja sisendiga JA kaksikventiil	TTL
7422	Nelja sisendiga NING-EI-kaksikventiil (avatud kollektor)	TTL
7427	Kolme sisendiga VÕI-EI kolmikventiil	TTL
7430	Kaheksa sisendiga NING-EI-ventiil	TTL
7432	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-ventiil	TTL
7451	Topeltlai kahe sisendiga/kolme sisendiga JA-VÕI-INVERTER kaksikventiil	TTL
7454	Neliklai kahe sisendiga JA-VÕI-INVERTER-ventiil	TTL
7455	Topeltlai nelja sisendiga JA-VÕI-INVERTER-ventiil	TTL
7486	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil	TTL
74125	Kvadraatne kolme olekuga mitteinverteeriv puhver (madal aktiveerimistase)	TTL
74126	Kvadraatne kolme olekuga mitteinverteeriv puhver (kõrge aktiveerimistase)	TTL
74132	Kvadraatne kahe sisendiga Schmitti NING-EI-trigerventiil	TTL
74133	13 sisendiga NING-EI-ventiil	TTL
74136	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil (avatud kollektor)	TTL
74240	Oktaalne kolme olekuga inverteeriv siini/liinidraiver	TTL
74241	Oktaalne kolme olekuga siini/liinidraiver	TTL
74242	Oktaalne kolme olekuga inverteeriv siinitransiiver	TTL
74243	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv siinitransiiver	TTL
74244	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv draiver	TTL
74245	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv siinitransiiver	TTL
74266	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-EI-ventiil (avatud kollektor)	TTL
74365	Kolme olekuga mitteinverteeriv hekspuhver ühise aktiveerimisega	TTL
74366	Kolme olekuga inverteeriv hekspuhver ühise aktiveerimisega	TTL
74367	Kolme olekuga mitteinverteeriv hekspuhver, neljabitine ja kahebitine	TTL
74368	Kolme olekuga inverteeriv hekspuhver, neljabitine ja kahebitine	TTL
74386	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil	TTL
74465	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv hekspuhver	TTL
	Ventiiliga aktiveerimine, inverteeritud	
74540	Oktaalne kolme olekuga inverteeriv puhver/liinidraiver	TTL
74541	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv puhver/liinidraiver	TTL
74640	Oktaalne kolme olekuga inverteeriv siinitransiiver	TTL
74641	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv siinitransiiver (avatud kollektor)	TTL
74645	Oktaalne kolme olekuga mitteinverteeriv siinitransiiver	TTL
4001B	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-EI-ventiil	CMOS
4002B	Nelja sisendiga VÕI-EI-kaksikventiil	CMOS
4011B	Kvadraatne kahe sisendiga NING-EI-ventiil	CMOS
4012B	Nelja sisendiga NING-EI-kaksikventiil	CMOS
4023B	Kolme sisendiga NING-EI-kolmikventiil	CMOS
4025B	Kolme sisendiga VÕI-EI-kolmikventiil	CMOS
4030B	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil	CMOS
4049B	Inverteeriv hekspuhver	CMOS
4050B	Mitteinverteeriv hekspuhver	CMOS
40097B	Mitteinverteeriv kolme olekuga hekspuhver	CMOS
40098B	Kolme olekuga inverteeriv puhver	CMOS
4069UB	Heksinverter	CMOS

4070B	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil	CMOS
4071B	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-ventiil	CMOS
4081B	Kvadraatne kahe sisendiga JA-ventiil	CMOS
4086B	Neliklai kahe sisendiga JA-VÕI-INVERTER-ventiil	CMOS
4093B	Kvadraatne kahe sisendiga Schmitti NING-EI-ventiil	CMOS
10100	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-EI-ventiil stroboskoobiga	ECL
10101	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI/VÕI-EI-ventiil	ECL
10102	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-EI-ventiil	ECL
10103	Kvadraatne kahe sisendiga VÕI-ventiil	ECL
10104	Kvadraatne kahe sisendiga JA-ventiil	ECL
10113	Kvadraatne kahe sisendiga VÄLISTAV-VÕI-ventiil	ECL
10114	Kolmikliinivastuvõtja	ECL
10115	Kvadraatne liinivastuvõtja	ECL
10116	Kolmikliinivastuvõtja	ECL
10117	Topeltlai kahe sisendiga/kolme sisendiga JA-VÕI/JA-VÕI-INVERTER-kaksikventiil	ECL
10118	Topeltlai kolme sisendiga JA-VÕI-kaksikventiil	ECL
10123	4-3-3 kolmiksisendsiinidraiver	ECL
10128	Kaksiksiinidraiver	ECL
10129	Kvadraatne siinidraiver	ECL
10188	Aktiveeritav hekspuhver	ECL
10192	Kvadraatne siinidraiver	ECL
10194	Kaksiksünkroontransiiver	ECL
10195	Hekspuhver inverteeriva/mitteinverteeriva juhtimisega	ECL

Digitaalsete integraalskeemide valmistamiseks kasutatakse mitmeid erinevaid lülituste konfiguratsioone ja tootmistehnoloogiaid. Iga sellist meetodit nimetatakse konkreetseks loogikaperekonnaks (eeltoodud tabeli viimane veerg). Loogikaperekondade hulka kuuluvad transistorite vaheline loogika (TTL), metalloksiid-pooljuhtloogika (MOS), emittersidestus-loogika (ECL), bipolaarne CMOS (Bi-CMOS) loogika ja integreeritud injektsiooni loogika (I2L). Kõik need nimetused on seotud mikroskeemide tootmistehnoloogiaga.

4.3 Kordusküsimused

1. Sisendpinge täpne väärtus on digitaallülituse jaoks oluline?
    a. õige
    b. vale
2. Milline on ainus sisendite kombinatsioon, mis annab tulemuseks SUUR viie sisendiga JA-ventiili väljundil?
    a. 00000
    b. 11011
    c. 11111
    d. 10001
3. Milline on ainus sisendite kombinatsioon, mis annab tulemuseks MADALA kahe sisendiga NING-EI-ventiili väljundil?
    a. 01
    b. 11
    c. 00
    d. 10
4. Milline on nelja ventiiliga kahe sisendiga NING-EI-integraallülituse sümbol?
    a. 74003
    b. 23145
    c. 7400
    d. 74SL45
5. Miks nimetatakse NING-EI ja VÕI-EI-ventiile universaalventiilideks?
    a. Sest neid võib vaheldumisi kasutada
    b. Mõlemad ventiilid on väga sarnased ja annavad sarnase väljundsignaali
    c. Mistahes Boole'i avaldise teostamiseks on võimalik kasutada ainult NING-EI-ventiile või ainult VÕI-EI-ventiile
    d. Mõlema kombineerimine annab alati tulemuseks MADALA signaali

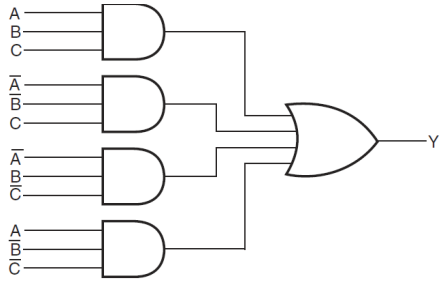
5 PROGRAMMEERITAVAD LOOGIKASEADMED

Loogikaseadmed moodustavad ühe kolmest olulisest seadmeklassist, mida kasutatakse digitaalsete elektroonikasüsteemide koostamiseks; ülejäänud kaks on mäluseadmed ja mikroprotsessorid. Mäluseadmeid (näiteks püsimälu ja muutmälu) kasutatakse erineva teabe, näiteks programmi tarkvarakäskude või andmebaasi sisu salvestamiseks, ning mikroprotsessorid täidavad tarkvarakäske erinevate funktsioonide teostamiseks, alates tekstitöötluse programme käivitamisest kuni muude märksa keerukamate toiminguteni. Loogikaseadmed rakendavad ka peaaegu kõiki teisi funktsioone, mida süsteem peab teostama, sealhulgas seadmetevahelist liidestamist, andmete ajastust, juhtimis- ja kuvamistoiminguid jms. Seni oleme käsitlenud loogikaseadmeid, mis teostavad tootmisetapis määratud püsiloogikaga funktsioone. Loogikaventiilid, multiplekserid, demultiplekserid, aritmeetilised skeemid jt on mõned sellised näited. Siin peatükis vaadeldakse uut loogikaseadmete kategooriat, mida nimetatakse programmeeritavateks loogikaseadmeteks (PLD). Programmeeritava loogikaseadme korral on selle teostatavad funktsioonid tootmise ajal määramata. Neid seadmeid programmeerib kasutaja teostama erinevaid funktsioone olenevalt loogikamahust ja teistest seadme omadustest. Alguses võrdleme püsi- ja programmeeritavat loogikat ning seejärel kirjeldatakse täpsemalt erinevat tüüpi PLD-seadmeid, nende tööpõhimõtteid, peamisi omadusi, arhitektuuri ja tavapäraseid rakendusi. Peatüki lõpus antakse lühiülevaade seadmetest, mida pakuvad mõned peamised PLD-de tootjad, ning PLD programmeerimiskeeltest.

5.1 Püsiloogika ja programmeeritav loogika

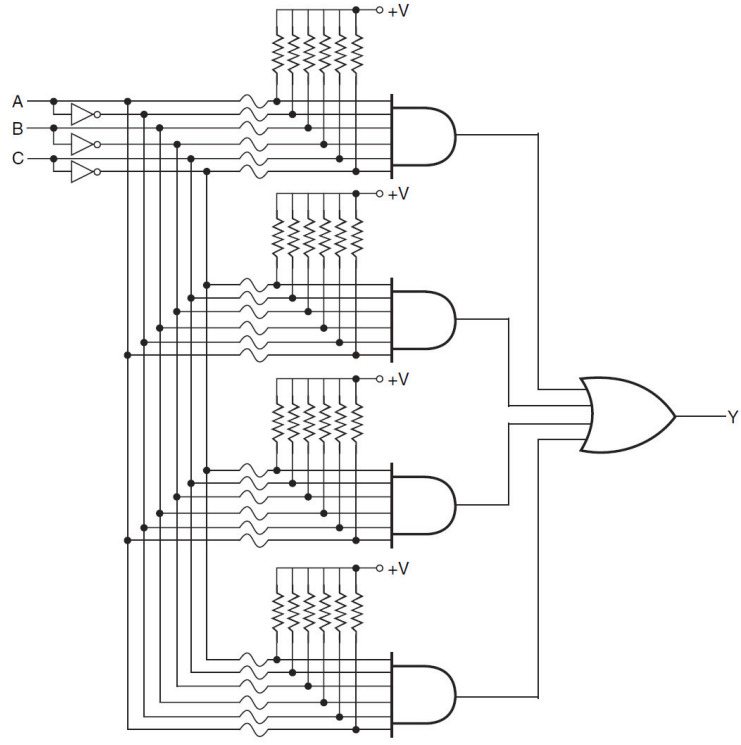
Nagu sissejuhatuses märgitud, on olemas kaks suurt loogikaseadmete kategooriat – püsiloogikaseadmed ja programmeeritavad loogikaseadmed. Kui püsiloogikaseade, nagu näiteks loogikaventiil, multiplekser või trigger, teostab seadme tootmise ajal määratud kindlat loogikafunktsiooni, siis programmeeritava loogikaseadme saab kasutaja konfigureerida teostama mitmeid erinevaid loogikafunktsioone. Mis puutub seadmete sisemisse ehitusse, siis püsiloogikaseadmes on lülitused või komponendid ja nende vahelised ühendused püsivad ning neid ei saa pärast seadme tootmist muuta.

Programmeeritav loogikaseade pakub kasutajale ohtralt erinevaid loogikavõimalusi digitaalsete komponentide puhul, mida kasutaja saab konfigureerida teostama soovitud funktsiooni või funktsioonide kogumit. Seda konfiguratsiooni saab kasutaja korduvalt muuta seadme ümberprogrammeerimise teel. Joonisel 5.1 on näidatud lihtne loogikaskeem, mis hõlmab nelja kolme sisendiga JA-ventiili ja üht nelja sisendiga VÕI-ventiili. See skeem annab väljundi, mis on täissummaatori üldväljund. Siin on A ja B kaks liidetavat bitti ning C on ülekandebitt. See on püsiloogikaseade, sest püsiühenduste tõttu erinevate komponentide vahel pole skeemi võimalik väljastpoolt muuta.



Joonis 5.1 Püsiloogikaskeem

Joonisel 5.2 on kujutatud lihtsa programmeeritava seadme loogikaskeem. Seadmel on neli kuue sisendiga JA-ventiili sisendil ning nelja sisendiga VÕI-ventiil väljundil. Iga JA-ventiil võib käidelda kolme muutujat ning luua seega kolme muutujaga tehte tulemi. Kolme muutujat (siin juhul A, B ja C) või nende täiendeid saab programmeerida esinema mistahes nelja JA-ventiili sisendil sulavühenduste abil, mida nimetatakse antikaitsmeteks.



Joonis 5.2 Lihtne programmeeritav loogikaskeem.

See tähendab, et iga JA-ventiil võib anda soovitud kolme muutuja tulemi. Siinkohal võib märkida, et antikaitse täidab funktsiooni, mis on vastupidine tavapäraste elektrikaitsmete

omale. Kaitsmel on madal algtakistus ning see katkestab püsivalt elektrit juhtiva raja, kui seda läbiv vool ületab teatud piirväärtuse. Antikaitsme korral on algtakistus väga kõrge ning selle eesmärk on luua madala takistusega elektrit juhtiv rada, kui seda läbiv pinge ületab teatud taseme. Selle tulemusena saab soovitud sulavühenduste aktiveerimisega lülituse programmeerida tekitama mistahes kolme muutuja summaarse tulemiga Boole'i funktsiooni vähemalt nelja mintermiga. Näiteks võib skeemi programmeerida tekitama summaväljundi kolme biti liitmisel (summaväljund täissummaatori korral) või vaheväljundid kahe laenuga biti lahutamisel (vaheväljund täislahuti korral).
Võime näha, et joonisel 5.2 kujutatud loogikaskeemil on programmeeritav JA-maatriks sisendil ning VÕI-püsiventiil väljundil. See on ühtlasi programmeeritavate loogikaseadmete arhitektuur, mida nimetatakse programmeeritavaks maatriksloogikaks (PAL). Praktikas on PAL-seadmetel märksa suurem arv programmeeritavaid JA-ventiile ning VÕI-püsiventiile, et tagada parem loogikamaht ja jõudlus.

Eelised ja puudused

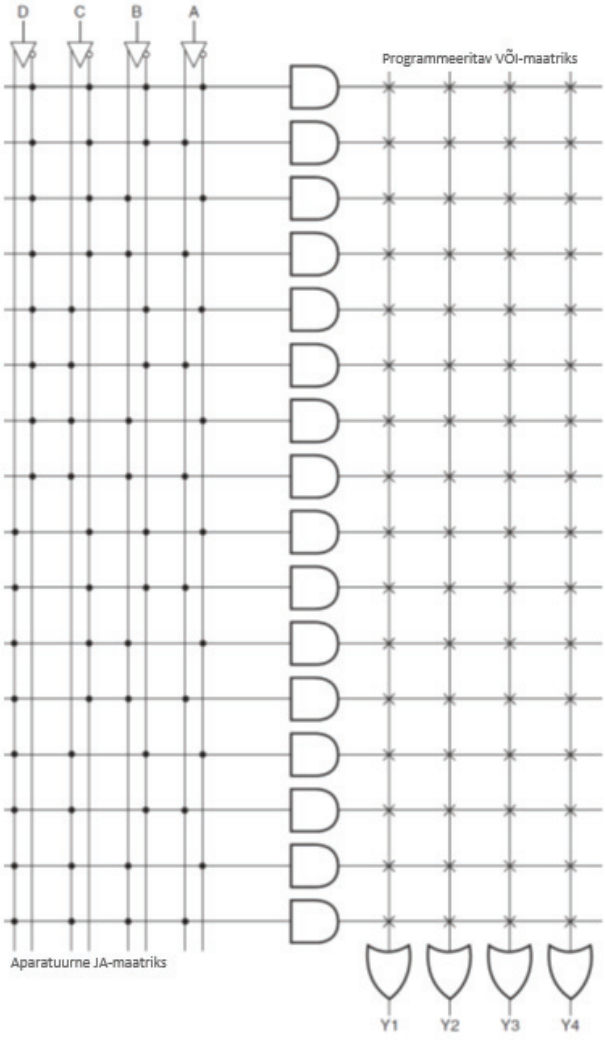
1. Kui me soovime koostada püsiloogikaseadme, mis teostaks konkreetset funktsiooni, võib vajalik aeg alates projekteerimisest kuni lõppstaadiumini, kus toodetud seade on reaalselt saadaval, ulatuda mitmest kuust kuni umbes aastani. PLD-põhine ehitus nõuab planeerimistsüklist kuni tootmise alustamiseni märksa vähem aega.
2. Püsiloogikaseadmete korral kaasnevad ehituse kontrolli ja sellele võimalike muutuste tegemise protsessiga märkimisväärsed ühekordsed insener-tehnilised (NRE) kulud, mille tagajärjel algse seadme prototüübi maksumus suureneb. PLD korral saab ehituse kiireks kontrollimiseks kasutada odavaid tarkvaravahendeid. Nende seadmete programmeeritavus võimaldab muutusi kiirelt sisse viia ning ka seadet tegelikus kasutuskeskkonnas kiiresti testida. Sellisel juhul on seadme prototüüp sama nagu seade, mis kvalifitseerub kasutamiseks lõppvarustuses.
3. Programmeeritavate loogikaseadmete korral saavad kasutajad muuta lülitust nii tihti kui nad soovivad, kuni seade töötab nende jaoks rahuldavalt. PLD annab kasutajatele kavandamistsüklis tunduvalt rohkem paindlikkust. Ehituslikud muudatused tähendavad üksnes programmeerimisfaili muutmist.
4. Püsiloogikaseadmed sobivad kasutamiseks suurtes süsteemides, sest neid saab odavamalt massiliselt toota. Lisaks on need eelistatud valikuks rakendustes, mis nõuavad kõrgeimat jõudlust.

Olemas on palju programmeeritavate loogikaseadmete tüüpe, mis erinevad üksteisest arhitektuuri, loogikamahu, programmeeritavuse ja mitmete teiste spetsiifiliste omaduste poolest. Selles peatükis vaatleme põgusalt levinud PLD-sid ja nende omadusi.

5.2 Programmeeritavad püsimälud

PROM (programmeeritav püsimälu) ja EPROM (ümberprogrammeeritav püsimälu) on põhimõtteliselt PLD-de eelkäijad. Programmeeritava püsimälu arhitektuur võimaldab kasutajal rakendada riistvaras suvalist antud sisendite arvu kombineeritud funktsiooni.
Mäluseadmena kasutamisel saab püsimälu n sisendit (mida nimetatakse antud juhul aadressiridadeks) ja m väljundit (andmeread) kasutada 2nm-bitiste sõnade salvestamiseks.

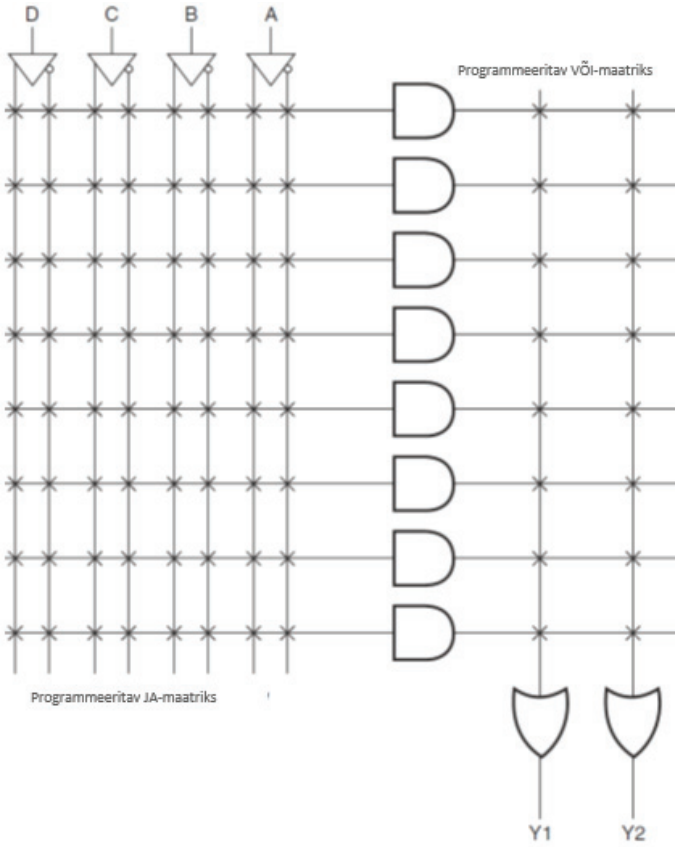
PLD-na kasutamisel saab seda kasutada m erineva kombineeritud funktsiooni rakendamiseks, kusjuures iga funktsioon on valitud funktsioon n muutujaga. Igale m väljundireale saab tuua mistahes võimaliku n muutujaga Boole'i funktsiooni. Üldistatud püsimäluseadmel n sisendi ja m väljundiga on 2n aparatuurset JA-ventiili sisendil ning m programmeeritavat VÕI-ventiili väljundil. Igal JA-ventiilil on n sisendit ning igal VÕI-ventiilil on 2n sisendit. Seega saab iga VÕI-ventiili kasutada mistahes võimaliku Boole'i funktsiooni loomiseks n muutujaga, ning sellist üldistatud püsimälu saab kasutada m suvalise n muutujata Boole'i funktsiooni loomiseks. JA-ventiil loob kõik võimalikud mintermid antud arvu sisendmuutujatega, ning programmeeritav VÕI-maatriks võimaldab üksnes soovitud mintermide rakendamist nende sisenditel. Joonisel 5.3 on kujutatud programmeeritava püsimälu sisearhitektuur, millel on neli sisendirida, aparatuurne 16 JA-ventiiliga maatriks ja programmeeritav nelja VÕI-ventiiliga maatriks. Rist (×) tähistab puutumatut (või programmeerimata) sulavkaitset või ühendust, ning täpp (•) näitab aparatuurset ühendust. PROM-, EPROM- ja EEPROM- (elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu) seadmeid saab programmeerida standardsete PROM-programmeerimisvahenditega. Üks peamine programmeeritavate püsimälude puudus on nende ebatõhus loogikamahu kasutamine. Pole ökonoomne kasutada programmeeritavaid püsimälusid kõikide rakenduste jaoks, kus on tarvis üksnes väikesel hulgal minterme. Teiste puuduste hulka kuuluvad suhteliselt kõrge energiakulu ja suutmatus tagada turvalisust asünkroonsete loogikaülekannete korral. Tavaliselt on need märksa aeglasemad kui spetsiaalsed loogikaskeemid. Lisaks ei saa neid kasutada jadaloogika rakendamiseks trigerite puudumise tõttu.



Joonis 5.3 Programmeeritava püsimälu sisearhitektuur.

5.3 Programmeeritava loogikaga maatriks

Programmeeritava loogikaga maatriksiga (PLA) seadmel on programmeeritav JA-maatriks sisendil ja programmeeritav VÕI-maatriks väljundil, mis teeb sellest ühe kõige mitmekülgsema PLD. Selle arhitektuuri erinevust programmeeritavast püsimälust on kirjeldatud allpool. Sellel on programmeeritav JA-maatriks, mitte aparatuurne JA-maatriks.



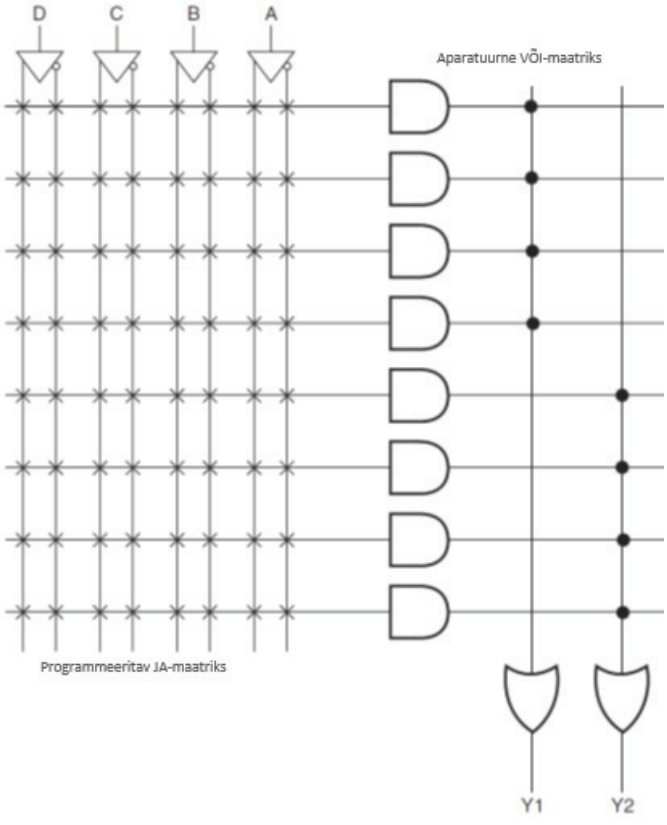
Joonis 5.4 PLA-seadme sisearhitektuur.

JA-ventiilide arv m sisendiga programmeeritaval püsimälul on alati 2m. PLA korral on JA-ventiilide arv programmeeritavas JA-maatriksis m sisendmuutuja korral tavaliselt märksa väiksem kui 2m, ning iga VÕI-ventiili sisendite arv võrdub JA-ventiilide arvuga. Iga VÕI-ventiil võib luua suvalise Boole'i funktsiooni maksimaalse mintermide arvuga, mis võrdub JA-ventiilide arvuga. Joonisel 5.4 on kujutatud PLA-seadme sisearhitektuur, millel on neli sisendirida, kaheksa JA-ventiiliga programmeeritav maatriks sisendil ja kahe VÕI-ventiiliga programmeeritav maatriks väljundil. PLA-seade kasutab loogikamahtu tõhusamalt kui programmeeritav püsimälu. Siiski on sellel oma puudused kahe programmeeritavate kaitsmete komplekti tõttu, mis muudavad selle tootmise, programmeerimise ja testimise suhteliselt keerukamaks.

5.4 Programmeeritav maatriksloogika

Programmeeritava maatriksloogika (PAL) arhitektuuris on programmeeritav JA-maatriks sisendil ning VÕI-püsimaatriks väljundil. PAL-seadme programmeeritav JA-maatriks sarnaneb PLA-seadme omale. See tähendab, et programmeeritavate JA-ventiilide arv on tavaliselt väiksem arvust, mis on vajalik kõikide võimalike mintermide loomiseks antud arvu

sisendmuutujate korral. VÕI-maatriks on püsimaatriks ning JA väljundid on jaotatud võrdselt olemasolevate VÕI-ventiilide vahel. Näiteks võib praktikas kasutataval PAL-seadmel olla kaheksa sisendmuutujat, 64 programmeeritavat JA-ventiili ning neli VÕI püsiventiili, kusjuures igal VÕI-ventiilil on 16 sisendit. St iga VÕI-ventiil saab toidet 16 JA väljundist 64 võimalikust. Joonisel 5.5 on kujutatud PLA-seadme sisearhitektuur, millel on neli sisendirida, kaheksa JA-ventiiliga maatriks sisendil ja kaks VÕI-ventiili väljundil, et tutvustada lugejatele erinevate PAL-seadmes paiknevate komponentide skeemi ja võimaldada neil võrrelda erinevaid programmeeritavaid loogikaseadmeid.



Joonis 5.5 PAL-seadme sisearhitektuur.

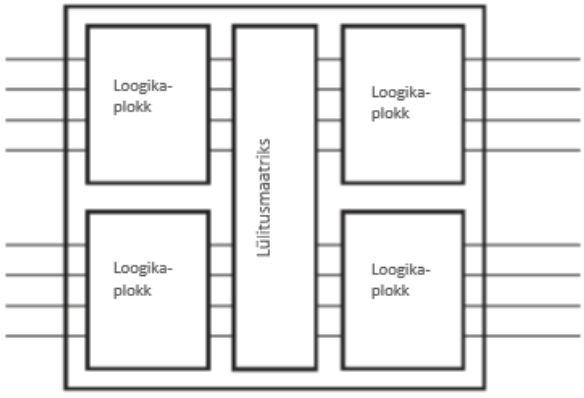
5.5 Üldine maatriksloogika

Üldise maatriksloogika (GAL) seade sarnaneb PAL-seadmele ning selle leiutas firma Lattice Semiconductor. See erineb PAL-seadmest asjaolu poolest, et GAL-seadme programmeeritavat JA-maatriksit saab kustutada ja ümber programmeerida. Lisaks on sellel ümberprogrammeeritav väljundloogika. See omadus annab eelise eelkõige seadme prototüübi valmistamise etapis, sest kõiki loogikavigu saab korrigeerida ümberprogrammeerimise abil. Sarnase seadme

nimega PEEL (elektriliselt ümberprogrammeeritav loogika) töötas välja firma International CMOS Technology (ICT) Corporation.

5.6 Täisprogrammeeritav loogikaseade

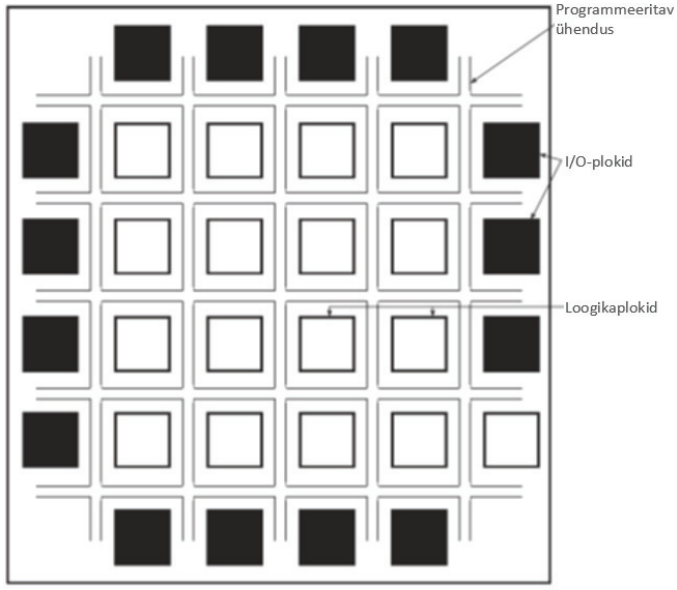
Programmeeritavad loogikaseadmed (nt PLA, PAL, GAL ja muud PAL-sarnased seadmed) liigitatakse tihti lihtsate programmeeritavate loogikaseadmete (SPLD) kategooriasse, et eristada neid märksa keerukamatest seadmetest. Täisprogrammeeritav loogikaseade (CPLD) on seni vaadeldud programmeeritavatest loogikaseadmetest tunduvalt keerukam. CPLD võib sisaldada süsteeme, mis on võrreldavad mitme programmeeritava vaheühendusega omavahel ühendatud PAL-seadmega. Joonisel 9.6 on kujutatud tavapärase CPLD sisemine struktuur. Iga neljast loogikaplokist on ekvivalentne PLD-ga, nt PAL-seadmega. CPLD loogikaplokkide arv võib olla ka suurem või väiksem kui neli. Igal loogikaplokil on programmeeritavad ühendused. Loogikaplokkide vahelistes ühendustes kasutatakse lülitusmaatriksit. CPLD lülitusmaatriks võib olla või mitte olla täielikult ühendatud. See tähendab, et vastav CPLD ei pruugi toetada mõningaid võimalikest ühendustest loogikaploki väljundite ja sisendite vahel. Kui tavapärase PAL-seadme keerukus võib jääda mõnesaja loogikaventiili suurusjärku, siis CPLD keerukus võib hõlmata kümneid tuhandeid loogikaventiile. Võrreldes FPGA-dega võimaldavad CPLD-d prognoositavaid ajastusomadusi tänu paindlikumale sisearhitektuurile ning sobivad seetõttu ideaalselt kasutamiseks kriitilistes juhtrakendustes ja muudes rakendustes, kus on vaja suurt jõudlust. Samuti on CPLD-d tunduvalt väiksema energiakulu ja madalama hinna tõttu ideaalne lahendus akutoitega kaasaskantavate rakenduste jaoks, nagu mobiiltelefonid, pihuarvutid vms. CPLD võib programmeerida PAL-programmeerimisseadme abil või suuna sellesse jadaandmete voo arvutist pärast selle jootmist trükkplaadile. CPLD-lülitus dekodeerib andmevoo ja konfigureerib selle teostama soovitud loogikafunktsiooni.



Joonis 5.6 CPLD arhitektuur.

5.7 Programmeeritav ventiilmaatriks

Programmeeritavas ventiilmaatriksis (FPGA) kasutatakse loogikaplokkide maatriksit, mida kasutaja saab konfigureerida. Termin „programmeeritav“ tähendab siin juhul, et seadet saab programmeerida väljaspool tehast, kus see on toodetud. FPGA-seadme sisearhitektuuril on kolm põhiosa, täpsemalt loogikaplokkide maatriks, programmeeritavad ühendused ja I/O- (sisendite-väljundite) plokid. Joonisel 5.7 on kujutatud tavapärase FPGA arhitektuur. Iga I/O-plokk tagab eraldi valitava sisendi, väljundi või kahesuunalise pöörduse ühele üldotstarbelisele I/O-viigule FPGA paketis. FPGA-loogikaplokid pole keerukamad kui loogikaventiilide paar või trigeri väärtusetabel. Programmeeritavad ühendused ühendavad loogikaplokke omavahel ning ka I/O plokke loogikaplokkidega. FPGA-d võimaldavad CPLD-dega võrreldes märksa suuremat loogikatihedust ja paremat jõudlust. Mõned kaasaegsed FPGA-seadmed võimaldavad loogika keerukust, mis vastab kaheksale miljonile süsteemiventiilile. Lisaks võimaldavad need seadmed kasutada näiteks sisseehitatud püsiprotsessoreid, suurt mälu, kellajuhtimissüsteeme ning toetada paljusid kaasaegseid seadmetevahelise signaaliülekande tehnoloogiaid.



Joonis 5.7 FPGA arhitektuur.

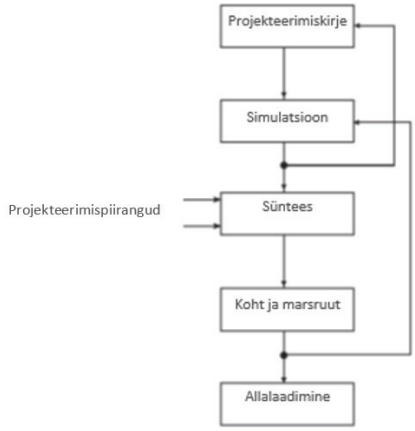
FPGA-sid kasutatakse erinevates rakendustes, sealhulgas andmetöötluses ja -salvestuses, digitaalsignaalide töötluses, instrumentides ja telekommunikatsioonis.
FPGA-d programmeeritakse sarnaselt CPLD-dele pärast jootmist trükkplaadile. FPGA-de korral on programmeeritud konfiguratsioon tavaliselt muutuv ja tuleb seetõttu uuesti laadida alati pärast sisselülitamist või erineva funktsionaalsuse vajaduse tekkimist.

5.8 Programmeeritava loogikaga riistvara projekteerimine ja arendamine

Selles punktis kirjeldatakse lühidalt erinevaid etappe, mis on seotud programmeeritava loogikaga riistvara koostamise ja arendamisega. Joonisel 5.8 on toodud plokkskeem vastavate etappide teostamise järjekorrast.

Protsess algab planeeritava riistvara toimimise aspektide ja arhitektuuri kirjeldamisega. Selleks kirjutatakse lähtekood kõrgema tasandi riistvarakirjelduse keeles (HDL), nagu näiteks VHDL või Verilog. Seda nimetatakse projekteerimiskirjeks. Ehkki skemaatiline hõive on samuti üks projekteerimiskirje variant, on see asendatud keelepõhiste vahenditega, kuna projekteerimine on muutunud üha keerukamaks ning keelepõhised vahendid on oluliselt arenenud.

Kõige olulisem erinevus riistvara ja tarkvara projekteerimise vahel seisneb alljärgnevas. Kui tarkvaraarendajad mõtlevad eelkõige järjekorras, siis riistvara projekteerijad peavad mõtlema ja programmeerima paralleelselt. Kõiki sisendsignaale töödeldakse paralleelselt, kui need liiguvad läbi makrorakkude ja seonduvate ühenduste sihtpunkti suunas. Selle tulemusena luuakse HDL-lausetega struktuure, mida samal ajal täidetakse. Siinkohal võib märkida, et infoülekanne ühelt makrorakult teisele on sünkroniseeritud teise signaaliga, näiteks kellaga.



Joonis 5.8 Programmeeritava loogika projekteerimis- ja arendusprotsess.

Projekteerimiskirje etapile järgneb või sellega kaasneb perioodiline funktsionaalne simulatsioon. Simulaatoris täidetakse projekt sisendite jaoks ja kinnitatakse loogika funktsionaalselt õiget toimimist.

Sellele järgneb riistvara kompileerimine, mis hõlmab kaht etappi. Esimene etapp on süntees ning selle tulemus on riistvara esitus, mida nimetatakse ahelaloendiks. Ahelaloend on seadmest sõltumatu ning selle sisu ei sõltu programmeeritava PLD parameetritest. Tavaliselt salvestatakse see standardvormingus, mida nimetatakse elektronandmevahetuse vorminguks (EDIF). Teine etapp – koht ja marsruut – hõlmab ahelaloendis kirjeldatud loogilise struktuuri vastendamist tegelike loogikaplokkide, ühenduste ja sisendite/väljunditega. Koha ja marsruudi protsess annab tulemuseks bitivoo, mis kujutab endast kahendandmeid, mis tuleb

laadida CPLD/FPGA-seadmesse, et kiip hakkaks täitma ettenähtud riistvaraprojekti. Siinkohal võib märkida, et igal seadmeperekonnal on oma kindel bitivoo vorming.

5.9 Programmeerimiskeeled

PLD arendustsüklis, alates projekteerimiskirjest kuni bitivoo loomiseni, mille saab mingit tüüpi elektroonilise programmeerimissüsteemi abil kiibile laadida, on tarvis kaht tüüpi tarkvara-programme kahe erineva funktsiooni teostamiseks.

Esimene neist on riistvarakirjelduse keel (HDL), mis on vajalik projekteerimiskirje etapis. HDL on tarkvara programmeerimiskeel, mida kasutatakse riistvaraelemendi ettenähtud toimimise modelleerimiseks või kirjeldamiseks. Siin juhul on see funktsioon, mida PLD kiip peab pärast programmeerimist teostama. Tasub märkida, et kaasaegsed arvutikeeled, sealhulgas nii riistvarakirjelduse keeled kui ka kõrgtasandi programmeerimiskeeled, sisaldavad peaaegu alati deklaratiivseid ja täitmislauseid, ning riistvarakirjelduse keeltes esineb esimesena mainituid eriti tihti. Kui me võrdleme kõrgtasandi programmeerimiskeele, näiteks C++ ja HDL-i tulemust, on see esimesel juhul täitmisprogramm ja teisel deklaratiivprogramm. Aastate jooksul välja kujunenud riistvarakirjelduse keelte hulka kuuluvad ABEL-HDL, VHDL (VHSIC HDL), Verilog ja JHDL (Java HDL). VHSIC tähendab väga kiiret integraallülitust (ingl *Very High-Speed Integrated Circuit*).

Teine tarkvaraprogrammi tüüp on arvutiprogramm nimega loogikakompilaator, mida kasutatakse HDL-keeles kirjutatud lähtekoodi teisendamiseks bitivooks. Loogikakompilaatorid on saadaval tootjatelt või kolmanda osapoole müüjatelt. Järgnevates lõikudes kirjeldatakse lühidalt iga eespool nimetatud riistvarakirjelduse keelt.

5.10 ABEL riistvarakirjelduse keel

ABEL HDL, mille võttis kasutusele firma DATA I/O, oli mõeldud suhteliselt lihtsamatele PLD-lülitustele, mida sai rakendada SPLD-del. ABEL võimaldab projekteerijatel kirjeldada digi-taallülituste projekte tõesustabelite, Boole'i funktsioonide, olekuskeemide või nende mistahes kombinatsioonide kujul. Lisaks võimaldab see projekteerijal optimeerida projekti kontrolli kaudu ilma seadet määratlemata. Teiste sõnadega hõlbustab ABEL riistvarast sõltumatute programmide kirjutamist ning PLD-seade valitakse alles pärast projekti kontrollimist ja optimeerimist. ABEL-keskkonnas kirjutatud lähtekoodil on standardvorming, et tagada liidese ühilduvus teiste tööriistadega.

5.11 VHDL-VHSIC riistvarakirjelduse keel

VHDL on kõige levinum riistvarakirjelduse keel, mida kasutatakse keerukate digitaallülituste projektide kirjeldamiseks, mis on ette nähtud rakendamiseks CPLD- ja FPGA-seadmetes. VHDL töötati algselt välja rakendusspetsiifiliste mikroskeemide toimimise kirjeldamiseks, mida paljud tootjad oma seadmetes kasutasid. Seejärel töötati välja loogika simulatsiooni ja sünteesi tööriistad, mis suutsid lugeda VHDL-faile ja väljastada lülituse füüsilise rakenduse definitsiooni. Kaasaegsete sünteesivahendite abil, mis suudavad eraldada mitmeid digi-taalseid komponente, nagu loendureid, muutmälusid, aritmeetikaplokke jms, ning rakendada neid kasutaja määratluse alusel, saab sama VHDL-koodi sünteesida optimaalse jõudluse tagamiseks erinevalt.

VHDL on tugevalt tüübitud keel. Üks VHDL-i põhiomadus on asjaolu, et see võimaldab planeeritava riistvara toimimist kirjeldada ja seejärel kontrollida enne projekti muutmist

tegelikuks tarkvaraks sünteesivahendite abil. Teine VHDL-i omadus, mis annab sellele digitaal-süsteemide projekteerimisel eelise, on asjaolu, et see võimaldab kirjeldada konkurentset süsteemi.

5.12 Verilog

Verilog, nagu ka VHDL, toetab analoog-, digitaal- ja kombineeritud signaalide lülituste projekteerimist, projekti kontrollimist ja järgnevat rakendamist erineval abstraktsustasandil. Verilog-põhine projekteerimine hõlmab moodulite hierarhiat, mille toimimise määravad konkurentsed ja järjestikused laused. Järjestikused laused paigutatakse 'alguse/lõpu' plokki ja plokis sisalduvaid järjestikuseid lauseid täidetakse järjest. Kõiki konkurentseid lauseid ja kõiki projekteeritud 'alguse/lõpu' plokke täidetakse paralleelselt. Lausete alamhulk Verilog-keeles on sünteesitav. Seetõttu, kui projektis kasutatakse erinevates moodulites ainult sünteesitavaid lauseid, saab projekti teisendada ahelaloendiks, mille saab hiljem teisendada bitivooks. Verilogil on teatud sarnasusi ja erinevusi C-keelega. Sellel on sarnane eelprotsessor, sarnased peamised kontrollvõtmesõnad, nagu näiteks „kui", „kuna" vms, ning ka sarnane vormindusmehhanism trükiprogrammides ja keeleoperaatorites. Erinevuste hulka kuuluvad „alguse/lõpu" kasutamine looksulgude asemel koodiploki määratlemiseks ning ka asjaolu, et Verilogil puuduvad struktuurid, viidad ja rekursiivsed alamprogrammid. Lisaks nõuab konstantide defineerimine Verilogis bitilaiust kogu aluse ulatuses.

5.13 Java HDL

Java HDL (JHDL) töötati välja Brigham Youngi Ülikooli (BYU) konfigureeritava arvutamise laboratooriumis. See on madala tasandi riistvarakirjelduse keel, milles kasutatakse peamiselt objektile suunatud lähenemist lülituste koostamiseks. Eelkõige töötati see välja FPGA-põhise riistvara projekteerimiseks ning arendajad on pööranud erilist tähelepanu FPGA kiipide Xilinx-seeria toetamisele.

5.14 Kordusküsimused

1. Kuidas erineb programmeeritav loogikaseade püsiloogikaseadmest?
    a. Püsiloogikaseadet saab vabalt muuta ja programmeerida
    b. Püsiloogikaseade suudab teostada ainult lihtsaid loogikafunktsioone
    c. Püsiseade teostab tootmisetapis määratud loogikafunktsioone, programmeeritavaid seadmeid aga saab kasutaja muuta.
    d. PLD saab programmeerida teostama piiramatult loogikafunktsioone
2. Milliseid seadmeid võib pidada PLD-de eelkäijaks?
    a. GAL
    b. FPGA
    c. PAL
    d. PROM/EPROM
3. Milline on programmeeritava loogikaga maatriksi sisemine riistvaraehitus?
    a. Seadmel n sisendi ja m väljundiga on 2n aparatuurset JA-ventiili sisendil ning m programmeeritavat VÕI-ventiili väljundil
    b. Seade programmeeritava JA-maatriksiga sisendil ja programmeeritava VÕI-maatriksiga väljundil
    c. PLA arhitektuuril on programmeeritav JA-maatriks sisendil ning VÕI-püsimaatriks väljundil
    d. Ainult NING-EI-ventiilid
    e. Sisendid ja väljundid on ühendatud madala algväärtusega takistitega
4. Kuidas programmeeritakse programmeeritavaid loogikaseadmeid?
    a. Seda saab teha üksnes assembleri programmeerimiskeelega
    b. Kasutada võib kõrgtasandi programmeerimiskeelt
    c. BABEL-programmeerimiskeelega
    d. Programmeerimiskeel on HDMI
    e. Riistvarakirjelduse keelt (HDL) kasutatakse planeeritud toimingu modelleerimiseks ja kirjeldamiseks.
5. Milline on programmeeritava ventiilmaatriksi sisearhitektuur
    a. Sellel on programmeeritav JA-maatriks sisendil ning VÕI-püsimaatriks väljundil
    b. Selle ahelasüsteem on ekvivalentne mitme PAL-seadme omaga, mis on ühendatud üksteisega programmeeritavate ühenduste kaudu
    c. See on HDL-i ja Java kombinatsioon
    d. FPGA-seadmel on kolm põhiosa: loogikaplokkide maatriks, programmeeritavad ühendused ja I/O-plokid

6 MIKROKONTROLLER, MIKROPROTSESSOR

Seni kirjeldatud lahendused on peamised komponendid, mida kasutatakse mingi konkreetse probleemi lahendamiseks spetsiaalselt ette nähtud rakenduste koostamiseks. Kirjeldatud 74LSxx-perekonna loogikaskeeme saab kergesti kombineerida isegi keerukate loogika-ülesannete lahendamiseks. Samuti saab kasutada programmeeritavaid loogikaseadmeid ilma sisemise püsikonstruktsioonita prototüüpide või töötavate seadmete valmistamiseks. Siiski ei ole selline meetod alati kõige mugavam. Sellise rakenduse teostamiseks, mis toimiks koos ümbritseva keskkonnaga ja suhestuks mingil viisil inimestega, peame kombineerima teatud arvu selliseid elementaarseid integraalskeeme. Võtame näiteks lihtsa digitaalse ilma-jaamakella, millel on graafiline näidik ja juhtnupud. Selline seade võib näidata ekraanil hetke sise/välistemperatuuri, õhuniiskust, kellaaega jms. Selle ehitamiseks tuleb kasutada kaht temperatuuriandurit, niiskusandurit ja baromeeterandurit. Nende andurite analoogsignaali teisendamiseks on tarvis vähemalt nelja analoog-digitaalmuundurit, transiiverit, andme-töötlusseadet, püsi- ja muutmälu, näidiku juhtsõlme, nuppude juhtsõlme jne. Kui kasutada sellise seadme koostamisel üksnes elementaarseid integraalskeeme, millest igaüks täidab ainul nimetatud lihtülesannet, oleks tulemus päris suur aparaat. Selline meetod sobib küll hästi näiteks prototüübi loomiseks, kuid mitte tootmiseks, sest kliendid eelistavad väiksemaid ja kompaktsemaid seadmeid. Integraalskeemide tootmistehnikate arengu tulemusel hakati kombineerima mitmeid erinevaid loogikaskeeme ühte kompaktsesse lahendusse, mida nimetatakse mikrokontrolleriks.

Mikrokontrollerid on olemas peaaegu igas tootes või seadmes, mida kasutaja saab mõjutada. Igal seadmel, millel on kaugjuhtimispult või LED/LCD-ekraan ja klaviatuur, on olemas sisemine mikrokontroller. Levinud toodete hulka, milles kasutatakse kindlasti mikrokontrollerit, kuuluvad näiteks autod, mikrolaineahjud, telerid, stereosüsteemid, videokaamerad, digitaal-kaamerad, pesumasinad, laserprinterid, helistaja ID tuvastusega telefonid, mobiiltelefonid, külmikud jne.

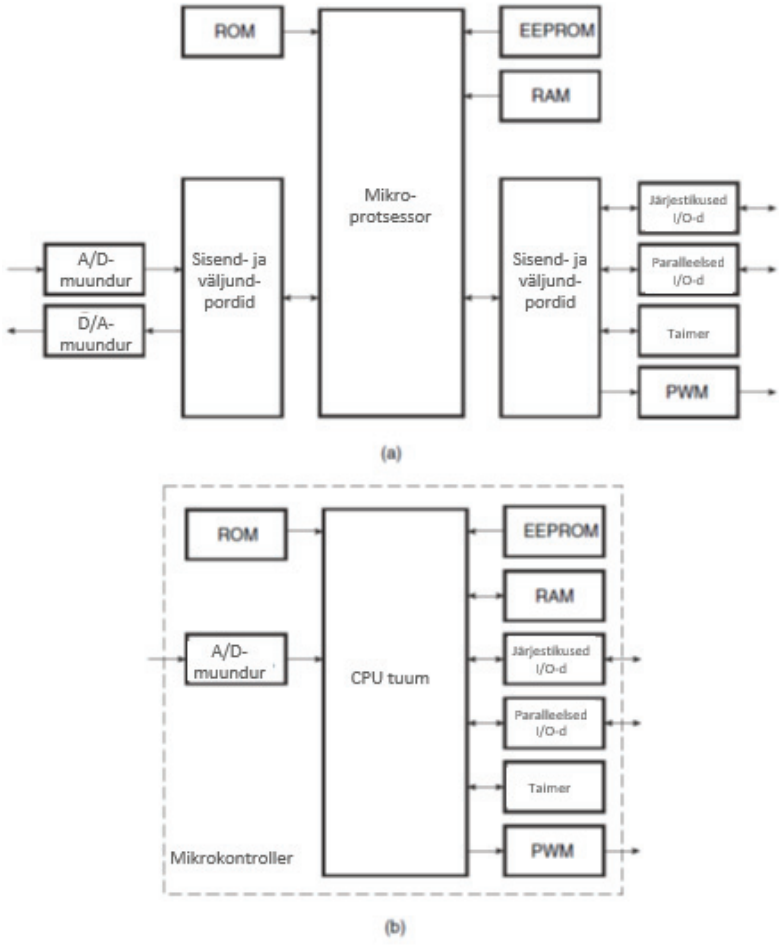
Kuid vaatamata sellele, et mikrokontrollerid on väga mugavad ja võimsad seadmed, vajame me suurte andmehulkade töötlemise vajaduse korral siiski midagi veelgi võimsamat. Teisest küljest pole sageli tarvis niivõrd universaalset lahendust, vaid protsessorit, mis töötaks peaaegu täielikult digitaalmaailmas. Sellist seadet nimetatakse mikroprotsessoriks. Eesliide „mikro“ tuleneb eelkõige kiibi füüsilisest arhitektuurist ja selle väiksusest.

Mikroprotsessor on mikroarvutisüsteemi süda. Tegelikult moodustab see iga mikroarvuti keskse töötlemisseadme ja seda nimetatakse konkreetselt kiiparvutiks. Siin peatükis vaadel-dakse mikroprotsessorite aluspõhimõtteid ja rakendustega seotud aspekte, nagu näiteks sisemisi omadusi, viikude konfiguratsiooni, sisearhitektuuri, käsustikku jt populaarsetel 8-bitiste, 16-bitiste, 32-bitiste ja 64-bitiste mikroprotsessorite mudelitel, mille on valmistanud rahvusvahelised suurfirmad, nagu INTEL, MOTOROLA ja ZILOG.

6.1 Mikrokontrollerid

Mikrokontrollerit võib lugeda spetsiaalseks kiiparvutiks. Sõna „mikro“ näitab, et tegemist on väikese seadmega, ning sõna „kontroller“, et seadet võib kasutada objektide, protsesside või sündmuste ühe või mitme funktsiooni juhtimiseks. Seda nimetatakse ka manuskontrolleriks, sest mikrokontrollerid on tihti lisatud seadmetesse või süsteemidesse, mida nad juhivad.

Mikrokontroller sisaldab lihtsustatud protsessorit, teatud mälu (ROM/RAM, püsi- ja muutmälu), I/O-porte ja välisseadmeid, näiteks loendureid/taimereid, analoog-digitaalmuundureid jt, mis on kõik integreeritud ühele kiibile. Just selline protsessori ja väliskomponentide olemasolu ühel kiibil eristab seda mikroprotsessoril põhinevast süsteemist. Mikroprotsessor on üksnes töötlemisseade mõnede üldotstarbeliste registritega.



Joonis 6.1 Mikroprotsessor ja mikrokontroller: (a) mikroprotsessori konfiguratsioon; (b) mikrokontrolleri konfiguratsioon.

Mikroprotsessoril põhineval süsteemil on ka RAM, ROM, I/O-pordid ja muud välisseadmed, mis teevad sellest toimiva tervikseadme, kuid kõik need komponendid asuvad mikroprotsessori kiibist väljaspool. Kui mikroprotsessoril põhinev süsteem on üldotstarbeline süsteem, mida saab programmeerida teostama ükskõik millist paljudest sellele jõukohastest

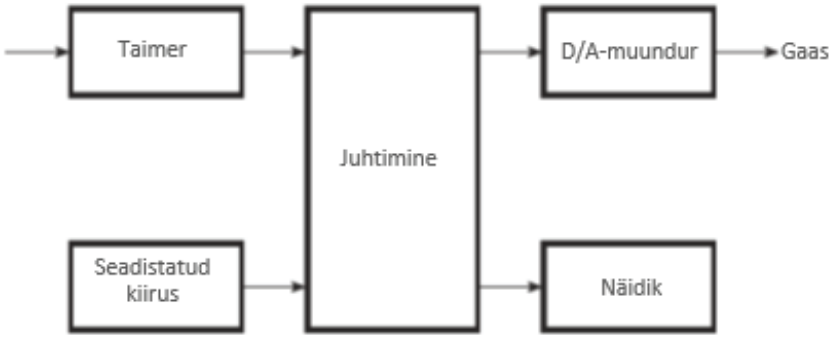
funktsioonidest, siis mikrokontrollerid on ette nähtud ühe ülesande jaoks ja kasutavad üht konkreetset programmi. See programm on salvestatud püsimälusse ja üldjuhul ei muutu.
Joonisel 6.1 on täiendavalt kujutatud peamine erinevus mikroprotsessoril põhineva süsteemi ja mikrokontrolleri vahel. Joonisel toodud kahe plokiga skeemist on näha, et kui mikroprotsessoril põhinev süsteem vajab töötamiseks täiendavaid kiipe, siis mikrokontrolleris on kõigi nende lisakiipide funktsioonid integreeritud samale kiibile.

6.1.1 Rakendused

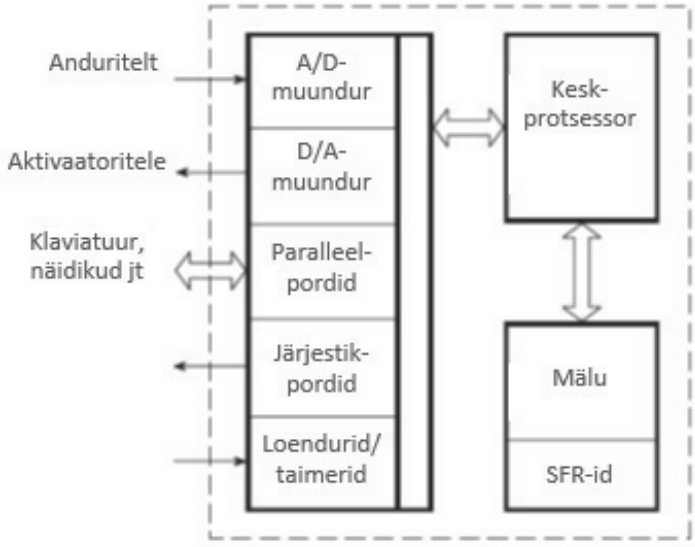
Mikrokontrollerid sisalduvad uskumatult paljudes erinevates toodetes, sealhulgas autodes, meelelahutus- ja tarbekaupades, katse- ja mõõteseadmetes ning lauaarvutites, kui nimetada vaid mõningaid peamisi kasutusalasid.
Igal seadmel või süsteemil, mis mõõdab, salvestab, juhib, arvutab või kuvab informatsiooni, on kindlasti olemas mikrokontroller seadme või süsteemi osana. Autodes võidakse kasutada üht või mitut mikrokontrollerit mootoril, püsikiiruse hoidiku süsteemis (joonis 6.2), pidurisüsteemis jne. Katse- ja mõõteseadmetes, nagu näiteks signaaligeneraatorites, multimeetrites, sagedusloendurites, ostsilloskoopides vms, kasutatakse mikrokontrollereid funktsioonide lisamiseks, et saavutada näiteks võimet salvestada mõõtetulemusi, kuvada teateid ja lainekujusid ning luua ja salvestada kasutajaprogramme. Lauaarvutites kasutatakse mikrokontrollereid välisseadmetes, näiteks klaviatuurides, printerites, modemites jt. Tarbe- ja meelelahutuskaupades, nagu näiteks telerites, videomagnetofonides, videokaamerates, mikrolaineahjudes, pesumasinates, helistaja ID tuvastusega telefonides, mobiiltelefonides, kliimaseadmetes, külmikutes ja paljudes teistes toodetes, kasutatakse mikrokontrollereid uute juhtimis- ja tööfunktsioonide lisamiseks.

6.1.2 Mikrokontrolleri sisemus

Joonisel 6.3 on toodud plokkskeem erinevate mikrokontrolleri komponentidega. Nagu eespool märgitud, on mikrokontroller integraalkiip, millele lisatud CPU, mälu, I/O-pordid ja teatud välisseadmed muudavad selle terviklikult toimivaks seadmeks. Joonisel 6.3 kujutatud tavapärasel mikrokontrolleril on järgmised komponendid: keskprotsessor (CPU), muutmälu (RAM), püsimälu (ROM), erifunktsiooniga registrid ja väliskomponendid, sealhulgas järjestik- ja/või paralleelpordid, taimerid ja loendurid, analoog-digitaalmuundurid (A/D) ja digitaal-analoogmuundurid (D/A).



Joonis 6.2 Mikrokontrolleril põhinev auto püsikiiruse hoidiku süsteem.



Joonis 6.3 Mikrokontrolleri sisemus.

6.1.3 Keskprotsessor (CPU)

Keskprotsessor töötleb programmi. See täidab programmi mälus salvestatud käske, millele osutab kellasignaaliga sünkroniseeritud programmiloendur. Protsessori keerukus võib varieeruda lihtsatest kaheksabitistest protsessoritest kuni keerukate 32-bitiste või isegi 64-bitiste protsessoriteni.

Mõnede levinud mikrokontrollerite hulka, milles kasutatakse kaheksabitiseid protsessoreid, kuuluvad 68HC11 (Freescale Semiconductor – varem Motorola osa), 80C51-mikrokontrollerite perekond (Intel ja Dallas Semiconductor), Zilog-eZ8 ja Zilog-eZ80 (Zilog) ning XC800 (Infineon). Mikrokontrollerite hulka, milles kasutatakse 16-bitiseid protsessoreid, kuuluvad 8096-perekond (Intel), 68HC12 ja 68HC16 (Freescale Semiconductor), F2MC-perekond (Fujitsu) ja XC166-perekond (Infineon). Mikrokontrollerite hulka, milles kasutatakse 32-bitiseid protsessoreid, kuuluvad 683XX, MPC 860 (PowerQUICC), MPC 8240/8250 (PowerQUICC-II) ja MPC 8540/8555/8560 (PowerQUICC-III) (kõik Freescale Semiconductor), TRICORE-perekond (Infineon) ja FR/FR-V-perekond (Fujitsu).

6.1.4 Muutmälu (RAM)

Muutmälu kasutatakse vahetulemuste ja teiste ajutiste andmete säilitamiseks programmi täitmise ajal. Tavaliselt on mikrokontrollerite muutmälu maht mõnisada baiti. Näiteks mikrokontrollerite 8XC51/80C31, 8XC52/80C32 ja 68HC12 muutmälu maht on vastavalt 128, 256 ja 1024 baiti.

6.1.5 Püsimälu (ROM)

Püsimälus säilitatakse programmikäske ja püsiandmeid. Mikrokontrollerites kasutatakse selleks üht või mitut järgmistest mälutüüpidest: ROM (maskprogrammeeritud ROM), PROM (ühekordselt programmeeritav ROM, mis pole ümberprogrammeeritav), EPROM (ümberprogrammeeritav ja tavaliselt UV-kustutatav), EEPROM (ümberprogrammeeritav, elektriliselt kustutatav, baidikaupa kustutatav) ja välkmälu (sarnane EEPROM-tehnoloogiaga). Mikrokontrolleritel tüübinumbritega 8XC51, 8XC51FA ja 8XC52 on 4K, 8K ja 16K ROM. Teise näitena on 68HC12 16-bitisel mikrokontrolleril 32K EEPROM-välkmälu, 768 baiti EEPROM-mälu ja 2K mahuga kustutuskindel buudiplokk.

6.1.6 Erifunktsiooniga registrid

Erifunktsiooniga registrid juhivad erinevaid mikrokontrolleri funktsioone. Neil registritel on kaks kategooriat. Esimesse kuuluvad registrid, mis on ühendatud juhtmega keskprotsessoriga ega moodusta tingimata adresseeritava mälu osa. Neid registreid kasutatakse programmivoo ja aritmeetiliste funktsioonide juhtimiseks. Näidete hulka kuuluvad olekuregister, programmiloendur, pinuviit jt. Ent nende registrite eest hoolitsevad kõrgtasandi keelte kompilaatorid ja seetõttu ei pea kõrgkeelte, nagu näiteks C, Pascali jt programmeerijad nende pärast muretsema. Teise kategooriasse kuuluvad registrid, mida vajavad väliskomponendid. Nende registrite sisu võimaldab näiteks seadistada taimerit, aktiveerida jadaedastust vms. Näiteks erifunktsioonide registritesse, mis on saadaval mikrokontrollerite 80C51-perekonnal (80C51, 87C51, 80C31), kuuluvad programmiloendur, pinuviit, RAM-aadressiregister, programmi aadressiregister ja PC-inkrementer.

6.1.7 Väliskomponendid

Enamikul mikrokontrolleritel on olemas väliskomponendid, nagu näiteks analoog-digitaal-muundurid, I/O-pordid, taimerid ja loendurid jt. Need komponendid teostavad funktsioone, mida võib järeldada nende vastavatest nimetustest. Lisaks sellele on teatud spetsiifiliste või keerukamate funktsioonide jaoks ette nähtud mikrokontrolleritel paljud täiendavad kiip-välisseadmed. Neist levinumad on pikkusmodulaator, jadasideliides (SCI), jadavälisliides (SPI), integraalskeemide vaheline (I2C) kahesooneline sideliides, RS 232-(UART) port, infrapunaport (IrDA), USB-port, kontrollervõrk (CAN) ja lokaalne ühendusvõrk (LIN). Neid välisseadmeid kirjeldatakse lühidalt alljärgnevates lõikudes.

6.1.7.1 Analoog-digitaalmuundurid

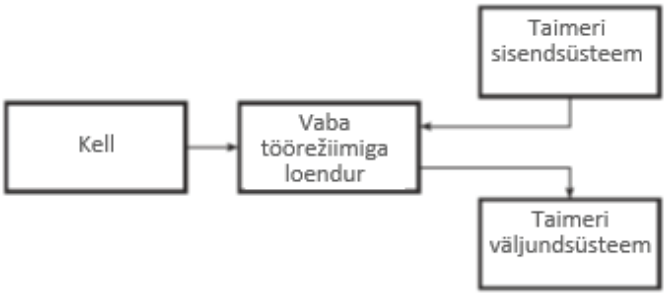
Analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid tagavad liidese analoogseadmetega. Näiteks analoog-digitaalmuundur tagab liidese mikrokontrolleri ja andurite vahel, mis edastavad juhitavate tegelike füüsiliste parameetrite analoogseid elektrilisi ekvivalente.
Digitaal-analoogmuundur seevastu tagab liidese mikrokontrolleri ja aktiveerimisseadmete vahel, mis teostavad juhtfunktsiooni. Näiteks mudelitel 68HC11 ja 68HC12 firmalt Freescale Semiconductor on kaheksa kanaliga kaheksabitised analoog-digitaalmuundurid. Digitaal-analoogmuunduri töö mikrokontrollerites tagab pikkusmodulaatori (PWM) ja sellele järgneva filtri kombinatsioon. Näiteks mudelil 68HC12 on 16-bitine/kahe kanaliga kiip-PWM.

6.1.7.2 I/O-pordid

I/O-pordid tagavad liidese mikrokontrolleri ja I/O välisseadmete vahel, nagu näiteks klaviatuur, näidik jt. Mikrokontrollerite 80C51 perekonnal on neli kaheksabitist I/O-porti. Mikrokontrolleril 68HC11 on 38 üldotstarbelist I/O-viiku, sealhulgas 16 kahesuunalist I/O-viiku, 11 ainult sisendviiku ja 11 ainult väljundviiku.

6.1.7.3 Loendurid/taimerid

Loendurid/taimerid teostavad tavaliselt järgnevat kolme funktsiooni. Neid kasutatakse ajaloenduseks ja/või ajaintervalli mõõtmiseks sündmuste vahel, sündmuste arvu loenda-miseks ning boodikiiruse loomiseks järjestikportide jaoks. Mikrokontrolleril 68HC11 on 16-bitine taimerisüsteem, mis sisaldab kolme sisendhõivekanalit, nelja väljundvõrdluskanalit ja üht lisakanalit, mille võib konfigureerida sisend- või väljundkanalina. Teisel populaarsel mikrokontrolleril PIC 16F84 on kaheksabitine taimer/loendur koos kaheksabitise sageduse jagajaga.
Joonisel 6.4 on toodud mikrokontrolleri taimeri alamsüsteemi üldistatud plokkskeem. Kellasignaal juhib kõiki mikrokontrolleri ajastustoiminguid. Loendurit kasutatakse nõnda väliste ajastussündmuste fikseerimiseks (taimeri sisendplokiga) ja ajastussündmuste loo-miseks välisseadmetele (taimeri väljundplokiga). Esimest protsessi kasutatakse tavaliselt perioodiliste signaalide sageduse ja ajaintervalli mõõtmiseks, teist aga juhtsignaalide loo-miseks välisseadmetele.

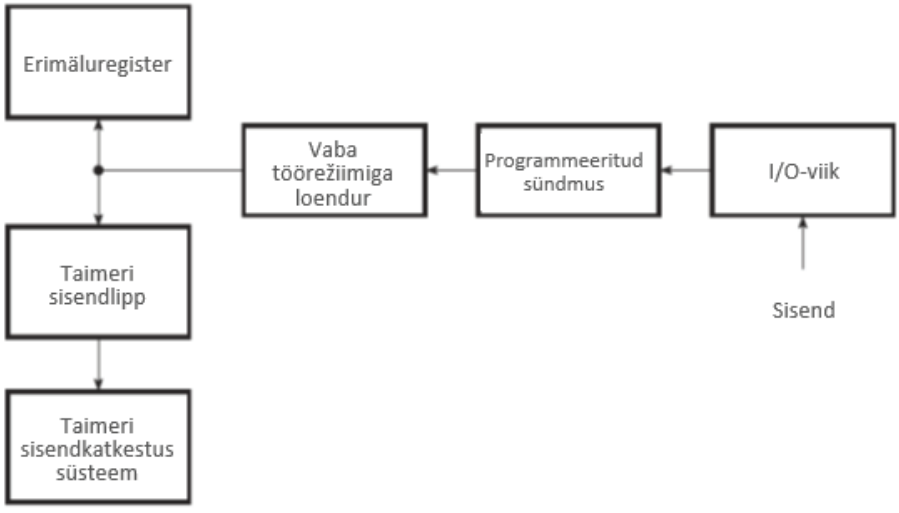


Joonis 6.4 Taimeri alamsüsteem

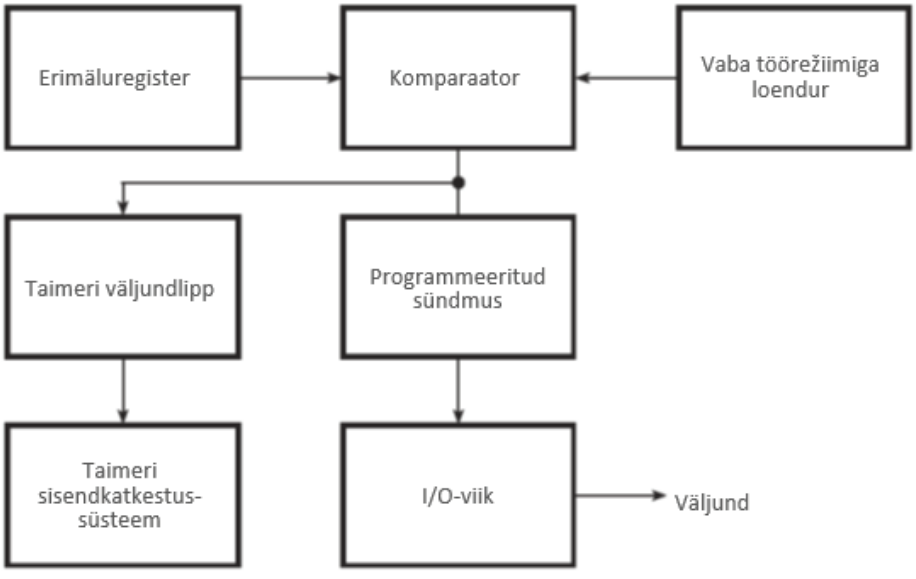
Siinkohal võib märkida, et fikseeritav või loodav ajastussündmus kujutab endast üksnes muutust loogika olekus ühel mikrokontrolleri I/O-viigul, mis on konfigureeritud sisendviiguna sündmuse fikseerimise korral ja väljundviiguna selle loomise korral. Joonisel 6.5 on toodud joonisel 6.4 kujutatud taimeri sisendploki plokkskeem. Nagu joonisel näidatud, fikseerib loendur sisendajasündmuse selle sisu vormis sündmuse toimumise ajal. Tegelikult fikseerib loendur sündmuse suhtelise aja, sest loendur on vaba töörežiimiga. Absoluutseid ajastus-väärtusi saab arvutada vastava süsteemi kella väärtuste põhjal. Võtame näiteks mikro-kontrolleri 10 MHz kellaga ja 16-bitise loenduri/taimeri alamsüsteemiga. Sellel loenduril kulub 6,5536 ms väärtuste 0000 kuni FFFF loendamiseks (kuueteistkümnendsüsteemis). Oletame, et soovitakse leida perioodilise signaali sagedus, mille järjestikused tõusvad või langevad servad esinevad väärtustel 0010 ja 0150. 0010 ja 0150 vastavad väärtustele 16 ja 336 kümnendsüsteemis. Seega on ajaintervall kahe järjestikuse servaväärtuse vahel 320 × 0,1 = 32 µs. Signaalisagedus on seega (1/32) MHz = 31,25 kHz.

Joonisel 6.6 on toodud joonisel 6.4 kujutatud taimeri väljundploki plokkskeem. Skeem on enesestmõistetav. Ka siin saab vaba töörežiimiga loenduri väärtusi kasutada väljundviigu soovitud loogika oleku muutuste aja sünkroniseerimiseks. Seda funktsiooni võib kasutada ka iga soovitud töötsükli perioodilise impulsi või signaali loomiseks.

Taimeri sisend- ja väljundtoimingute jaoks peab mikrokontroller seadistama teatud eriregistrid. Taimeri sisendtoimingu jaoks, nagu näidatud joonisel 6.5, on vaja registreid sündmuse programmeerimiseks (SUUR loogika või VÄIKE loogika), füüsilise I/O-viigu konfigureerimiseks sisendviiguna ja ka parameetrite seadistamiseks seotud katkestile, kui seda kasutatakse. Teist registrit kasutatakse loenduri väärtuse fikseerimiseks sündmuse toimumise ajal.



Joonis 6.5 Taimeri väljundalamsüsteem.



Joonis 6.6 Taimeri väljundalamsüsteem

Taimeri väljundtoimingu korral, nagu näidatud joonisel 6.6, peab füüsiline I/O-viik olema konfigureeritud väljundviiguna, sündmus peab olema programmeeritud ning ajastusväärtus peab olema seadistatud eriregistris, et määrata kindlaks, millal peab programmeeritud

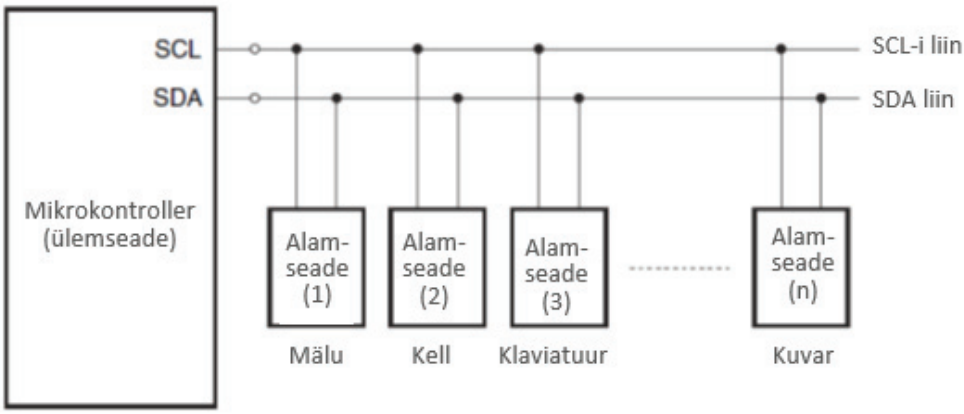
sündmus esinema väljundviigul. Taimeri väljundsüsteemil on lisaks seonduv katkesti, mida saab vajaduse korral kasutada.

6.1.7.4 Järjestiksideliidesed

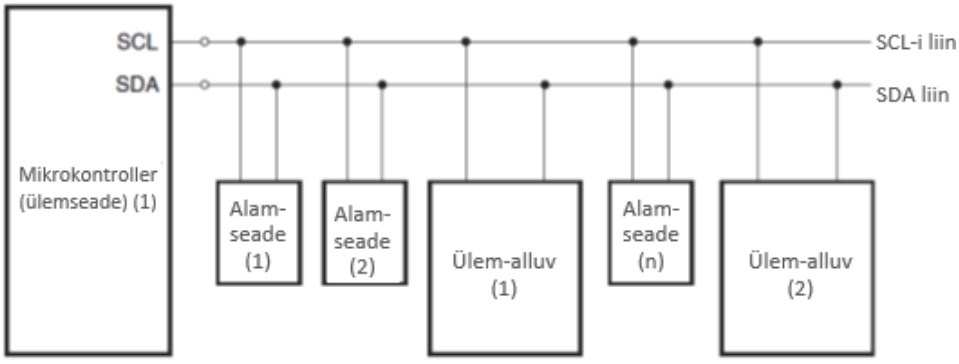
Olemas on kaht tüüpi järjestiksideliideseid, täpsemalt asünkroonsed sideliidesed ja sünkroonsed sideliidesed. Asünkroonses sideliideses kasutatakse alg- ja lõppbiti protokolli saatja ja vastuvõtja sünkroniseerimiseks. Alg- ja lõppbitid asuvad igas andmebaidis. Võrreldes sünkroonse sideliidesega võimaldab see aeglasemat andmeülekande kiirust. Seda nimetatakse ka universaalseks asünkroontransiiveriks (UART) või jadasideliideseks (SCI). Sünkroonses sideliideses kasutatakse sünkroniseeritud kella iga biti edastamiseks ja vastuvõtmiseks. Saatja ja vastuvõtja kella sünkroniseerimiseks kasutatakse tavaliselt täiendavat kellaliini, mis ühendab saatjat ja vastuvõtjat. See pole ette nähtud kaugside jaoks. Seda nimetatakse ka jadavälisliideseks (SPI). Mikrokontroller 68HC11 võimaldab kasutada asünkroonset mittenullitavat jadasideliidest ja ka sünkroonset jadavälisliidest. Mikrokontrollerite 80C51-perekonnal on UART-täisdupleksliides.
Kuna olemas on suurel hulgal välisseadmeid sidepidamiseks RS-232-ühilduva liidesega, mis on jadaliidese standard, millega on seotud erinevad aspektid, sealhulgas elektrilised, mehaanilised, funktsionaalsed ja protseduurilised spetsifikatsioonid, on saadaval arvukalt erinevaid kiipe mikrokontrolleri signaalide teisendamiseks RS-232-ühilduvateks signaalideks. Need kiibid võimaldavad liidestamist kahesuunalise sidesüsteemiga.

6.1.7.5 Integraalskeemidevaheline (I2C) siin

Integraalskeemidevaheline (I2C) siin on kahesooneline aeglase kuni keskmise kiirusega jadasideliides, mille töötas välja Philips Semiconductors 1980. aastate alguses kiipidevahelise side jaoks. I2C-siini kaht soont nimetatakse kellasooneks (SCL) ja andmesooneks (SDA). SDA-soones liiguvad andmed, SCL-soon aga sünkroniseerib saatja ja vastuvõtja andmeülekande ajal.
See on sisse töötatud tööstusliku standardi sideprotokoll, mida kasutatakse erinevates elektroonikatoodetes ning mis on eriti eelistatud madala hinna ja suure võimsuse tõttu. Seda kasutavad paljud pooljuhtide ja süsteemide tootjad, kes pakuvad erinevaid elektroonika-tooteid, sealhulgas sisend- ja väljundseadmeid, erinevat tüüpi andureid, mäluseadmeid, kuvareid, andmesisestusseadmeid jt.
I2C-seadmetel on ülema-alluva hierarhia. Neid liigitatakse ülemseadmeteks (seade, mis algatab sõnumi) või alamseadmeteks (seade, mis vastab sõnumile). Seade võib olla ainult ülem- või alamseade, või lülitatav ühest olekust teise olenevalt rakenduse vajadusest. Ühes võimalikus ülema-alluva konfiguratsioonis on üks ülemseade (nt mikrokontroller) ühendatud paljude alluvatena konfigureeritud kiipidega, nagu on näidatud joonisel 6.7. Iga I2C alamseade on tuvastatav ainulaadse aadressiga. Kui ülemseade saadab sõnumi, sisaldab see ettenähtud alamseadme aadressi sõnumi alguses.



Joonis 6.7 Ülema-alluva konfiguratsioon – üks I2C ülemseade ja mitu alamseadet.



Joonis 6.8 Ülema–alluva konfiguratsioon – mitme ülemseadme toega süsteem.

I2C liides toetab ka mitut ülemseadet samal ajal. Siinil on spetsiaalne funktsioon, mis võimaldab sellel lahendada signaalikonflikte, kui kaks või enam ülemseadet üritavad korraga siinil suhelda. I2C ülemseade, mis tuvastab konflikti ehk otsustusvea, katkestab siini kasutuse, mis võimaldab teisel ülemseadme saadetud sõnumil siini segamatult läbida. Joonisel 6.8 on näidatud üks selline mitme ülemseadme toega süsteem.

6.1.7.6 Kontrollervõrgu (CAN) siin

Kontrollervõrgu (CAN) siin on tugev jadasideliides, mida kasutatakse paljudes erinevates sisemistes ja ka automaatsetes juhtrakendustes. Selle võttis kasutusele Bosch 1986. aastal autode sisevõrkude jaoks. CAN-protokoll standardiseeriti rahvusvaheliselt 1993. aastal standardina ISO-11898-1 ning see sisaldab seitsmekihilise ISO/OSI-etalonmudeli andmelingikihti. Protokoll võimaldab teostada kaht sideteenust, täpsemalt andmekaadrite edastust (sõnumite saatmist) ja kaugedastuspäringut (sõnumi tellimist). Kõiki teisi teenuseid, nagu näiteks veasignaale, ebakorrektsete kaadrite automaatset kordusedastust jms, teostavad CAN-kiibid. Järgnevas on loetletud mõned CAN-protokolli olulised omadused. See tagab mitme ülemseadme hierarhia. See võimaldab kasutajal koostada intelligentseid varuga süsteeme. Selles kasutatakse leviedastuse sidemeetodit. Sõnumi saatja teostab edastuse kõikidele siiniga ühendatud seadmetele. Kõik seadmed loevad sõnumit ja dekodeerivad selle, kui see on neile mõeldud. See funktsioon tagab andmete terviklikkuse. Lisaks tagavad andmete terviklikkuse veatuvastusmehhanismid ja ebakorrektsete sõnumite automaatne kordusedastus.
CAN-protokoll tagab aeglase kiirusega veakindla edastuse kiirusega 125 kbps kuni 40 m kaugusele, mis võib toimuda ühe juhtme kaudu. Edastus ilma veakindluseta on tagatud kiirusega 1 Mbps kuni 40 m kaugusele. Edastuskiirus 50 kbps on võimalik kaugusele kuni 1 km.

6.1.7.7 Lokaalühendusvõrgu (LIN) siin

Lokaalühendusvõrgu (LIN) siin on leviedastuse jadavõrk, mida kasutatakse CAN-siini odava alamvõrguna intelligentsete andurite või aktiveerimisseadmete integreerimiseks kaasaegsetes sõidukites. See sisaldab üht ülemseadet (tavaliselt keskmise võimsusega mikrokontrollerit) ja kuni 16 alamseadet (väiksema võimsusega odavamad mikrokontrollerid või rakendusspetsiifilised mikroskeemid). Sellel puudub konfliktituvastuse funktsioon ning seetõttu algatab kõik sõnumid ülemseade, sõnumi identifikaatorile vastab aga üks alamseade. Mitu sellist LIN-võrku võivad kõik olla ühendatud CAN-i kõrgema kihi võrguga vastavate ülemseadmete kaudu.

6.1.8 Välisseadmete liidestamine mikrokontrolleriga

Selles punktis kirjeldatakse lühidalt mõnede levinud välisseadmete liidestamist mikrokontrolleriga. Vaadeldavate välisseadmete hulka kuuluvad LED-tuled, elektromehaanilised releed, seitsme segmendiga näidikud, klaviatuurid, LCD-näidikud ning analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid. Käsitlemist leiavad ainult põhiomadused. Tarkvara alamprogrammide detailne kirjeldus ei ole siinse raamatu teema.

6.1.8.1 LED-seadmete liidestamine

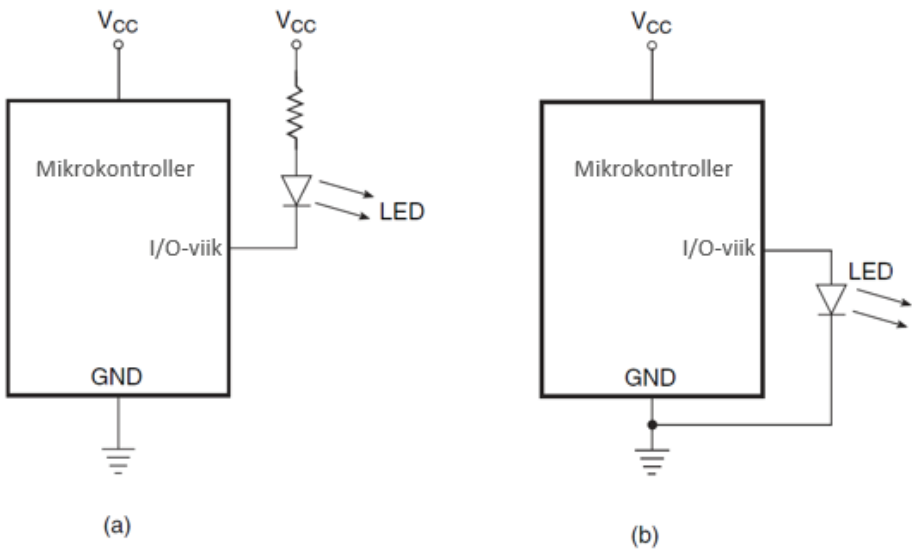
Levinud konfiguratsioon LED-seadme ühendamiseks mikrokontrolleriga on toodud joonisel 6.9(a). Tuli põleb, kui mikrokontrolleri viigu väärtus on VÄIKE ning ei põle, kui viigu väärtus on SUUR. Tuled ühendatakse selliselt, kuna mikrokontrollerite vooluvähendusvõime on

suurusjärgus mõnikümmend milliamprit ning vooluhankevõime mikroamprite suurusjärgus. Tulesid läbiva voolu piiramiseks kasutatakse takistit. Takistuse väärtus valitakse järgmise valemi põhjal:

$$R = (VCC - VLED) / I$$

kus VLED on tuld läbiv pinge ja I on voolutugevus.

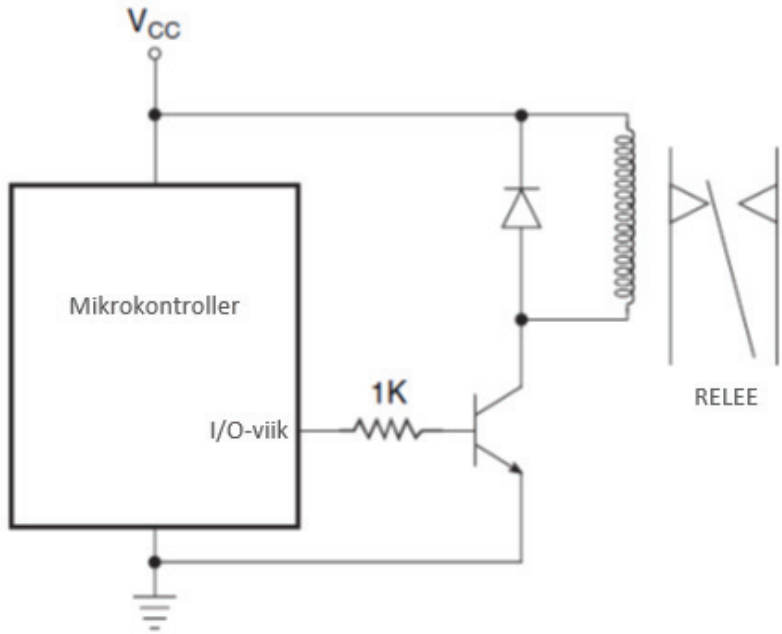
Tavapärased VLED ja I väärtused on vastavalt 1,5 V ja 20 mA. Kui mikrokontrolleri vooluhankevõime on tule otselülituseks piisav, ühendatakse tuli mikrokontrolleriga nii, nagu on näidatud joonisel 6.9(b). Sellisel juhul tuli põleb, kui mikrokontrolleri viigu väärtus on SUUR.



Joonis 6.9 LED seadmete liidestamine mikrokontrolleriga.

6.1.8.2 Elektromehaaniliste releede liidestamine

Joonisel 6.10 on toodud tavapärane ühendusskeem elektromehaanilise relee liidestamiseks mikrokontrolleriga. Releepoolile soovitud voolu tagamiseks kasutatakse NPN-transistorit, sest mikrokontroller ei suuda releed otse käivitada. Tarvis on ka vabajooksudioodi, sest induktorit läbivat voolu pole võimalik koheselt nullida. Kui mikrokontrolleri viik seadistatakse väärtusele SUUR, lülitub transistor sisse. Vool liigub läbi releepooli ja kontakt suletakse.



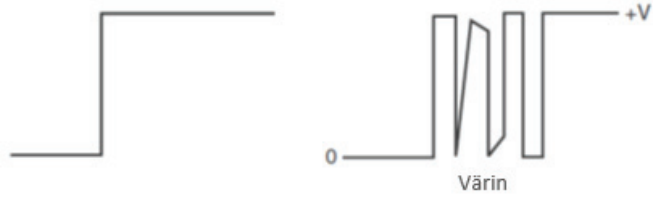
Joonis 6.10 Elektromehaanilise relee liidestamine mikrokontrolleriga.

Kui mikrokontrolleri viik on väärtusel VÄIKE, siis lülitatakse transistor välja ning induktorvool liigub läbi vabajooksuga dioodi ja sumbub aeglaselt nullväärtuseni.

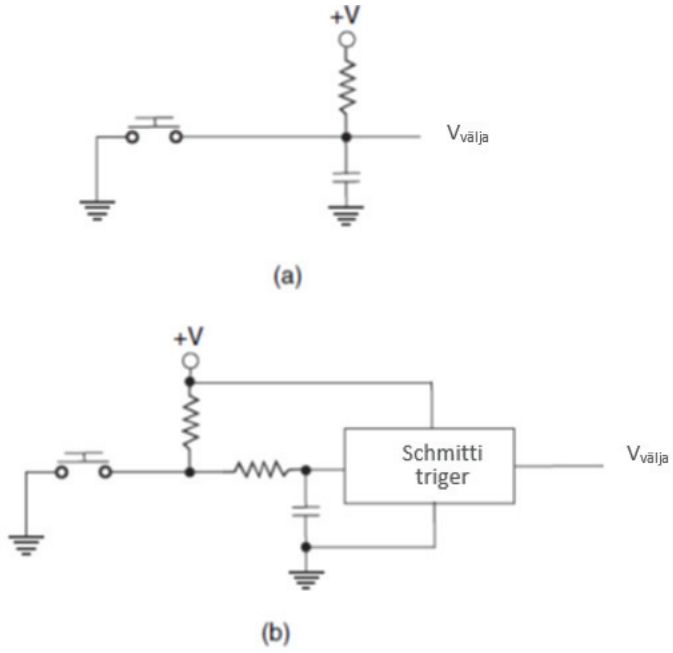
6.1.8.3 Klaviatuuride liidestamine

Klaviatuure kasutatakse andmete, väärtuste vms sisestamiseks mikrokontrolleri süsteemi. Üldjuhul on need saadaval kolmes konfiguratsioonis, täpsemalt lineaarklaviatuurid, maatriksklaviatuurid ja kodeeritud klaviatuurid. Lineaarklaviatuure kasutatakse juhul, kui on vaja tunnetada väga vähe klahve. Kodeeritud klaviatuure kasutatakse tavalisel telefonirakendustes. Need on kvaliteetsed ja vastupidavad klaviatuurid, mis võimaldavad kergesti tuvastada mitme klahvi korraga vajutamist. Neid kasutatakse, kui klahvide arv on 16 või väiksem, sest need on väga kallid. Kõige levinum on maatriksklaviatuur, kus klahvid paiknevad maatriksina ning sama rea ja veeru klahvidel on samad pöördusliinid. Kui klahvide arv on suurem kui 10, kasutatakse väga tihti maatriksklaviatuure. Maatriksklaviatuuri liidestamist mikrokontrolleriga kirjeldatakse järgnevates lõikudes.
Klaviatuuride ühendamisel mikrokontrolleriga tuleb arvesse võtta järgmisi tegureid.
1. Kontakti värin. Kontakti värin hõlmab mitmeid kontakti võnkeid klahvi vajutamisel (joonis 6.11). Kvaliteetsete klaviatuuride värinaperiood on 1–5 ms, odavamatel aga mitukümmend millisekundit. Kui värinat ei arvestata, reageerib mikroprotsessor nii, nagu oleks klahvi vajutatud ja lahti lastud mitu korda, tegelikult aga vajutati seda vaid ühe korra. Kontakti värin

eemaldatakse riistvara- või tarkvaraprogrammi abil, et vältida soovimatud mitme kontakti mõjud ning tagada, et vajutust loetakse üheksainsaks sisse- või väljalülitustoiminguks. Riistvara abil värina eemaldamiseks kasutatakse RC-lülitust [joonis 6.12(a)] või Schmitti trigerit [joonis 6.12(b)]. Värina eemaldamisel tarkvaraprogrammi abil jäetakse pärast klahvivajutust 20–50 ms pikkune viivitusaeg enne vastava klahvi programmi täitmist.



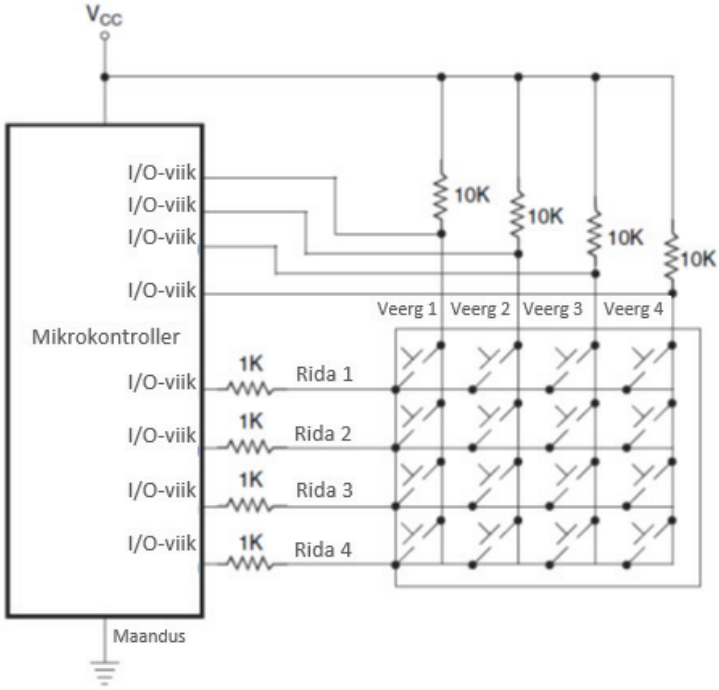
Joonis 6.11 Kontakti värin.



Joonis 6.12 (a) Värina eemaldamine riistvara abil, kasutades RC-lülitust, ja (b) värina eemaldamine riistvara abil, kasutades Schmitti trigerit.

2. Mitme klahvi vajutus. Mitme klahvi korraga vajutamisel tuleks täita ainult programme, mis vastavad määratud mitme klahvi vajutustele. Lisaks täidetakse esimene kehtiv klahvivajutuse skeem.

3. Klahvi all hoidmine. Klaviatuuri aktiveerimiseks on kaks viisi, täpsemalt kahe klahviga lukustus ja N-klahviga ülesõit. Kahe klahviga lukustuse korral võetakse arvesse ainult üht vajutatud klahvi. Täiendav vajutatud ja lahti lastud klahv koode ei genereeri. Süsteem on lihtne ja seda kasutatakse sageli. N-klahviga ülesõidu korral ignoreeritakse kõiki vajutatud klahve, kuni üks jääb alla vajutatuks.
Joonisel 6.13 on kujutatud 16 klahviga maatriksklaviatuuri ühendus mikrokontrolleriga. Siin on iga veeru ja rea pöördusliin ühendatud mikrokontrolleri viiguga. Veerud on tavaliselt SUUREL tasemel. Realiinid on konfigureeritud väljundliinidena ning veeruliine kasutatakse skaneerimisliinidena. Klahvi aktiveerimine fikseeritakse, saates VÄIKESE signaali igale reale ühekaupa läbi tarkvaraprogrammi rea 1, rea 2, rea 3 ja rea 4 liinide kaudu. Veeruliine kontrollitakse iga rea suhtes, et teha kindlaks, kas mõni tavaliselt SUUR veeruliin on VÄIKE. Kui veerg on VÄIKE, siis määratakse kindlaks, milline rea- ja veeruliin on VÄIKE, tuvastatakse klahv ning täidetakse sellele klahvile vastav programm.



Joonis 6.13 16 klahviga maatriksklaviatuuri ühendamine mikrokontrolleriga.

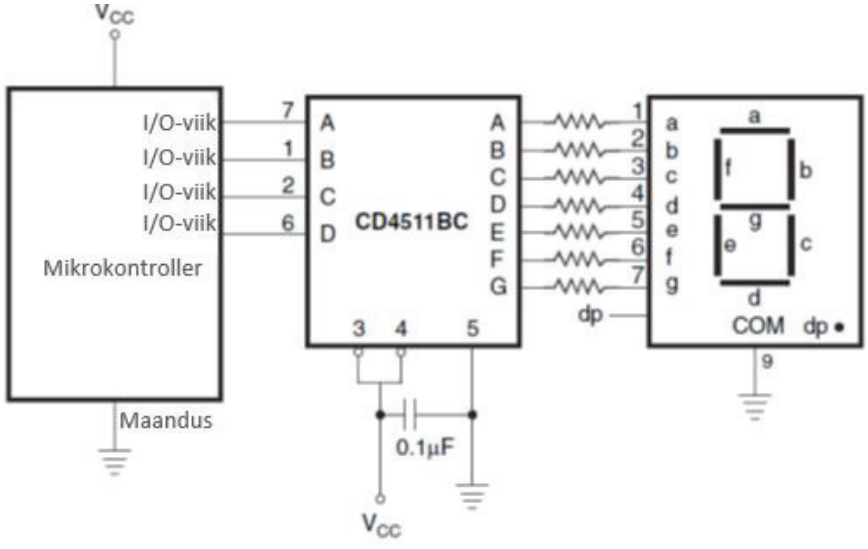
6.1.8.4 Seitsme segmendiga näidikute liidestamine

Seitsme segmendiga näidikud sisaldavad tavaliselt LED segmente, mis paiknevad kaheksakujulise skeemina, kus on üks ühine juhe (anood või katood) ja seitse individuaalset juhet iga segmendi jaoks. Kui ühine juhe on anood, nimetatakse seda ühiseks anoodiks (CA), kui aga ühine juhe on katood, nimetatakse seda ühiseks katoodiks (CC). Joonisel 6.14 on kujutatud üks

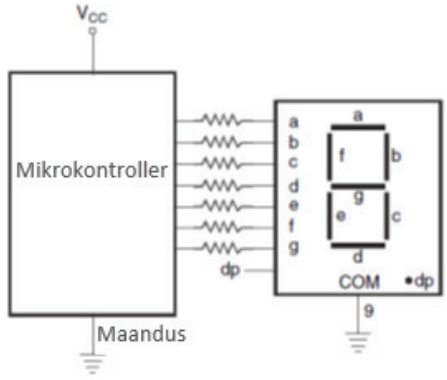
võimalik konfiguratsioon CC näidiku liidestamiseks mikrokontrolleriga. IC CD4511 on BCD seitsme segmendiga dekooderi/draiveri jaoks. Mikrokontroller edastab BCD-le toidet märgi alusel, mis kuvatakse 4511IC näidikule.

Seitsme segmendiga näidikuid saab ühendada ka otse ilma BCD kasutamiseta seitsme segmendiga dekooderiga. Sellisel juhul loob märgi seitsme segmendiga koodi mikrokontrolleri programm ise. Joonisel 6.15 on kujutatud CA-näidiku otselülitus.

Mitme näidiku kasutamise korral on näidikud ajaliselt multipleksitud. Inimsilm ei suuda tuvastada näidiku vilkumist, kui iga näidik süttib uuesti umbes iga 10 ms järel. 10 ms aeg jagatakse kasutatavate näidikute arvuga, et leida intervall iga näidiku värskendamise vahel. CC näidikute korral valitakse näidik, seades ühise katoodi loogikale VÄIKE, ning CA-näidikute korral valitakse näidik, seades ühise anoodi loogikale SUUR.

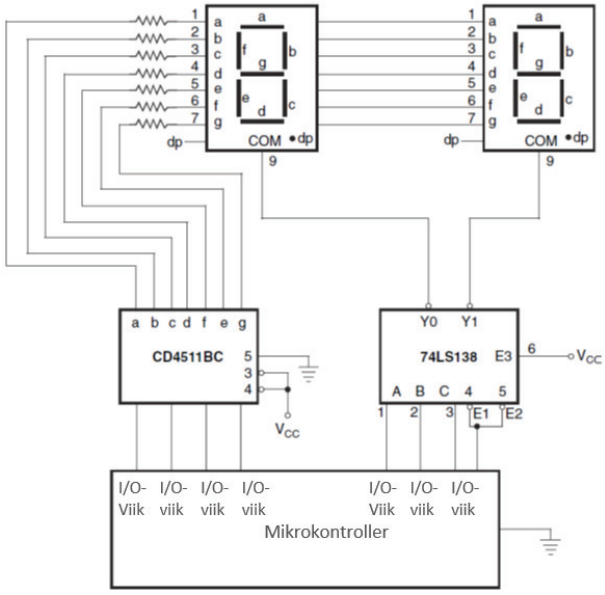


Joonis 6.14 Võimalikud konfiguratsioonid CC näidiku liidestamiseks mikrokontrolleriga.

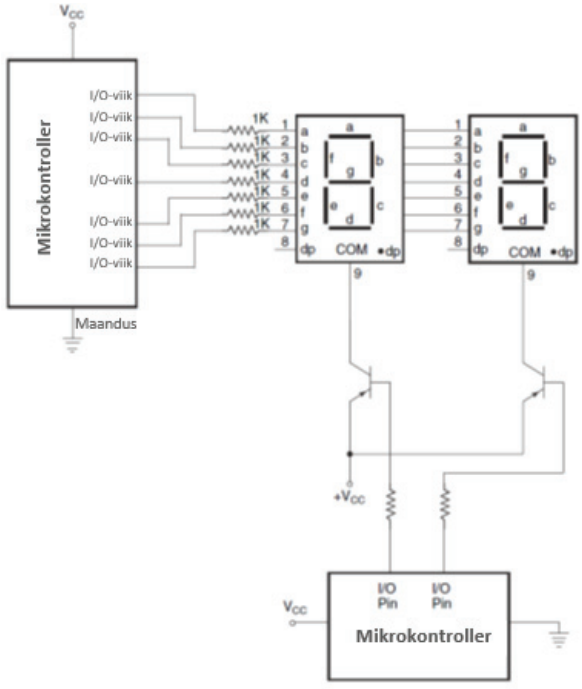


Joonis 6.15 Otselülitusühendus CA-näidikule.

Joonisel 6.16 on kujutatud kahe CC näidiku multiplekslülitus. IC 74138 on 3 kuni 8 liini dekooder, mida kasutatakse näidiku valimiseks. Joonisel 6.17 on kujutatud multipleksimist CA-näidikute korral otseühenduse teostamiseks ilma BCD kasutamiseta seitsme segmendiga draiveril.



Joonis 6.16 Kahe CC näidiku multiplekslülitus.



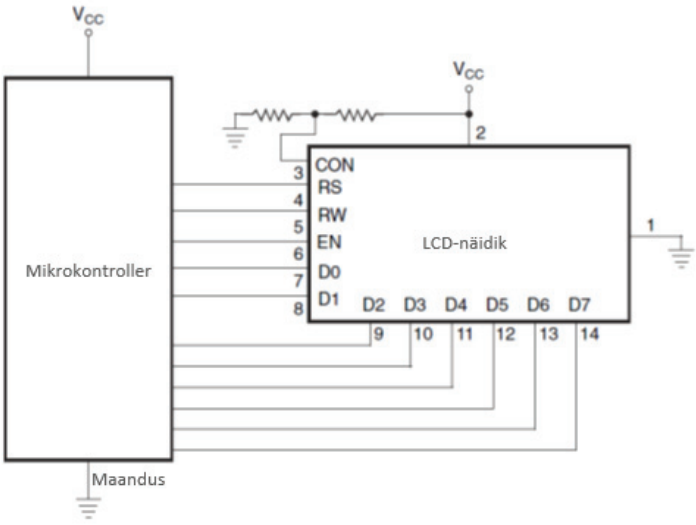
Joonis 6.17 Multiplekslülitus kahe CA-näidiku otseühenduseks.

6.1.8.5 LCD-näidikute liidestamine

Vedelkristallnäidikud võimaldavad kasutada paremaid kasutajaliideseid kui LED-näidikud, sest LCD-näidikutel on tekstisõnumeid märksa lihtsam kuvada. Lisaks on nende energiakulu LED-näidikutest tunduvalt väiksem. Teisalt on LED-näidikud parema intensiivsusega kui LCD-näidikud.

LCD-näidikud on tavaliselt saadaval 8 × 2, 16 × 2, 20 × 2 või 20 × 4 vormingus. 20 × 2 tähendab kaht rida, kummaski 20 tähemärki. Neil näidikutel on LCD-kontroller, mis näidikut käitab. Joonisel 6.18 on kujutatud LCD-näidiku liidestamine mikrokontrolleriga. Kasutusel on kolm juhtliini, täpsemalt EN (aktiveerimine), RS (registri valik) ja RW (lugemine/kirjutamine). EN-liini kasutatakse LCD teavitamiseks, et mikrokontroller saadab andmeid. Kui RS-liini olek on SUUR, sisaldavad andmed tekstiandmeid, mida tuleb LCD-näidikule kuvada. Kui RS on VÄIKE, käsitletakse andmeid LCD-mooduli käsuna. Kui RW-liini olek on VÄIKE, kirjutatakse andmesiini käsk LCD-le. Kui RW-liini olek on SUUR, loetakse andmeid LCD-lt. Tarkvaraprogramm lähtestab kõigepealt LCD ning selleks tuleb sel seadistada andmesiini laius, valida tähemärk, kirjatüüp vms, puhastada LCD, lülitada sisse LCD-moodul ja kursor, seadistada kursori positsioon jne.

Seejärel saadetakse kuvatavad andmed andmeliinidel ning kolme juhtsignaali kasutatakse LCD-näidiku nõuetekohase töö tagamiseks.



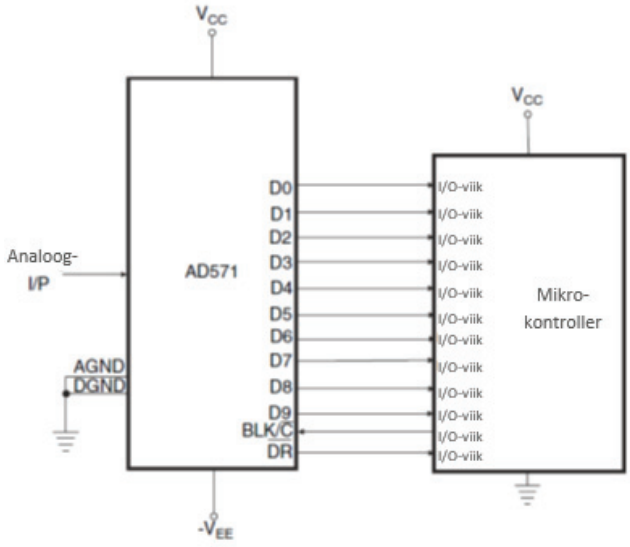
Joonis 6.18 LCD-näidiku liidestamine mikrokontrolleriga.

6.1.8.6 A/D-muundurite liidestamine

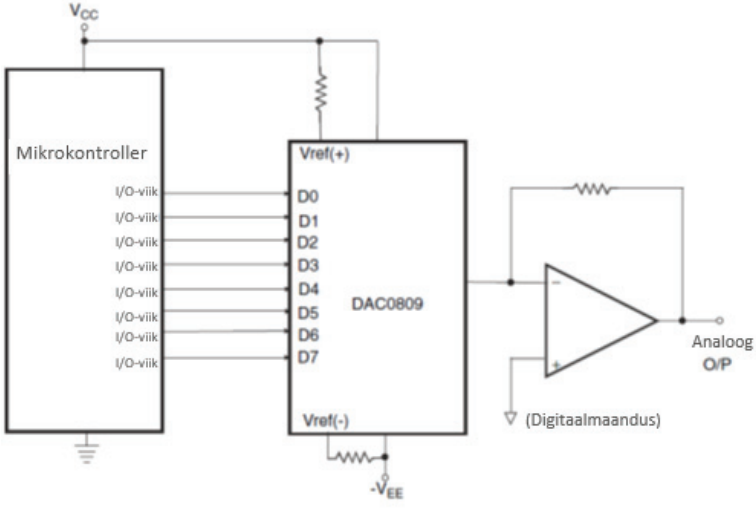
A/D-muundureid kasutatakse mikrokontrolleri liidestamiseks analoogmaailmaga. Joonisel 6.19 on kujutatud A/D-muunduri AD571 liidestamine mikrokontrolleriga. AD571 on kaheksabitine A/D-muundur. Nagu jooniselt näha, ühendatakse A/D-muunduri andmete väljundliinid ja juhtliinid mikrokontrolleri I/O-viikudega. Mikrokontroller saadab käsu, näiteks teisenduse alustamiseks, sisendkanali valimiseks, kui A/D-muunduril on mitu sisendkanalit jne. Lisaks fikseerib see signaale A/D-muundurilt, näiteks teisenduse lõpetamise kohta, et salvestada digitaalbitid. Antud juhul saadab mikrokontroller MADALA signaali $T\ddot{U}HJAL/\overline{DR}$ liinil teisendusprotsessi alustamiseks. Seejärel ootab see andmete valmisoleku ($\overline{DR}$) signaali, et siirduda VÄIKESESSE olekusse. Pärast seda võtab mikrokontroller vastu digitaalväljundbitid, mida töödeldakse tarkvaraprogrammi alusel.

6.1.8.7 D/A muundurite liidestamine

D/A-muunduri liidestamisel mikrokontrolleriga ühendatakse digitaalandmeliinid ja juhtliinid, näiteks teisenduse alustamise ja kiibi valiku liinid, mikrokontrolleri I/O-viikudega. Tarkvaraprogramm loob vajalikud signaalid teisendusprotsessi alustamiseks. Joonisel 6.20 on kujutatud D/A-muunduri DAC 809 liidestamine mikrokontrolleriga. DAC-809 on kaheksabitine D/A-muundur. Siin on väljundiks vool, mistõttu väljundil on tarvis voolu-pinge muundurit.



Joonis 6.19 A/D-muunduri liidestamine mikrokontrolleriga.



Joonis 6.20 D/A-muunduri liidestamine mikrokontrolleriga.

Näide 14.1

Mikrokontrolleril on kiibil 16-bitine loenduri/taimeri süsteem. Seda kasutatakse sisendimpulsi vältuse mõõtmiseks. Mikrokontroller on programmeeritud mõõtma sisendimpulsi piirväärtuste tõusu ja languse aegu kindlal I/O-viigul. Kui mikrokontroller kasutab 8 MHz kella ning sisendimpulsi piirväärtuste tõusu ja languse aegadel fikseeritud loendusväärtused on 001F ja 00F1 (kuueteistkümnendsüsteemis), saab määrata mikrokontrolleriga mõõdetud impulsi vältuse.

Lahendus

• Kuna mikrokontroller kasutab 16-bitist loendurit, on loendusväärtuste vahemik 0000 kuni FFFF (kuueteistkümnendsüsteemis) või 0 kuni 65536 kümnendsüsteemis.

• Sisendimpulsi tõusupiir on 001F, mille vaste kümnendsüsteemis on 31.

• Languspiir on 00F1, mille vaste kümnendsüsteemis on 241.

• Seega on sisendimpulsi vältus 241 − 31 = 210 kellatsüklit.

• Kellasignaali ajaperiood = 1/8 = 0,125 µs.

• Seega ajaperiood, mis vastab 210 tsüklile = 210 × 0,125 = 26,25 µs.

• Mikrokontrolleriga mõõdetud impulsi vältus = 26,25 µs.

Näide 14.2

Soovitakse koostada mikrokontrolleril põhinevat perioodiliste signaalide generaatorit minimaalsete ja maksimaalsete ajaperioodi spetsifikatsioonidega 125 ns ja 100 ms. Milline peab olema süsteemi kella sagedus?

Lahendus

• Minimaalne ajaperiood, mille saab mikrokontrolleriga luua, võrdub ühele kellatsüklile vastava ajaperioodiga.

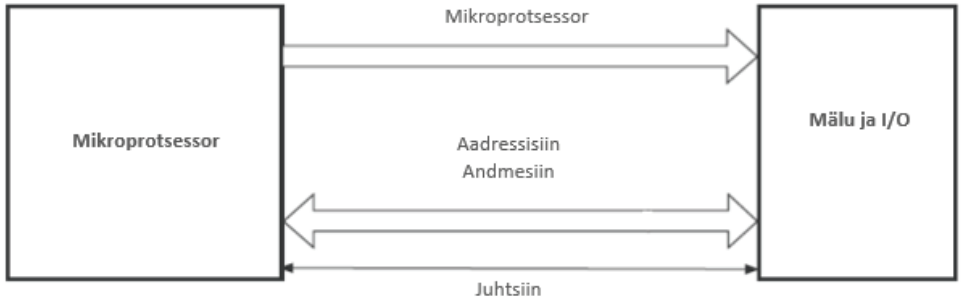
• Seega ühe kellatsükli ajaperiood = 125 ns.

• Kella sagedus = 1/125 GHz = 1000/125 MHz = 8 MHz.

6.2 Mikroprotsessorid

Mikroprotsessor on programmeeritav seade, mis võtab sisendseadmelt vastu binaarandmeid, töötleb andmeid mälusse salvestatud käskude põhjal ja edastab tulemused väljundina. Teiste sõnadega täidab mikroprotsessor mälus salvestatud programmi ning teostab andmevahetust välismaailmaga I/O-portide kaudu. Iga mikroprotsessoril põhinev süsteem hõlmab eelkõige kolme osa, täpsemalt mikroprotsessorit, mälu ja I/O-välisseadmeid. Mikroprotsessorit peetakse tavaliselt süsteemi keskmeks, kuna see teostab kõiki operatsioone ning juhib ühtlasi

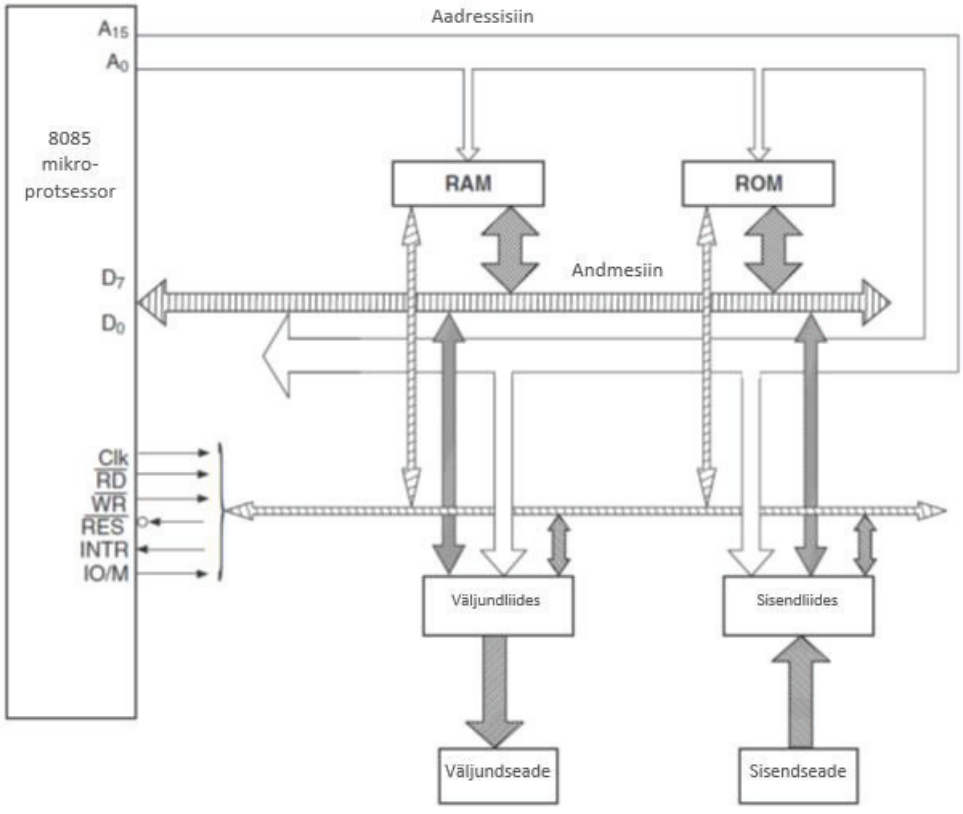
ülejäänud süsteemi. Nimetatud kolm osa on omavahel ühendatud andmesiini, aadressisiini ja juhtsiini kaudu (joonis 6.21).
Mälus on salvestatud mikroprotsessori binaarkäsud ja -andmed. Mälu võib liigitada primaar- ehk põhimäluks ja sekundaarmäluks. Kirjutus/lugemismälu (R/WM) ja püsimälu (ROM) on primaarmälu näited ning neid kasutatakse programmide täitmiseks ja salvestamiseks. Magnetkettad ja -lindid on sekundaarmälu näited. Neid kasutatakse programmide ja tulemuste salvestamiseks pärast programmi täitmise lõppu. Mikroprotsessorid ei täida otseselt sekundaarmälus salvestatud programme. Selle asemel kopeeritakse need kõigepealt R/W-primaarmälusse.



Joonis 6.21 Mikroprotsessoril põhinev süsteem.

*Sisend/väljund*seadmed (I/O) on vahendid, mille kaudu suhtleb mikroprotsessor välismaailmaga. Levinud sisendseadmete hulka kuuluvad klaviatuurid, A/D-muundurid, lülitid, kaamerad, skannerid, mikrofonid jt LED-seadmed, seitsme segmendiga näidikud, LCD-näidikud, printerid ja monitorid on mõned levinud väljundseadmetest.
Siin on põhimõtteliselt sidelüli töötlusseadme ja välisseadmete vahel. See on juhmete rühm, milles liigub informatsioon bittidena. Aadressisiin on ühesuunaline ja seda kasutab keskprotsessor mälupesa aadressi saatmiseks, kuhu pöördus teostada. Lisaks kasutab keskprotsessor seda konkreetse sisend- või väljundpordi valimiseks. See võib koosneda 8, 16, 20 või isegi rohkemast paralleelliinist. Bittide arv aadressisiinis määrab maksimaalse andmepesade arvu mälus, kuhu saab pöörduse teostada. 16-bitine aadressisiin võimaldab näiteks teostada pöördust 216 andmepesale. Selle tähis on $A_0, \ldots, A_{n-1}$, kus n on aadressisiini laius (bittides).
Andmesiin on kahesuunaline, st andmevoog toimub mikroprotsessori ja välisseadmete vahel mõlemas suunas. Andmesiini suurus mõjutab märkimisväärselt arvuti arhitektuuri, kuna see määrab kindlaks teatud parameetrid (näiteks sõnapikkuse ja andmehulga, mida saab korraga käsitleda). Olemas on sisemine andmesiin, millel ei pruugi olla sama laius nagu välisel andmesiinil, mis ühendab mikroprotsessorit I/O ja mäluga. Sisemise andmesiini suurus määrab suurima arvu, mida mikroprotsessor saab ühe operatsiooniga töödelda. Näiteks suurim arv, mida saab töödelda mikroprotsessor, millel on 16-bitine sisemine andmesiin, on 65535. Andmesiini tähis on $D_0, \ldots, D_{n-1}$, kus n on andmesiini laius (bittides).

Juhtsiin sisaldab mitmeid individuaalseid liine, milles liiguvad sünkroniseerimissignaalid. Termin „siin“ viitab tavaliselt koos töötavate liinide rühmale. Juhtsiin (kui me nimetame seda siiniks) saadab juhtsignaale mälule, I/O-portidele ja teistele välisseadmetele, et tagada nõuetekohane töö. Selles edastatakse juhtsignaale, nagu näiteks mälust lugemine, mälusse kirjutamine, sisendpordi lugemine, väljundpordi kirjutus, hoidmine, katkestus jt. Näiteks kui soovitakse lugeda konkreetse mälupesa sisu, saadab keskprotsessor kõigepealt välja vastava pesa aadressi aadressisiini ja „mälust lugemise“ juhtsignaali juhtsiini kaudu. Mälu väljastab vastuseks adresseeritud mälupesas salvestatud andmed andmesiini kaudu. „Katkestus” teatab keskprotsessorile, et välisseade vajab lugemist või hooldust. „Hoidmine” võimaldab teatud seadmel, näiteks otsemällupöörduse (DMA) kontrolleril, aadressi- ja andmesiinid üle võtta.
Joonisel 6.22 on kujutatud siiniliides mikroprotsessori ja selle välisseadmete vahel. Skeemil olev mikroprotsessor on kaheksabitine mikroprotsessor, nagu näiteks Intel 8085.
Mikroprotsessoril põhinevaid süsteeme saab liigitada üldotstarbelisteks ümberprogrammeeritavateks süsteemideks ja manussüsteemideks. Ümberprogrammeeritavate süsteemide hulka kuuluvad mikroarvutid ning suurarvutid ja miniarvutid, kus mikroprotsessoreid kasutatakse arvutusteks ja andmetöötluseks. Manussüsteemides teostavad need konkreetseid ülesandeid ning lõppkasutaja neid ümber programmeerida ei saa. Nende süsteemide hulka kuuluvad mobiiltelefonid, pesumasinad, mikrolaineahjud, nõudepesumasinad jt.



Joonis 6.22 Siiniliides mikroprotsessori ja selle välisseadmete vahel.

Enamikus nimetatud süsteemides on mikroprotsessor, mälu ja I/O-pordid koos ühel kiibil, mida nimetatakse mikrokontrolleriks.

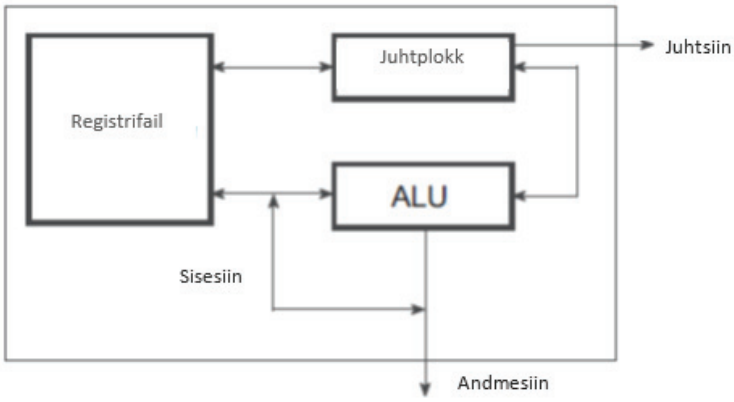
6.2.1 Mikroprotsessorite areng

Seni on mikroprotsessorite areng toimunud kooskõlas Moore'i seadusega, mille kohaselt kahekordistub mikroskeemil olevate transistorite arv iga kahe aasta järel. Üldiselt on see reegel kehtinud alates mikroprotsessorite tagasihoidlikust kasutuselevõtust kalkulaatorites kuni tänapäeva stsenaariumini, kus igas süsteemis suurimatest suurarvutitest kuni väikseimate pihuarvutitena kasutatakse keskse seadmena mikroprotsessorit.
Esimese mikroprotsessori võttis 1971. aastal kasutusele Intel Corporation. See oli neljabitine mikroprotsessor Intel 4004. Seejärel töötati välja teised mikroprotsessorid – Intel 4040 (Intel), PPS-4 (Rockwell International), T3472 (Toshiba) jne. Esimese kaheksabitise mikroprotsessori Intel 8008 töötas välja samuti Intel 1972. aastal. Kõikides nendes mikroprotsessorites kasutati

PMOS-tehnoloogiat. Esimene mikroprotsessor, milles kasutati NMOS-tehnoloogiat, oli Intel 8080, mille töötas välja Intel 1973. aastal. Sellele järgnes 1975. aastal Intel 8085, mis sai väga populaarseks. Teisteks populaarseteks kaheksabitised mikroprotsessorid olid Zilog Z80 (1976) ja Z800, Motorola MC6800 (1974) ja MC6809 (1978), National Semiconductor NSC 800, RCA 1802 (1976) jt.
Esimene mitme kiibiga 16-bitine mikroprotsessor oli 1973. aastal turule toodud National Semiconductor IMP-16. Esimene 16-bitine ühekiibiline mikroprotsessor oli Texas Instruments TMS 9900. Inteli esimene 16-bitine mikroprotsessor oli 1978. aastal välja töötatud Intel 8086. Teised Inteli 16-bitised mikroprotsessorid olid Intel 80186 (1982), Intel 8088, Intel 80188 ja Intel 80286 (1982). Muude populaarsete 16-bitiste mikroprotsessorite hulka kuuluvad Motorola 68000 (1979), 68010 ja 68012, Zilog Z8000, Texas Instruments TMS 9900 seeria jt.
32-bitised mikroprotsessorid ilmusid 1980. aastatel. Maailma esimese ühekiibilise 32-bitise mikroprotsessori võttis 1980. aastal kasutusele AT&T Bell Labs. Selle nimi oli BELLMAC-32A. Inteli esimene 32-bitine protsessor oli 1981. aastal turule toodud iapx 432. Sellest populaarsemaks sai 32-bitine mikroprotsessor Intel 80386, mis nägi ilmavalgust 1985. aastal. Seda kasutati ulatuslikult lauaarvutites. Inteli 32-bitiste mikroprotsessorite perekonda kuuluvad Intel 486, Pentium, PentiumPro, Pentium II, Pentium III ja Pentium IV. AMD K5, K6 ja K7, Motorola 68020 (1985), 68030 ja 68040, National Semiconductor 32032 ja 32332 ning Zilog Z80000 on teised populaarsed 32-bitised mikroprotsessorid. Kõik need mikroprotsessorid põhinevad CISC- (kompleksse käsustikuga arvuti) arhitektuuril. Esimese kaubanduslikku RISC (kärbitud käsustikuga arvuti) arhitektuuriga protsessori, 32-bitise R2000, tõi välja MIPS Technologies. Populaarsemate RISC protsessorite hulka kuuluvad Intel 80860 ja 80960, Motorola 88100 ning Motorola, IBM ja Apple Power PC mikroprotsessorite seeria.
64-bitist mikroprotsessorite arhitektuuri on kasutatud paljudel turgudel juba alates 1990. aastate algusest, kuid 2000. aastate alguses võeti kasutusele personaalarvutite turule suunatud 64-bitised mikrokiibid. Mõned populaarsed 64-bitised mikroprotsessorid on AMD64 (2003) ja Intel x86-64 kiibid. Populaarsete 64-bitiste RISC-protsessorite hulka kuuluvad SUN ULTRASPARC, PowerPC 620, Intel Itanium, MIPS R4000, R5000, R10000 ja R12000 jt.

6.2.2 Mikroprotsessori sisemus

Joonisel 6.23 on kujutatud lihtsustatud tavapärane mikroprotsessori skeem. See joonis on üldistatud ega kujuta ühegi kaubanduslikult saadaval oleva mikroprotsessori tegelikku struktuuri. Oluliste funktsionaalsete plokkide hulka kuuluvad aritmeetika-loogikaplokk (ALU), registrifail ja juhtplokk.
Neid funktsionaalseid plokke kirjeldatakse lühidalt järgnevates punktides.



Joonis 6.23 Mikroprotsessori tavapärane skeem.

6.2.2.1 Aritmeetika-loogikaplokk (ALU)

Aritmeetika-loogikaplokk (ALU) on kõigi mikroprotsessorite põhikomponent. See teostab kõiki täisarvulisi aritmeetilisi ja bitthaaval teostatavaid loogilisi tehteid mikroprotsessoris. ALU on kombinatsioonilist loogikat teostav seade (skeem). Sellel on kaks andmesisestusliini, üks andmeväljundliin ja üks olekuliin. See saab andmeid mikroprotsessori registritelt, töötleb andmeid juhtploki käskude alusel ning salvestab tulemused väljundregistrites. Kõikides kaasaegsetes ALU-des kasutatakse binaarandmeid kahenitäiendi vormingus.
ALU teostatavate täisarvuliste aritmeetiliste tehete hulka kuuluvad liitmine ja lahutamine. ALU teeb JA, VÕI, EI ning VÄLISTAV-VÕI loogilisi tehteid. Mõned 16-bitised, 32-bitised ja 64-bitised mikroprotsessorid teevad ka korrutus- ja jagamistehteid. Teistes mikroprotsessorites teevad korrutus- ja jagamistehteid kirjutusalgoritmid, kasutades selleks liitmis- ja lahutamistehteid. ALU teeb ka bitinihketehteid ja andmete võrdlemise tehteid.

6.2.2.2 Registrifail

Registrifail sisaldab erinevaid registreid, mida kasutatakse peamiselt andmete, aadresside ja olekuinformatsiooni salvestamiseks programmi täitmisel. Registrid on jadaloogikaseadmed, mille ehitamisel kasutatakse bistabiilseid ahelaid. Mõnede enamikus mikroprotsessorites levinud registrite hulka kuuluvad programmiloendur, käsuregistrid, puhverregistrid, olekuregister, pinuviit, üldotstarbelised registrid ja ajutised registrid.

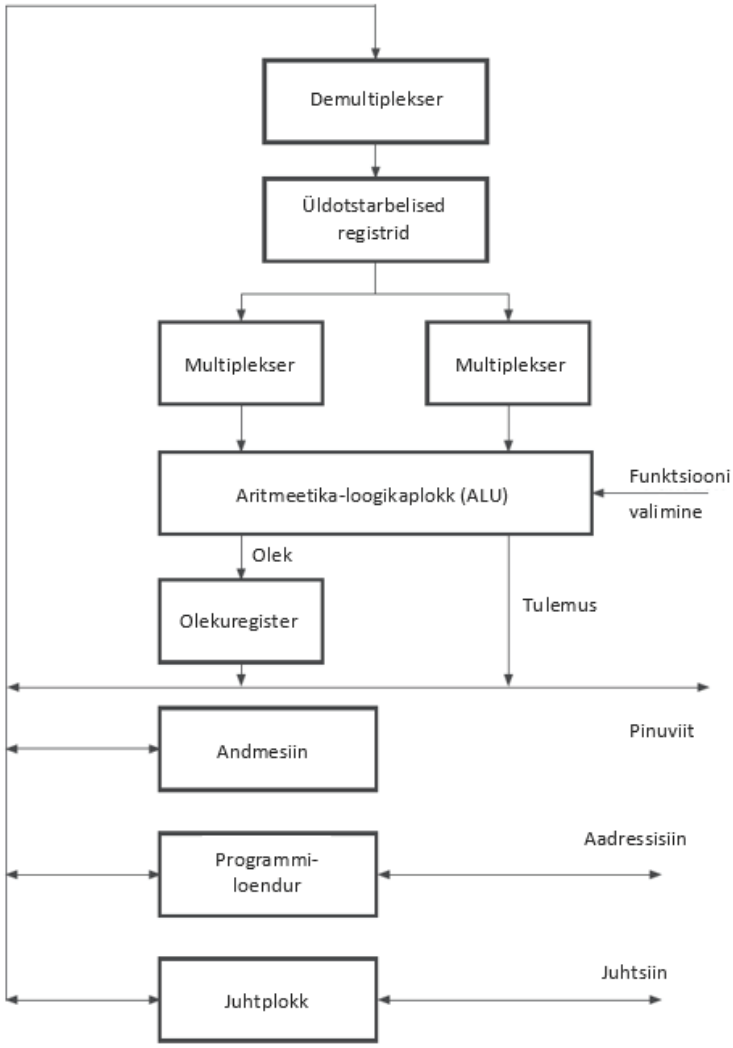
6.2.2.3 Juhtplokk

Juhtplokk juhib ja koordineerib protsessori ja I/O-seadmete erinevate osade tegevust. Selle ülesanne on juhtida masinakäskude mälust võtmise ja nende täitmise tsüklit. Lisaks koordineerib see sisend- ja väljundseadmete tegevust. See on selgelt kõige keerukam

mikroprotsessori funktsionaalne plokk, mis võtab enda alla enamiku kiibist. Juhtplokk on jadaloogikaskeem, mis juhib protsessori läbi järjestikuste sünkroniseeritud toimingute. See saadab juhtsignaalide ja ajastatud impulsside voo mikroprotsessori komponentidele ja välisviikudele. Näiteks mälust saadud käsu täitmiseks saadab juhtplokk mällu „lugemise“ käsu ja loeb käske (või andmeid), mis saadetakse andmesiini kaudu tagasi. Seejärel dekodeerib juhtplokk käsu ja saadab vastavad signaalid ALU-le, üldotstarbelistele registritele, multiplekseritele, demultiplekseritele, programmiloendurile jne. Käsu korral andmed mällu salvestada saadab juhtplokk välja mälupesa aadressi aadressisiini kaudu, salvestatavad andmed andmesiini kaudu ja „kirjutamise“ käsu juhtsiini kaudu.

Juhtplokke võib olenevalt nende ehitusest olla kaht tüüpi. Nende hulka kuuluvad aparatuursed ja mikrokodeeritud juhtplokid. Aparatuursed kontrollerid on jadaloogikaskeemid, mille olek vastab käskude täitmistsükli faasidele. Aparatuurse kontrolleri korral on juhtplokis elektroonikaskeem, mille abil luuakse juhtsignaalid iga käsu jaoks. Need on väga kompaktsed ja kiired, kuid keerukad koostada. Sellist ehitust nimetatakse ka RISC- (kärbitud käsustikuga arvuti) arhitektuuriks. Mikrokodeeritud juhtplokke on lihtne koostada ning nende korral hõlmab käsu täitmine mikrokäskude jadast koosneva mikroprogrammi täitmist. Sellist ehitust nimetatakse ka CISC- (kompleksse käsustikuga arvuti) arhitektuuriks. Mikrokodeeritud juhtplokid on aparatuursetest juhtplokkidest paindlikumad, kuid samas võrdlemisi aeglasemad.

Joonisel 6.24 on toodud kirjeldav mikroprotsessori plokkskeem. Multiplekseritel ja demultiplekseritel puuduvad esmatähtsad funktsioonid ning nende ülesanne on võimaldada andmevoogu erinevate plokkide vahel, samuti erinevate plokkide ja välismaailma vahel.



Joonis 6.24 Mikroprotsessori kirjeldav plokkskeem.

6.2.3 Mälu adresseerimine

Mikroprotsessorid teostavad operatsioone registris või mälus salvestatud andmetega. Need andmed on määratletud käsu operandiväljal. Andmeid saab määratleda erineval viisil otsese andmeväärtusena või salvestada need mõnesse registrisse või mälupesasse jne. Neid variante nimetatakse mikroprotsessori adresseerimisrežiimideks. Teiste sõnadega teatab käsus väljendatud adresseerimisrežiim, kuidas ja kust saab mikroprotsessor andmeid, mille põhjal

tegutseda. Adresseerimisrežiimid on otsese tähtsusega kompilaatorite kirjutajate ja programmeerijate jaoks, kes kirjutavad koodi assemblerkeeles.
Erinevatel mikroprotsessori arhitektuuridel on erinevad adresseerimisrežiimid. RISC-mikroprotsessoritel on vähem adresseerimisrežiime kui CISC-mikroprotsessoritel. Kõige levinumad adresseerimisrežiimid on absoluutsed, vahetud, registry-otsepöördusega, registry-kaudpöördusega, indekseeritud, programmiloenduriga seotud, otsesed ja kaudsed adresseerimisrežiimid. Need moodustavad üle 90% kõigist adresseerimisrežiimidest.

6.2.4 Mikroprotsessori valik

Turul on saadaval tuhandeid mikroprotsessoreid. Õiget mikroprotsessorit pole kindla rakenduse jaoks lihtne valida ning seda ei saa teha huupi, vaid vastava rakenduse alusel. Lisaks tuleb arvesse võtta ka andmemahtu ning töötajate kogemusi ja võimeid. Valikuprotsess algab rakenduse määratlemisega, millele järgneb vastava protsessori sobitamine selgelt määratletud rakendusega.

6.2.4.1 Valikukriteeriumid

Mõnikord on keeruline projekti algstaadiumis rakendusest mikroprotsessori nõudeid välja selekteerida. Seda võivad põhjustada mitmed tegurid, muu hulgas järgmised.

1. Mikroprotsessori kiiruse ühilduvus välisseadmetega.

2. Rakenduse ajakriitiline toimimine.

3. Teatud funktsioonide teostamiseks vajalik programmi suurus pole teada.

Need ebaselged aspektid võivad tähendada, et projekt pole mikroprotsessori valimiseks piisavalt määratletud. Mikroprotsessori valimisel tuleb arvesse võtta mitmeid tegureid, mille hulka kuuluvad hind, energiakulu, jõudlus, saadavalolek, tarkvaratugi ja kooditihedus.

Hind

Hind on üks olulisemaid tegureid, millega projekteerijad protsessori hindamisel arvestavad. See on olulisem manussüsteemide korral, millel on hinnapiirangud.

Energiakulu

Energiakulu on oluline tegur akutoitega süsteemide korral. Mikroprotsessori energiakulu varieerub olenevalt toitepingest (toitepinge ruut), kiirusest (lineaarselt) ja kiibi töötarkvarast. Samuti tuleb arvesse võtta protsessori siinistruktuuri ja selle ühendust mäluskeemidega.

Jõudlus

Protsessorid, mis sobivad hästi ühe ülesande teostamiseks, ei pruugi teise jaoks sama hästi sobida. Seetõttu on väga oluline määrata kindlaks protsessori nõuded konkreetse rakenduse korral. Need on seotud programmi eeldatava suuruse ja keerukuse, kiirusenõuete (ajakriitilised funktsioonid), kasutatava keele, vajalike aritmeetiliste funktsioonide, mälunõuete (ROM, RAM ja massmälu), I/O nõuete ning vajaliku katkestusallika ja reageerimisajaga.

Pärast rakenduse nõuete määratlemist tuleb neid võrrelda protsessori võimalustega. Tabelis 13.1 on toodud protsessori põhiparameetrid, mida tuleks arvestada selle valimisel konkreetse rakenduse jaoks.

Saadavalolek

Enne konkreetse mikroprotsessori välja valimist tuleb veenduda, et see on saadaval.

Tabel 6.1 Mikroprotsessori omaduste kontroll-leht.

Käsustik	Andmetüübid: bititehted, pikas sõnad Aritmeetilised funktsioonid: korrutamine ja jagamine Kodeerimisvõime: RISC või CISC
Registrid	Registrite arv Registrite pikkus Eriotstarbeliste registrite arv
Adresseerimine	Režiimide arv: otsene, kaudne jt. Segmenteeritud või lineaarne adresseerimine Mälu ja I/O aadressivahemikud (mäluga vastendatud/I/O-ga vastendatud) Mäluhaldus
Siinid ja juhtsignaalid	Siini ajastused, katkestused DMA/siini juhtsignaalid Andme- ja aadressisiini laius Kella kiirus ja siini tsükliaeg
Muu	Eelvõtt (käsujärjekorra pikkus), vahemälu Kaasprotsessori tugi: ujukoma, I/O protsessorid Võimsusnõuded
Mittetehnilised aspektid	Dokumentatsiooni kvaliteet ja saadavalolek Arendusvahendid: emulaatorid, silurid ja loogika analüsaatorid Tarkvaratugi: OS, kompilaator, assembler, utiliidid

6.3 Korduskü simused

1. Mis on mikrokontroller?
    a. See on väike piletikontrolliaparaat
    b. See on mikroarvuti keskseade
    c. Kombinatsioon mitmest erinevast loogikaseadmest, mis on paigutatud ühte korpusse, nn kiiparvutile
    d. See on programmeeritav seade lihtsate loogikafunktsioonide teostamiseks
    e. Väga keerukas püsiloogikaseade
2. Mida tähendab eesliide „8 bit" enne sõna „(mikro)protsessor".
    a. See näitab, mitu bitti saab mikroprotsessori sisemälus salvestada
    b. See näitab andmeid, mida saab korraga lugeda
    c. See näitab summaarset mälumahtu, mida saab mikroprotsessoriga adresseerida.
    d. Kaheksabitised CPU-d kasutavad 8-bitist andmesiini ning võivad teostada pöörduse 8 andmebitile ühe masinakäsuga
3. Mis on aadressisiin?
    a. Siin, mis saadetakse konkreetsele aadressile
    b. Siin, mida kasutatakse füüsilise aadressi, nt mäluaadressi määramiseks
    c. Siin, mis ühendab protsessorit mäluga salvestatud andmete lugemiseks
    d. Elektriliste ühendusliinide seeria erinevate seadmete vahel
4. Millised on mikrokontrolleri liidesenõuded, kui seda soovitakse liidestada LED-seadmega?
    a. Vaja on analoog-digitaalmuundurit
    b. Õige takisti LED-seadet läbiva voolu piiramiseks
    c. LED-seadme vajaliku voolu tagamiseks kasutatakse NPN-transistorit
    d. Riistvara värinaeemaldus RC lülituse abil
    e. LED-näidiku süttimiseks on vaja taimeriväljundit
5. Millised riistvarakomponendid sisalduvad tõenäoliselt tavapärases mikrokontrolleris?
    a. Juhtplokk, aritmeetikaplokk, registrifail
    b. Aadressisiin, andmesiin
    c. AD/DA-muundurid, I/O-pordid, loendurid/taimerid, sidepordid
    d. Mitte ükski eelnimetatutest

TEADMISTE KONTROLLI KÜSIMUSTE TULEMUSED

Tabelist leiate õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele **õppeaines 04: Digitaal-süsteemid**. Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr	Küsimuse nr. ja õige vastus				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
2. Analoog- ja digitaaltehnika	D	C, D	C	B, C, E	A
3. Arvusüsteemid	C	C	C	C	C
4. Digitaallülitused/Loogikalülitused	B	C	C	C	C
5. Programmeeritavad loogikaseadmed	C	D	B	E	D
6. Mikrokontroller, mikroprotsessor	C	D	B	B	C

VIITED

[1] Anil K. Maini, *Digital Electronics: Principles, Devices and Applications,* John Wiley & Sons, Ltd. 2007
[2] Tokheim, R. L. *Schaum's Outline Series of Digital Principles*, McGraw-Hill Companies Inc., 1994.
[3] Atiyah, S. K. *A Survey of Arithmetic*, Trafford Publishing, 2005.
[4] Langholz, G., Mott, J. L. and Kandel, A. *Foundations of Digital Logic Design*, World Scientific Publ 1998
[5] Cook, N. P. *Practical Digital Electronics*, Prentice-Hall, 2003.
[6] Lu, M. *Arithmetic and Logic in Computer Systems*, John Wiley & Sons, Inc., 2004
[7] Tocci, R. J. *Digital Systems – Principles and Applications*, Prentice-Hall Inc., 2006
[8] Holdsworth, B. and Woods, C.*Digital Logic Design*, Newnes, 2002.
[9] Chen, W.-K. *Logic Design*, CRC Press, 2003.
[10] Floyd, T. L. *Digital Fundamentals*, Prentice-Hall 2005
[11] Seals, R. C. and Whapshott, G. F. *Programmable Logic: PLDs and FPGAs*, McGraw-Hill, 1997.
[12] Dueck, R. *Digital Design with CPLD Applications and VHDL*, Thomson Delmar Learning, 2003.
[13] Chartrand, L. *Digital Fundamentals: Experiments and Concepts with CPLD*, Thomson Delmar Learning, 2003.
[14] Oldfield, J. and Dorf, R. *Field Programmable Gate Arrays*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
[15] Trimberger, S. (Ed.) *Field Programmable Gate Array Technology*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
[16] Brown, S., Francis, R., Rose, J. and Vranesic, Z. *Field Programmable Gate Arrays*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
[17] Crisp, J. *Introduction to Microprocessors and Microcontrollers*, Newnes, 2004.
[18] Tocci, R. J. and Ambrosio, F. J. *Microprocessors and Microcomputers: Hardware and Software*, Prentice- Hall, 2002.
[19] Rafiquzzaman, M. *Microprocessor and Microcomputer-based System Design*, CRC Press, 1990.
[20] Susnea, L. and Mitescu, M. *Microcontrollers in Practice*, Springer Series, Springer, 2005.
[21] Predko, M. *Programming and Customizing the 8051*, McGraw-Hill Professional, 1999.
[22] Predko, M. *Handbook of Microcontrollers*, McGraw-Hill/Tab Electronics, 1998.

Euroopa tööstuslike väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete innovatiivse ja aruka kasvu strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas (MechMate)

ÕPPEAINE 05. MANUSSÜSTEEMID MEHHATROONIKAS [M005ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

STEFAN IVANOV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
TODOR TODOROV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)

2018

Dokumendist

Seda dokumenti tuleks kasutada põhiõpikuna õppeaines: Manussüsteemid mehhatroonikas

Sisukord

Dokumendist 3
Sissejuhatus 7
1 MANUSSÜSTEEMIDE PÕHIOMADUSED 8
1.1 Manussüsteemide struktuur ja põhikomponendid 8
1.1.1 Töötlev tuum 8
1.1.2 Mälu ja andmete salvestamine 8
1.1.3 Analoogsignaali töötlemislülitused 9
1.1.4 Analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid 9
1.1.5 Digitaalsignaalid manussüsteemides 9
1.1.6 Sideliidesed andmevahetuseks 9
1.1.7 Info visualiseerimine 9
1.1.8 Toiteallikas 9
1.1.9 Tarkvara 9
1.2 Manussüsteemide ajalooline areng 10
1.3 Suundumused manussüsteemide arengus 10
1.4 Enesekontroll 11
2 MIKROPROTSESSORID JA MIKROKONTROLLERID MANUSSÜSTEEMIDES 12
2.1 Mikroprotsessorite ajalooline areng 12
2.2 Nüüdisaegsete mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite arhitektuur 14
2.3 Mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite põhiomadused 15
2.4 Mikrokontrollerite arengutrendid 18
2.5 Enesekontroll 19
3 MANUSSÜSTEEMIDES KASUTATAVAD HÄVI- JA SÄILMÄLUD 20
3.1 Mälud 20
3.2 RAM – Suvapöördumisega muutmälu 21
3.3 ROM, PROM, EPROM, EEPROM, välkmälu. 22
3.3.1 ROM - (püsimälu). 22
3.3.2 PROM - (programmeeritav püsimälu). 22
3.3.3 EPROM (Ümberprogrammeeritav püsimälu) 23
3.3.4 EEPROM - (Elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu) 24
3.3.5 Välkmälu 24
3.4 Enesekontroll 25
4 ANALOOGSIGNAALID JA ELEKTROONIKALÜLITUSED NENDE TÖÖTLEMISEKS 26
4.1 Analoogsignaalid ja analoogsignaalide töötlemine 26
4.2 Operatsioonivõimendid 28
4.3 Põhiskeemid operatsioonivõimenditega 28
4.3.1 Pingejärgur 29
4.3.2 Mitteinverteeriv võimendi 29
4.3.3 Inverteeriv võimendi 30
4.3.4 Diferentsiaalvõimendi 30
4.3.5 Summeeriv võimendi 31
4.4 Analoogkomparaatorite tööpõhimõte 31
4.5 Enesekontroll 32
5 ANALOOG-DIGITAAL- JA DIGITAAL-ANALOOG-MUUNDURID MANUSSÜSTEEMIDES 34
5.1 Signaalide muundamine 34
5.2 Analoog-digitaalmuundurid 34
5.2.1 Kahekordse integreerimise meetod 35
5.2.2 Järjestikune lähendamine. ADC 35
5.2.3 Välkmälu meetod 36
5.3 Digitaal-analoogmuundurid 36
5.3.1 Voolude summeerimisega DAC. 37

5.3.2 Takistite maatriksi voolude summeerimisega DAC. 37
5.3.3 Takistite maatriksi pingete summeerimisega DAC. 37
5.4 Enesekontroll 38
6 DISKREETSED JA SAGEDUSLIKUD SIGNAALID MANUSSÜSTEEMIDES 40
6.1 Diskreetsed ja sageduslikud signaalid 40
6.2 Loogiliste signaalide nivood 41
6.3 Manussüsteemide digitaalsed sisendid ja väljundid 42
6.4 Enesekontroll 44
7 SIDEPROTOKOLLID MANUSSÜSTEEMIDES 46
7.1 Info ja andmete edastamise ja vastuvõtmise meetodid 46
7.2 Väline jadaliides (SPI) 47
7.3 Jadaliides I^2C 49
7.4 Universaalne asünkroontransiiver (UART) 51
7.5 Enesekontroll 52
8 INFO VISUALISEERIMINE 53
8.1 LED – valgusdioodmärgutuled 53
8.2 LCD – vedelkristallnäidikud 54
8.3 TFT – aktiivmaatriksekraanid (kiletransistoritega) 55
8.4 OLED – orgaaniliste valgusdioodidega ekraanid 56
8.5 Enesekontroll 57
9 MANUSSÜSTEEMIDE ELEKTRITOIDE 58
9.1 Lineaarstabilisaatorid 58
9.2 Impulss-stabilisaatorid 58
9.2.1 Pinget madaldav muundur 59
9.2.2 Kõrgendav pingemuundur 59
9.2.3 Vastulülituses dioodiga pingemuundur 60
9.2.4 Akutoitega süsteemide eriomadused 60
9.2.5 Mitmikpingeallikate kasutamine manussüsteemides 61
9.3 Enesekontroll 61
10 MANUSSÜSTEEMIDE PROGRAMMEERIMINE 63
10.1 Programmeerimiskeeled 63
10.1.1 Masinakood 63
10.1.2 Assemblerkeeled 64
10.1.3 Kõrgtaseme programmeerimiskeeled 65
10.2 Manussüsteemide tarkvara väljatöötamine 65
10.3 Tarkvara tööpõhimõtted 67
10.3.1 Koodi järjestikune täitmine sündmusekontrolliga 67
10.3.2 Töötamine katkestuste käitlemisega 67
10.3.3 Tarkvara töötamine reaalaja-opsüsteemi kasutades 68
10.4 Tarkvara silumine 69
10.5 Manussüsteemide programmeerimine 69
10.6 Enesekontroll 70
Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused 71
Kirjanduse viited 72

Sissejuhatus

Elame kiire tempoga maailmas, kus erinevad elektroonikaseadmed määravad meie elurütmi. Oleme kõik seotud globaalse võrgu kaudu ja meil kõigil on digitaalne jalajälg. See maailm oleks mõeldamatu ilma murrangulise progressita arvutite ja mikroprotsessorsüsteemide valdkonnas. Progress, mis mõjutab praegust põlvkonda ning viib meid tulevikus tehis-intellekti ja ulatusliku ühenduvuse maailma, milles reaalsus ja virtuaalsus põimuvad tulevaste põlvkondade elukeskkonnas.

Manussüsteemid on tänapäevase tehnoloogia lahutamatu osa. Nende areng on seotud teaduse ja tehnika üha kiireneva progressiga, mida inimkond on kogenud 20. sajandi teisest poolest tänaseni. Manussüsteeme kasutatakse kõikides inimtegevuse valdkondades. Võima-lused, mida pakuvad nüüdisaegsed mikrokontrollerid ja rakendatud tarkvaralähendused muudavad inimeste elukvaliteeti. See kursus käsitleb manussüsteemide põhielemente ja pakub ülevaadet (pretendeerimata kõike hõlmavusele) manussüsteemide omadustest ning nende rakendamisest.

1 MANUSSÜSTEEMIDE PÕHIOMADUSED

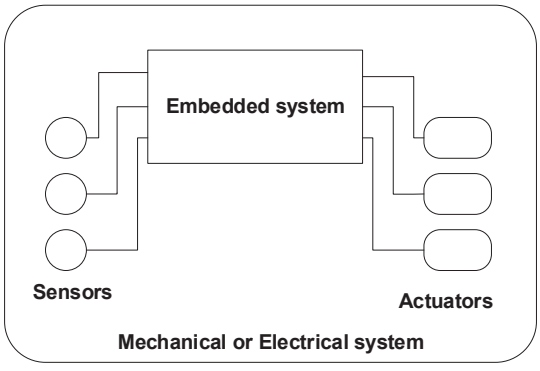
Manussüsteemide kasutamine on tänapäevase elu lahutamatu osa. Neid kasutatakse majapidamisseadmetest, autodest ja lennukitest kuni meditsiini ja kõrgtehnoloogiliste kosmoselaevadeni.

Manusseadmele võib anda järgmise määratluse – see on mehaanilisse või elektrilisse süsteemi sisse ehitatud elektroonikaseade, mis laiendab selle süsteemi funktsionaalsust ja lisab uusi võimekusi.

1.1 Manussüsteemide struktuur ja põhikomponendid

Manussüsteemi tööpõhimõte on oma algoritmi rakendamine jälgitavate suuruste seisundeid mõõtvatelt anduritelt saadud lugemite alusel. Nende lugemite alusel ja juhitakse algoritmi abil mehaanilisi või elektrilisi süsteeme juhtivaid täitureid

Fig. 1.1 shows the structure of an embedded device.



Joonis 1.1. Structure of an embedded device

Manusseadme põhikomponendid on:

1.1.1 Töötlev tuum

See on kõige sagedamini konstrueeritud mikrokontrolleri baasil, kuid selle saab konstrueerida ka mikroprotsessori, digitaalsel signaaliprotsessori (DSP), FPGA-seadme või ASIC-lülituste baasil või nende kasutamise abil.

1.1.2 Mälu ja andmete salvestamine

Mälu kasutatakse andmete töötlemiseks ja salvestamiseks. Ka programmikood salvestatakse mällu. Tüübi järgi jagunevad mälud energiast sõltuvateks ehk hävimäludeks (RAM, SRAM, DRAM, DDRAM) ja energiast sõltumatuteks ehk säilmäludeks (ROM, PROM, EPROM, EEPROM, välkmälu). Igal mälutüübil on erinevad omadused ja rakendused. Hävimälusid kasutatakse andmete töötlemiseks ja säilmälusid programmide salvestamiseks, samuti selliste andmete salvestamiseks, mis peavad säilima süsteemi elektritoite väljalülitamisel.

1.1.3 Analoogsignaali töötlemislülitused

Neid kasutatakse anduritelt tulevate signaalide eeltöötlemiseks. Neid kasutatakse ka signaalide skaleerimisel, kasuliku signaali väljafiltreerimisel soovimatust mürast ja mujal.

1.1.4 Analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid

Ilma analoog-digitaalmuundurita ei saa mikrokontroller ega muud digitaallülitused analoog-signaale töödelda. Analoog-digitaalmuunduri (ADC) lülituste ülesanne on muundada analoogsignaali pinged digitaalseks. ADC-lülitusi kasutatakse peamiselt andmete kogumiseks manussüsteemide jälgitavaid ja juhitavaid suurusi mõõtvatelt anduritelt. Digitaal-analoog-muundurid (DAC) võimaldavad muundada manussüsteemi tarkvarast saadud teatud muutujaid või parameetreid analoogsignaaliks, mida omakorda kasutatakse täiturite juhtimiseks.

1.1.5 Digitaalsignaalid manussüsteemides

Nagu enamikul elektroonikaseadmetel, on mikrokontrollerite ja muude manussüsteemide kiipide digitaalsete sisendsignaalide pinge tavaliselt 3,3 või 5 V. Kuid välisseadmete juhtimiseks on vaja kasutada kõrgema pingega signaale. Manussüsteemide jaoks ei ole need pinged probleemiks, sest laialdaselt on kasutusel elektroonikakomponentide kaitsetehnikad (enamlevinud on madala ja kõrge pingega signaalide galvaaniline eraldamine).

1.1.6 Sideliidesed andmevahetuseks

Tänapäevased manusseadmed sisaldavad mitmeid kiipe nagu mälud, analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid, integraalses kasutuses olevad andurid jne, mis vahetavad andmeid digitaalsete liideste kaudu. Kõige levinumad nende hulgas on liidesed SPI, I^2C ja UART. Manusseadmed võivad olla suutelised jagama andmeid personaalarvutiga või muude seadmetega, kasutades USB, Etherneti, Bluetoothi ja WiFi-liideseid.

1.1.7 Info visualiseerimine

Kasutaja mugavuse huvides sisaldavad manusseadmed tavaliselt visualiseerimise seadist. Need võivad olla tavalistest LED-näidikutest kuni tänapäevaste graafiliste puuteekraanideni. Näidiku abil luuakse ühendus kasutajatega ning on võimalik visualiseerida ja muuta manusseadme tööd juhtiva tarkvaraprogrammi üksikuid parameetreid.

1.1.8 Toiteallikas

Manusseadme väga oluline osa on toiteallikas. Toiteallikas võib olla ühendatud elektritoite-võrguga või olla sellest sõltumatu (fotoelektilise (nt päikese-) või akutoitega). Toiteallikast sõltumata tagavad manussüsteemide pingeregulaatorid stabiliseeritud nõuetekohase talitluspinge andmise elektroonikalülitustele.

1.1.9 Tarkvara

Ilma õige tarkvarata ei suuda manusseade täita oma funktsioone. Seetõttu on väga oluline, et seadme algoritm on õigesti rakendatud tarkvaraprogrammina. Tarkvara arendamiseks kasutatakse programmeerimiskeelt Assembler või kõrgetasemelisemat keelt. Manussüs-teemi tüübist olenevalt töötatakse tarkvara välja ilma opsüsteemita või opsüsteemi-

põhisena. Opsüsteemi kasutamise korral on see tavaliselt RTOS (Real Time Operation System – reaalaja-opsüsteem), mida iseloomustab suur töökindlus ja deterministlik reageerimisaeg.

1.2 Manussüsteemide ajalooline areng

Manussüsteemide areng on seotud elektroonika, arvutitehnika ja tarkvaratehnoloogiate arenguga 1940. aastate lõpust kuni tänapäevani. Esimeste vaakumlampidel põhinevate arvutite väljatöötamine 1940. aastatel oli seotud tohutu tehnilise arenguga, mida II maailmasõda, kõige hirmsam sõda inimajaloos, tõi erinevatesse tehnoloogiavaldkondadesse. Esimese transistori leiutamine 1947. aastal ettevõttes Bell Labs avas elektroonikale uued horisondid ning viis arvutitehnoloogia ja selle komponendibaasi muutumiseni. 1950. aastatel toimus järgmine tehnoloogiline hüpe – esimese kiibi loomine ettevõttes Texas Instruments. 1960. ja 1970. aastatel tehti kvalitatiivne hüpe arvutiprogrammide loomiseks vajalike vahendite valdkonnas. Sel perioodil loodi kõrgtaseme programmeerimiskeeled, näiteks C, BASIC ja PASCAL. Tänapäeval kasutatakse neid keeli manussüsteemide tarkvara arendamiseks ja need on ka aluseks nüüdisaegsetele kõrgtaseme programmeerimiskeeltele. 1971. aastal tõi Intel turule esimese mikroprotsessori Intel 4004 (4-bitise arhitektuuriga, eraldi kiibina), sellele järgnes peagi 8-bitise arhitektuuriga Intel 8008. Kuigi esimesed mikrokontrollerid töötati välja juba 1970. aastatel, algas nende laiaulatuslik kasutamine 1980. aastatel. Mikrokontrollerite ulatuslik kasutamine tõi manussüsteemide arengusse kvalitatiivse hüppe: vähendas nende mõõtmeid ja pakkus uusi rakendusi ka inimeste igapäevaelus. Hoogsalt arenevad manussüsteemid autonduse alal. Kuigi esimesed mikroprotsessoril põhineva sisseehitatud elektroonikaga varustatud autod ilmusid 1970. aastate algul, on raske ette kujutada nüüdisaegset autot, milles ei ole kasutusel kümneid manussüsteeme, mis enamikus põhinevad mikrokontrolleritel ning tagavad ohutuma ja mugavama sõitmise.

Manussüsteemide ajalooline areng ei ole seotud ainult mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite arenguga, vaid on lahutamatult seotud ka muude elektroonikakomponentidega (mälud, analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid, liidese ühenduslülitused, näidikud, ekraanid ning muud elemendid), milleta ei oleks võimalik manussüsteemide tänapäevane tase.

Komponentide arendamisega paralleelselt on arendatud ja kaasajastatud manussüsteemides kasutatavaid opsüsteeme. Praegu kasutatakse laialdaselt selliste opsüsteemide nagu Linux ja Windows erinevaid versioone, kuid manussüsteemide jaoks võivad olla kõige sobivamad sellised RTOS-tüüpi opsüsteemid, nagu Linuxi-põhised süsteemid FreeRTOS, QNX, ThreadX ja muud. Opsüsteemid võimaldavad manussüsteemide arendajatel kasutada praktikas kontrollitud arhitektuuri, mis sisaldab draivereid paljude kiipide ja muude seadmete juhtimiseks ning keerulisi sideprotokolle, mida saab kasutada minimaalse vaevaga. Veel üks opsüsteemide oluline omadus on võime teha multitegumtööd, kus tegumihalduse ülesannet täidab opsüsteem.

1.3 Suundumused manussüsteemide arengus

Manussüsteemide areng on otseselt seotud mikroprotsessorsüsteemide arenguga, mistõttu uute suure jõudlusega protsessorite ja mikrokontrollerite väljatöötamine kiirendab ka tänapäevaste manussüsteemide arengut ja nende kasutamist nii olmeseadmetes kui ka

muude valdkondade seadmetes. Interneti ülemaailmne laiaulatuslik kasutamine ja interneti-protokollide võime tagada kaugühendus (täpsemalt kaugside) erinevate seadmete vahel, on võtmeetapp manussüsteemide arengus.
Manussüsteemide arengusuunad näitavad, et süsteemid hakkavad veelgi enam olema omavahel ühenduses ülemaailmse võrgustiku kaudu ja pakkuma inimestele teenuseid interneti vahendusel. Tehnoloogiad, millel põhineb asjade internet (IoT), on nüüdisaegsed suure kiirusega Etherneti ja WiFi-võrgud. Nende kaudu saavad seadmed kasutada pilv-teenuseid ja neis jagatud andmebaasidesse salvestada või sealt lugeda oma tööks vajalikku infot.
Veel üks suundumus on tehisintellekti kasutamine nüüdisaegsetes elektroonikaseadmetes. Tänu tehisintellektile on manusseadmed võimelised tegema tegevusi, mida siiani suutsid ainult inimesed. Tehisintellekti kasutamine ja juurdepääs infole interneti kaudu võimaldab manussüsteemil oma tööd analüüsida ja autonoomselt otsuseid teha.
Praegu võib kokkuvõtteks öelda, et mikroelektroonika, kommunikatsiooni, pilvteenuste ja tehisintellekti areng muudab manussüsteemid tulevikus inimeste eksistentsi lahutamatuks osaks.

1.4 Enesekontroll

1. Kus kasutatakse manussüsteeme?
    a. Ainult kodumajapidamistes;
    b. Ainult meditsiiniseadmetes;
    c. Ainut tüüstussüsteemides;
    d. Kõikidel ülalnimetatud valdkondades.

2. Millised on manussüsteemi peamised komponendid?
    a. Aurumasin ja pneumoseadmed;
    b. Mikrokontroller, mälu, ADC, DAC, andmesideliidesed, toiteallikad;
    c. Sisepõlemismootor;
    d. Elektrijaam ja elektriliinid.

3. Milline järgnevatest väidetest on tõene?
    a. Mõned manussüsteemid kasutavad reaalajaoperatsioonisüsteemi. (RTOS)
    b. Manussüsteemi mikrokontrollerit pole vaja programmeerida
    c. Manussüsteem ei kasuta elektroonilisi komponente.
    d. Kõik manussüsteemid kasutavad RTOS

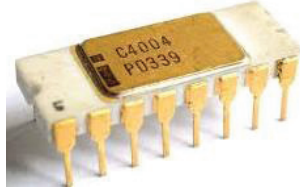
4. Manussüsteemide tulevikutrendid hõlmavad: The future trends in embedded systems include:
    a. Tehisintellekti (AI);
    b. Asjade internetti (IoT);
    c. Kasutavad elektronlampe;
    d. Toiteallikaks on kivisüsi.

2 MIKROPROTSESSORID JA MIKROKONTROLLERID MANUSSÜSTEEMIDES

Mikroprotsessorid ja mikrokontrollerid on ilmselt nüüdisaegsete manussüsteemide on juhtimise ja võimete kasutamise kõige olulisem osa. Selles peatükis on käsitletud mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite põhifunktsioone, kõige enam levinud arhitektuurilahendusi, tööpõhimõtteid ja ajaloolist arengut.

2.1 Mikroprotsessorite ajalooline areng

Mikroprotsessori väljatöötamist võib kindlasti pidada suureks elektroonikavaldkonna sündmuseks pärast transistori ja esimese kiibi leiutamist. Esimene mikroprotsessor valmis 1971. aastal. Esimese mikroprotsessori võimekus oli tagasihoidlik – 4-bitine arhitektuur ainult 2300 transistoriga võimaldas täita 46 käsku taktsignaali maksimaalse sagedusega 740 kHz. Kuigi seda mikroprotsessorit ei iseloomusta suur võimekus, on selle väljatöötamine suur samm tehnoloogilises arengus, sest arvutiprotsessoreid oli varem konstrueeritud eraldi kiipidele, kuid mudelil 4004 olid kõik vajalikud lülitused koondatud ühte kiipi.



Joonis 2.1. Intel 4004

1972. aastal tõi Intel turule esimese 8-bitise protsessori 8008. Seda iseloomustab 8-bitine andmesuurus, see täitis 48 käsku ja taktgeneraatori maksimaalne sagedus on 800 kHz. Mikroprotsessor suutis adresseerida 16 kB mälu. 1974. aastal ilmus turule Intel 8080, mis suutis adresseerida juba 64 kB aadressiruumi taktsagedusega kuni 3 MHz.
Paralleelselt Inteliga esitlesid ka muud ettevõtted oma mikroprotsessorite mudeleid. 1974. aastal tõi Motorola turule oma mikroprotsessori 6800. Kahe aasta pärast ilmus turule Zilog Z-80. Mõlemaid mikroprotsessoreid tarniti laialdaselt 1970. ja 1980. aastatel.
1978. aastal tootis Intel välja esimese 16-bitise mikroprotsessori Intel 8086. See suutis adresseerida 4 MB mälu, töötas taktsagedusega 5 MHz ja oli Intelx86 mikroprotsessorite tooteseeria alusepanija. Sellest mikroprotsessorite perest võib mainida mudeleid 80186, 80286 ning 32-bitiseid mudeleid 80386 ja 80486. 1993. aastal lasi Intel välja uue protsessori Pentium, millest sai alguse Pentiumi mikroprotsessorite perekond ja millel oli palju aastaid domineeriv roll personaalarvutite turul. Nendele mikroprotsessoritele järgnesid Xeon, Itanium, Core i7 jt.

Joonis 2.2. Nüüdisaegne mikroprotsessor Intelilt – Core i7

Ka Inteli konkurendid töötasid välja mudeliga x86 ühilduvaid mikroprotsessoreid, millest tuntuim on AMD.
Paralleelselt x86-ga arendati ka muid mikroprotsessorite arhitektuure, sh PowerPC, SPARC, MIPS, Alpha ja muud.
Mikroprotsessorite arendustööga samal ajal toimus ka protsess selliste kiipide loomiseks ja kasutuselevõtmiseks, mis ühendaksid endas mikroprotsessorite arvutusvõimsuse ja lisavõimekustega (nt mälu, analoog-digitaal- ja digitaal-analoogmuundurid, taimerid, sidelülitused jne). Seda tüüpi seadmeid nimetatakse üldiselt mikrokontrolleriteks.
Mikrokontrollerid on manussüsteemides kõige laialdasemalt kasutusel olevad seadmed.
Esimene turule jõudnud mikrokontroller on TMS 1000 ettevõttelt Texas Instruments. Sellel on 1024 x 8 bitti püsimälu (ROM), 64 x 4 bitti muutmälu (RAM) ja 23 sisend-/väljundviiku. Selle väljatöötamine 1974. aastal tähistab uut tüüpi kiipide ajastu algust ja nende arendamine kestab kiire tempoga tänaseni.

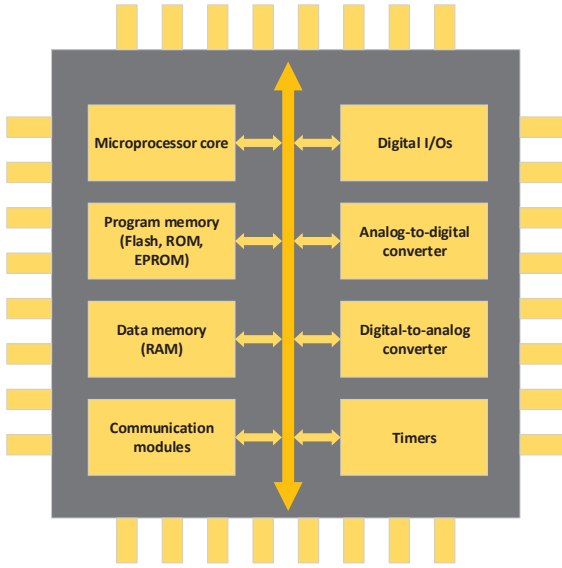
Joonis 2.3. Esimene mikrokontroller TMS 1000

Mikrokontrollerid nagu mikroprotsessoridki jagunevad eraldi klassidesse, olenevalt andmete eraldusvõimest, millega nende registrid töötavad. Põhimõtteliselt kasutatakse 8-, 16- ja 32-bitiseid mikrokontrollereid ja vastupidi mikroprotsessoritele, on 8- ja 16-bitised seadmed ikka veel laialdaselt kasutusel erinevates süsteemides, kus põhinõudeks on väike maksumus ja arvutusvõimekus ei ole nii oluline.
Juhtivaid ettevõtteid mikrokontrollerite turul on Microchip (8-bitiste mikrokontrollerite perekonnad Pic16, Pic18 ja Atmega). Texas Instruments pakub suurt seadmevalikut. Hinna ja arvutusvõimsuse hea suhte ning väikese võimsustarbega tõusevad esile 16-bitised mikrokontrollerid tooteseeriast MSP430. 32-bitiste seadmete hulgas domineerivad turul ARM-protsessorituumadega tooted. Selliseid mikrokontrollereid toodavad paljud ettevõtted: Freescale, Infineon, NXP, STMicroelectronics jt. Pakutavaid tooteid iseloomustab konku-

rentsivõimeline hind, ajas pidevalt kasvav suutlikkus ja suur valik välisseadmeid, mis muudavad need eelistatud seadmeteks paljudes manussüsteemides.
Nii mikroprotsessorite kui mikrokontrollerite kiipide areng järgib Moore'i seadust (Gordon Moore, üks Inteli rajajatest), mille kohaselt transistoride arv kiipides kahekordistub iga kahe aasta järel.

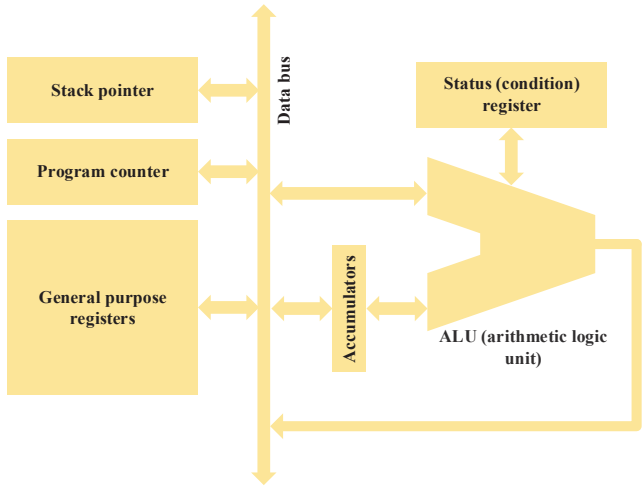
2.2 Nüüdisaegsete mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite arhitektuur

Mikroprotsessor on arvutusseade, mis täidab käske ja mille juhtimisel tehakse andmetega teatud matemaatilisi, loogilisi ning muid tegevusi. Mikroprotsessorsüsteemis on peale mikroprotsessori vaja ka mälu (andmete ja programmi jaoks), sisend-/väljundseadmeid andmete sisestamiseks ja väljastamiseks, erinevaid kiipe digitaal-analoog- või analoog-digitaalmuunduritega ja liideselülitusi välisseadmetega ühendamiseks.
Mikroelektroonika nüüdisaegsed tehnoloogiad võimaldavad kõik mikroprotsessorsüsteemi moodustamiseks vajalikud lülitused realiseerida samal kiibil. Süsteemi, mis ühendab mitut erinevate funktsioonidega lülitust (mikroprotsessori tuuma juhtimisel), nimetatakse mikrokontrolleriks. Joonisel 2.4 on näidatud tüüpilise mikrokontrolleri struktuur. Fig. 2.4 shows the structure of a typical microcontroller.



Joonis 2.4. Mikrokontrolleri struktuur

Protsessorituuma ja mikroprotsessori ülesanne on teha arvutus- ja loogikatehteid ning lugeda mälust ja kirjutada mällu andmeid. Hüpoteetilise mikroprotsessori struktuur on esitatud joonisel 2.5. Fig.2.5



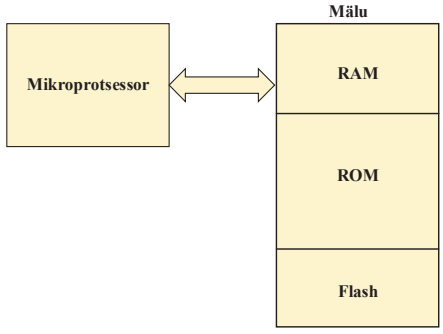
Joonis 2.5. Mikroprotsessori struktuur

Mikroprotsessori põhikomponent on aritmeetika-loogikaseade (ALU). Selle abil täidetakse programmi käske. ALU käskude täitmiseks kasutatavaid andmeid töödeldakse tööregistrites, mida nimetatakse ka akumulaatoriteks. Andmeid hoitakse mälus, laaditakse protsessori registritesse, töödeldakse käskude kohaselt ja tulemus salvestatakse uuesti mällu. Peale tööregistrite on mikroprotsessori struktuuris ka muid registreid, millest mõned on üldotstarbelised ja mõnel on erifunktsioon. Selline register on käsuloendur (Program Counter, PC), mis on suunatud programmimälule ja näitab selle käsu mäluaadressi, mida protsessor hakkab täitma. Pinuviit (Stack Pointer, SP) näitab kohta mälus, kus on realiseeritud nn pinu. See on mälupiirkond, mida kasutatakse andmete ajutiseks salvestamiseks ja katkestuste töötlemisel või alamprogrammide väljakutsumisel. Protsessoritel on ka loogikasüsteem selliste katkestuste töötlemiseks, mis on välisallikatest saabuvad asünkroonsed sündmused ja mis katkestavad ajutiselt kasutajaprogrammi täitmise, sundides protsessorit töötlema tekkinud katkestust.
Keerukusest olenemata on kõik protsessorid (või protsessorituumad) sünkroonsed loogilised seadmed, mis tähendab, et neil on nõuetekohaseks töötamiseks vaja taktsignaali. Taktsignaali sagedus määrab suures ulatuses nende jõudluse. Turul pakutavate mikrokontrollerite taktsagedus on vahemikus mõnest kuni mitmesaja megahertsini. Nüüdisaegsetes protsessorites ulatub taktsagedus mitme GHz-ni.

2.3 Mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite põhiomadused

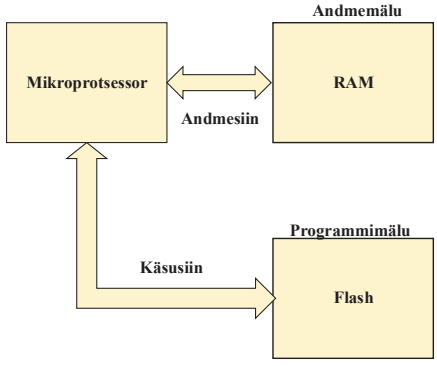
Mikroprotsessoreid või mikrokontrollereid liigitatakse selle põhjal, kuidas need täidavad kasutajaprogrammi, kuidas tõlgendavad andmeid, kuidas pöörduvad mälu poole (kuidas mälu on adresseeritud) ja milliseid käske need kasutavad.
Mälu adresseerimisviisist olenevalt on olemas nn Von Neumanni ja Harvardi arhitektuur. Von Neumanni arhitektuuris toimub juurdepääs programmimälule ja andmemälule ühissiini kaudu, kus erinevat tüüpi mäludel on üldises aadressiruumis erinevad aadressid (joonis 2.6)

(Fig.2.6). Seda tüüpi arhitektuuris on võimalik edastada programm alglaadimisel välkmälust muutmällu (RAM) seal töötamiseks. See parandab jõudlust, sest välkmälud töötavad aeglasema taktsagedusega kui RAM.



Joonis 2.6. Von Neumanni arhitektuur

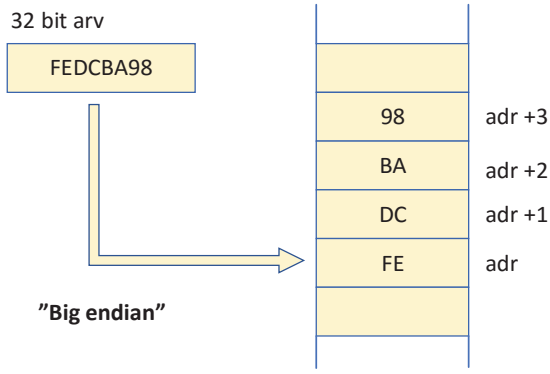
Harvardi arhitektuuris (Fig.2.7) on programmimälu ja andmemälu selgelt eraldatud. Nende jaoks on eraldi käsu- ja andmesiinid. Nii saavutatakse juurdepääs korraga mõlemale programmiruumile.



Joonis 2.7. Harvardi arhitektuur

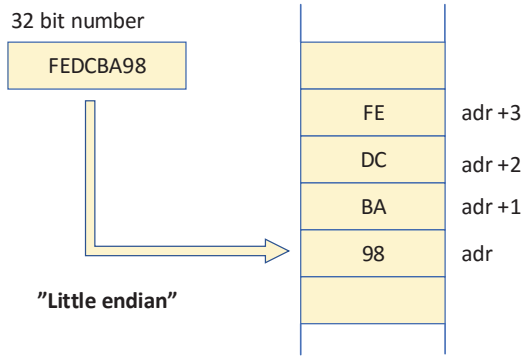
Kummalgi arhitektuuril on oma eelised ja puudused, kuid kokkuvõtlikult võib öelda, et von Neumanni arhitektuur sobib suure jõudlusega seadmetele ja Harvardi arhitektuuri kasutatakse tagasihoidlikumates mikrokontrollerites, kuid see võimaldab omada erineva suurusega programmi- ja andmemälu.
Käskudest, nende vormingust ja arvust olenevalt jagunevad nüüdisaegsed mikroprotsessorid täisprotsessoril (CISC) ja kärbikprotsessoril (RISC) põhinevateks seadmeteks. CISC-seadmetes täidab mikroprotsessor palju komplekskäske (kuni mitusada). Sellisel juhul on võimalik ühe käsuga teha keerukamaid tegevusi, mis nõuavad RISC-seadmetes mitmeid käske. Suur

käskude arv tähendab aga keerukamat käsudekoodrit ja vastavalt suuremat arvu transistore, mida kasutatakse selle rakendamiseks.
CISC-arhitektuuris on tüüpiline, et üksikud käsud võivad kasutada erinevat arvu mälubaite ja käskude täitmine kestab erineva arvu taktitsükleid. RISC-arhitektuuris täidetakse käsud tavaliselt 1 taktitsükli jooksul.
Teine nüüdisaegsete mikroprotsessorite ja mikrokontrollerite liigitamise alus on andmete salvestamise viis mälus. Selle liigituse kohaselt on andmete mällu paigutamiseks olemas kaks lähenemisviisi: pöördjärgesitus (little endian) ja tavajärgesitus (big endian). Tavajärgesitusega andmepaigutuse (Fig. 2.8) korral paigutatakse üks mitmebaidine number mällu selliselt, et esmalt paigutatakse numbri kõige kõrgem järk ja lõpuks kõige madalam.



Joonis 2.8. Tavajärgesitusega mälupaigutus

Pöördjärgesitusega andmepaigutuse (Fig. 2.9) korral paigutatakse üks mitmebaidine number mällu selliselt, et esmalt paigutatakse numbri kõige madalam järk ja lõpuks kõige kõrgem.



Joonis 2.9. Pöördjärgesitusega mälupaigutus

2.4 Mikrokontrollerite arengutrendid

Üks selgelt tõusev trend mikrokontrollerite maailmas on 32-bitise protsessoriga mikrokontrollerite laialdasem kasutamine. ARM Cortex-M tuumal põhinevad mikrokontrollerid on praegu kujunenud manussüsteemides kasutatavaks põhiarhitektuuriks.

Veel üks suundumus on turul väikese võimsustarbega mikrokontrollerite kasutamine, mis on oluline akutoitel seadmete arendamises (nt juhtmevabad andurid, portatiivsed mõõteseadmed, meditsiiniseadmed jne). Selliste mikrokontrollerite energiatarve vähendatud võimsuse režiimil võib olla alla 1 µA.

Arengut on märgata ka mikrokontrollerites kasutatavate mälude valdkonnas. Turul on juba FRAM-mäluga (ferroelektriline muutmälu) seadmed. Seda tüüpi mällu kirjutamiskiirus on võrreldav SRAM-mälu kiirusega (staatiline muutmälu), kusjuures andmed säilivad pärast elektritoite väljalülitamist.

Mikrokontrolleri välismooduleid arendatakse samuti pidevalt. Seadmeid koos seadmesõltumatute välisseadmetega (Core Independent Peripherals), mis suudavad töötada protsessorituumast sõltumatult, on turul juba saadaval. Analoog-digitaalmuundurite ja digitaal-analoogmuundurite välismoodulid on samuti saadaval. Paljud uued mikrokontrollerid on saadaval koos 12-bitise või suurema eraldusvõimega ADC-ga, mõnikord on ühes kiibis mitu välist ADC-d ja DAC-d. Mikrokontrolleri struktuuris on ka analoogkomparaatorid, operatsioonivõimendid, pingeallikad ja muud analooglülitused.

Tänapäeval on paljud mikrokontrollerid saadaval mitme liidesemooduliga, näiteks CAN, Ethernet jne, mis võimaldavad neid kasutada andurite võrkudes, autoelektroonikas ja IoT-seadmetes (asjade internet). Turul on ka juhtmevaba liidesega kiibid, mis tegelikkuses on mikrokontrolleriga ühendatud raadiomoodulid ning tagavad töös suurepärase paindlikkuse ja andmeedastuse suure turvalisuse.

2.5 Enesekontroll

1. Milline nendest mikroskeemidest on esimene mikrokontroller?
    a. Intel 4004;
    b. Intel 8008;
    c. Z-80;
    d. Motorola 6800.

2. Milline allpooltoodud mikrokontrolleri arhitektuur domineerib 32-bitiste mikrokontrollerite turul?
    a. MIPS;
    b. ARM;
    c. TMS320;
    d. Mõni teine tüüp.

3. Võrreldes mikroprotsessoriga omavad mikrokontrollerid oma koosseisus lisaks veel järgmisi komponente:
    a. Kõrgema tööpingega sisendeid ja väljundeid;
    b. Displeid;
    c. Mälu, taimerid ja andmeside perifeeriaseadmed;
    d. Mitte midagi ülalmainitutest.

4. Harvardi arhitektuur tähendab et:
    a. Seal on eraldi siinid programmi käskude ja andmete edastamiseks;
    b. Seal on ainult üks siin kasutusel käskude ja andmete jaoks;
    c. See mikrokontroller ei kasuta siine andmete edastamiseks;
    d. Programmikäsud ja andmed edastatakse protsessorisse traadita sidevahenditega (raadio teel)

5. Võrreldes CISC arhitektuuri RISC arhitektuuriga on esimeses:
    a. Vähendatud arv käske;
    b. Rohkem käske keeruka süntaksiga;
    c. Ei kasutata üldse käske;
    d. Pole vahet.

3 MANUSSÜSTEEMIDES KASUTATAVAD HÄVI- JA SÄILMÄLUD

Kõik mikroprotsessorite või mikrokontrollerite jaoks konstrueeritud digitaalsed süsteemid vajavad teatud hulka mälu.

Mälu põhiülesanne on salvestada andmed, mida on vaja mikroprotsessorsüsteemi tööks. Teine mälu ülesanne on võimalus salvestada uusi andmeid ja asendada või uuendada vanu andmeid. Peale selle peab mälu pakkuma võimalust lugeda sellesse salvestatud infot.

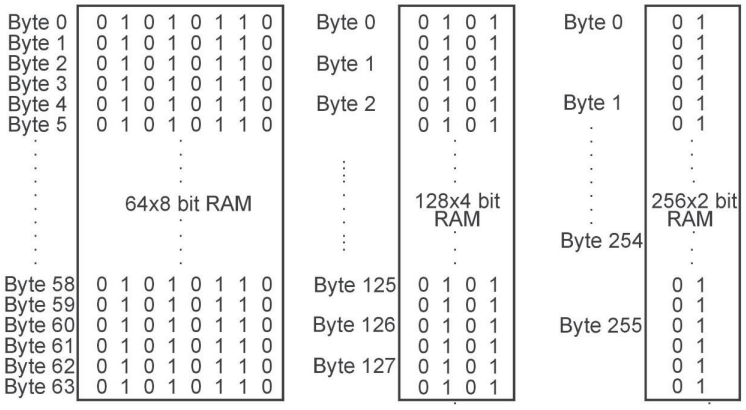
3.1 Mälud

Mikroprotsessor ja mälu on omavahel ühendatud andmesiini kaudu. Siinilaius võib olla 8, 16, 32, 64 bitti jne. Mälu on mikroprotsessorile alluv seade, mis seda juhib. Kõik vajalikud käsud andmevahetuseks mäluga annab mikroprotsessor. Nendest käskudest sõltuvalt salvestab mälu andmesiinilt saadud infot teatud pessa või edastab mällu salvestatud infot andmesiinile.

Mälu asukohast olenevalt liigitatakse see sise- või välismäluks.

Välismälu paikneb mikroprotsessorsüsteemist väljaspool ja seda saab vajaduse korral ühendada või eemaldada. Välismälu on välkmälu või kõvaketas ja need on tavaliselt säilmälud

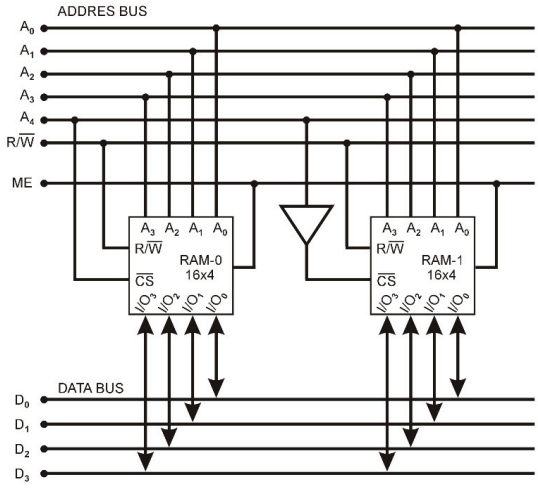
Sisemälud on RAM, ROM, PROM, EPROM, EEPROM. Muutmälu (RAM) on hävimälu (st info salvestamine sõltub energiaallikast) ja ROM, PROM, EPROM ning EEPROM on säilmälud. Mälud on tüübist olenemata kõik organiseeritud samal viisil. Kogu mälupiirkond (maht, kogus) on jagatud eraldi pesadeks. Kõikidel mälupesadel on ühesugune eraldusvõime. Pesa tihedus mälus oleneb sellest, kus seda kasutatakse. Pesad võivad olla 2, 4, 8, 16, 32, 64 bitised jne. Joonisel 3.1 on näidatud 64-baidine mälu, mis on erineval viisil organiseeritud (8, 4 ja 2 bitti).



Joonis 3.1. 64-baidise mälu organiseerimise näide

Joonisel on mälu organiseeritud baitidesse või eraldi gruppidesse. Mälu saab organiseerida erineval viisil: nt 64x8, 256x2, 32x2, 8x8 või 4x16. Igal mälupesal on oma aadress. Aadressi kasutatakse andmete lugemiseks ja kirjutamiseks. Igale mälust lugemisele või mällu kirjuta-

misele eelneb operatsiooniga seotud mälupesale aadressi andmine. Andmevahetus mäluga saab toimuda kahel viisil – paralleel- või jadapöördusega. Paralleelpöörduse korral edastatakse mällu paralleelselt terved sõnad või baidid. Joonisel 3.2 on kujutatud kahe 64-bitise mälupanga skeem.



Joonis 3.2. Kahe 64-bitise mälupanga põhimõtteskeem

Andmesiini juhtide tähised on D0, D1, D2 ja D3. Aadressisiini juhid on A0, A1, A2, A3 ja A4. Peale selle on kaks R/W ja ME juhti. Signaal juhis R/W määrab kindlaks, kas mälu loetakse või mällu kirjutatakse. ME juht näitab valmisolekut andmevahetuseks (lugemiseks või kirjutamiseks).
Jadapöörduse korral edastatakse infot järjestikku bitikaupa. Liideseid (nt I^2C ja SPI) kasutatakse andmete jadaedastuseks.
Mälusid liigitatakse hinna, kiiruse, võimsustarbe jne järgi. Järgnevalt esitatakse põhilised mälutüübid.

3.2 RAM – Suvapöördumisega muutmälu

Seda tüüpi mälu on hävimälu (energiast sõltuv) ja seda kasutatakse süsteemi mikroprotsessorites peamiselt andmemäluna. See salvestab tavaliselt ajutisi andmeid ja muutujaid, mis on vajalikud töötava programmi normaalseks tööks. Seda kasutatakse ka mikroprotsessori pinu jaoks. Tootmistehnoloogiast olenevalt jagunevad RAM-id kahte tüüpi: DRAM (dünaamiline muutmälu) ja SRAM (staatiline muutmälu).
DRAM-i salvestuselement (pesa) on valmistatud kondensaatorite või MOS-elementide baasil. Nende omapära tõttu väheneb neist elementidest ehitatud pesades natukese aja pärast pinge ja info kaob. Mällu kirjutatud info kadumise vältimiseks tuleb salvestatud väärtusi regulaarselt (teatud ajaperioodi järel) värskendada. Salvestatud laengute (väärtuste) dünaamiliseks värskendamiseks tuleb kasutada spetsiaalseid skeeme. Sellest tuleneb ka nimi dünaamiline mälu. Kondensaatori seisundist olenevalt (laetud või tühjendatud), saadakse

seisundid loogiline 1 või loogiline 0. Seda tüüpi dünaamilist mälu kasutatakse praktikas laialdaselt, sest kondensaatoril põhineva salvestuselemendi integreeritud versiooni tegemine on suhteliselt odav. Seda tüüpi mälu puudus on suhteline aeglus, sest mälukondensaatori pesa laadimine võtab aega.
SRAM-i salvestuselement (pesa) põhineb trigeritel. SRAM on küllaltki kiire mälu, sest trigeri ühest seisundist teise lülitamiseks kulub vähe aega.
Mälupesas kasutatakse iga biti jaoks eraldi trigerit. Trigerite tüübid võivad olla RS, JK või D.
RS-trigerite seisund muutub loogiliseks 0-ks või loogiliseks 1-ks olenevalt sellest, kumba sisendisse signaal antakse. Signaal S seab trigeri loogilisse seisundisse 1 ja signaal R loogilisse seisundisse 0.
JK-trigeri tööpõhimõte sarnaneb RS-trigeri käitumisele.
D-trigeril on üks sisend ja selle seisund oleneb sisendisse antava signaali tasemest (loogilise 1 korral lülitub seisundisse 1 ja loogilise 0 korral seisundisse 0). Trigeritega mälu on palju kiirem kui kondensaatoritega mälu, seetõttu kasutatakse seda tavaliselt vahemäludes, mis on mikroprotsessorisse sisse ehitatud. Nende mälude puudus on palju kõrgem hind võrreldes DRAM-mäludega. Seetõttu on nende kasutamine piiratud väiksema arvu mälupesadega.

3.3 ROM, PROM, EPROM, EEPROM, välkmälu.

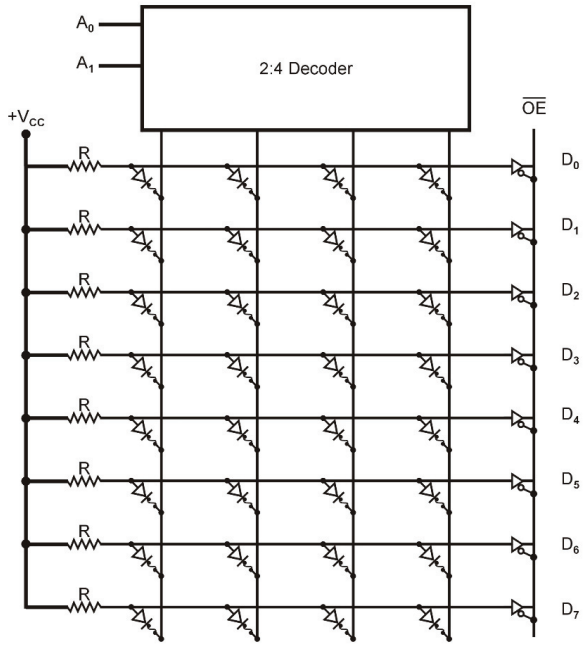
Peaaegu kõik nüüdisaegsed digitaalskeemide baasil ehitatud elektroonikaseadmed (mikroprotsessorid, mikrokontrollerid, nutitelefonid, nutikellad, ruuterid, digitaalsed telerid, GPS-navigeerimisseadmed jne) vajavad säilmälu. Selles salvestatakse tavaliselt mõned programmid ja info, mis ei kao süsteemi elektritoite väljalülitamisel. Sellised mälud programmi salvestamiseks on säilmälud (püsimälud). Need on energeetiliselt sõltumatud ja kui midagi on neisse salvestatud, suudavad need seda infot lõputult säilitada. Tavaliselt kirjutatakse sinna programmi kood, mida süsteemi mikroprotsessor hakkab täitma.

3.3.1 ROM - (püsimälu).

Seda tüüpi mälu programmeerib ainult tootja konkreetse kiibi tootmiseprotsessis. Seda tehakse tehnoloogiaga, mis põhineb pooljuhi elementide struktuuri iga kihi kujundamisel litograafilise meetodiga. Nagu nimi näitab, ei saa kasutaja sinna andmeid kirjutada. Seda saab kasutada ainult lugemiseks. Tootja programmeerib ise ja esialgsed tootmise arendus- ja korralduskulud on küllalt suured, seega on neid majanduslikult mõistlik toota ainult suurte partiidena. Mälupesaga kahjustumise (ka ühe biti) korral tuleb välja vahetada kogu mälu (vahetada kiip uue vastu).

3.3.2 PROM - (programmeeritav püsimälu).

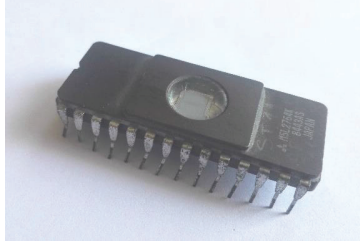
Kui on vaja väiksemaid partiisid, kasutatakse nn PROM-mälusid. Seda mälu saab kasutaja programmeerida ainult üks kord. Programmeeritakse pooljuhtmaatriksi soovimatute ühenduste (bittide) läbipõletamisega. Pärast seda saab programmeeritud lülitust kasutada ainult lugemiseks. Nagu ka ROM-mälu korral, tuleb kahjustumise (ka ühe biti) korral välja vahetada kogu mälu (vahetada kiip uue vastu). Neljabaidise programmeeritava PROM-mälu lihtsustatud skeem joonisel Figure 3.3.



Joonis 3.3. Neljabaidise PROM-mälu lihtsustatud skeem

3.3.3 EPROM (Ümberprogrammeeritav püsimälu)

Seda mälu saab programmeerida mitu korda. See kustutatav mälu on PROM-mälu täiustatud versioon. Programmeeritakse asjakohase riistvaraga, mida nimetatakse EPROM-programmaatoriks. Nende mälude kustutamine ja ettevalmistamine uueks programmeerimiseks toimub ultraviolettkiirgusega. Selle jaoks on olemas aken kiibi peal, mis on valguse eest kaitsmiseks kaetud. Saadaoleva info kustutamiseks on vaja eemaldada kaitsekate ja seda kohta vastava valgusega valgustada umbes ühe tunni jooksul. Mälu kustutamine ultraviolettkiirgusega tähendab, et kõikidesse mälupesadesse salvestatakse loogiline 1. Kui info kustutatakse ja programmeeritakse uuesti, tuleb kate tagasi panna, et vältida uute andmete kadumist. Joonisel 3.4 on näidatud EPROM-kiip. In Fig. 3.4 is presented an EPROM integrated circuit.



Joonis 3.4. EPROM mälukiip

3.3.4 EEPROM - (Elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu)

Ka neid mälusid saab programmeerida mitu korda.
EEPROM – elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu kustutatakse elektriliselt ja lülitus läheb spetsiaalsele režiimile. EEPROM-mälude programmeerimine toimub elektriliselt, seega saab kustutada ja uuesti programmeerida ilma kiipi trükkplaadilt eemaldamata. Peale selle saab EEPROM-mäludel ümber programmeerida või muuta ainult soovitud osa, mitte kogu mälu nagu EPROM-il.

3.3.5 Välkmälu

EEPROM-mälu versioon, mida saab kirjutada ja lugeda väga suure kiirusega (ülikiire ehk välkmälu). Nagu ka EEPROM-i, saab seda korduvalt programmeerida trükkplaadilt eemaldamata. Selleks on välkmäludes lülituse osa, mis tagab nende ümberprogrammeerimise. Võrreldes EEPROM-iga on kustutamise ja ümberprogrammeerimise aeg palju lühem. Mälupesade struktuur välkmälus on suhteliselt lihtne, mis võimaldab ühte kiipi integreerida palju mälupesi. See on seda tüüpi mälu üks põhieelistest. Tänu nendele omadustele on välkmälusid viimastel aastatel laialdaselt kasutatud. Puudus on see, et ainult ühe baidi andmete kustutamiseks ja programmeerimiseks on vaja kustutada ja programmeerida välkmälus terve andmeplokk.

3.4 Enesekontroll

1. Milline nendest mälutüüpidest on muutmälu?
    a. RAM
    b. ROM
    c. EPROM
    d. EEPROM

2. Millist mälutüüpi saab klient programmeerida ainult üks kord?
    a. ROM
    b. PROM
    c. EEPROM
    d. EPROM

3. Millist mälutüüpi programmeeritakse ainult tehases?
    a. ROM
    a. PROM
    b. EEPROM
    c. EPROM

4. Millise mälutüübi andmete kustutamiseks kasutatakse ultraviolettvalgust?
    a. ROM
    b. PROM
    c. EEPROM
    b. EPROM

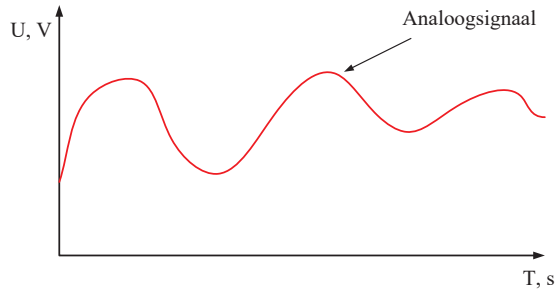
5. Milline järgnev väide ei ole tõene?
    a. Välkmälul on suuremlugemise/kirjutamise kiirus kui EEPROM mälul.
    c. EEPROM mälu saab programmeerida ainult üks kord.
    b. RAM mälu ei säilita andmeid (selles salvestatud väärtusi) pärast voolukatkestust.
    c. PROM mälu on üks kord programmeeritav mälutüüp.

4 ANALOOGSIGNAALID JA ELEKTROONIKALÜLITUSED NENDE TÖÖTLEMISEKS

Manussüsteemide kasutamine on sageli seotud erinevate suuruste mõõtmise ja juhtimisega. Neid suurusi mõõdavad andurid ja andurite signaalid on tavaliselt analoogsignaalid, mida on vaja töödelda. See peatükk tutvustab analoogsignaalide enimkasutatavaid töötlemis-tehnikaid.

4.1 Analoogsignaalid ja analoogsignaalide töötlemine

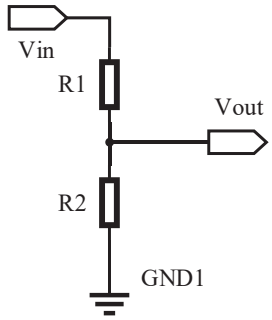
Analoogsignaalid on pidevad signaalid, mis muutuvad ajas ja kannavad infot konkreetse suuruse kohta. Manussüsteemides mõistetakse analoogsignaalide all tavaliselt pinge-signaale, mida genereerivad andurid ja mis esitavad suuruste (nt temperatuur, rõhk, valgustatus jne) mõõdetud väärtusi elektrilisel kujul.



Joonis 4.1. Analoogsignaal

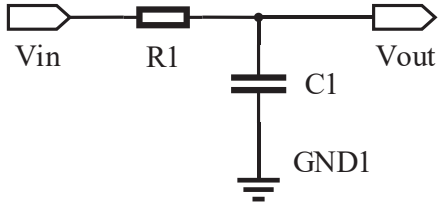
Analoogsignaalis kannab mõõdetud suuruse kohta infot tavaliselt signaali amplituud, kuid perioodilistes analoogsignaalides võivad sellist infot kanda signaali faas ja sagedus.
Tavaliselt esineb analoogsignaalides müra, mis on häiringutegur ja mille mõju tuleb võtta arvesse ning kui seda ei saa täielikult elimineerida, tuleb seda vähendada vähemalt sellise suuruseni, et see ei sega analoogsignaali õiget lugemist.
Mõned kõige laialdasemalt kasutatavad analoogsignaali töötlemistehnikad on signaalipinge vähendamine (pingejaguri abil), müra filtreerimine, väikese amplituudiga signaali võimen-damine (operatsioonivõimendite abil) jne.
Pingejagur on elementaarne lülitus, mis koosneb kahest takistist, mida kasutatakse analoogsignaali amplituudi vähendamiseks. Joonisel 4.2 on näidatud pingejaguri skeem. Väljundpinge V_{out} saadakse järgmise valemiga:

$$V_{out} = V_{in} \frac{R2}{R1+R2} \tag{4.1}$$



Joonis 4.2. Pingejagur

Teine laialdaselt kasutatav analoogsignaali töötlemistehnika on analoogsignaalist soovimatute sageduste väljafiltreerimine. Filtreerimiseks kasutatavad filtrid jaotatakse passiiv- ja aktiivfiltriteks. Passiivfiltrite valmistamisel kasutatakse takisteid, kondensaatoreid ja induktiivpoole, aktiivfiltrite struktuuris on operatsioonivõimendid. Ribalaiusest olenevalt jagunevad filtrid madalpääsfiltriteks, kõrgpääsfiltriteks, ribapääsfiltriteks ja ribatõkkefiltriteks.
Üks kõige laialdasemalt kasutatavaid passiivfiltreid on RC-madalpääsfilter, mida kasutatakse mõõteahelates müra eemaldamiseks analoogsignaalidest.
RC-filtri skeem on esitatud joonisel 4.3.

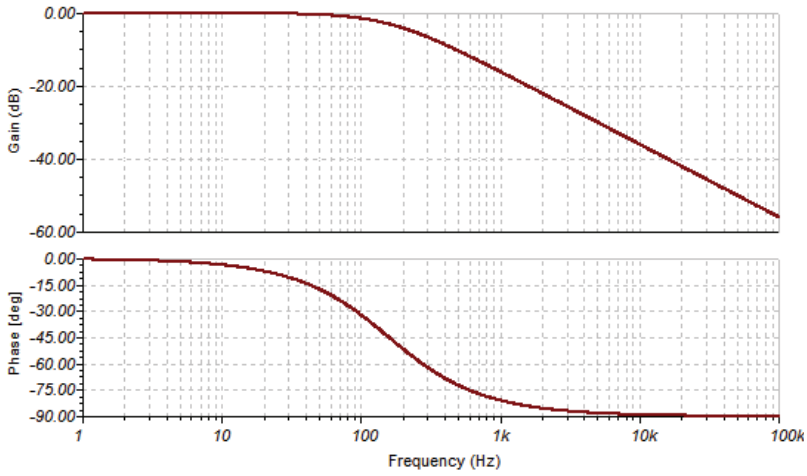


Joonis 4.3. Madalpääsfilter

Seda tüüpi filter määrab nn lõikesageduse (fc), mis on sagedus, millel filter vähendab analoogsignaali amplituudi poole võrra. RC-madalpääsfiltris määratakse see sagedus fc järgmise valemiga:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \tag{4.2}$$

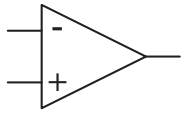
Kui takisti ja kondensaatori väärtused joonisel 3 on vastavalt 1 kΩ ja 1 µF, on lõikesagedus fc ≈ 160 Hz.
Joonisel 4.4 esitatud filtri töögraafik näitab, et fc väärtusest väiksemad sagedused pääsevad filtrist läbi ja lõikesagedusest suuremate sageduste amplituudi on oluliselt vähendatud. Peale selle muudab filter ka analoogsignaali faasi.



Joonis 4.4. Filtri karakteristikud

4.2 Operatsioonivõimendid

Nüüdisaegsetes manussüsteemides töödeldakse analoogsignaali põhiliselt operatsioonivõimenditega. Neid kasutatakse analoogsignaalide amplituudi ja faasi muutmiseks, müra kõrvaldamiseks, signaalide summeerimiseks või lahutamiseks ning signaalide skaleerimiseks kujule, mis sobib analoog-digitaal-muundamiseks. Joonisel 4.5 on esitatud operatsioonivõimendi sümbol.



Joonis 4.5. Operatsioonivõimendi

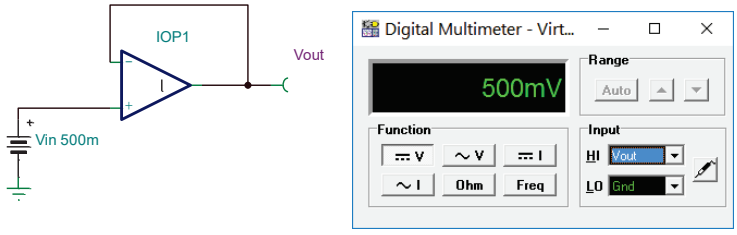
Operatsioonivõimendid on elektroonilised elemendid, mis töötavad nn negatiivse tagasisidega. Üldiselt võib operatsioonivõimendi tööpõhimõtet kirjeldada järgmiselt. Operatsioonivõimendi juhib väljundpinget selliselt, et negatiivse tagasiside kaudu võimendi negatiivsesse sisendisse antud pinge on võrdne selle positiivses sisendis oleva pingega.
Praktikas kasutatakse erinevat tüüpi operatsioonivõimendeid. Need erinevad kasutatava toitepinge (ühe ja kahe toitepingega), sisendimpedantsi, sisend- ja väljundsignaalide vahemiku ning paljude muude parameetrite poolest.

4.3 Põhiskeemid operatsioonivõimenditega

Operatsioonivõimendite jaoks on palju erinevaid skeeme, mida praktikas laialdaselt kasutatakse. Sellised lülitused on pingejärgurid, inverteerivad ja mitteinverteerivad võimendid, diferentsiaalvõimendid, instrumentvõimendid, madalpääs-, kõrgpääs- ja ribapääsfiltrid ning paljud muud analoogsignaali töötlemise põhilised lülitused.

4.3.1 Pingejärgur

Pingejärgur tagab kõrge impedantsi sisendsignaali jaoks ja väljundsignaali madala impedantsi operatsioonivõimendi väljundis. Joonisel 4.6 on näidatud pingejärguri skeem ja tulemus väljundis.



a) b)

Joonis 4.6. Pingejärgur: a) skeem, b) tulemus väljundis

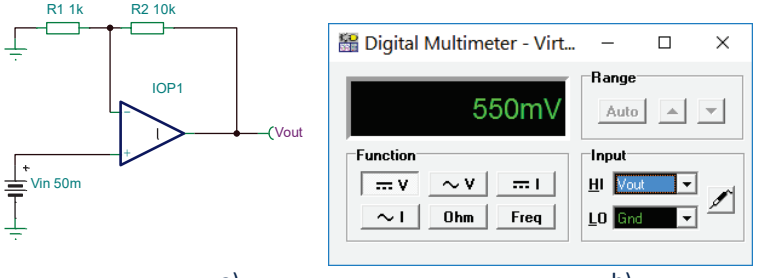
Lülitus töötab järgmiselt.

$$Vout = Vin, \tag{4.3}$$

st väljundsignaal on võrdne sisendisse saabuva signaaliga.

4.3.2 Mitteinverteeriv võimendi

Mitteinverteerivat võimendit kasutatakse signaalide võimendamiseks väljundpinge polaarsust muutmata. Seda lülitust kasutatakse laialdaselt mõõtesüsteemides. Joonisel 4.7 on esitatud mitteinverteeriva võimendi skeem.



a) b)

Joonis 4.7. Mitteinverteeriv võimendi: a) skeem, b) väljundpinge

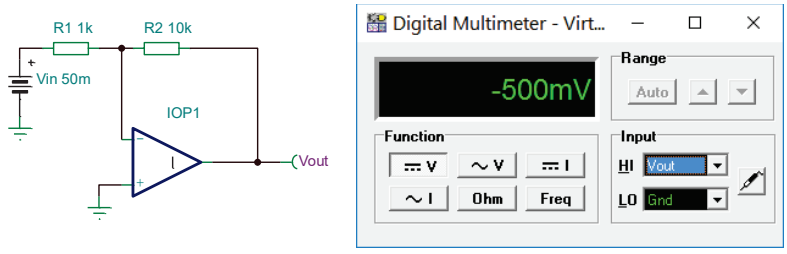
Mitteinverteeriva võimendi võrrand on:

$$Vout = Vin.\left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \tag{4.4}$$

Mitteinverteeriva võimendi võimendustegur on alati suurem kui 1, st see saab töötada ainult signaalivõimendina.

4.3.3 Inverteeriv võimendi

Inverteerivat varianti kasutatakse tavaliselt kaheastmelise toitega võimendite korral. Sellisel juhul on väljundis vastuvõetav signaal vastupidise polaarsusega, võrreldes operatsioonivõimendi sisendisse saabuva signaaliga. Joonisel 4.8 on esitatud inverteeriva võimendi skeem.



a) b)

Joonis 4.8. Inverteeriv võimendi: a) skeem, b) väljundpinge

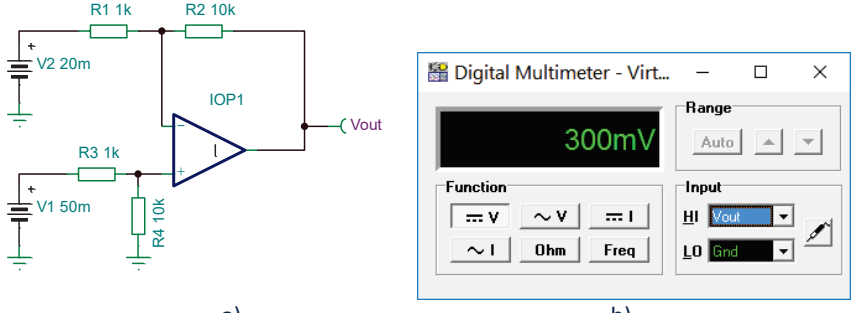
Inverteeriva võimendi tööd kirjeldab võrrand:

$$Vout = -Vin.(\frac{R2}{R1}) \quad (4.5)$$

Inverteerivat võimendit saab kasutada signaalivõimendina, kui võimenduse suhe (R2/R1) on suurem kui 1, või pingejagurina, kui võimenduse suhe (R2/R1) on väiksem kui 1.

4.3.4 Diferentsiaalvõimendi

Diferentsiaalvõimendi on laialdaselt kasutatav mõõteahel takistuslikest temperatuurianduritest, tensomeetritest ja muudest anduritest saadud signaalide võimendamiseks, mis on ühendatud Wheatstone'i silla lülitusse. Üldiselt on diferentsiaalvõimendi tööpõhimõte võimendada kahe sisendpinge erinevust vajaliku võimendusastmega.



a) b)

Joonis 4.9. Diferentsiaalvõimendi: a) skeem, b) väljundpinge

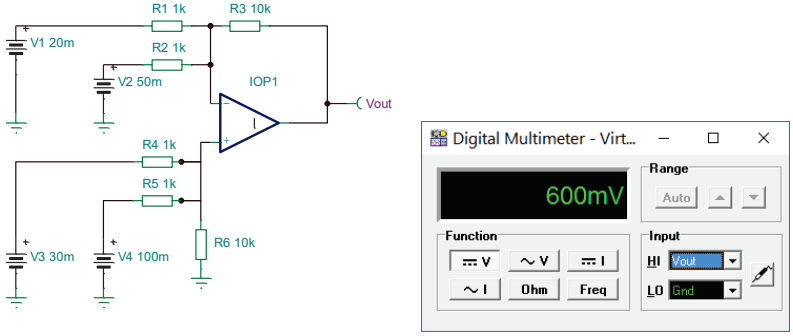
Diferentsiaalvõimendi tööd kirjeldab valem:

$$Vout = (V1 - V2)(\frac{R2}{R1}) \quad (4.6)$$

Diferentsiaalvõimendi jaoks peavad lülituses olevad takistid vastama järgmisele tingimusele: R1 = R3 ja R2 = R4.

4.3.5 Summeeriv võimendi

Summeeriv võimendi on lülitus, mis on realiseeritud operatsioonivõimendi baasil ja mis liidab kokku mitu signaali. Operatsioonivõimendi positiivsesse sisendisse saabuvad signaalid summeeritakse „+"-märgiga ja negatiivse sisendi signaalid summeeritakse „–"-märgiga. Positiivsesse sisendisse antavate signaalide arv peab olema võrdne negatiivsesse sisendisse antavate signaalide arvuga.



a) b)

Joonis 4.10. Summeeriv võimendi: a) skeem, b) väljundpinge

Joonisel 10 näidatud summeeriva võimendi väljundsignaal määratakse kindlaks valemiga:

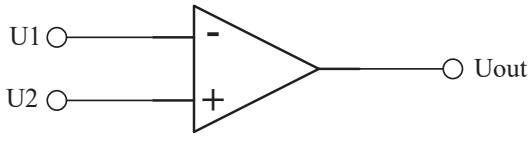
$$Vout = (V3 + V4 - V1 - V2).(\frac{R3}{R1}), \quad (4.7)$$

Takistid peavad vastama järgmistele tingimustele: R1 = R2 = R4 = R5 ja R3 = R6.

4.4 Analoogkomparaatorite tööpõhimõte

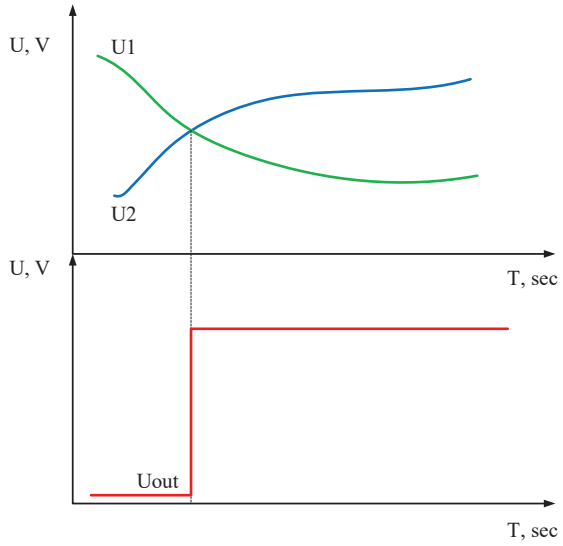
Analoogkomparaatorid on kiibid, mida kasutatakse kahe pinge võrdlemiseks. Nende sümbol sarnaneb operatsioonivõimendi sümbolile, kuid erinevuseks on, et need ei vaja töötamisel negatiivset tagasisidet. Analoogkomparaatorid on avatud kollektoriga või digitaalse (vastastakt-)väljundiga.

Joonisel 4.11 on näidatud analoogkomparaatori sümbol. Kaks pinget antakse vastavalt sisenditesse U1 ja U2.



Analoogkomparaator

Kui kahe pinge võrdlemisel negatiivsesse sisendisse antav pinge on suurem kui pinge positiivses sisendis, on väljundis madal pingetase (loogiline 0). Kui positiivsesse sisendisse antav pinge on suurem, on väljundis kõrge pingetase (loogiline 1). Ühe analoogkomparaatori tööd on näidatud joonisel 4.12.



Joonis 4.12. Analoogkomparaatori tööpõhimõte

Siin tutvustatud skeemid moodustavad ainult väikese osa kõikidest riistvaralahendustest, mida kasutatakse analoogsignaalide töötlemiseks nüüdisaegsetes manussüsteemides. Analoogsignaalide töötlemise eesmärk manussüsteemides on tavaliselt sisendsignaalide muundamine kujule, mis sobib järgnevaks analoog-digitaal-muundamiseks. See tähendab, et signaali tuleb skaleerida selliselt, et kasutatakse analoog-digitaalmuunduri vahemiku täielikku ulatust parima võimaliku eraldusvõime saavutamiseks.

4.5 Enesekontroll

1. Mis on analoogsignaal?
    a. See on pidev signaal mingi suuruse kohta, mille väärtus muutub aja jooksul ja see kannab infot;
    b. See signaal TTL loogika tasemete kohta;
    c. See on signaal mida edastatakse raadio teel;
    d. See on signaal mille amplituud on üle 100 V.

2. Pingejaguri väljundsignaal on:
    a. Suurema väärtusega kui sisendpinge;
    b. Tüüpiliselt väiksema väärtusega kui sisendpinge;
    c. Alati võrdne sisendpinge väärtusega;
    d. Täpselt pool sisendpinge väärtusest.

3. Pingejärgur
    a. Võimendab sisendpinget;
    b. Kasutatakse sisendpinge puhvrina;
    c. Summutab sisendpinget;
    d. Jagab sisendpinge väärtuse pooleks.

4. Mitteinverteeriv võimendi toimib järgmise valemi kohaselt:
    a. $Vout = Vin$
    b. $Vout = -Vin.(\frac{R2}{R1})$
    c. $Vout = Vin.(1 + \frac{R2}{R1})$
    d. $Vout = (V1 - V2)(\frac{R2}{R1})$

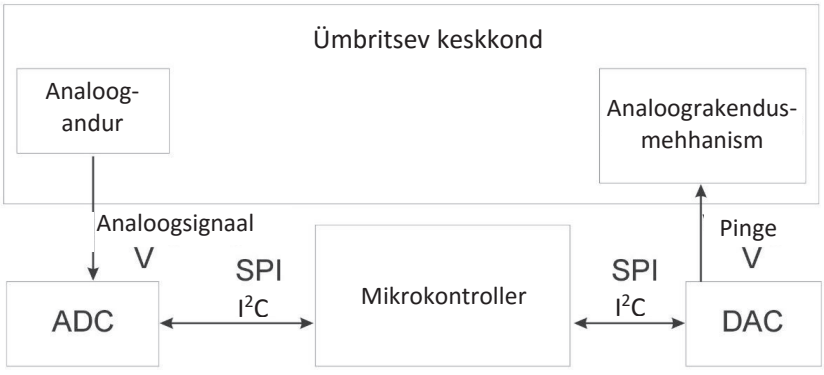
5. Analoogkomparaatoreid kasutatakse järgmisel otstarbel:
    a. Kahe pinge väärtuste võrdlemiseks
    b. Voolude otseseks võrdlemiseks;
    c. Kahe signaali sageduste võrdlemiseks;
    d. Takistuse otseseks võrdlemiseks.

5 ANALOOG-DIGITAAL- JA DIGITAAL-ANALOOG-MUUNDURID MANUSSÜSTEEMIDES

Loodus ja ümbritsev keskkond on täidetud signaalidega, mis on analoogsignaalid. Näiteks õhu, vee ja meid ümbritsevate objektide temperatuur. Samuti on sellistel füüsikalistel suurustel nagu niiskus, valgus, heli, kiirus, kaal jne analoogne loomus. Kõikide nende signaalide ühine omadus on sujuv ja pidev muutumine ajas.
Tänapäeva digitaalses maailmas mõõdetakse, salvestatakse ja töödeldakse neid signaale sageli erinevate digitaalsete seadmetega. Selle võimaluse tagamiseks on vaja muundada analoogsignaalid digitaalsele kujule. Analoogajamite juhtimiseks digitaalsete mikroprotsessorsüsteemide abil vaja muundada digitaalne info analoogsignaaliks. Seetõttu on signaalide lihtsalt ja kiirelt ühelt kujult teisele muutmiseks aja jooksul välja töötatud spetsiaalsed elektriskeemid..

5.1 Signaalide muundamine

Signaalide muundamine analoogsest digitaalseks toimub analoog-digitaalmuunduri (ADC) abil. Ja vastupidi, digisignaali muundamine analoogseks toimub digitaal-analoogmuunduri (DAC) abil. Need muundurid võivad olla eraldi, autonoomsed seadmed või nüüdisaegsete mikrokontrollerite välismoodulitesse sisse ehitatud. Üldiselt on mõlemad tüübid levinud ja neid kasutatakse nn andmehõivesüsteemis (DAQ). Joonisel 5.1 on esitatud analoogsignaalide töötlemise ja analoogtäituri juhtimise plokkskeem.



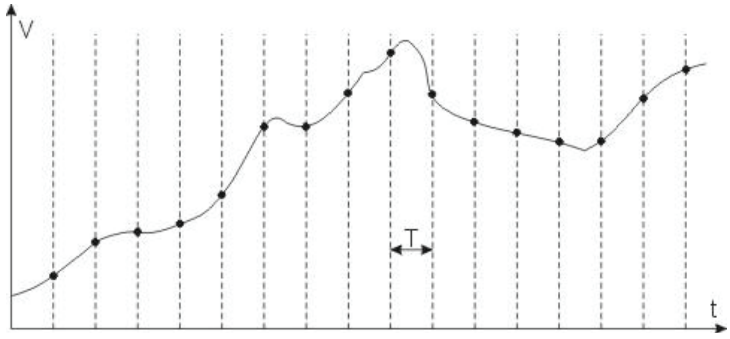
Joonis 5.1. ADC (analoog-digitaalmuundur) ja DAC (digitaal-analoogmuundur) manussüsteemis

5.2 Analoog-digitaalmuundurid

Muundamise põhimõte seisneb selles, et analoogsignaal juhitakse sobiva elektriahela kaudu mõõtvale ADC-moodulile. ADC-moodulid jaotatakse tööpõhimõtte järgi erinevatesse tüüpidesse.

Sobiva ADC valimiseks on mitu olulist parameetrit:

- Esimene parameeter on bittide arv ehk eraldusvõime, millega mõõdetud analoogväärtus muundatakse digitaalsesse vormi. Tänapäevastes ADC-des on tavaline eraldusvõime vahemikus 8–24 bitti. 8-bitises ADC-s saab mõõdetavat analoogsignaali esitada 256 väärtusega. 16-bitises ADC-moodulis saab signaali esitada 65 536 väärtusega.
- Teine parameeter on ühe biti väärtus (madalaim bitt), mis väljendab pingemuutust. 8-bitise ADC väljundi muutus 1 võrra vastab analoogsignaali muutusele 0,00391 V. 16-bitise ADC korral tähendab samasuur väljundi muutus analoogsignaali muutust 0,0000153 V. Esimesel juhul on muutus umbes 4 mV, teisel juhul umbes 15 µV. Võrdlus näitab, et teine muundur on parem (tundlikum), sest see mõõdab signaali väärtuste muutusi palju täpsemalt. Joonisel 5.2 on näidatud ajas diskreeditud analoogsignaal.
- Kolmas parameeter on ADC siirdeprotsessi kestus. See on ajavahemik, mis on kulub analoogsignaali mõõtmise tegemiseks. Mida lühem see aeg on, seda rohkem mõõtmisi saab kindlas aja jooksul teha. See võimaldab analoogsignaalist mõõta rohkem punkte. Signaali amplituudi järskude muutuste mõõtmiseks peab mõõtmisaeg olema võimalikult lühike.



Joonis 5.2. Analoogsignaali diskreetimine

Praktikas kasutatakse analoogväärtuste digitaalväärtuseks muundamisel erinevaid meetodeid ja lahendusi. Näiteks muundamine loendamisega, paralleelne muundamine, muundamine integreerimisega, topeltintegreerimisega, sigma-delta jne.

5.2.1 Kahekordse integreerimise meetod

Kahekordse integreerimisega meetod on lihtne, kuid ka kõige aeglasem muundamismeetod. Selle meetodi eelis on suhteliselt lihtne rakendamine. Meetodi puudus on, et analoogsignaali mõõtmise aeg on muutuv ja muundamine on muude meetoditega võrreldes aeglasem.

5.2.2 Järjestikune lähendamine. ADC

Järjestikune lähendamine on üks kõige laiemalt kasutatavaid meetodeid ADC-des. Selle eraldusvõime on tavaliselt vahemikus 8–12 bitti. Seade koosneb komparaatorist, digitaal-

analoogmuundurist (DAC), mahaloendustaimerist ja taktgeneraatorist. Sel juhul saadakse maksimaalne tulemus pärast n taktitsüklit (n on ADC eraldusvõime). Sellise ADC põhiomadused on suhteliselt suur kiirus ja madal hind, võrreldes muude ADC tüüpidega.

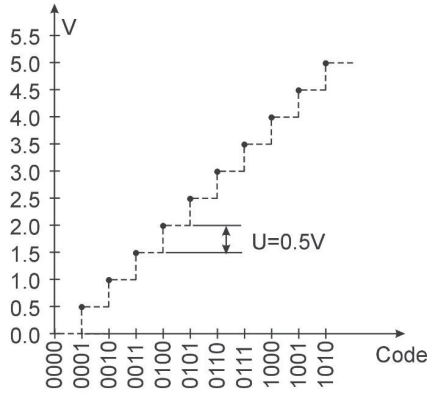
Muundamine tehakse, kui igal taktitsüklil vähendatakse loendusregistri väärtust ühe biti võrra. Registri väärtus on ühendatud DAC sisendiga. DAC väljund on ühendatud komparaatori inverteeriva sisendiga. Sisendpinge on suunatud mitteinverteerivale sisendile. Muundamise algoritm algab kõige vanema biti määratlemisega. Kui sisendpinge on suurem kui tugiväärtus, omistatakse vanimale bitile loogikaväärtus 1. Vastupidises olukorras omistatakse väärtus 0. Siis korratakse tegevust järgmise biti jaoks, kuni madalaima bitini.

5.2.3 Välkmälu meetod

Välkmäluga analoog-digitaalmuundur on konstrueeritud 2^n–1 tugipinge alusel ja 2^n–2 komparaatorite ja trigerite alusel. Sisendpinged, komparaatorid ja trigerid on konstrueeritud paralleelkanalitena ja töötavad väga kiiresti – sellest tuleb ka meetodi nimetus. Selle eesmärgi täitmiseks on iga sellise kanali jaoks vaja tugipinget. Kõige sagedamini tehakse seda ühe allikpinge abil, mis jaotatakse igale kanalile takistusliku jaguri abil. Seega saadakse 2^n–1 tugipinget. Kõikide komparaatorite negatiivne sisend on ühendatud oma tugipingega ja positiivne sisend mõõdetava pingega. Kui antakse sisendpinge, töötavad kõik need komparaatorid paralleelselt. Komparaatorite väljundid on ühendatud eraldi trigeritega. Trigerite signaalid on ühendatud prioriteetsusdekoodri sisenditega. Prioriteetsusdekoodri väljundid väljastavad konverteerimistulemuse kahendsüsteemis.

5.3 Digitaal-analoogmuundurid

Kasutatakse, kui digitaalne mikroprotsessorsüsteem peab täituri juhtimiseks andma analoogsignaali. Sel juhul on vaja digitaal-analoogmuundurit (DAC). Joonisel 5.3 on diagramm DAC väljundkarakteristikuga. Sellel näidatud DAC-l on 4-bitine eraldusvõime.



Joonis 5.3. DAC väljundkarakteristik

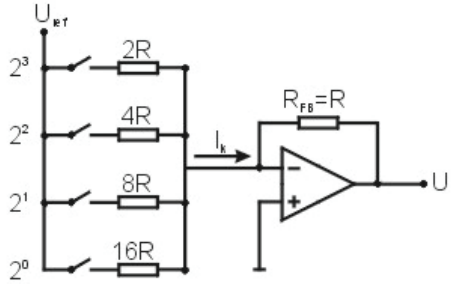
Nagu näha jooniselt 5.3, on DAC väljundsignaal diskreetse funktsiooni kujul. Karakteristiku see omadus tulenebki DAC väljundsignaali diskreetsest olemusest.

DAC oluline parameeter on kiirus. See on määratud ajaga, mis kulub väljundi stabiilse seisundi saavutamiseks.

Läbi aegade on rakendatud mitmeid DAC skeemide lahendusi.

5.3.1 Voolude summeerimisega DAC.

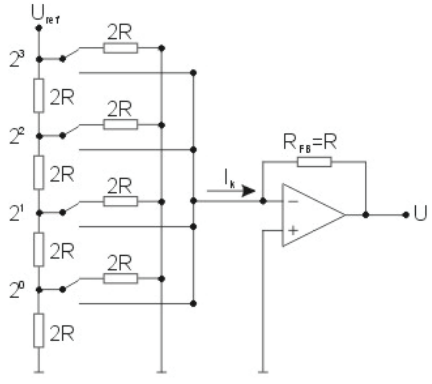
Nagu nimetus näitab, võtavad selle meetodiga töötavad muundurid tulemuse vastu voolude summeerimise teel. Oluline tingimus selliseks töötlemiseks on, et voolude summeerimise ahelate takistid peavad olema valitud nii, et takistuste väärtused on vastavuses oma binaarse kaaluteguriga. Joonisel 5.4 on esitatud voolude summeerimisega DAC skeem.



Joonis 5.4. Voolude summeerimisega DAC

5.3.2 Takistite maatriksi voolude summeerimisega DAC.

Kasutades võrdse takistusega takististe maatriksit, tekib voolu järjestikuste jagamistega elektriahel, milles võetakse arvesse ka kaalutegurid. Joonisel 5.5 on takistite maatriksi voolude summeerimisega DAC skeem.

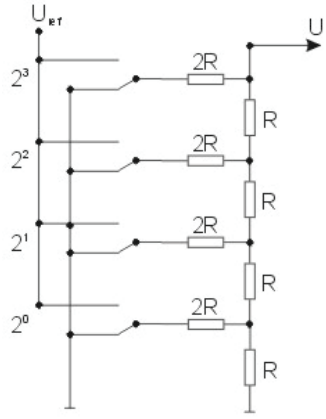


Joonis 5.5. Takistite maatriksi voolude summeerimisega DAC

5.3.3 Takistite maatriksi pingete summeerimisega DAC.

See DAC on konstrueeritud pingete summeerimise põhimõttel. Skeemis kasutatakse takistite maatriksit ja seade ettenähtud samade probleemide lahendamiseks, kui eespool kirjeldatud

voolude summeerimisega variant. Joonisel 5.6 on takistite maatriksi pingete summeerimisega DAC skeem.



Joonis 5.6. Takistite maatriksi pingete summeerimisega DAC

Summeeritakse ainult pinged nendelt liinidelt, mille sisendi seisundid on lülitatud loogilise 1 väärtusele.

5.4 Enesekontroll

1. Mida teeb analoog-digitaalmuundur (ADC)?
    a. Muundab analoogsignaali väärtuse digitaalse arvu vääruseks;
    b. Muundab digitaalse arvu väärtuse analoogsignaali väärtuseks;
    c. Muundab signaali sageduse väärtuse digitaalse arvu väärtuseks;
    d. Muundab digitaalse arvu signaali sageduse väärtuseks.

2. Mida teeb digitaal-analoogmuundur (DAC)?
    a. Muundab analoogsignaali väärtuse digitaalse arvu vääruseks;
    b. Muundab digitaalse arvu väärtuse analoogsignaali väärtuseks;
    c. Muundab signaali sageduse väärtuse digitaalse arvu väärtuseks;
    d. Muundab digitaalse arvu signaali sageduse väärtuseks.

3. Mis on ADC väljundi stabiilse seisundi saavutamise aeg?
    a. Ajavahemik mille jooksul on lubatud kasutada konkreetset ADC;
    b. Ajavahemik, mis kulub ADC väljundi stabiilse seisundi saavutamiseks analoogsignaali mõõtmisel;
    c. ADC koosseisus oleva sagedusgeneraatori signaali ühe perioodi pikkus.
    d. Mitte ükski ülalmainitud väidetest pole tõsi.

4. Milline on kõige kiiretoimelisem ADC?
    a. ADC mis kasutab kahekordse integreerimise meetodit;
    b. ADC mis kasutab järjestikuse lähendamise meetodit;
    c. Välkmäluga analoog-digitaalmuundur;
    d. Kõikidel ülalmainitud ADC tüüpidel on sama muundamiskiirus.

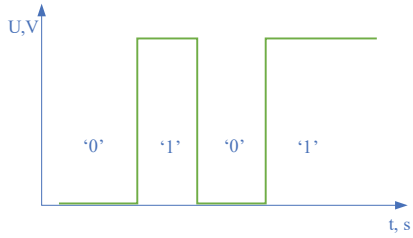
5. DAC väljundpinge muutub astmeliselt. Väljundpinge väärtust muudetakse ühe astme võrra kui sisendisse antud digitaalse arvu väärtus muutub 1 võrra. Millest sõltub väljundpinge väärtuse muutumise ulatus?
    a. Teistest elektriahelatest mis on DAC kõrval;
    b. DAC eraldusvõimest;
    c. Mikrokiibi töötemperatuurist;
    d. Päikesekiirgusest.

6 DISKREETSED JA SAGEDUSLIKUD SIGNAALID MANUSSÜSTEEMIDES

Mikroprotsessorite maailm on digitaalne, seadmed suhtlevad omavahel digitaalsete signaalide abil, nende programmid ja andmeinfo on mälus salvestatud kahendarvudena. Manussüsteemid kasutavad anduritest ja sisendseadmetelt info kogumiseks samuti digitaalseid signaale, et juhtida täitureid või olla andmevahetuses muude elektriahelatega. See käsitleb digitaalsete signaalide karakteristikuid, samuti manussüsteemide digitaalsete sisendite ja väljundite rakendamist.

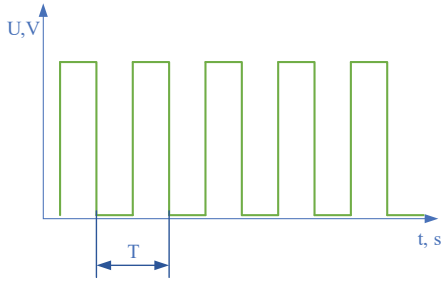
6.1 Diskreetsed ja sageduslikud signaalid

Definitsiooni kohaselt on digitaalne signaal selline, mida kasutatakse andmete esitamiseks diskreetsete väärtuste järjestusena. Konkreetsel ajahetkel saab signaalil olla ainult üks väärtus piiratud hulgast väärtustest, näiteks kahendsignaalil on neid väärtusi ainult kaks – loogiline 0 või loogiline 1. See digitaalsete signaalide omadus on vastupidine analoogsignaalidele, mille korral signaalil võib igal hetkel olla väärtus pidevast väärtuste reast
Digitaalsed signaalid jagunevad diskreetseteks ja sageduslikeks. Diskreetsed kahendsignaalid saavad olla kahe väärtusega: loogiline 0 ja loogiline 1. Tavaliselt töötavad digitaalsed sisendid või väljundid nendel väärtustel. Joonisel 6.1 on diskreetne signaal.



Joonis 6.1. Diskreetsed signaalid

Kui digitaalne signaal muutub perioodiliselt ja kindla regulaarsusega, siis räägime nn sageduslikest signaalidest. Sageduslikele signaalidele on tüüpiline, et signaali formaat kordub teatud ajavahemiku järel. Seda ajavahemikku nimetatakse signaali perioodiks ja tähistatakse tavaliselt tähisega T (joonis 6.2). Perioodi mõõdetakse sekunditega.

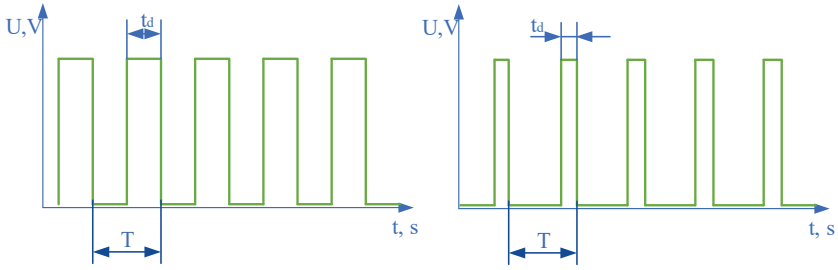


Joonis 6.2. Sageduslik signaal

Sagedus f, millega signaal ajas kordub, on määratletud valemiga:

$$f = \frac{1}{T}, \tag{6.1}$$

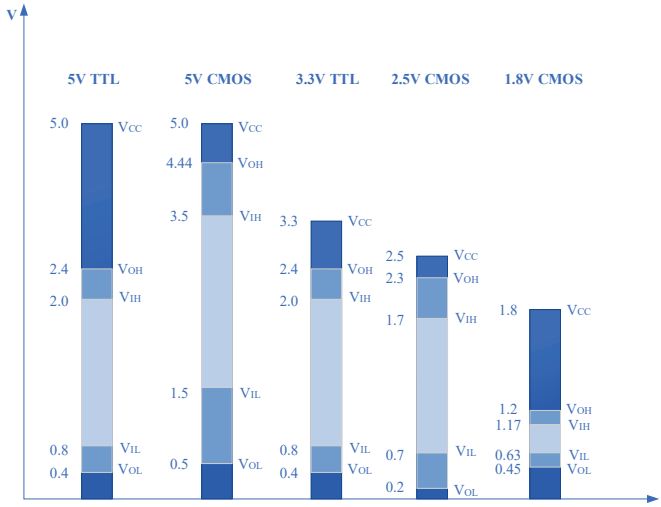
kus f on mõõdetud hertsides (Hz). Sageduslikke signaale kasutatakse nn kestusmõdulatsioonis (ka pulsi-laiusmodulatsiooniks) (joonis 6.3). Samal sagedusel muutub käidutsükkel (td) ehk täitetegur. Täitetegur võib muutuda 0–100%.



Joonis 6.3. Kestusmodulatsioon (ka pulsi-laiusmodulatsioon)

6.2 Loogiliste signaalide nivood

Mikroskeemid, nagu ka muud elektroonikakomponendid vajavad töötamiseks sobivat toitepinget. Tänapäevased kiibid töötavad erinevate toitepinge standardite alusel. Nende standardite alusel määratletakse loogilise 0 ja loogilise 1 nivood. Nivood määratletakse sisendnivoodena (need, mis antakse ahela sisenditele) ja väljundnivoodena (need, mis saadakse väljunditest). Joonisel 6.4 on esitatud kiipides kasutatud erinevaid loogilisi standardeid.

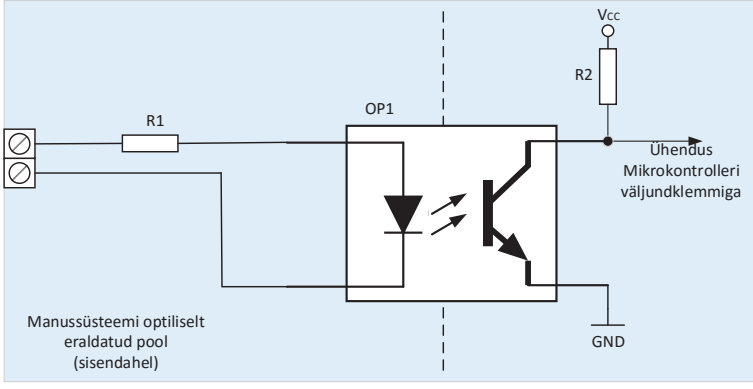


Joonis 6.4. Loogiliste nivoode standardid

Loogilise 0 nivoo on määratletud vahemikus 0–VIL ja loogilise 1 nivoo vahemikus VIH–VCC. Väljundnivood muutuvad loogilise 0 korral vahemikus 0V–VOL ja loogilise 1 korral vahemikus VOH–VCC.
Ühes manussüsteemis võidakse kasutada erinevate toitepingetega elektriahelaid, mis töötavad erinevate loogiliste nivoode standardite kohaselt. Sel juhul on vaja nn pingetaseme muundureid.
Kiipide toitepinge tüüpiline väärtus on 3,3 V pinget ja enamik tänapäevaseid mikro-kontrollereid töötab selle pingega. Kuid on ka süsteeme, mis töötavad 5 V toitepingel. Nende signaalid on suurema mürakindlusega, aga see on saavutatud kiibi suurema võimsuskao arvel. Paljud kiibid (sh mikrokontrollerid) võimaldavad laia toitepinge ulatust, mis võimaldab nende töötamist süsteemides, kus kasutatakse loogiliste nivoode erinevaid standardeid.

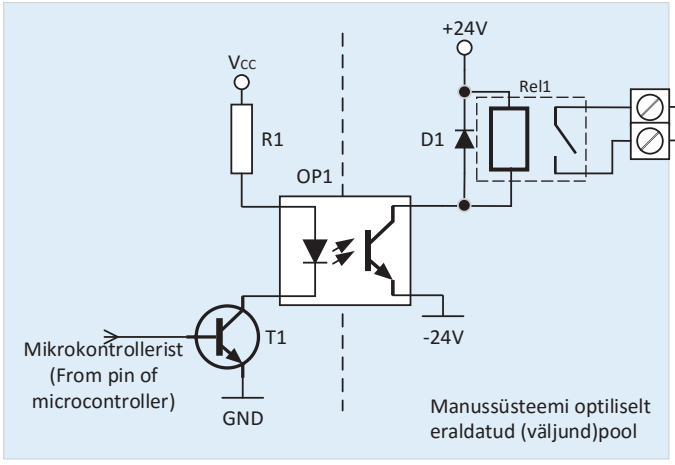
6.3 Manussüsteemide digitaalsed sisendid ja väljundid

Manussüsteemid on suuremate mehaaniliste või elektriliste süsteemide osad, mis koguvad andmeid erinevatelt anduritelt ja juhivad erinevaid tüüpi täitureid. Sel juhul peavad manussüsteemide sisendid ja väljundid töötama kiipidega võrreldes palju kõrgematel pingetel. Seetõttu peab manussüsteemide sisendite ja väljundite struktuur tagama kiibi maksimaalse kaitse välise pinge kõrgete väärtuste eest. See kaitse teostatakse kõige sagedamini optiliste sidestite (aga teisest suunast vaadates elektriliste eraldajate) abil.



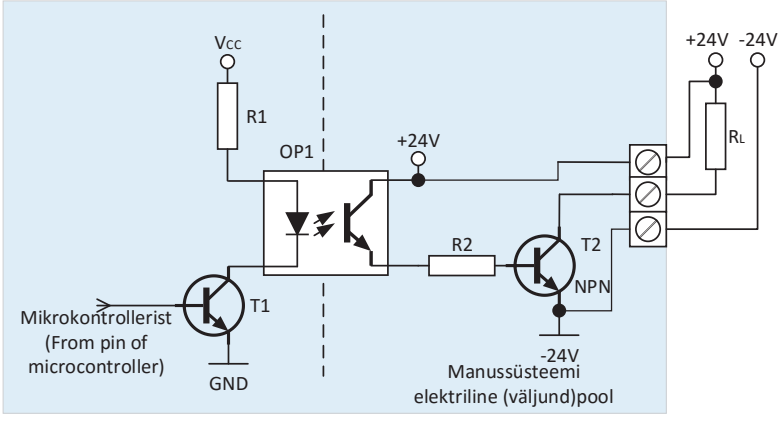
Joonis 6.5. Digitaalsisendite isoleerimine optilise sidestiga

Optiline isolatsioon tagab kiipide ja muude elektroonikaelementide eraldamise sisendi kaudu tulevate pingete eest, kasutatud optiliste sidestite läbilöögipinge suurus on mõned kilovoldid.
Nagu sisendid, nii võivad ka väljundid olla optiliselt isoleeritud. Kasutatakse kolme liiki digitaalväljundeid, olenevalt sellest, milliseid signaale lülitatakse. Releeväljundites (joonis 6.6) on võimalik lülitada nii alalis- kui ka vahelduvpingesignaale. Seda tüüpi väljundi puudus on, et kuna relee on elektromehaaniline süsteem, siis selle liikuvatel mehaanilistel osadel on piiratud kasutuskestus.

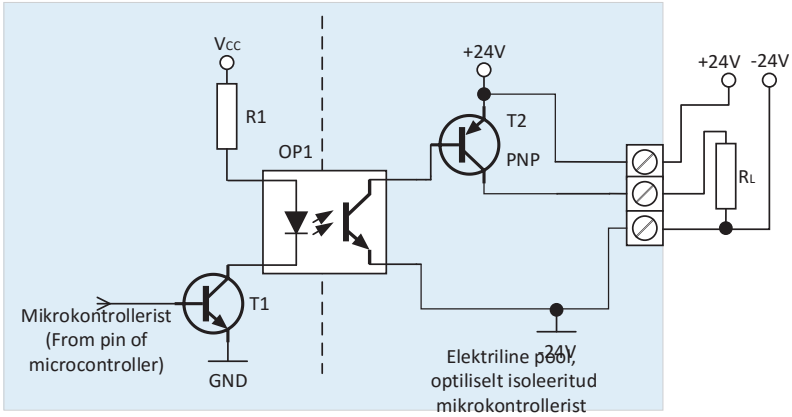


Joonis 6.6. Releeväljund

Releeväljundite seda puudust saab kõrvaldada, kasutades lülituselementidena transistoreid või sümistore.



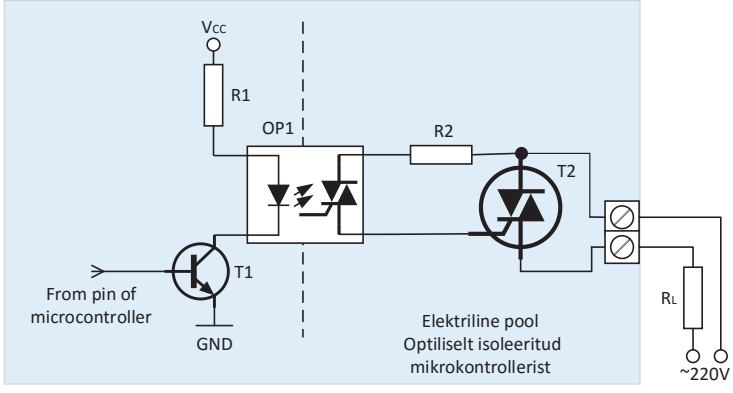
a)



b)

Joonis 6.7. Transistorväljundid: a) NPN, b) PNP

Transistorväljundeid (joonis 6.7) saab kasutada alalispinge signaalide lülitamiseks. Vahelduvpinge signaalide lülitamise jaoks need väljundid ei sobi. Transistorväljundite eelis on liikuvate mehaaniliste osade puudumine, mis võimaldab sagedast lülitamist ning sageduslike signaalide ja kestusmodulatsiooni genereerimist.
Vahelduvsignaalide lülitamisel on vaja kasutada sümistorväljundeid.



Joonis 6.8. Sümistorväljundid

Sellist tüüpi väljundite puudus on, et need ei saa lülitada alalispingesignaale, sest kui sümistor on sisse lülitatud, siis väljalülitamiseks peab seda läbiv vool olema väiksem kui kindlaksmääratud miinimumväärtus. Selline vool saavutatakse vahelduvpinge korral, kui pinge väärtus liigub läbi 0 V (nullkoht).

6.4 Enesekontroll

1. Kahendsignaalidel on:
    a. Ainult kaks võimalikku arvulist väärtust – loogiline 0 ja loogiline 1;

b. Ainult kolm võimalikku väärtust – loogiline 0, loogiline 1 ja loogiline -1;
c. Palju võimalikke pinge nivoosid;
d. Mitte ükski eelmainitutest.

2. Signaali sageduse ühikut tähistatakse:
   a. W;
   b. Hz;
   c. A;
   d. V.

3. 5 V toitepingega TTL loogikakiipide sisendite loogiliselt madala nivoo pinge väärtus on:
   a. 0V-0.8V;
   b. 0V-0.4V;
   c. 0V-1.5V;
   d. 0V-0.63V.

4. 3,3 V toitepingega TTL loogikakiipide väljundite loogiliselt kõrge nivoo pinge väärtus on:
   a. 2.4V -3.3V;
   b. 2.4V-5V;
   c. 1.5V-3.3V;
   d. 1.7V-3.3V.

5. Sümistori väljund suudab lülitada järgmisi elektrisignaale:
   a. DC signaale;
   b. AC signaale;
   c. AC ja DC signaale;
   d. Sümistor ei ole lülituselement.

7 SIDEPROTOKOLLID MANUSSÜSTEEMIDES

Sideprotokolli mõiste tähendab digitaalsete signaalide ja andmete koordineeritud ülekannet elektroonikaahelate vahel nii ühes süsteemis kui ka kahe või enama süsteemi vahel.

7.1 Info ja andmete edastamise ja vastuvõtmise meetodid

Info edastamine ja vastuvõtmine toimub digitaalse liidese kaudu. Liidesed võivad olla korraldatud nii, et andmeid edastatakse paralleelselt või järjestikku.

Paralleelpordis toimub andmeedastus nii, et iga kaheksa biti jaoks on eraldi liin, mis ühendab kahe seadme porte. Paralleelne andmeedastus võib toimuda 4, 8, 16, 32, 64 jne liini kaudu, olenevalt ühissiini moodustavate ahelate biti suurusest. Siini iga liin edastab korraga ühe biti võrra andmeid.

Erinevalt andmete paralleeledastusest edastatakse jadaedastuse korral iga konkreetse baidi iga bitt signaalide järjestikuses ajalises jadas.

Mõlemal andmeedastusviisil on omad eelised ja puudused. Paralleeledastuse eelis on, et sama kiiruse korral saavutatakse suurem andmeedastusmaht kui jadaedastusega. Puudus on, et kahe ahela vahel on vaja suurt arvu liine (nn siine). Siinis olevate liinide arv oleneb edastatavate andmete suurusest bittides. Jadaedastuse eelis on, et andmeedastus toimub siinis, mis kasutatavast protokollist olenevalt koosneb ainult 2–4 liinist. Kahjuks on andmeedastusmaht palju väiksem, kui andmete paralleeledastuse korral.

Võrdluseks, kui andmeid edastada sama taktsagedusega 1 Hz:

- 8 bitise siini kaudu andmete paralleeledastuse korral edastatakse 1 bait sekundis ja 60 baiti minutis. Kui siinilaius on 16 bitti, siis edastatakse 2 baiti sekundis ja 120 baiti minutis. 32-bitise siini korral edastatakse 4 baiti sekundis ja 240 baiti minutis.
- jadaedastuse korral edastatakse 1 bitt sekundis, 60 bitti minutis – see on vähem kui 8 baiti.

Edastatud signaalid võivad olla ühesuunalised (simpleks) saatja ahela väljundpordist vastuvõtja ahela sisendpordile. Mõned liidesed on võimelised andmeid edastama mõlemas suunas korraga (dupleks). Nendel juhtudel kasutatakse igas ahelas portide paari, üks on sisendsignaali ja teine väljundsignaali jaoks.

Kahesuunalise andmeedastuse jaoks saab rakendada kahte meetodit. Esimese meetodiga toimub andmete edastamine ja vastuvõtmine ühel liinil, kuid erinevatel ajavahemikel. Seda meetodit nimetatakse poolDupleksiks. Kui üks ahel edastab andmeid, siis teine ahel on vastuvõtmise režiimil. Teine meetod on andmete edastamine samal ajal, kuid kahe eraldi liini kaudu. Sellepärast nimetatakse seda meetodit täisdupleksiks.

Ühendus (täpsemalt seos) ja andmete edastamine saab toimuda kahe seadme vahel, esimene on põhiseade (ülemseade) ja teine juhitav (alluvseade). Andmeid on võimalik edastada ka mitme seadme vahel. Sel juhul on üks nendest programmeeritud põhiseadmeks (ülemseadmeks) ja kõik teised on juhitavad (alluvad).

Et oleks võimalik ühendada (ja selle tulemusena seostada) rohkem seadmeid ja edastada rohkem andmeid, on vaja, et seadmed kasutaksid asjakohast protokolli. Veelgi enam, vajalik tingimus on, et ahela kõik osad oleksid seadistatud töötama sama protokolliga.

Sideprotokoll on komplekt reegleid, mis sisaldab andmete edastamise sagedust, bittide arvu, algusesignaali, lõpusignaali, paarsuse kontrollimist jne.

7.2 Väline jadaliides (SPI)

In the late 1980s, Motorola developed the SPI interface. Soon afterwards, it gained wide popularity and became one of the most widely used interfaces in digital microprocessor devices and systems.

1980. aastate lõpus töötas Motorola välja SPI-liidese, inglise k. **S**erial **P**eripheral **I**nterface (SPI). Varsti saavutas see suure populaarsuse ja muutus digitaalsetes mikroprotsessor-seadmetes ja süsteemides kõige laiemalt kasutatavaks liideseks.

Väline jadaliides (SPI) on ette nähtud andmete sünkroniseeritud edastamiseks üksikute ahelate või seadmete vahel. Selle liidese eelis on, et riistvara on väga lihtne rakendada. Kõige enam kasutatakse seda liidest andmete edastamiseks mikrokontrollerite, EEPROM-mälude, klaviatuuride, hiirte, ekraanide, ADC, DAC, sagedusjagurite, sünkronisaatorite jne vahel. SPI kaudu toimub andmete jadaedastus. Ahelate vaheline füüsiline ühendus on teostatud neljaliinilise siiniga. Esimene liin on ühendatud signaali jadaväljundiga (SDO) ja selle kaudu toimub andmete jadaedastus. Teine liin on ühendatud signaali jadasisendiga (SDI) ja selle kaudu toimub jadaedastuse andmete vastuvõtmine. Kolmandas liinis edastatakse jadatakti-signaali (SCK signal) seadmete taktgeneraatorite sünkroniseerimiseks. Neljanda liini kaudu juhitakse alluvseadme valiku signaali (Slave Select signal, SS signal) või kiibivaliku signaali (Chip Select signal, CS signal). Need on seadme valimiseks. SPI-liidese abil saab rakendada andmeedastuse täisdupleksmeetodit üheaegseks andmeedastuseks, sest side toimub kahe andmeliini kaudu, kummagi suuna jaoks üks. Andmeedastuse ajal on üks seade ülem ja teine alluv. SCK sünkroniseerimise signaal kõikide siini seadmete jaoks tuleb ülemseadmelt.

Ahelate väljundite identifitseerimiseks kasutatakse ühtlustatud standardseid tähistusi:

- MISO - **M**aster **I**n **S**lave **O**ut mode - (sisendis ülem, väljundis alluv). Liin on konfigureeritud nii, et selle sisend on ülemseadme jaoks ja väljund on alluvseadme jaoks.
- MOSI - **M**aster **O**ut **S**lave **I**n mode - (väljundis ülem, sisendis alluv). Liin on konfigureeritud, et väljund on ülemseadme jaoks ja sisend on alluvseadme jaoks.
- SS - **S**lave **S**elect – (alluvseadme valik). Ahela viik on konfigureeritud kas 1 või 0 jaoks, olenevalt sellest, kas seade on ülem (1) või alluv (0).
- SCK - **S**erial **C**loc**K** – (jadatakt). Liini kasutatakse ülemseadmelt taktsignaalide genereerimiseks alluvseadmete jaoks.

Ülemseadme MOSI-viik on ühendatud alluvseadme MOSI-viiguga (ehk need on seotud). Vastavalt on ühendatud ülemseadme MISO-viik alluvseadme MISO-viiguga. Kui on tegemist rohkem kui ühe alluvseadmega, tuleb MOSI-liin puhverdada takistiga, mis on ühendatud toitepingega. Kõikide ahelate SCK-viigud on lühistatud. Kõikide alluvseadmete SS-viigud on ühendatud lisaahelaga (dekoodriga), nii et igale alluvseadmele on määratud loogiline nivoo 0 seadme jaoks, mis edastab andmeid ja kõikide muude jaoks on nivoo 1, et saaks andmeid vastu võtta. Joonisel 7.1 on kahe seadme ühenduse skeem.

Joonis 7.1. Kahe seadme ühenduse skeem

Kahe seadme vahel toimub andmeside järgmiselt: seadmed on eelkonfigureeritud töötamiseks SCK-signaali sama frondiga. Sünkroonimine toimub selle järgi, milline signaali serv on valitud juhtivaks (tõusev või langev). Ülemseade genereerib SCK-liinile taktsignaali alluvseadme sünkroonimiseks. Selle signaali järgi liigutatakse andmeid registritesse (LSb-st MSb-le) mõlemas seadmes samal ajal. Joonisel 7.2 on esitatud signaalide edastamise skeem.

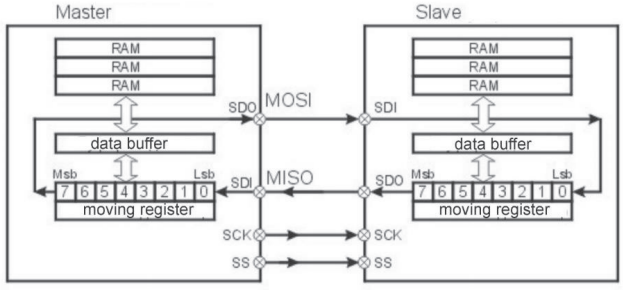


Fig. 7.2. SPI communication master slave

Esimene samm on, et nihkeregistri puhver aktsepteeriks tervelt andmeplokilt saadud väärtuse ülekande jaoks. Andmeedastusega oodatakse, kuni ülekandeliin on vaba. Puhvri väärtus edastatakse nihkeregistrisse, samas genereeritakse automaatselt andmeedastuspäring. Algab andmebittide nihutamine andmeregistris, see toimub SDI-viigult SDO-viigule. Kui 8 bitti on edastatud, siis genereeritakse infosignaal ülekandebaidi jaoks ja vastuvõetud andmed liigutatakse registrist ahela puhvrisse. Nüüd algatatakse mõlemas ahelas riistvaraline protseduur, millega edastatakse andmed puhvrist andmeploki mälusse. Samal ajal algab andmete ülekandejärjestuses järgmise baidi paigutamine puhvrisse. Pärast viimase infobaidi edastamist genereeritakse andmete ülekande lõpusignaal. Et liinid on füüsiliselt ühenduses, siis liiguvad andmed nii ülemseadme MOSI-liinist alluvseadmesse kui ka alluvseadme MISO-liinist ülemseadmesse. Selles olukorras on kolm erinevat situatsiooni, kui üks ühendatud seadmetest saab saata andmeid, mis on kehtetud või soovimatud.

- Esimene juhtum on, kui ülemseade saadab kehtivaid andmeid ja samuti saadab kehtivaid andmeid alluvseade.

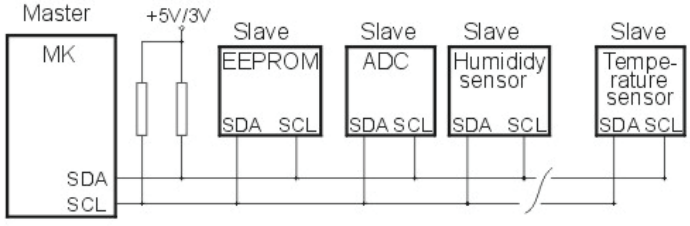
- Teine juhtum on, kui ülemseade saadab kehtivaid andmeid, aga alluvseade saadab kehtetuid andmeid (liinil saadetakse mõned juhuslikud väärtused, mis olid jäänud alluvseadme nihkeregistrisse).
- Kolmas juhtum on, kui alluvseade saadab kehtivaid andmeid ja ülemseade saadab kehtetuid andmeid (liinil saadetakse mõned juhuslikud väärtused, mis olid jäänud ülemseadme nihkeregistrisse).

Eespool kirjeldatud kolme juhtumi korral võivad mõlemad seadmed (ülem- ja alluvseade) reageerida erinevalt, olenevalt nende eelseadistustest ja sellest, mis funktsioone need sel hetkel täidavad.

- Esimesel juhul edastavad mõlemad seadmed (ülem- ja alluvseade) vastuvõetud andmed nihkeregistrist andmepuhvrisse ja seejärel alustatakse protseduuri vastuvõetud andmete väärtuse kirjutamiseks puhvrist mäluplokki.
- Teisel juhul edastab ülemseade vastuvõetud andmed nihkeregistrist andmepuhvrisse, kuid ei alusta protseduuri vastuvõetud andmete väärtuse kirjutamiseks puhvrist mäluplokki. Alluvseade reageerib samal viisil, kui on kirjeldatud esimesel juhul.
- Kolmandal juhul edastab alluvseade vastuvõetud andmed nihkeregistrist andmepuhvrisse, kuid ei alusta protseduuri vastuvõetud andmete väärtuse kirjutamiseks puhvrist mäluplokki. Ülemseade reageerib samal viisil, kui on kirjeldatud esimesel juhul.

7.3 Jadaliides I²C

Jadaliidese I²C on välja töötanud ettevõte Philips Semiconductor. Selle eelis SPI-liidese ees on, et side toimub ainult kahe liini kaudu. Puudus on, et kui üks seade saadab andmeid, peavad muud seadmed need andmed aktsepteerima või ootama. Üks liin on andmete jadaliini signaali (Serial DAta Line signal, SDA signal) ja teine on jadataktiliini signaali (Serial Clock Line signal, SCL signal) jaoks. Joonisel 7.3 on esitatud I²C-seadmete ühendamine.

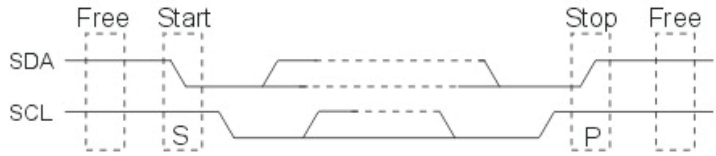


Joonis 7.3. **I²C**-side ülem-/alluvseadme vahel

I²C-liidest saab kasutada andmesideks ülemseadme ja paljude alluvseadmete vahel. Iga tootja seadistab oma 4 bitist koosneva tehaseaadressi. Süsteemi projekteerimisel seadis-

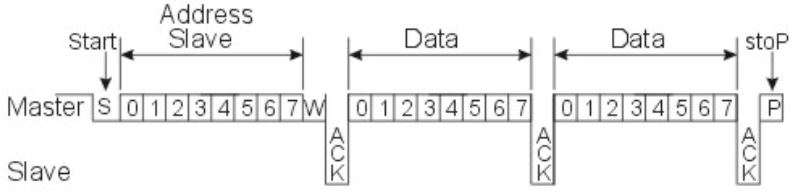
tatakse iga alluvseadme jaoks 3 bitist koosnev riistvara-aadress. See võimaldab liiniga ühendada kuni 127 erinevat kiipi. Standardne andmeedastuskiirus I²C kaudu on 100 kbit/s, kiirel režiimil 400 kbit/s ja ülikiirel režiimil 3,4 Mbit/s. Siiniga ühendatud seadmetes saab infovahetuseks kasutada teistsugust kiirusrežiimi.

I²C-andmesidet saab algatada ainult ülemseade. Esimese sammuna kontrollitakse, kas liin on vaba, mis tähendab, et SDA- ja SCL-liinidel on kõrge signaalitase. Ülemseade genereerib algusesignaali, mis on kõikide seadmete jaoks käsk jälgida liini. (Joonisel 7.4 on näidatud signaal vaba liini jaoks, samuti I²C-liidese alguse- ja lõpusignaalid).

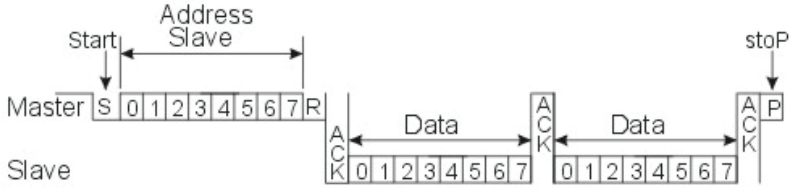


Joonis 7.4. Vaba liini, alguse- ja lõpusignaalid I²C-andmeside jaoks

Seejärel saadetakse selle seadme aadress, millega peetakse sidet. Aadressi viimase (mädalaima) biti abil teatatakse alluvseadmele, kas andmeid on vaja vastu võtta või saata. Seade, mis tunneb oma aadressi ära, vastab kinnitussignaali (ACK) genereerimisega. Andmeid vastuvõttev seade edastab kinnitussignaali alati pärast iga edukalt vastuvõetud baiti. Kui andmeid saatev seade seda signaali ei saa, siis see seade lõpetab andmete edastamise. Pärast kogu andmepaketi edastamist genereerib ülemseade lõpusignaali, mis tähendab, et liin on vaba. Joonisel 7.5 on esitatud signaalide järjestused kirjutamise ja lugemise ajal alluvseadmelt ja sellele.



Joonis 7.5 a) Andmete kirjutamine alluvseadmes I²C-side korral

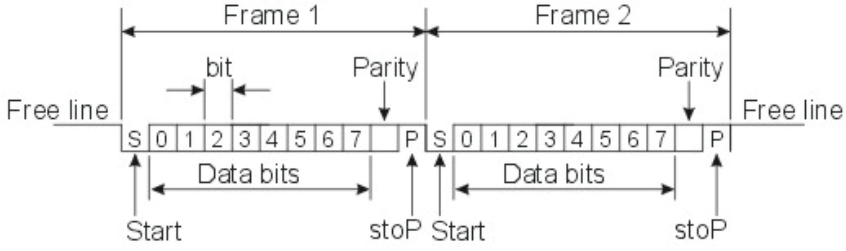


Joonis 7.5 b) Andmete lugemine alluvseadmelt I²C-side korral

7.4 Universaalne asünkroontransiiver (UART)

UART-liidese korral saab andmeid edastada pooldupleks- või täisdupleksrežiimil. Et puudub liin taktsignaali jaoks, saavutatakse sünkroniseerimine selle sageduse eelseadmisega, mida kasutades toimub andmevahetus iga ahelaga. Siiski on andmevahetuse võimaldamiseks igal ahelal oma sagedusgeneraator. Võimalikud andmesidekiirused on 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19 200, 38 400, 57 600, 115 200, 230 400, 460 800 ja 921 600 bitti sekundis. UART-liides töötab standardiga RS-232 kindlaksmääratud reeglite kohaselt. See võimaldab digitaalseid süsteeme üksteisega ja ka arvutiga lihtsalt ühendada.

Enne ühenduse käivitamist peab kasutaja mõlemad seadmed selleks seadistama. Seadistus seisneb andmesidekiiruse, andmebittide arvu ja paarsuse kontrollimise määramises. Asünkroonedastus toimub samal ajal mõlemas suunas RC- ja TX-liinidel. Saatja nihkeregister nihutab andmeid järjestikku igal taktil TX-väljundviigult vastuvõtjale. RX-sisendviigu kaudu sissetulevad andmed salvestatakse igal taktil vastuvõtja nihkeregistrisse. Et seadmete vahel puudub sünkroonimisliin, siis toimub andmete sünkroonimine nn raamide abil. Enne iga infobaidi saatmist formeeritakse individuaalsed raamid: saatja saadab algusesignaali ja pärast iga baiti saadab saatja lõpusignaali. Lõpusignaaliks võib olla 1, 1,5 või 2 bitti, olenevalt eelnevast algseadistusest. Andmebittide arv võib samuti olla erinev – 4, 5, 6, 7 või 8 bitti, olenevalt seadme seadistusest. Joonisel 7.6 on esitatud signaalide järjestus asünkroonedastuse korral.



Joonis 7.6. Signaalide järjestus asünkroonedastuse korral

Saatja riistvarasse on sisse ehitatud andmete paarsuskontrollisüsteem. Selle meetodiga saab rakendada teatud elementaarset kaitset madala tasemega vigade vastu. Selle süsteemi ülesanne on kontrollida saadetavates andmetes ühtede hulka (kõrge loogiline tase 1). Kui ühtesid on paarisarv, lisatakse lõppu loogiline 0 ja paaritu arvu korral lisatakse lõppu loogiline 1. See paarsusbitt ilmub infobittide juurde kui lisabitt (üheksas). Pärast andmete vastuvõtmist jälgib ja loendab vastuvõttev seade iga bitti. Kui vastuvõetud loogiliste ühtede arv ja paarsuskontrolli tulemus on erinev, tekib vastuvõetud andmetes veaseisund. See tähendab, et saatja saadetud andmete raamis on edastamise ajal tekkinud muutus (müra või liinihäiringud).

7.5 Enesekontroll

1. Kui palju liine kasutab SPI liides?
    a. 4 liini;
    b. 2 liini;
    c. 6 liini;
    d. 8 liini.

2. Kui palju liine kasutab I2C liides?
    a. 4 liini;
    b. 2 liini;
    c. 6 liini;
    d. 8 liini.

3. Milline järgnev ülem-/alluvseadme vahelise andmeside kohta käiv väide on tõene?
    a. Ülemseade võtab vastu käske alluvseadmetelt;
    b. Konkreetne alluvseade valib millist ülemseadet valida (adresseerida);
    c. Ülemseade juhib jadatakti liini (genereerib taktsignaale alluvseadmete jaoks);
    d. Siiniga saab seostada palju ülemseadmeid ja ainult ühe alluvseadme.

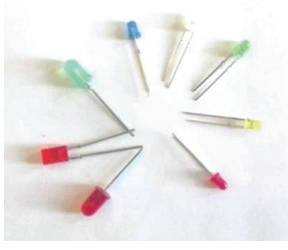
4. Täisdupleks andmeedastus tähendab:
    a. Seotud seadmed saavad saata ja vastu võtta andmeid samaaegselt;
    b. Need seadmed saavad ainult saata andmeid;
    c. Need seadmed saavad ainult vastu võtta andmeid
    d. Need seadmed algul saadavad andmeid ja siis pärast seda võtavad andmeid vastu.

8 INFO VISUALISEERIMINE

Elektroonikaseadmete kasutamisel on alati vaja seadme tegevuste kohta mingit Visualiseerimist. Visualiseerimise kaudu saab seadme kasutaja vajalikku infot. Sel viisil teab kasutaja, kas seade töötab õigesti ja mis sammuni see on oma tegevuses jõudnud. Lihtsamates vähemate funktsioonidega seadmetes toimub erinevate etappide visualiseerimine tavaliselt helisignaali või märgutulega. Selleks saab kasutada magneteid, kõlareid, lampe, leede jne. Kui on vaja kasutaja reageerimist või käsku, kasutatakse ka erinevaid lüliteid, nuppe jms. Digitaalse tehnoloogia kasutuselevõtmisega on seadmete võimekus mitmekordselt kasvanud. Sageli on vaja enne käivitamist seada erinevaid parameetreid, näiteks käivitumise viivitus, töötamise kestus, soovitud programmi valimine jne. Seadmed, millel on palju selliseid võimalusi, vajavad kindlasti rohkem kui valgus- ja helisignaali. Sellepärast kasutatakse erinevat tüüpi ekraane. Nende kaudu saab kasutaja rohkem infot ja on võimeline seadmega suhtlema.

8.1 LED – valgusdioodmärgutuled

Märgutuledeks võivad olla näiteks valgusdioodid (LED). LED on pooljuhtelement, mis on valmistatud pn-siirde baasil. Selle omadused sarnanevad tavalise dioodi omadustega. Kui LED lülitatakse pärisuunas sisse, hakkab diood kiirgama mittekoherentset valgust. Enamasti on LED tehtud ühest või enamast kristallist, mis on koondatud ühte korpusse. Valguskiire ees kasutatakse optilist läätse valguse koondamiseks ja kindlasse punkti fookustamiseks. See valguskiirgus on inimsilma jaoks nähtava (400–750 nm) lainepikkuse piirkonnas. On olemas ka valgusdioode, mille kiirgus on väljaspool nähtavat spektrit: infrapunane, ultravioletne jm. Erinevate dioodide kiiratud valguse värvus sõltub otseselt kiirguse sagedusest (ja lainepikkusest). Kiirguse sagedus sõltub kasutatavast pooljuhtkristallist ja kristallis leiduvatest lisanditest. LED-i valguskiirguse värvus on esitatud nanomeetrites (konkreetse valguskiirguse lainepikkus).



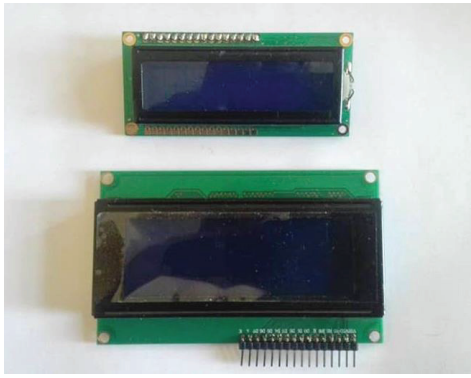
Joonis 8.1. Valgusdioodid (LED-id)

Erinevate värvuste jaoks kasutatakse kõige sagedamini järgmisi materjale: punase valguse jaoks GaP, AlGaA, GaAsP, kollase valguse jaoks GaP, AlGaInP, GaAsP, rohelise valguse jaoks GAP, GaN, AlGaP, AlGaInP, sinise valguse jaoks GaN, InGaN, SiC, Al2O3, ZnSe, valge valguse jaoks GaN, oranži valguse jaoks AlGaInP, GaAsP, oranžpunase valguse jaoks AlGaInP, GaAsP, sinirohelise valguse jaoks InGaN, infrapunase valguse jaoks AlGaAs jne. Varem kasutati infrapunase ja punase spektri valgusdioode tavaliselt kaugjuhtimisandmete edastamiseks ja

juhtseadmetes. Hiljem, teaduse arengu ja erinevate materjalide omaduste avastamise käigus hakati kasutama eespool nimetatud pooljuhtide omadusi. Praegusel ajal toodetakse valgusdioode, mis kiirgavad erinevat valgust (nii nähtavas kui nähtamatus spektriosas). LED-e kasutatakse peaaegu kõikjal, sest need on madala hinna ja väikese energiatarbega (1–50 mA). Neid kasutatakse erinevates rakendustes alates märgutulest ja valgustitest kuni reklaamipaneelideni, millel saab kuvada videopilti. Valgusdioodide baasil toodetakse erinevaid segmentnäidikute (seitse või rohkem segmenti) plokke. Kui sellised näidikud ühendada rühma, saab kuvada erinevaid numbreid, väärtusi ja isegi lühikest teksti.

8.2 LCD – vedelkristallnäidikud

Vedelkristallide omadused avastas Friedrich Reinitzer juba 1888. aastal. Laiemat kasutust leidsid need omadused peaaegu sajand hiljem: 20. sajandi lõpus. 21. sajandi alguses olid LCD-ekraanid arvuliselt võrdses kasutuses katoodkiiretoruga CRT-kineskoopidega. See ennustab kindlasti vana CRT-tehnoloogiaga toodetud ekraanide lõppu. LCD-tehnoloogia põhineb vedelkristallide kihil, mis muudab oma optilisi omadusi, kui kristallid asetada muutuva elektrilise potentsiaaliga keskkonda (st rakendada pinget). Vedelkristallide korral saavutatav minimaalsete mõõtmetega valguspunkt (piksel). Punktide tihedus võib olla 10–60 punkti/cm^2. Sellistest punktidest koostatakse maatriks, mille abil saab visualiseerida väga detailset kujutist. See tehnoloogia sobib hästi erineva suuruse ja eraldusvõimega ekraanide valmistamiseks. LCD-d on edukalt kasutusel sülearvutites, telerites, elektroonilistes mängudes, reklaamipaneelides jne. Valmistada saab ka väga väikeseid ekraane, seega sobivad need eriti hästi elektronkellade, sõidukite näidikute, olmeseadmete, kalkulaatorite, MP3- ja DVD-mängijate, väikeste elektroonikaseadmete jm jaoks. LCD-ekraanide energiatarve on väga väike ja see võimaldab neid kasutada akutoitega elektroonikaseadmetes. Algselt olid LCD-ekraanid ainult passiivset tüüpi. Vedelkristallid ise valgust ei kiirga, seega on neid ekraane võimalik vaadata päevavalguses või siis, kui need on valgustatud väljastpoolt. Hiljem töötati välja aktiivset tüüpi ekraanid, milles on kasutusel sisseehitatud lisavalgustus. Selleks võib olla külmkatoodvalgusti (luminofoor), mis on paigutatud LCD-maatriksi vastasküljele. Samuti saab kasutada sama suurt valgustusega plaati, mis paigutatakse LCD-maatriksi taha. Need on nn külmkatoodiga luminofoorlampidega (CCFL) LCD-paneelid. Külma (luminestsents-) valgust kasutatakse vedelkristallide valgustamiseks, seega vajab see meetod suuremat pinget (umbes 1000 V). See saavutatakse tavaliselt trafode abil, mis teatud määral takistavad ekraani või lõppseadme paksuse vähendamist. Siiski on need ekraanid oluliselt õhemad, kui varem laialt kasutusel olnud elektronkiiretorudega ekraanid (CRT).



Joonis 8.2. LCD-ekraanid tekstiinfo kuvamiseks

LCD-ekraanide eelised on väike energiatarve, väiksem suurus, elektromagnetkiirguse puudumine, silmade jaoks kahjuliku vilkumise puudumine jne. LCD-ekraanide puudused on, et neil on piiratud vaatenurk, iga ekraani eraldusvõime on ette määratud, Suhteliselt pikk reageerimisaeg pikslite seisundi uuendamisel (põhjustab liikuvate objektide korral ähmaseid kaadreid), ekraani ebaühtlane valgustatus, halb nähtavus liiga ereda valgusega ruumis jne.

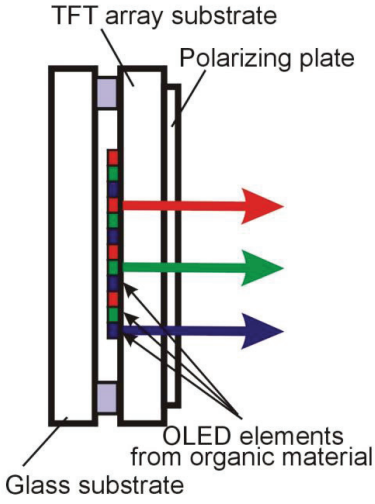
8.3 TFT – aktiivmaatriksekraanid (kiletransistoritega)

Seda tüüpi ekraanide tööpõhimõte on valgusvoo juhtimine pikslite polarisatsiooni muutmise teel. Selleks on iga piksli kohta kolm transistori. Nende transistoride ülesanne on juhtida maatriksi kindla piksli iga põhivärvuse RGB (punane, roheline ja sinine) intensiivsust. Kõigi nende juhttransistoride kiht on vedelkristallmaatriksi taga õhukeses kiles. Sellepärast nimetatakse sel viisil iga pikslit juhtiva transistori kasutamise tehnoloogiat ka TFT aktiivmaatriksiks. Võrreldes tavaliste LCD-ekraanidega, on TFT-ekraanidel suurepärane kujutise kontrastsus. Nendel ekraanidel on suhteliselt suur kaadrivärskendusjõudlus (kuni 2 ms). TFT-tehnoloogia töötati välja eelmise sajandi kaheksakümnendate aastate lõpus. Praegu on see tehnoloogia kasutusel väga paljudes elektroonikaseadmetes, kus on vaja infot visualiseerida. Neid kasutatakse videomängudes, telerites, arvutimonitorides, sülearvutites, tahvelarvutites, telefonides ja mujal.

Joonis 8.3. TFT displei 240x300 punkti

8.4 OLED – orgaaniliste valgusdioodidega ekraanid

OLED-tehnoloogial ekraanide tootmiseks kasutatakse põhiliselt kahte liiki materjali. Esimene liik on väikese molekulmassiga materjalid. SM-OLED ekraanides kasutatavad materjalid on väikeste molekulidega. Teine liik on pikkade polümeerahelatega materjalid, millest toodetakse PLED-ekraane. OLED-tehnoloogial ekraanid koosnevad mitmest õhukesest orgaanilisest kihist (iga kihi paksus umbes 100 nm). Nii on anoodi ja katoodi vahele paigutatud orgaanilised kihid. Sellised kihid on ka koos väga õhukesed ja neil ei ole vajalikku tugevust, seetõttu on need paigutatud läbipaistvale tugimaterjalile, kõige sagedamini klaasile. Kõigepealt kantakse klaasile kiht juhtivat oksiidi, mis töötab anoodina. Seejärel kantakse peale mitu orgaanilist kihti. Lõpuks tuleb uuesti anorgaaniline kiht, mis töötab katoodina. Kogu pakett on valmistatud eraldi pikslitest koosneva maatriksina. Kui rakendada anoodile-katoodile pinget, hakkavad orgaanilised kihid kiirgama valgust laias värvuste ulatuses. Võimalik on saada isegi valget kiirgust. Üldiselt on see tehnoloogia teistest palju arenenum ja palju kulukam. Sellepärast on nendel ekraanidel kõik omadused paremad kui TFT-ekraanidel. Kõrgema hinna eest on tagatud palju väiksem võimustarve, suuremad vaatenurgad, väga suur kontrastsus, palju parem ja realistlikum värvipilt jne. OLED-tehnoloogia positiivne omadus on ka eriti õhuke ekraan (1–2 mm). Väikesed mõõtmed võimaldavad OLED-ekraane kasutada nutitelefonides, nutikellades ja muudes miniatuursetes süsteemides ja seadmetes.



Joonis. 8.4. OLED displei ehitus. (Block pattern of OLEO display)

8.5 Enesekontroll

1. Mis on LCD displeide eelis võrreldes LED indikaatoritega?
    a. Väiksem võimsus, energiatarve;
    b. Heledus;
    c. Lai vaatenurk;
    d. Neil pole eeliseid.

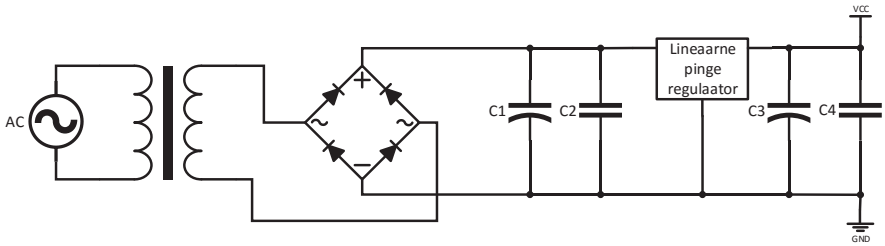
2. Valige mis on valesti järgmistes väidetes:
    a. TFT displeidel on suurepärane pildi kontrastsus;
    b. TFT tähendab - kiletransistoritega aktiivmaatriksekraanid;
    c. TFT displeid kasutavad elektronkiirt ja helendavat kattematerjali;
    d. TFT maatriksi Igal pikselil on punane, roheline ja sinine komponent.

9 MANUSSÜSTEEMIDE ELEKTRITOIDE

Iga elektroonikasüsteem peab saama sobiva elektritoite ja iga komponendi toitepinge peab nõuetekohase töötamise tagamiseks olema õige. Süsteemi õige ja vigadeta töö sõltub oluliselt selle elektritoite sobivusest. Seega on manussüsteemide konstrueerimise protsessis äärmiselt oluline valida õige elektritoide, toiteblokk, mis hoiab stabiilset pinget ja tagab vajaliku voolutugevuse. Selles peatükis on kirjeldatud erinevat liiki toitevariante, mida manussüsteemides kasutatakse, samuti nende eeliseid ja puudusi.

.

9.1 Lineaarstabilisaatorid



Joonis 9.1. Lineaarstabilisaatoriga toiteplokk

Lineaarse koormuskarakteristikuga pingestabilisaatoreid kasutatakse laialdaselt elektroonikaseadmete elektritoite allikatena. Lineaarstabilisaatorid saavad oma elektriahela sisendisse pinge, mille reguleerivad väljundi jaoks madalamaks pingeks. Pingestabilisaatoris tekitatakse ettenähtud väljundpinge stabiliseerimiseks vajalik pingelang reguleeriva transistori kollektori-emitteri üleminekul. Lineaarstabilisaatorite (toiteblokkide) kasutamine on väga lihtne lahendus. On kahte liiki lineaarstabilisaatoreid: standardne lineaarstabilisaator ja väikese pingelanguga lineaarstabilisaator (LDO). Erinevus seisneb selles, milline peab olema sisend- ja väljundpingete erinevus, et hoida stabiilset pinget. Näiteks kui 5 V pingeregulaatoril on vajalik minimaalne pingete erinevus 1 V, siis on vaja sisendpinget 6 V. Praktikas on ettenähtud pingete erinevuseks regulaatori enda pingelang. LDO-liiki lineaarstabilisaatorid on alalispinge regulaatorid, mis saavad reguleerida väljundpinget isegi siis, kui nende sisendpinge on väljundpingele väga lähedal.
Lineaarstabilisaatorite eelised on lülitusmüra puudumine (sest tegelikult sisse-väljalülitamist ei toimu), seadme väiksemad mõõtmed, (sest ei lähe vaja suuri induktiivpoole ega trafosid) ja nende lihtne kasutamine. Puuduseks on, et erinevalt impulss-stabilisaatorist, hajub selles suhteliselt suur osa energiast regulaatoris. Hajuvõimsus on võrdeline stabilisaatorit läbiva koormusvoolu ja sisemisel regulaatoril tekkiva pingelangu korrutisega. Hajunud energia tuleb suunata ümbritsevasse keskkonda. Sellega kaasneb regulaatori (jõutransistori) temperatuuritõus. Korpus kuumeneb ja sageli on jahutamiseks vaja radiaatorit.

.

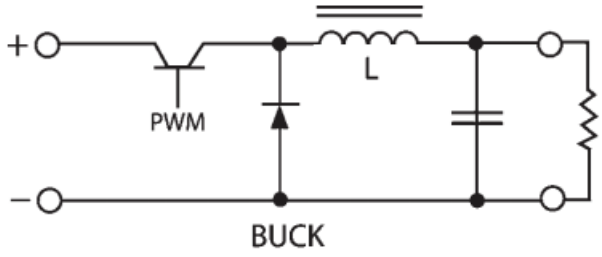
9.2 Impulss-stabilisaatorid

Pinge impulss-stabilisaator on toiteplokk, milles on spetsiaalne impulsimodulaator, mis võimaldab elektripinget tõhusalt reguleerida. Erinevalt lineaarstabilisaatoritest töötab

impulss-stabilisaatori lülitustransistor avanedes ja sulgudes küllastusrežiimis, mistõttu kaod on väiksemad. Väljundpinge reguleerimine saavutatakse transistori avatud-/suletud seisundi ajalise suhte muutmisega. Impulsstoiteallikad on väga tõhusad pinge stabiliseerimiseks suure võimsusega süsteemides, sest sel juhul ei toimu modulaatorist (või transistorist) nii suurt soojuse eraldumist, kui lineaarstabilisaatoril.
Kokkuvõtteks on impulss-stabilisaatorid suurema kasuteguriga, väiksemate mõõtmetega ja kergema kaaluga, kui lineaarstabilisaatorid. Siiski on need stabilisaatorid keerulisemad, kasutusel keerukamad komponendid (dioodid ja induktiivpoolid), lülitusvoolud võivad põhjustada soovimatut elektrilist müras, mis mõõtesüsteemides võib mõõtetäpsusele negatiivselt mõjuda.
Olenevalt impulss-stabilisaatori rakenduskohast, liigitatakse need pinget madaldavateks, pinget kõrgendavateks, madaldav-kõrgendavateks (töötavad madaldaval ja kõrgendaval režiimil), isoleeritud väljundiga stabilisaatoriteks jne.

9.2.1 Pinget madaldav muundur

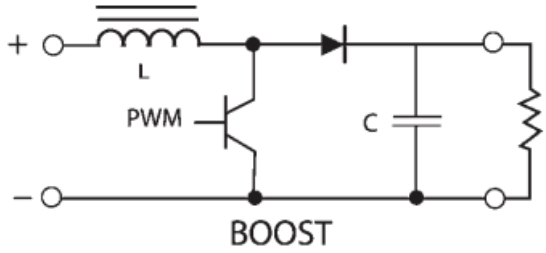
Madaldavat pingemuundurit kasutatakse, kui väljundpinge peab olema sisendpingest madalam. Seda tüüp muundurites ei ole väljundpinge isoleeritud. Madaldaval pinge-muunduril on kõrge muundamise kasutegur (sageli üle 90%), mis teeb selle sobivaks suhteliselt suure pinge (12 või 24 V) muundamiseks väiksemaks pingeks, mida on vaja mikrokontrollerite ja muude manussüsteemides kasutatavate kiipide jaoks.
Joonisel 9.2 on esitatud pinget madaldava muunduri skeem.



Joonis 9.2. Pinget madaldav muundur

9.2.2 Kõrgendav pingemuundur

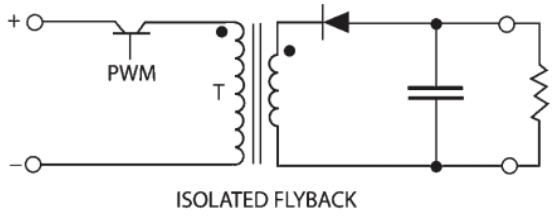
Kõrgendavat pingemuundurit kasutatakse sisendpingest suurema väljundpinge genereeri-miseks. Sageli on manussüsteemide korral vaja juhtida väliseid seadmeid, mis töötavad suurema pingega. Selliste pingete tekitamiseks kasutatakse kõrgendavat pingemuundurit. Akutoitega süsteemides saab kõrgendava pingemuunduriga hoida stabiilset toitepinget isegi siis, kui aku mahtuvus on vähenenud ja aku väljundpinge on langenud.
Joonisel 9.3 on esitatud pinget kõrgendava muunduri elektriskeem.



Joonis 9.3. Pinget kõrgendav muundur

9.2.3 Vastulülituses dioodiga pingemuundur

Vastulülituses dioodiga pingemuundurit kasutatakse nii alalis-/alalispingemuundurina (üks alalispinge muundatakse teiseks alalispingeks) kui vahelduv-/alalispingemuundurina (vahelduvpinge muundatakse alalispingeks). Seda liiki muunduris on sisendi ja väljundi vahel galvaaniline isolatsioon, mis on teostatud impulsstrafo abil. Tavaliselt on ahelas nn tagasiside, mille abil juhitakse vastulülituses dioodiga pingemuundurit ja hoitakse stabiilset väljundpinget. Erinevalt muudest kirjeldatud pingemuunduritest tagab selle muunduri väljundi isoleerimine sellelt toidet saavate elektroonikakomponentide ohutuse juhuks, kui regulaatori sisendiosas tekib töötõrge. Puuduseks on, et see saavutatakse suurema arvu komponenti ja keerulisema konstruktsiooni hinnaga. Joonisel 9.4 on esitatud vastulülituses dioodiga pingemuunduri lihtsustatud skeem.



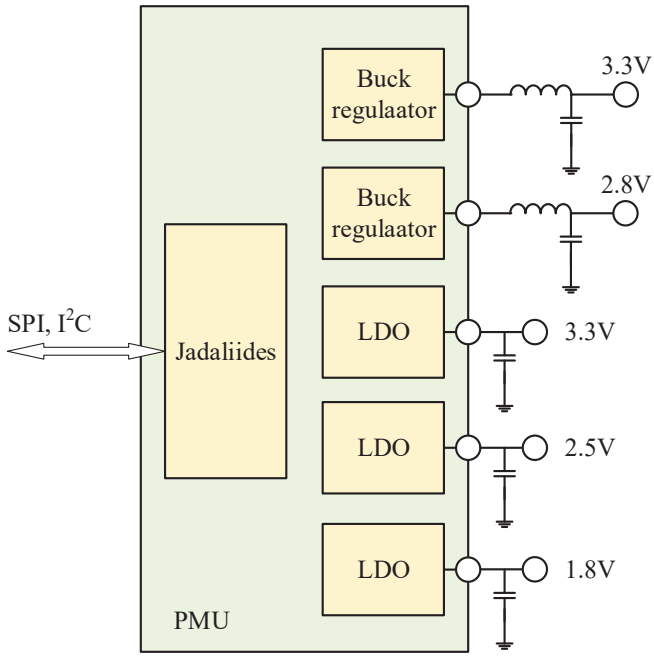
Joonis 9.4. Vastulülituses dioodiga pingemuundur

9.2.4 Akutoitega süsteemide eriomadused

Akutoitega süsteemides on eesmärk vähendada võimsustarvet, et pikendada aku kasutuskestust. Sel juhul on väga oluline kasutatavate komponentide valik ja eriti pingeregulaatorite valik. Üldiselt on sellised süsteemid väga väikese energiatarbega, mõnedel seadmetel on saavutatud väga väike, ainult mõnekümne nanoampriline energiatarve. Akutoitega süsteemidel on ka oluline, et regulaator võtab akust maksimaalselt energiat. Selleks on olemas kõrgendavad pingemuundurid, mis võimaldavad stabiilset töötamist 1 V sisendpingega.
Paljudel regulaatoritel on lisasisend, mille abil saab nende töötamist keelata (välja lülitada), et energiat säästa.
Akutoitega süsteemidel on spetsiaalsed mikroskeemid aku laadimiseks, mis on konstrueeritud optimaalse laadimisprofiili tagamiseks just selle akutüübi jaoks.

9.2.5 Mitmikpingeallikate kasutamine manussüsteemides

Praktikas kasutatakse toitehalduse kiipe (PMIC) või toitehalduse mooduleid (PMU). Need on kiibid, mis täielikult juhivad elektritoidet ja kõiki toitepingeid, mida manussüsteemis on vaja. Need kiibid täidavad süsteemi toitega seotud erinevaid funktsioone ja neid kasutatakse tavaliselt süsteemides, kus erinevate mikroskeemide jaoks on kasutusel erinevad toitepinged. Integreeritud toiteplokkide ahelad pakuvad järgmisi funktsioone: pidev (otsene) pinge reguleerimine, akutoitega süsteemide aku laadimine, toiteallika valimine, individuaalsete mikroskeemide lülitamise järjestus ja muud lisaomadused.
Seda tüüpi seadmetega saab seada erinevaid pingeid, nt 5, 3,3, 1,8 V jne (joonis 9.5).



Joonis 9.5. Toitepinge haldamise skeem

Tüüpiliselt on PMU rakendatav komplekssete süsteemide toiteplokkides, kus on vaja mitmeid pingeid reguleerida ja juhtida süsteemi eri osadele täpselt määratud järjestuses.

9.3 Enesekontroll

1. Millised eelised on lineaarregulaatoritel võrreldes impulssregulaatoritega?
    a. Väike müra;
    b. Suur sisendpingete muutumise võimalus;
    c. Väiksem hajuvõimsus (energiavoog) keskkonda;
    d. Neil ei ole eeliseid.

2. Milline järgmistest väidetest on tõene?
    a. Madaldavat pingemuundurit kasutatakse vahelduvpinge genereerimiseks.
    b. Madaldav pingemuundur muundab sisendpinge madalamaks pingeks väljundis.
    c. Madaldav pingemuundur muundab sisendpinge kõrgemaks pingeks väljundis
    d. Madaldav pingemuundur genereerib stabiilse väljundpinge kõrgema või madalama pingega sisendpinge allikast.

3. Milline järgmistest väidetest on tõene?
    a. Kõrgendavat pingemuundurit kasutatakse vahelduvpinge genereerimiseks.
    b. Kõrgendav pingemuundur muundab sisendpinge madalamaks pingeks väljundis.
    c. Kõrgendav pingemuundur muundab sisendpinge kõrgemaks pingeks väljundis.
    d. Kõrgendav pingemuundur genereerib stabiilse väljundpinge kõrgema või madalama pingega sisendpinge allikast.

4. Mis on oluline akutoitega seadmete jaoks?
    a. Kasutada akudest võimalikult palju energiat kui võimalik ning vähendada seejuures tarbimist (seadmete võimsust).
    b. Kasutada Li-ioon akusid;
    c. Kasutada suure mahtuvusega akusid;
    d. Omada suurt energeetilist võimsust ja kasutada päikesepaneele.

5. Milline väide on vale?
    a. Toitehaldusseadmed (PMU) on kiibid mis täielikult juhivad energiavarustust ja manusseadmes vajaliku pinge väärtust.
    b. Toitehaldusseadmeid ei kasutata manussüsteemide toiteallikana.
    c. Toitehaldusseadmeid kasutatakse tavaliselt süsteemides kus erinevatele mikroskeemide jaoks on vaja mitut erinevat toitepinget.
    d. Toitehaldusseadmed genereerivad mitmeid pingeid mida juhitakse ja edastatakse süsteemi individuaalsetele osadele täpselt määratud järjestuses.

10 MANUSSÜSTEEMIDE PROGRAMMEERIMINE

Et manussüsteemid saaksid täita ettenähtud funktsioone, peab neil olema asjakohane tarkvara, mis on kirjutatud otse juhtimise mikrokontrolleri programmimälusse või paikneb välisel andmekandjal (tavaliselt välkmälus, SD-kaardil või kõvakettal). Juhtimisprogramm on asukohast olenemata salvestatud mälusse, sest masinakäsud ja andmed sõltuvad platvormist, st igal mikrokontrolleri või mikroprotsessori tüübil on oma komplekt masinakäske ja erinev andmete adresseerimise viis. Tänapäevaste manussüsteemide jaoks tarkvara väljatöötamisel kasutatakse erinevaid programmeerimiskeeli, neist kõige levinum on C/C++. Tarkvara loomisel on arendajatel kasutada lai valik utiliite, sh tarkvara arendamise keskkonnad asjakohaste silumisvõimalustega, teegid ja manussüsteemide jaoks ette nähtud reaalaja-opsüsteemid.
Selles peatükis on kirjeldatud tarkvara arendamise erinevaid aspekte ja erinevaid etappe.

10.1 Programmeerimiskeeled

Konkreetse süsteemi jaoks tarkvara loomisel kasutatakse süsteemi tööülesannete algoritmide kirjeldamiseks programmeerimiskeelt. Programmeerimiskeeled sisaldavad reserveeritud sõnu, et aidata ehitada struktuure, mis määratlevad, kuidas mikroprotsessor- või mikrokontrollersüsteem töötab. Programmeerimiskeeles tehtud kirjeldus on arusaadav arendaja jaoks, kuid et käsud oleksid mikroprotsessori või mikrokontrolleri jaoks täidetavad, tuleb kirjeldus tõlkida nn masinakoodiks.

10.1.1 Masinakood

Masinakood esindab keelt, mille käsud täidetakse vahetult mikroprotsessoris või mikrokontrolleris. Igal mikroprotsessorite või mikrokontrollerite tooteseerial on oma spetsiifiline masinakood, mis erineb muude mikroprotsessorite või mikrokontrollerite programmides kasutatavast masinakoodist.
Masinakood sisaldab masinakäske, mis esindavad kindla väärtusega numbreid, iga masinakäsk teeb erinevaid tegevusi, näiteks liitmine, lahutamine, mälust lugemine, mälusse salvestamine jne. Millist tegevust teha, määratakse nn operandikoodiga (tehtekoodiga).
Masinakäsk sisaldab peale tehtekoodi veel nn operande. Operandideks võivad olla mingid andmed, millega töötatakse või viited andmetele, mida programmeerimistegevustes kasutatakse. Operandide suurus võib masinakäskudes muutuda, samuti on võimalik, et mõnel masinakäsul ei ole operandi.
Joonis 10.1 kujutab tüüpilist masinakäsku, mis sisaldab ühte baiti tehtekoodi ja ühte operandi baiti.

Opcode	Operand
10000110	00010100

Masinkäsk

Joonis 10.1. Masinakäsu struktuur

Masinakäsud kirjutatakse mälusse kahendkoodina. Programmide otse masinakoodis kirjutamist ei kasutata. Kõige lähemad masinakeeltele on assemblerkeeled.

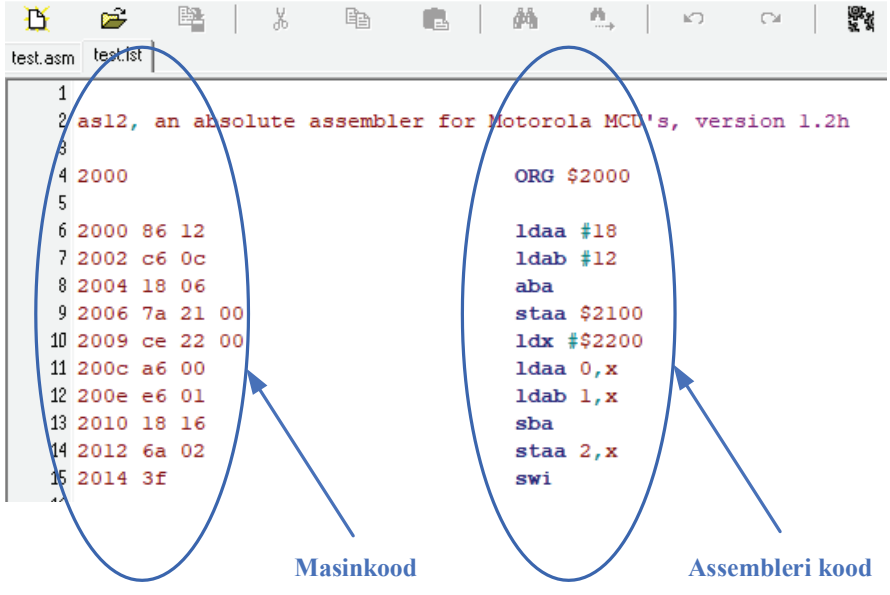
10.1.2 Assemblerkeeled

Assemblerkeeled on keeled madala taseme programmeerimise jaoks. Nendes keeltes on reserveeritud sõnad (masinakäsud) rangelt vastavusse seatud vastava masinakoodiga. Seetõttu on iga assemblerkeel kooskõlas oma masinakeelega ja ette nähtud kasutamiseks kindlat tüüpi mikroprotsessori või mikrokontrolleri korral. Assemblerkeeltes on masinakäsud sõnade või fraaside lühendid, mis näitavad programmeerijale masinakäsuga seotud tegevust. Näiteks, mikrokontrolleri 68HC11 assemblerkeeles on järgmised masinakäsud, mille tähendust saab inglise keeles lihtsalt lugeda (tabel 10.1.)

Tabel 10.1

Masinakäsk	Tähendus
CLRA	Tühjenda akumulaator A
LDAA #10	Laadi akumulaatorisse A 10
ADDA #2	Liida 2 akumulaatori A sisule
……	

Assembleri programmide kirjutamist tehakse tüüpiliselt spetsiaalsetes tekstiredaktoritega keskkondades, mis koostavad või tõlgivad kirjutatud programmi masinakoodiks. Joonisel 10.2 on näidatud assemblerkeeles programmi võrdlust masinakoodiga.



Joonis 10.2. Assemblerkeeles programmi võrdlus genereeritud masinakoodiga

Kuigi assembleril on masinakoodi ees eeliseid, on sel ka mõned puudused: nt vajadus õppida selgeks konkreetse mikroprotsessori või mikrokontrolleri assembleri käsud (mida sageli on mitusada), suur tõenäosus vigade tegemiseks, raskused komplekssete andmestruktuuride realiseerimisel, programmi kirjutamise väike tööviljakus jne. Need assemblerkeelte puudused on eemaldatud nn kõrgtaseme keeltes, mida manussüsteemide tarkvara väljatöötamisel laialdaselt kasutatakse.

10.1.3 Kõrgtaseme programmeerimiskeeled

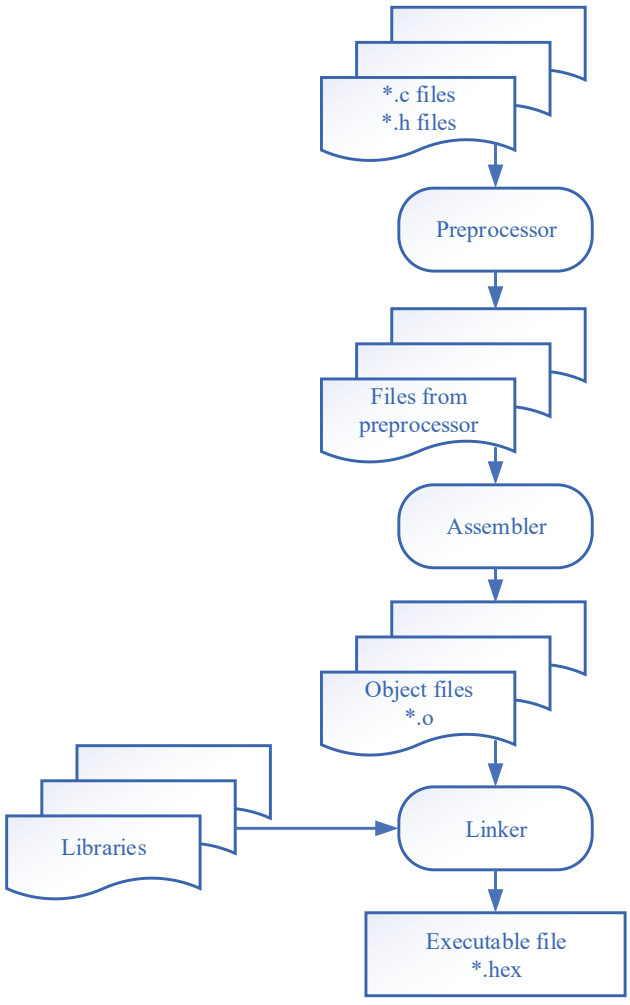
Kõrgtaseme programmeerimiskeeled on sellised, mis ei sõltu platvormist, st keele süntaks ei sõltu konkreetse mikroprotsessori või mikrokontrolleri riistvara arhitektuurist. Nendes keeltes kasutatakse ingliskeelseid sõnu, mille abil tehakse erinevaid loogikatehteid või tegevuste järjestusi.

Manussüsteemide tarkvara arendamisel kasutatakse programmeerimiskeeli, mis on kasutusel ka arvutisüsteemides, nt C, C++, Pascal, Basic, Java, Python jne. Kõige enam on kasutusel C, seda just 8, 16 ja 32-bitise arhitektuuriga mikrokontrollerite korral. Tänapäevased C-kompilaatorid võimaldavad pärast kompileerimist masinakoodi genereerimist, tagavad kõrgel tasemel optimeerimise ja programmide kiirus ei ole väga erinev nendest, mis on kirjutatud assemblerkeeltes.

Mikrokontrollerite tootjad pakuvad arenduseks keskkondi, kus on peale C-kompilaatori veel palju teeke draiverite funktsioonide või komplekssete sideprotokollide rakendamiseks. Need lihtsustavad arendaja tööd ja kiirendavad tarkvara väljatöötamise protsessi.

10.2 Manussüsteemide tarkvara väljatöötamine

Tarkvara kirjutamine on loominguline tegevus, mis oleneb otseselt tööülesandest ja funktsioonidest, mida manussüsteem peab tegema hakkama. Praegusel ajal kasutatakse mikrokontrollersüsteemide tarkvara loomiseks kõrgtaseme keeli (enamasti C/C++). Lähtekoodi kompileerimisega saadakse programmifail (kõige sagedamini hex-vormingus), mis on manussüsteemi mikrokontrollerisse sisse programmeeritud. See programmifail sisaldab ASCII-vormingus täidetavat programmikoodi ja lisainfot programmi asukohast mälus. Joonisel 10.3 on näidatud C-programmi kompileerimise protsess ja selle peamised etapid.



Joonis 10.3 Kompileerimise protsess

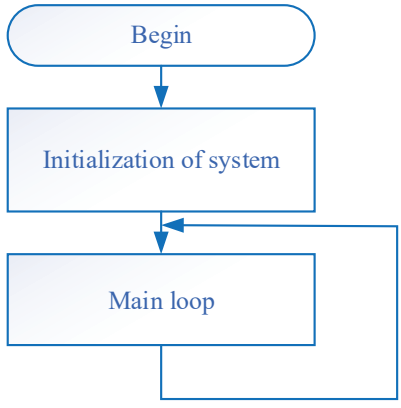
Mõnes kompilaatoris alustatakse väljundfailide muundamisest assembleri koodiks, mis seejärel pannakse kokku ja saadakse nn objektifailid. Need failid sisaldavad masinakoodi ja sel hetkel veel ei ole määratud, kus kood mikrokontrolleri mälus paikneb. Millistel aadressidel kood hakkab paiknema, määratakse nn linkuriga, mis liidab erinevad objektifailid ja projektis kasutatud teegifailid. Linkur määrab kompileeritud programmi tegeliku salvestuskoha mälus. Kompileerimisprotsessi viimane samm on programmifaili väljatöötamine (kõige sagedamini hex-vormingus), mida saab kirjutada mikrokontrollerisse programmaatori abil.

10.3 Tarkvara tööpõhimõtted

Manussüsteemi tüübist ja funktsioonist olenevalt esitatakse tarkvarale erinevaid nõudmisi. Kohvimasina juhtimine ja enneaegsete laste kuvööosi juhtimine esitavad arendajatele täiesti erinevaid ohutus- ja töökindlusnõudeid. Seepärast on erinevate manussüsteemide jaoks arendataval tarkvaral erinev komplekssus ja struktuur.

10.3.1 Koodi järjestikune täitmine sündmusekontrolliga

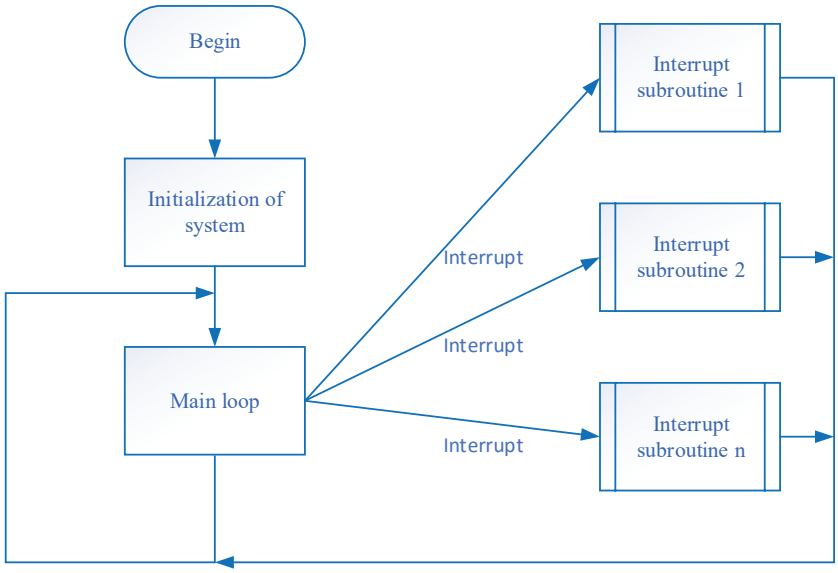
Tarkvara korraldamise see viis on võibolla kõige lihtsakoelisem, siiski on see lihtsate süsteemide juhtimiseks laialt kasutuses. Programmikood koosneb kahest peamisest osast – mikrokontrolleri ressursside lähtestamine ja lõpmatu tsükkel, kus süsteemi kõik tööalgoritmis esitatud tegevused täidetakse ja tehakse sündmuste toimumise kontrollimised. Joonisel 10.4 on näidatud koodi järjestikuse täitmise plokkskeem.



Joonis 10.4. Programmikoodi järjestikune täitmine

10.3.2 Töötamine katkestuste käitlemisega

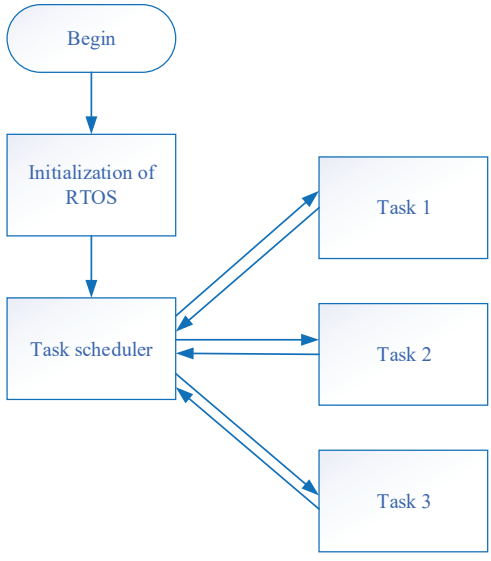
Tüüpiliselt on mikrokontrolleri töötamisel vaja reageerida sündmustele, mis tavaliselt ilmnevad asünkroonselt ja millele tuleb reageerida viivitamatult või kõige väiksema võimaliku viivitusega. Sellised sündmused põhjustavad mikrokontrolleri töös katkestusi. Katkestus peatab põhiprogrammi täitmise ja mikrokontroller täidab spetsiaalse alamprogrammi, mis käitleb seda katkestust. Pärast katkestuse protsessi lõpetamist jätkab mikrokontroller põhiprogrammi täitmist. Joonisel 10.5 on näidatud tarkvara töö plokkskeem, kui on tegemist katkestuse käitlemisega.



Joonis 10.5. Tarkvara töö katkestuste käitlemisega

10.3.3 Tarkvara töötamine reaalaja-opsüsteemi kasutades

Tänapäevaste manussüsteemide korral, kus on väga oluline tagada rakenduste turvalisus, samuti arenenud sideprotokollide ja failisüsteemide kasutamise korral kasutatakse tarkvara väljatöötamisel nn reaalaja-opsüsteeme (RTOS), vt joonis 10.6.



Joonis 10.6. Tarkvara töötamine reaalaja-opsüsteemi kasutamise korral

RTOS peamine omadus on ettemääratud reaktsiooniaeg, st süsteem tagab sündmuse ilmnemise korral, et süsteem reageerib mitte hiljem, kui eelmääratud aja jooksul. RTOS tuumaks on nn tegumihaldur (tegumiplaanur), mis otsustab, millist ülesannet täita, olenevalt ülesande prioriteedist. RTOS-i näidete hulka kuuluvad järgmised süsteemid: uClinux, FreeRTOS, QNX, VxWorks, ThreadX ja muud.

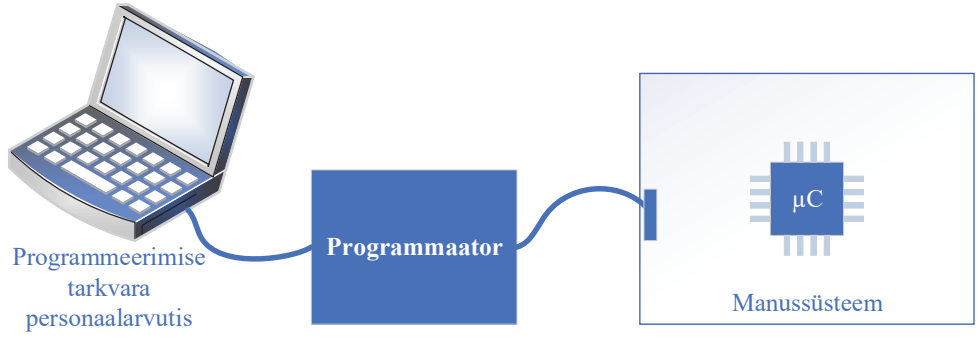
10.4 Tarkvara silumine

Termin silumine tähendab vigade tuvastamist programmi koodis. Potentsiaalsete vigade tuvastamiseks ja manussüsteemi tarkvara nõuetekohase töötamise kontrollimiseks on kaks põhilist lähenemisviisi: tarkvara töötamise matkimine arvutis ja tarkvara testimine otse mikrokontrolleris. Tarkvara töötamise matkimiseks kasutatakse nn matkureid, mis on tavaliselt programmeerimiskeskkonda sisse ehitatud. Matkurid matkivad vastava mikro-kontrolleri arhitektuuri, kaasa arvatud kõiki registreid, programmimälu ja andmemälu. Mikrokontrolleri programmi töötamise testimiseks on võimalik ka matkida signaale mikrokontrolleri sisend-/väljundviikudel või välismoodulites. Nende signaalide alusel jälgitakse programmi õiget rakendumist ja kontrollitakse, kas tulemused registrites ja mälus vastavad eeldatavatele tulemustele.

Koodi silumisel otse mikrokontrolleris täidetakse programm otse sihtseadmes. Sel juhul ühendatakse mikrokontrolleriga väline seade (silur), mis jälgib registrite tegelikku seisundit ja muutujaid mälus. Seda tüüpi silumise korral on võimalik tekitada katkepunkte, mille järel programm seiskub ja nii on võimalik programmi rakendada samm-sammult.

10.5 Manussüsteemide programmeerimine

Kui manussüsteemi tarkvara on kasutusvalmis (väljalaskeversioon), programmeeritakse see manussüsteemi mikrokontrollerisse. Selle programmeerimiseks kasutatakse programmeeri-mistarkvara (mis on paigaldatud personaalarvutisse) ja spetsiaalset seadet – program-maatorit (joonis 10.7).



Joonis 10.7. Manussüsteemi programmeerimine

Praktikas kasutatakse erinevaid programmaatoreid, mis on ette nähtud kasutamiseks alates üksiktootmiseks sobivatest süsteemidest kuni masstootmise komplekssete automatiseerimissüsteemideni.
On olemas ka sisseehitatud süsteeme, milles kasutatakse RTOS-i ja mille rakendustarkvara ei ole kirjutatud otse mikrokontrolleri programmimälusse, vaid välisesse välkmälusse või SD-kaardile otse personaalarvutist.

10.6 Enesekontroll

1. Milline väidetest on vale?
    a. Masinkood esindab keelt mida täidetakse otseselt vastava protsessoriga.
    b. Masinkood sisaldab masinkäske mis kirjeldavad kindla väärtusega arvusid.
    c. Masinkood on keel mida saab käivitada erinevat tüüpi mikroprotsessorites.
    d. Et käivitada C keeles kirjutatud programme tuleb need tõlkida masinkoodiks.

2. Milline väidetest on tõene?
    a. Assemblerkeel on kõrgtaseme programmeerimiskeel;
    b. Assemblerkeel on lähim mälutehniline keel masinkoodile;
    c. Assemblerkeelt saab kohandada erinevatele mikroprotsessoritele.
    d. Assemblerkeeles loodud kood on väga mahukas ja ei ole optimeeritud.

3. Valige milline kõrgetasemeline keel on manussüsteemides kõige enam kasutusel.
    a. C
    b. Basic
    c. Pascal
    d. Java

4. Millist nimetatud failiformaatidest kasutatakse ühe mikrokontrolleri süsteemi programmeerimiseks?
    a. .h
    b. .lst
    c. .obj
    d. .hex

5. RTOS on reaalajas määratletud, see tähendab:
    a. RTOS tagab, et kui toimub mingi sündmus siis see (RTOS) ei reageeri hiljem, kui ettemääratud aja jooksul;
    b. RTOS sisaldab palju draivereid ja kommunikatsioonikihte;
    c. RTOS täidab palju kasutaja ülesandeid ja järjestab nende teostamist;
    d. RTOS on kohandatav paljudele mikrokontrolleri tüüpidele.

TEADMISTE KONTROLLI KÜSIMUSTE TULEMUSED

Tabelist leiate õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele.
Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimuse nr. ja õige vastusevariant				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
1. Manussüsteemide põhiomadused	D	B	A	A	B
2. Mikroprotsessorid ja mikrokontrollerid manussüsteemides	A	B	C	A	A
3. Manussüsteemides kasutatavad hävi- ja säilmälud	A	B	A	D	B
4. Analoogsignaalid ja elektroonikalülitused nende töötlemiseks	A	B	B	C	A
5. Analoog-digitaal ja digitaal-analog muundurid	A	B	B	C	B
6. Diskreetsed ja sageduslikud signaalid manussüsteemides	A	B	A	A	B
7. Sideprotokollid manussüsteemides	A	B	C	A	-
8. Info visualiseerimine	A	C	-	-	-
9. Manussüsteemide elektritoide	A	B	C	A	B
10. Manussüsteemide programmeerimine	C	B	A	D	A

KIRJANDUSE VIITED

[1] Kirk Zurell, C Programming For Embedded Systems, R&D Books, Lawrence, KS , USA, 2000
[2] Michael Barr, Programming Embedded Systems in C and C++, O'Reilly, ISBN: 1-56592-354-5, January 1999
[3] Richard Zurawski, Handbook Embedded Systems, Taylor & Francis Group, 2006
[4] Heath, S. (1997). Embedded Systems Design. Oxford: Newnes.
[5] Vahid, F., & Givargis, T. (2002). Embedded System Design: A Unified Hardware/Software Introduction. Hoboken: Wiley.
[6] Wilmshurst, T. Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers. Oxford: Newnes. (2008).
[7] The Art of Designing Embedded Systems. Oxford: Newnes.
[8] P. Koopman. Embedded Systems in The Real World. Carnegie Mellon University, April 1998
[9] E. A. Lee And S. A. Seshia, Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach, Leeseshia.Org, 2011
[10] Bishop, R. The Mechatronics Handbook. CRC Press 2002.
[11] Dorf, R., R. Bishop. Modern Control Systems. New Jersey, Pearson Eduaction Inc., 2001, 2011.
[12] Engelberg, S. A Mathematical Introduction to Control Theory. London, Imperial College Press, 2005.
[13] Hsu, H. Theory and problems of signals and systems. McGraw Hill. 1995. https://electronicsbookcafe.files.wordpress.com/2015/08/signals-and-systems-2nd-edition-schaums-outline-series-hwei-hsu.pdf
[14] Каракехайов З., Кристенсен К., Винтер Оле, Проектиране на вградени системи. PenSoft, София-Москва, 2000.
[15] Токхам Р., Цифрова електроника. Техника, София, 1999.

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 06. SIDELIIDESED JA -PROTOKOLLID [M006ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

ALDENIZ RASHIDOW, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
STANIMIR YORDANOV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)

2018

Teave selle dokumendi kohta

Seda dokumenti kasutatakse põhilise õpikuna moodulis „Sideliidesed ja -protokollid“.

Sisukord

Jooniste loend 8
Tabelite loend 10
Lühendid 11
Terminite sõnastik 12
SISSEJUHATUS 18
1 Tööstuslikud sidevõrgud. Sissejuhatus 19
1.1 Tänapäevaste tootmissüsteemide eriomadused 19
1.2 Sidesüsteemide arhitektuur 19
1.3 Tänapäevaste sidesüsteemide omadused 19
1.4 Hajusjuhtimissüsteemid 19
1.4.1 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuur – I tüüp 19
1.4.2 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuur – II tüüp 20
1.4.3 Horisontaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuurid 21
1.5 Võrgusidega automaatsed juhtimissüsteemid 22
1.6. Võrgusidega jaotusvõrkude funktsionaalne jaotamine 22
1.6.1. Tööväljatasandi süsteemid 22
1.6.2. Juhtimistasandi süsteemid 23
1.6.3. Infotasandi süsteemid 23
1.7. Teadmiste kontroll 25
2 Sidevõrk 26
2.1 Sidevõrk. Võrgutüübid 26
2.2 Võrgutüübid 27
2.2.1 Võrdvõrk 27
2.2.2 Klient-server-tüüpi võrk 28
2.2.3 Liittüüpi võrgud 28
2.3 Teadmiste kontroll 30
3 Võrgu topoloogiad ja mudelid 31
3.1 Võrgu topoloogiad 31
3.2 Füüsiliste topoloogiate tüübid 31
3.2.1 Siinitopoloogia 31
3.2.2 Ringtopoloogia 32
3.2.3 Tähttopoloogia 32
3.2.4 Laiendatud tähttopoloogia 33
3.2.5 Hierarhiline topoloogia 33
3.2.6 Silmustopoloogia 33
3.3 Võrgumudelid 33
3.3.1 OSI võrgumudel 34
3.3.2 DoD mudel 35
3.4 Seadmed füüsilise ja loogilise võrgu struktureerimiseks 36
3.4.1 Passiivseadmed 36
3.4.2 Aktiivseadmed 37
3.4.3 Seadmed võrgu konfigureerimiseks segmentideks ja alamvõrkudeks 38
3.5 Teadmiste kontroll 41
4 Tööstuslikud tööväljavõrgud. Üldised omadused 42
4.1 Tööstuslike tööväljavõrkude omadused 42

4.2 Tööväljavõrkude funktsioonid 44
4.3 Tööväljavõrkudes kasutatavad andmeedastusmeetodid 44
4.4 Tööväljavõrkudes kasutatavate seadmete klassid 45
4.5 Tööväljavõrkude sidemehhanismid 45
4.6 Tänapäevased tööväljavõrkude spetsifikatsioonid 48
4.7 Teadmiste kontroll 50
5 Tööväljavõrgu Profibus spetsifikatsioon 51
5.1 Sissejuhatus 51
5.2 Protokolli kirjeldus 51
5.3 PROFIBUS DP tööpõhimõte 52
5.4 Siini ajastamine 58
5.5 Teadmiste kontroll 59
6 Sideprotokollid CANBUS ja MODBUS 60
6.1 Sideprotokoll CANBUS 60
6.1.1 Protokolli kirjeldus 60
6.1.2 Tööpõhimõte 61
6.1.3 Andmepaketi kirjeldus 61
6.1.4 Retsessiivne ja dominantne bitt 64
6.1.5 Kaadrite tüübid 64
6.1.6 Arbitreerimine andmeedastuse ajal 64
6.1.7 Veatõrje 65
6.1.8 Edastuskiirus ja võrgu pikkus 65
6.1.9 Kiiruse (sageduse) vahemik 65
6.1.10 Võrgu kriitiline pikkus 66
6.1.11 Kõrgtaseme/kihi protokollid 66
6.1.12 CAN-i eelised 66
6.1.13 CAN-i puudused 66
6.2 Sideprotokoll Modbus 69
6.2.1 Protokolli kirjeldus 69
6.2.2 Kaadri formaat 70
6.2.3 Funktsioonikoodide kategooriad 73
6.2.4 Standardiseeritud käsud 73
6.2.5 Andmete lugemine 74
6.2.6 Kasutaja käsud 74
6.2.7 Reserveeritud käsud 75
6.2.8 Andmemudel 75
6.2.9 Veatõrje Modbus RTU protokollis 76
6.3 Teadmiste kontroll 78
7 Juhtimistasandi tööstuslikud võrgud. ControlNet-võrgu spetsifikatsioon 79
7.1 Juhtimistasandi tööstuslikud võrgud 79
7.2 ControlNet-võrgu spetsifikatsioon 80
7.3 ControlNeti võrkude topoloogia 81
7.4 Sõnumitüübid ControlNetis 83
7.5 ControlNeti kaadri struktuur 83
7.6 ControlNeti võrkude seadmete klassid 84
7.7 Teadmiste kontroll 86
8 Infotasandi tööstuslikud võrgud 87
8.1 Võrkude üldised omadused ja nõuded 87
8.2 Infotasandi võrkude töö reaalajas 88
8.3 Infotasandi võrkudes kasutatavad seadmed 88

8.4 Tarkvara sisu 88
8.5 Infotasandi võrkude topoloogia 88
8.6 Infotasandi andmevahetuse tüübid 89
8.7 Teadmiste kontroll 90
9 Etherneti võrgu spetsifikatsioon 91
9.1 Kiire Ethernet (100 Mbit/s) 92
9.2 Ülikiire Ethernet (Gigabit Ethernet) 92
9.3 Edastusmeedium 93
9.4 Sideprotokollid 94
9.5 Aadressiteisenduse protokoll (Address Resolution Protocol, ARP) ja võrguaadressi (sõlme) pöörd-aadressiteisenduse protokoll (Reverse Address Resolution Protocol, RARP) 95
9.6 Protokollid TCP/IP 96
9.7 Kasutajadatagrammi protokoll (User Datagram Protocol, UDP) 99
9.8 Internetiprotokoll IP 102
9.9 Teadmiste kontroll 106
10 Traadita side tööstuslikus keskkonnas 107
10.1 Traadita võrkude sisu ja taust 107
10.2 Traadita võrkude rühmad 107
10.2.1 Suure läbilaskevõimega tehnoloogia 107
10.2.2 Keskmise läbilaskevõimega tehnoloogia 108
10.2.3 Bluetooth-tehnoloogia 108
10.2.4 Väikese läbilaskevõimega tehnoloogiad 109
10.2.5 ZigBee võrgud 109
10.2.6 EnOcean 110
10.2.7 Z-Wave 111
10.3 Traadita võrkude loogilised topoloogiad 111
10.3.1 AD-HOC 111
10.3.2 Pääsupunkt-klient 112
10.3.3 Traadita jaotussüsteem (Wireless Distribution System, WDS) 113
10.3.4 Repiiter 113
10.3.5 Sild 114
10.4 Andmekaitse 114
10.5 Teadmiste kontroll 115
Vastused enesekontrolli küsimustele 116
Viited 117

JOONISTE LOEND

Joonis 1.1 Hierarhiline kolmetasandiline heterogeenne võrk ... 20
Joonis 1.2 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud arhitektuur, I tüüp ... 20
Joonis 1.3 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud arhitektuur, II tüüp ... 21
Joonis 1.4 Kaugsisendi ja -väljundiga süsteemid ... 21
Joonis 1.5 Tööstuslik tööväljavõrk ... 23
Joonis 1.6 Tööstusvõrgu kolm hierarhiatasandit ... 24
Joonis 2.1 Kohtvõrk (Local Area Network, LAN) ... 26
Joonis 2.2 Laivõrk (Wide Area Network, WAN) ... 26
Joonis 2.3 Võrdvõrk ... 27
Joonis 2.4 Klient-server-tüüpi võrk ... 28
Joonis 2.5 Liittüüpi võrgud ... 29
Joonis 3.1 Siinitopoloogia ... 31
Joonis 3.2 Ringtopoloogia ... 32
Joonis 3.3 Tähttopoloogia ... 32
Joonis 3.4 Laiendatud tähttopoloogia ... 33
Joonis 3.5 Hierarhiline topoloogia ... 33
Joonis 3.6 Silmustopoloogia ... 33
Joonis 3.7 OSI võrgumudel ... 34
Joonis 3.8 DoD mudel ... 36
Joonis 3.9 Profibusi ühenduspistik ... 36
Joonis 3.10 Ühenduspistik, seinapesa ja pistikupesa RJ-45 ... 37
Joonis 3.11 Etherneti kaablipaneel ... 37
Joonis 3.12 Etherneti passiivjaotur ... 37
Joonis 3.13 Sidevõrkude loogiline struktureerimine ja selleks ettenähtud seadmed ... 39
Joonis 3.14 Ruuter ... 40
Joonis 3.15 CAN-Etherneti lüüs ... 41
Joonis 4.1 Tööväljavõrkude koht tööstussüsteemide hierarhias ... 42
Joonis 4.2 Tööstuslike tööväljavõrkude spetsifikatsioonid olenevalt nende rakendusest erinevates tehnoloogiaprotsessides ... 43
Joonis 4.3 Üksikedastus (üks ühele) ... 44
Joonis 4.4 Multiedastus (üks mitmele) ... 44
Joonis 4.5 Leviedastus (üks kõigile) ... 45
Joonis 4.6 Klient-server-tüüpi mehhanism ... 46
Joonis 4.7 Võrdvõrgu mehhanism ... 46
Joonis 4.8 Mitme ülemseadmega mehhanism ... 47
Joonis 5.1 PROFIBUS-i protokollid ... 51
Joonis 5.2 PROFIBUS-i tüüpilised rakenduspõhised omadused ... 52
Joonis 5.3 OSI mudeli kihid ProfiBusis ... 53
Joonis 5.4 Seadmete pollimisahel ... 53
Joonis 5.5 PROFIBUS-i füüsiline kiht (RS 485) ... 54
Joonis 5.6 Alluvseadmete juhtimine Profibusi võrgus ... 55
Joonis 5.7 Ülemseadmete omavaheline side kahe võrgu vahel, milles on üks ülemseade ... 55
Joonis 5.8 PROFIBUS-DP sideskeem ... 56
Joonis 5.9 Sideprotokoll PROFIBUS-DP ... 57
Joonis 5.10 Aja arvutamise diagramm ... 58
Joonis 6.1 Füüsiline keskkond andmete edastamiseks ... 60
Joonis 6.2 Seadmevõrgu korraldus CAN-protokolli abil ... 60

Joonis 6.3 Versiooni 2.0A kaadri formaat, d – dominantne, r – retsessiivne 62
Joonis 6.4 Infokaadri kontrollväli 62
Joonis 6.5 Tsükkelkoodkontrolli formaat 62
Joonis 6.6 Jaatusimpulsi (ACK) formaat 63
Joonis 6.7 Leviedastus 63
Joonis 6.8 Andmeedastuse arbitreerimine 65
Joonis 6.9 Järjestikku ühendatud MODBUS-süsteemi infrastruktuur 69
Joonis 6.10 Modbus TCP-süsteemi infrastruktuur 69
Joonis 6.11 Ülem-alluv-side 70
Joonis 6.12 PDU struktuur 70
Joonis 6.13 Üldine MODBUS-i pakett 70
Joonis 6.14 MODBUS-i andmepakett, ADU kaader 71
Joonis 6.15 Modbus ASCII infokaader 71
Joonis 6.16 Modbus TCP infokaader 72
Joonis 6.17 Modbus TCP/IP infokaader 72
Joonis 6.18 MODBUS TCP/IP ühenduse arhitektuur 73
Joonis 6.19 Funktsioonide jagunemine MODBUSis kategooriate kaupa 73
Joonis 7.1 Juhtimistasand võrgusidega automaatses juhtimissüsteemis 79
Joonis 7.2 Ühendus CIP, ControlNeti ja OSI mudeli vahel 81
Joonis 7.3 ControlNeti võrgu lineaarse struktuuri näide 81
Joonis 7.4 ControlNeti võrgu puustruktuuri näide 82
Joonis 7.5 ControlNeti võrgu hübriidstruktuuri näide 82
Joonis 7.6 ControlNeti keskkonna juurdepääs 83
Joonis 7.7 ControlNeti kaadri struktuur 84
Joonis 7.8 ControlNeti seadmete klassid 84
Joonis 8.1 Infotasand võrgusidega automaatses juhtimissüsteemis 87
Joonis 8.2 Tähttopoloogia kasutamine Ethernetis 89
Joonis 9.1 IEEE 802.3 standard 91
Joonis 9.2 Ethernet II DIX kaader. Kaadri formaat 94
Joonis 9.3 Aadressiteisenduse protokolli (ARP) funktsioonid 95
Joonis 9.4 Pöörd-aadressiteisenduse protokolli (RARP) funktsioonid 96
Joonis 9.5 TCP/IP kihid OSI mudelis 97
Joonis 9.6 TCP päise formaat 98
Joonis 9.7 UDP päise formaat 99
Joonis 9.8 TCP ja UDP pordid 100
Joonis 9.9 Portide jaotus 102
Joonis 9.10 Andmete kapseldus TCP/IP kaadris 103
Joonis 9.11 IPv4 päis 104
Joonis 9.12 IPv6 päis 105
Joonis 10.1 Bluetoothi võrgu topoloogia 109
Joonis 10.2 ZigBee ühenduse näide 110
Joonis 10.3 EnOceani sidevõrgu kasutamine 110
Joonis 10.4 Z-Wave'i võrgu näide 111
Joonis 10.5 Iseorganiseeruv võrdvõrgu tüüpi traadita võrk (AD-HOC) 112
Joonis 10.6 Iseorganiseeruv pääsupunkt-kliendi tüüpi traadita võrk 112
Joonis 10.7 Traadita jaotussüsteem (WDS) 113
Joonis 10.8 Iseorganiseeruv traadita võrk repiiteriga 113
Joonis 10.9 Iseorganiseeruv traadita võrk sillaga 114

TABELITE LOEND

Tabel 6.1. Väljade funktsioonid Modbus ASCII kaadris 72
Tabel 6.2. Standardiseeritud käsud Modbusis 74
Tabel 6.3. Alamfunktsiooni kood 75
Tabel 6.4. Andmetabelid Modbusis 76
Tabel 6.5. Vastuse kaader (alluv→ülem) vigade tekkimise korral Modbus RTU-s 77
Tabel 6.6. Standardsed veakoodid MODBUS-i protokollis 77
Tabel 9.1. 10 Mbit/s Etherneti omaduste kokkuvõte 91
Tabel 9.2. Kiire Etherneti (100 Mbit/s) omadused 92
Tabel 9.3. Gigabit Etherneti omadused 92
Tabel 9.4. UTP-kaabli ühendusviisid 93
Tabel 10.1 Traadita tehnoloogia omadused 107

LÜHENDID

ACSNC	Võrgusidega automaatsed juhtimissüsteemid
CAN	Kontrollervõrk
CIP	Üldine tööstuslik protokoll
CRC	Tsükkelkoodkontroll
CSMA/CD	Liikluse ja põrke tuvastusega multipöördus
CTDMA	Samaaegne hulgipöördus
DCS	Hajusjuhtimissüsteem
DNS	Domeeninimede süsteem
DoD	USA kaitseministeerium
HMI	Kasutajaliides
ISO	Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon
LAN	Kohtvõrk
LLC	Loogilise lüli juhtimiskiht
MAC	Meediumipöörduse juhtimine
MAN	Regionaalvõrk
NRZ	Baasita
NUT	Võrgu värskendamisaeg
OSI	Avatud süsteemide ühendamine
PDU	Protokolliandmeüksus
PLC	Programmeeritav kontroller
QoS	Teenusekvaliteet
SAN	Salvestusvõrk
TCP/IP	Edastusohje protokollistik internetiprotokolli peal
UDP	Kasutajadatagrammi protokoll
WAN	Laivõrk
WDS	Traadita jaotussüsteem
WEP	Krüpteerimismeetod traadita võrkude kaitseks (traatsidele vastav privaatsus)
WLAN	Traadita kohtvõrk

TERMINITE SÕNASTIK

Mõiste	Selgitus
Pääsupunkt	Pääsupunkt-klient – praktikas kõige sagedamini kasutatav topoloogia seadmete ühendamiseks traadita võrku. Suur hulk mobiilseadmeid kasutab ühte tugijaama (*base station*, BS), mida nimetatakse ka pääsupunktiks (*Access Point*, AP) ja mis juhib/haldab kõiki sellega seotud kliente. Tugijaam teatab kliendile, millist kanalit andmete edastamiseks kasutada ja millal. Olenevalt omistatud reeglitest võivad mõned kliendid saada teiste klientide ees prioriteete (QoS).
Jaatussõnum	Sõnumi õiget vastuvõtmist kinnitav sõnum.
Aktiivsed võrguseadmed	Võimendavad sisendsignaali ja suudavad seda muundada ühest edastusmeediumist teise. See rühm hõlmab järgmisi seadmeid: edastusmeediumi muundurid, repiiterid ja aktiivjaoturid.
Rakendusandmeüksus (Application Data Unit, ADU)	Üldine MODBUS-i paketiprotokoll. PDU struktuuri määrab protokolli tüüp: Modbus RTU, Modbus ASCII või Modbus TCP.
ARP (aadressiteisenduse protokoll)	Aadressiteisenduse protokolli (ARP) kasutatakse kohtvõrgu seadmetele omistatud IP-aadresside ja MAC-aadresside vastavustabeli koostamiseks. See tabel võimaldab luua andmeedastusmeediumil põhineva võrguühenduse kohtvõrgus (LAN), näiteks IEEE 802.3 Ethernetil. Kui sihtmärgiks olev IP-aadress on teada, tuleb võrguühenduse loomiseks leida ARP tabelist sellele vastav MAC-aadress.
Võrgusidega automaatsed juhtimissüsteemid (ACSNC)	Süsteemid, milles juht- ja terminaliüksused on ühendatud andmesidevõrku. Iga selline üksus esindab ühte sõlme konkreetses võrgus ja suhtleb teiste üksustega võrgumeediumi kaudu.
Bitiaeg (Tbit)	Bitiaeg (Tbit) on ajahulk, mis on vajalik ühe biti info edastamiseks olenevalt edastuskiirusest.
Bluetooth-tehnoloogia	Bluetooth on mistahes tüüpi traadita ühenduste tehnoloogia. See on ette nähtud sülearvutite, pihuseadmete, mobiiltelefonide ja muude autonoomse toitega mobiilsete süsteemide vaheliseks raadiosideks väikeste ja ökonoomsete seadmete abil.
Sild	Jagab võrgu loogilisteks segmentideks ja sõnumeid edastatakse ühest segmendist teise üle silla pordi, kui vastuvõtja ainulaadne võrguaadress kuulub vastavasse võrgusegmenti.
Leviedastus	Info edastamise meetod. Pakett saadetakse kõigile võrguseadmetele. Saatja adresseerib paketi leviaadressi abil ja seejärel saadetakse see üle võrgu igale seadmele.
CAN Kingdom	CAN Kingdom on kõrgema tasandi CAN-i sideprotokoll. See on välja töötatud väljasiiniprotokollina. Erinevalt teistest kõrgema tasandi CAN-i protokollidest ei püüa see järgida OSI mudelit.
CANopen	CANopen on automaatikas kasutatavate manussüsteemide sideprotokoll ja seadmeprofiili spetsifikatsioon. OSI mudelis rakendab CANopen ülemisi kihte, sealhulgas võrgukihti. Standard CANopen koosneb adresseerimisskeemist, mitmest väiksemast sideprotokollist ja rakenduskihist, mis on määratletud seadmeprofiiliga.
Kontrollsumma	Kontrollsumma saadakse andmejadale kindla algoritmi rakendamisega. Seda kasutatakse andmesides, et kontrollida, kas andmeid edastatakse õigesti.
Klient/server	Põhiline sidemudel tänapäevastes arvutivõrkudes.
Liittüüpi võrgu arhitektuur	Seda tüüpi võrgud on kombinatsioon võrdvõrgust ja klient-server-tüüpi võrgust.
Sidevõrk	Koosneb kahest või enamast seadmest ning nende ühendamiseks vajalikust riist- ja tarkvarast, mis võimaldab neil omavahel andmeid vahetada.

Sideprotokoll	Reeglistik, mis juhib kahe identsete ühel funktsionaalsustasandil oleva võrgusõlme vahelist dialoogi. Need reeglid määravad ühenduse loomise ja katkestamise protseduurid, andmevormingu, plokiandmete edastamise järjekorra, taastamise vigade korral jne.
Kontrollervõrk (CAN-siin)	Kontrollervõrk (CAN-siin) on suurepäraste veaparandusvõimalustega jadaliides reaalajas andmeedastuseks kiirusega kuni 1 Mbit/s. Seda kasutatakse ka standardi ISO 11898 kohases kiires andmeedastuses ja standardi ISO 11519 kohastes aeglastes rakendustes.
Ristkaabel	Ühendus UTP-ristkaabli abil. Ristkaableid kasutatakse järgmiste ühenduste jaoks: arvuti-arvuti, kommutaator-kommutaator, jaotur-jaotur.
Tsüklilised sõnumid	Sidemehhanism, mida kasutatakse andmete perioodiliseks edastamiseks alluvseadmetelt ülemseadmetele.
Andmekaader	Andmekaadreid kasutatakse andmete edastamiseks.
Detsentraliseeritud perifeeria	Hajutatud sisend-väljundseadmed on ühendatud keskse kontrolleriga kiire jadaühenduse kaudu.
DeviceNet	DeviceNet on automaatikas kasutatav võrgusüsteem juhtseadmete andmevahetuseks. See tugineb kontrollervõrgu tehnoloogiale ja määratleb rakenduskihi, mis katab mitmeid seadmeprofiile. Tavapärased rakendused on andmevahetus, ohutusseadmed ja suured S/V-juhtvõrgud.
Hajusjuhtimissüsteem (Distributed control system, DCS)	Peamine alamsüsteemide tüüp integreeritud tootmisjuhtimissüsteemides.
Krüpteerimine	Krüpteerimine või kodeerimine on andmete teisendamine, näiteks loetava teksti loetamatuks muutmine. Algkujule tagasi teisendamist nimetatakse dekrüpteerimiseks. Selleks kasutatakse mitmeid algoritme. Seda tehakse andmete turvaliseks säilitamiseks või edastamiseks kaitsmata infokanalites.
EnOceani võrgud	EnOcean on autonoomsel toiteallikal põhinev traadita andmeedastusprotokoll. EnOceani leviulatus on umbes 300 meetrit ja selle andmeedastuskiirus on kuni 120 kbit/s.
Veakaader	Veakaader – see edastatakse sõlmest, kus viga tuvastati.
Ethernet	Tänapäevastes arvutivõrkudes laialdaselt kasutatav võrguarhitektuur. Selle töötasid välja Xerox, Digital ja Intel. Füüsiliselt on see konfigureeritud siini või tähena ja see kasutab liikluse ja põrke tuvastusega multipöördust (CSMA/CD). Võrguseadmed konkureerivad andmete edastamise loa saamisel.
Otsesõnumid	Sidemehhanism, mida rakendatakse võrguseadmete esmase tuvastamise, konfigureerimise ja diagnostika korral.
Tööväljavõrgud	Tööväljavõrgud on aluseks võrgusidega juhtimissüsteemide struktuurile, mis hõlmab selliseid nutikaid üksusi nagu regulaatorid, programmeeritavad kontrollerid, nutiandurid, täiturid jne.
Killustatud sõnumid	Sidemehhanism, mille korral edastatavad andmed on jaotatud osadeks, mis hiljem vastuvõtja pool nii kokku pannakse, et moodustub algse suurusega sõnum.
Kaader	Andmekihist pärinev infoühik. See koosneb ülakihtidest pärit andmetest ja seda raamivatest päise- ja sabaväljast. Need sisaldavad vastuvõtjale vajalikku kontrollinfot.
Lüüs	Ühendab erinevaid juurdepääsumeetodeid ja protokolle kasutavat koht- ja laivõrku (nt DeviceNet ja CANopen).
GSD-failid	GSD-failid sisaldavat infot seadme peamiste omaduste kohta. GSD-failide standardvorming on kirjeldatud PROFIBUS-i juhistes. GSD-faili abil saavad süsteemikoostajad määratleda põhiandmeid, nagu sidevõimalused ja võimalik diagnostika.
HIPERLAN/2-tehnoloogia (suure läbilaskevõimega tehnoloogia)	HIPERLAN/2-tehnoloogia on ette nähtud andmete, kõnede ja piltide edastamiseks tööstus-, haldus- ja eluhoonetes. Selle abil on realiseeritud kärglähiulatusega WLAN, mille ärilised rakendused on väljatöötamisel.
Sagedushüpitamine	Sagedushüpitamine on perioodiline sageduse muutmine, mille määrab

	sagedushüplemise järjekorra parameeter.
IP (internetiprotokoll)	Sideprotokoll võrgus edastatavate andmete adresseerimiseks. Igale võrgus olevale hostile antakse ainulaadne aadress (IP-aadress). Võrgus andmeid edastades jagatakse sõnum väikesteks pakettideks (IP paketid). Iga pakett algab päisega, mis sisaldab saatja ja vastuvõtja IP-aadresse ning muid vajalikke andmeid. Nende aadresside abil otsustavad need arvutid, mida pakett läbib, mida selle paketiga teha. Internetiprotokolli kasutavad transpordikihi protokollid, nt TCP ja UDP.
Kohtvõrk (Local Area Network, LAN)	Kohtvõrk (*Local Area Network*, LAN) on väike üksteisega ühendatud arvuteid ja muid seadmeid teenindav võrk. See teenindab ühte organisatsiooni ja paikneb ühes või mitmes külgnevas hoones.
Loogiline topoloogia	Määrab kasutajate võrgule juurdepääsu meetodi ja võimalikud marsruudid andmevahetuseks võrgusõlmede vahel.
Suurarvutid	Võimaldavad hallata suuri andmehulki ja lahendada keerukaid arvutusülesandeid.
Regionaalvõrk (Metropolitan Area Network, MAN)	Regionaalvõrk (*Metropolitan Area Network*, MAN) katab asustatud ala või suure hoone, mida jagab mitu organisatsiooni.
1. tüüpi ülemseade	1. tüüpi ülemseade on tavaliselt programmeeritav kontroller (PLC) või ProfiBusi võrgus töötav spetsiaalse tarkvaraga arvuti. See määrab andmeedastuskiiruse ja alluvseadmed leiavad selle automaatselt. See hoiab andmevahetust sellega seotud alluvseadmetega ja töötab peamise juhtseadmena sisend/väljundinfo vahetuses võrguperifeeriaga.
2. tüüpi ülemseade	2. tüüpi ülemseade on spetsiaalne seade, mida kasutatakse peamiselt tarbijarakenduste üleslaadimiseks alluvseadmetesse diagnostika eesmärgil. See töötab koordineeriva seadmena ja esineb aktiivse jaamana 1. tüüpi ülemseadmete ja nende alluvseadmete suhtes. 2. tüüpi ülemseadet kasutatakse konfigureerimiseks, veadiagnostikaks ja parameetrite muutmiseks.
Ülemseadmed	Seadmed, mis määravad andmevahetusmeetodid võrgus ja täidavad juhtimis- või infojuhtimisfunktsioone.
Ülem-alluv-mudel	Ülem-alluv-mudel on sidemudel, kus ühel seadmel või protsessil on ühesuunaline kontroll ühe või enama seadme üle. Mõne süsteemi korral valitakse ülemseade sobilike seadmete rühma hulgast, kusjuures ülejäänud jäävad täitma alluva rolli.
Modbus	**Sideprotokoll Modbus** põhineb klient-server-arhitektuuril. Seda kasutatakse laialdaselt tööstuses kontrollerite vaheliste andmeside loomiseks. Andmete edastamiseks kasutatakse jadakanaleid nagu RS-485, RS-422, RS-232 (joonis 6.9) või TCP/IP-tüüpi võrku (Modbus TCP).
Ühe ülemseadmega süsteem	Ainult ühe ülemseadmega tööstuslik arvutivõrk.
Multiedastus	Info edastamise meetod. Saatja edastab andmepaketi mitmele võrgus olevale vastuvõtjale. Saatja adresseerib paketi, kasutades vastuvõtjate multiaadressi, misjärel saadetakse see üle võrgu igale multiaadressis olevale saajale.
Mitme ülemseadmega süsteem	Sidemehhanism, kus mitu ülemseadet vajavad juurdepääsu ühe ja sama alluvseadme andmetele.
Võrguprotokoll	Protsesside või võrku ühendatud arvutite vahelist infoedastust korraldavate reeglite kogum. Selles võrgus põhineb andmevahetus mitmel eri funktsioonidega protokollil ja see toimub paketivahetuse kaudu.
Võrgu topoloogia	Määrab sidevõrgu struktuuri. Eristatakse kahte tüüpi topoloogiat: loogiline ja füüsiline.
OSI mudel	Võrgumudel, mis kirjeldab baasarhitektuuri, mis jaotab pakettkommutatsiooniga võrguside seitsmeks iseseisvaks kihiks.
Ülekoormusekaader	Ülekoormusekaader tagab andmekaadrite või päringute vahelised vahed.
Parameetrikirje	Profibusi üldine andmebaas, mis sisaldab andmeid kõigi ühendatud jaamade konfiguratsiooni ja parameetrite kohta. Parameetrikirje laaditakse tööväljavõrgu ülemseadmesse riistvara konfigureerimise etapis. Tööväljavõrgu ülemseade kasutab seda infot süsteemi käivitamisel, et iga alluvseadmega suhelda.

Passiivsed võrguüksused	Pakuvad ühenduspunkti sidevõrku, muutmata sisendisse saabuva signaali parameetreid. Sellesse üksuste rühma kuuluvad: ühenduspistikud, pistikupesad seinal, kaablipaneelid ja passiivjaoturid.
Protokolliandmeüksus (Protocol Data Unit, PDU)	Esmane ModBusis kasutatav paketiprotokoll. Protokolliandmeüksuse ülesehitus ei olene ühendusliini tüübist ning see sisaldab funktsioonikoodi ja andmevälja.
Võrdvõrgu arhitektuur	Seda tüüpi võrgus on kõik seadmed võrdõiguslikud ja võivad kindlal ajahetkel toimida nii serveri kui ka kliendina. Juurdepääsu jagatud võrguressurssidele ei hallata eraldi serverist, nagu seda tehakse klient-server-tüüpi võrkude korral. Seda tüüpi võrke kasutatakse siis, kui seadmeid on suhteliselt vähe ja puudub vajadus failide ja ressursside keskse salvestamise järele.
Võrdvõrk	Sidemehhanism, mille korral kõik võrguseadmed on võrdväärsed ja võivad samal ajal toimida nii alluvana kui ka ülemana.
Füüsiline topoloogia	Määrab ühenduskaablite, võrguseadmete ja võrgus olevate tööjaamade konfiguratsiooni.
Pikovõrgu ühendus	Ülem-alluv-tüüpi võrk, milles korraga aktiivsete ühenduste arv on väiksem kui kõigi alluvseadmete arv. Passiivsed alluvseadmed on ülemseadmega ühenduse loonud ja ootavad vaba kohta andmete edastamiseks.
Poll	Sidemehhanism, kus ülemseade saadab päringu igale alluvseadmele, et nendega andmeid vahetada.
Pollimine	ProfiBus-süsteem kasutab ProfiBusi ülemseadet, mis teeb mööda RS 485 magistraalliini hajutatud alluvseadmete pollimist.
PROFIBUS	PROFIBUS on tööväljaprotokoll, mille töötasid välja Siemens, Bosch ja Klockner-Moeller, et vastata nii diskreetse tootmise kui ka Euroopa standardite EN50170 ja EN50254 nõuetele.
PROFIBUS-DP	PROFIBUS-DP (detsentraliseeritud perifeeria) (1992) on välja töötatud andmevahetuseks programmeeritavate kontrollerite ja heterogeensete objektidega ühendatud seadmete vahel. See võimaldab andmevahetust kiirusega 12 Mbit/s. Sidemeetod on ülem/alluv või võrdvõrk. Füüsilisel tasandil on edastusmeediumiks keerdpaarkaabel.
PROFIBUS-FMS	PROFIBUS-FMS (*Fieldbus Message Specification*, tööväljasiini sõnumi spetsifikatsioon) töötati välja kõrgema hierarhiatasandi side jaoks ega ole seetõttu sobilik sidevahend töövälja tasandil.
PROFIBUS-PA	PROFIBUS-PA (*Process Automation*) (1997) on välja töötatud andmevahetuseks tööväljatasandi süsteemide vahel konventsionaalses või plahvatusohtlikus kohas (suurema turvalisusega alal). See protokoll vastab rahvusvahelise standardi IEC 61158-2 nõuetele. See on ette nähtud ühendama kontrollerite, andurite ja täiturite haldamise süsteeme.
Pöörd-aadressiteisenduse protokoll (Reverse Address Resolution, RARP)	RARP on funktsionaalsuse poolest ARP-i vastand. Selle protokolliga lahendatakse vastupidine ülesanne, et leida teadaoleva MAC-aadressi abil sellele vastav IP-aadress. Sarnase lähenemisega saadetakse leviedastuse IP-datagramm võrgutasandil ja selle kinnituseks saadakse vastav IP-aadress.
Reageerimisaeg	Reageerimisaeg on aeg, mis kulub süsteemil või funktsioneerival sõlmel sisendsignaalile reageerimiseks.
Reaalajarežiim	Automatiseeritud andmetöötlus- ja juhtimissüsteemide tööreżiim. Süsteemi reageerimiseaeg sünkroonitakse väliste füüsiliste protsesside sooritamiseks vajamineva ajaga.
Retsessiivne ja dominantne bitt	Edastusmeediumist isoleerimise huvides väldib CAN binaarsete väärtustega 0 ja 1 sõnumi kirjeldamist. Selle asemel võetakse vastu retsessiivseid ja dominantseid signaale. Näiteks optilise ühenduse korral võib retsessiivne signaal olla pimedus ja dominantne valgus. Elektrisignaalide korral võib retsessiivne tähendada kõrgel tasemel elektrisignaali ja dominantne selle puudumist.
Päringukaader	Esitab andmekaadrite edastamise päringu konkreetse identifikaatori kohta.

Repiiter	Traadita võrgu töörežiim, mille korral leviala laiendamiseks kasutatakse pääsupunkti repiiterirežiimil. Kasutab sama kanalit kui pääsupunkt, mis võimaldab juurdepääsu tugivõrku.
Ruuter	Eraldiseisev seade, mida kasutatakse andmepakettide jaotamiseks erinevate võrkude või võrgusegmentide vahel.
Salvestusvõrk (Storage Area Network, SAN)	Salvestusvõrk (*Storage Area Network*, SAN) – andmete salvestamise võrk, mida kasutatakse suurte andmemassiivide ühendamiseks kobarserveritesse.
Alluvseade	Alluvseadmed (andurid, täiturid, ajamid või mõõteseadmed) on passiivsed võrguseadmed, millel on piiratud juurdepääs võrku. Need saavad ainult kinnitada vastuvõetud sõnumeid või vastata ülemseadme päringutele. Meeles tuleb pidada, et kõik alluvseadmed on võrdse tähtsusega ja side algatab alati ülemseade.
Alluvseadmed	Võrgusidega automaatsete juhtimissüsteemide terminalid: töövälja testrid/mõõturid, muundurid, täiturid, sisend/väljundmoodulid, mõõteseadmed.
Alluvseadme reageerimisaeg (TSDR)	Alluvseadme reageerimisaeg (TSDR) on aeg, mille jooksul peab alluvseade andma vastuse ülemseadme päringule.
Allikas-sihtpunkt	Alternatiiv tootja-tarbija sidemehhanismile. Selle korral saavad alluvseadmed ainult neile adresseeritud pakette.
Otsekaabel	Ühendus UTP-otsekaabli abil. Otsekaablit kasutatakse arvuti ühendamiseks kommutaatori või jaoturiga.
Grupipäring	Sidemehhanism, mille korral saadab ülemseade andmevahetuse eesmärgil päringu kõigile alluvseadmetele.
Kommutaator	Uuema põlvkonna sild, mis tagab info paralleelse töötlemise. Kommutaatorit kasutatakse kõige enam tööjaamade ühendamiseks tähttopoloogia võrkudes.
Sünkroonimisaeg (TSYN)	Sünkroneerimisaeg (TSYN) on miinimumaeg, mille jooksul tööjaam peab jääma jõudeolekusse, enne kui muutub kättesaadavaks järgmisele päringule.
Edastusohje protokoll (Transmission Control Protocol, TCP)	Edastusohje protokoll (*Transmission Control Protocol*, TCP) on andmevahetust ohjav võrguprotokoll. Andmeid edastatakse pakettidena ning protokoll jälgib vastuvõetud pakettide järjestust ja terviklikkust. See on välja töötatud multitegumrežiimi jaoks ja moodustab koos IP-ga protokolli TCP/IP.
Edastusohje protokollistik internetiprotokolli peal (Transmision Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP)	TCP/IP on tarkvaral põhinev sideprotokoll, mis on kombinatsioon protokollidest TCP ja IP ning mis pakub andmete edastamise meetodit ühest arvutist teise. TCP on edastusohje protokoll, mis funktsioneerib transpordikihil. See määrab, kuidas info tuleb andmepakettideks jagada ja mööda sidekanalit edastada.
Terminal	Elektrooniline riistvaraline sisend-väljundseade serverite, arvutuskeskuste või suurarvutite jaoks.
Luba	Andmeid edastatakse järjest ühelt arvutilt teisele, kuni need jõuavad vastuvõtjani. Selleks ringleb võrgus loaks nimetatud 3 baidi pikkune signaal, mis tuvastab, milline arvuti on konkreetsel ajahetkel aktiivne.
Lubaringvõrk	Lubaringvõrk on kohtvõrgu tehnoloogia liik, milles arvutid on omavahel ühendatud nii, et moodustub suletud ring. Andmeid edastatakse järjest ühelt arvutilt teisele, kuni need jõuavad vastuvõtjani. Selleks ringleb võrgus loaks nimetatud 3 baidi pikkune signaal, mis tuvastab, milline arvuti on konkreetsel ajahetkel aktiivne.
Kasutajadatagrammi protokoll (User Datagram Protocol, UDP)	Kasutajadatagrammi protokoll (*User Datagram Protocol*, UDP) on standardis IETF RFC 768 dokumenteeritud minimaalne paketiedastusprotokoll. UDP on lihtne liides internetiprotokolli (mille peal see töötab) ja ülemiste kihtide rakendusprotokollide vahel. UDP ei taga andmete kohalejõudmist. See töötab transpordikihil.
Ainuedastus	Info edastamise meetod. Saatja edastab andmepaketi võrgus olevale vastuvõtjale. Vastuvõtja kasutab paketi adresseerimiseks vastuvõtja aadressi, misjärel saadetakse pakett sihtpunkti.

Varjestamata keerdpaarkaabel (Unshielded Twisted Pair, UTP)	Varjestamata keerdpaarkaabel (*Unshielded Twisted Pair*, UTP) on kaabel, mille abil saavutatakse koaksiaalkaabliga võrreldes suurem andmeedastuskiirus.
Laivõrk (Wide Area Network, WAN)	Laivõrk (*Wide Area Network*, WAN) – globaalne võrk, mis kasutab erinevates geograafilistes kohtades paiknevate arvutite ühendamiseks kiiret kaugsidet või satelliite.
Traadita jaotussüsteem (Wireless Distribution System, WDS)	Traadita jaotussüsteem (*Wireless Distribution System*, WDS) on tehnoloogia, mis võimaldab laiendada traadita võrgu levialasid, ühendades mitu traadita võrgu pääsupunkti üheks võrguks ilma kaabliühendusi kasutamata. Võrreldes muude tehnoloogiatega on selle eripära kliendivõrgustiku MAC-aadresside säilitamine.
Wi-Fi (Wireless Fidelity)	Traadita kohtvõrgu (WLAN) tehnoloogia, mis tugineb IEEE802.11 standarditele. See on välja töötatud kohtvõrgus (LAN) töötavate sülearvutite jaoks.
Traadita kohtvõrk	Traadita kohtvõrgud põhinevad raadiolainetehnoloogial. Need on ette nähtud keskmiste andmepakettide edastamiseks ning mitmesuguste jälgimise, korrastamise ja haldamisega seotud ülesannete täitmiseks.
ZigBee võrgud	Traadita võrku ZigBee iseloomustab ainulaadne iseseadistus ja isetaastumine sel hetkel, kui eraldiseisvad võrguseadmed lülituvad võrku, identifitseerides üksteist. Mõne sellise seadme vea korral taastab võrk ennast ise ja alustab andmete edastamist mööda uut marsruuti. Andmeid, sealhulgas võrgu teenuseinfot, edastatakse kiirusel 250 kbit/s. Traadita võrk ZigBee töötab sageduskanalitel 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz.
Z-Wave'i võrgud	Protokoll traadita andmeedastuseks üle lühikese vahemaa ja minimaalse energiakuluga. Z-Wave'i protokollil põhinevad seadmed kasutavad suhteliselt väikest kiirust, umbes 40 kbit/s 30 meetri ulatuses ja töötavad ühe akuga kauem kui aasta. Üldiselt kasutatakse seda tehnoloogiat nutikodu lahendustes, eriti valgustus- ja soojusjuhtimissüsteemides, tulekahjuandurites ning videovalve- ja kaitsesüsteemides. Z-Wave võimaldab kõiki neid andurite ja seadmete võrke juhtida ühe kaugjuhtimispuldi abil.

SISSEJUHATUS

Tööstuslik automatiseerimine on majandustootlikkuse suurendamise alus. Selle arendamine hõlmab erinevate tootmisprotsesside ja seadmete automatiseeritud süsteemide väljatöötamist ja ehitamist. Tänapäeva tööstusautomaatika hõlmab info-, haldus- ja sidetehnoloogia valdkondade saavutusi.

Õpiku „Sideliidesed ja -protokollid“ eesmärk on anda väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete töötajatele põhiteadmisi standardliideste kasutamise kohta ning kirjeldada tööstusvõrkude seadistamist automatiseerimissüsteemides. Õpiku koostamisel on autorid järginud kõnealuse valdkonna saavutuste tänapäevast taset ning püüdnud vähendada teoreetiliste valemite ja matemaatiliste kirjelduste hulka mõistliku piirini. Õpiku sisu on jaotatud kümneks peatükiks.

Esimese peatükis „Sideliidesed ja -protokollid“ on kirjeldatud tänapäevaste tootmis- ja sidesüsteemide põhiomadusi, võrgusidega automatiseerimis- ja juhtimissüsteeme ning nende funktsioonide jaotust. Teine peatükk annab ülevaate sidevõrkude tüüpidest. Järgmises peatükis on esitatud üldine taustteave võrgumudelite ja -topoloogiate kohta. Erilist tähelepanu pööratakse võrgu füüsiliseks ja loogiliseks seadistamiseks vajalikele seadmetele ning mudelitele OSI ja DoD. Neljas peatükk hõlmab tööstuslike juhtimissüsteemide hierarhias madalaimal tasemel olevate tööstuslike tööväljavõrkude eriomadusi ja -tunnuseid. Järgmised kaks peatükki annavad ülevaate tööväljavõrkude Profibus ja CAN eriomadustest. Seitsmendas peatükis on esitatud üldinfo juhtimistasandi tööstuslike võrkude kohta ja ControlNeti spetsifikatsiooni eripärad. Seejärel on antud ülevaade infotasandi tööstusvõrkudest, Etherneti võrguspetsifikatsioonist ja traadita side rakendamisest tööstuslikes automatiseerimissüsteemides. Õpiku lõpus on konkreetsete peatükkidega seotud kontrollküsimused, millega saab hinnata koolitatavate edusamme.

1., 3., 4., 7. ja 8. peatüki autor on dotsent Aldeniz Rashidov, PhD ning 2., 5., 6., 9. ja 10. peatüki on kirjutanud dotsent Stanimir Yordanov, PhD.

Õpikut saab kasutada väikese ja keskmise suurusega ettevõtete töötajate kutseoskuse täiendamise ja ümberõppe koolitusprogrammide õppematerjalina. Siinse materjali omandamise peamine eeltingimus on põhiteadmised matemaatikas ja füüsikas. Õpik võib olla kasulik ka üliõpilastele ja neile spetsialistidele, kes annavad koolitusi, mis on seotud sidevõrkude rakendamisega tööstuslikes juhtimissüsteemides.

Autorid

1 TÖÖSTUSLIKUD SIDEVÕRGUD. SISSEJUHATUS

1.1 Tänapäevaste tootmissüsteemide eriomadused

Tänapäevaseid tootmissüsteeme saab esitada kui kolmetasandilist hierarhiamudelit. Kõige madalamale (esimesele) tasandile kuuluvad süsteemid tootmisprotsesside automatiseeritud juhtimiseks reaalajas. Teine tase seob esimese taseme süsteemid territoriaalse/tootmisprintsiibi alusel operatiivse/halduslíku iseloomuga ülesannete täitmise eesmärgil. Kolmas tasand hõlmab majanduse ja organisatsioonilise valdkonna tegevuste juhtimisega seotud süsteeme.

1.2 Sidesüsteemide arhitektuur

Tänapäevaste tootmissüsteemide struktuur mõjutab ka sidesüsteemide arhitektuuri. Sidesüsteeme töötatakse välja kolmetasandilise hierarhilise heterogeense arvutivõrguna (Joonis 1.1):

- põhivõrk – andmevahetus ettevõtte tasandil
- käidu- ja dispetšerjuhtimise võrgud
- sidevõrgud programmeeritavate loogikakontrolleritega (PLC), anduritega, täituritega jne

1.3 Tänapäevaste sidesüsteemide omadused

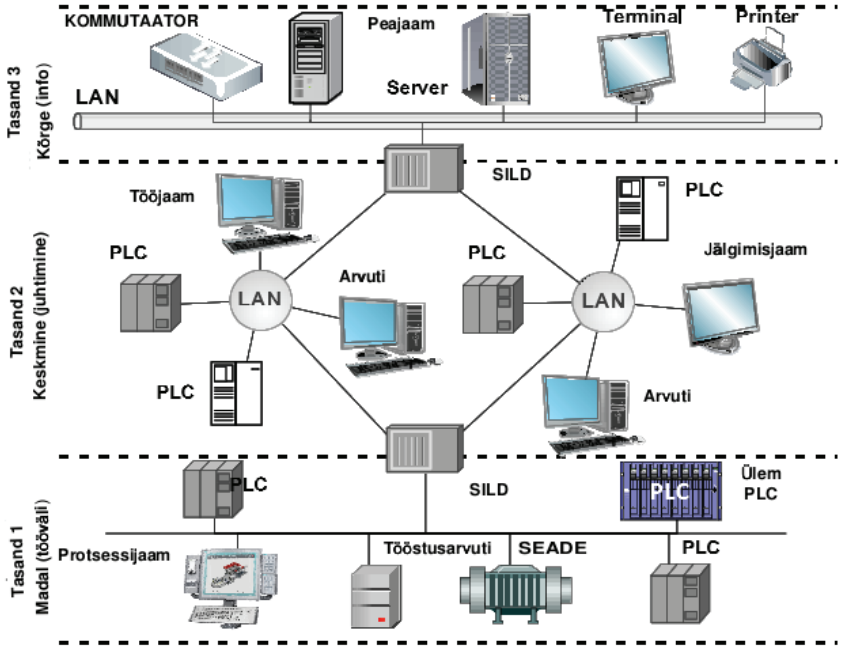
Tänapäevased sidevõrgud kasutavad erinevaid andmevahetuskeskkondi: kaabliühendus, optiline kiud, raadioühendus, infrapunakiirgus jne. Tänu erinevate vastastikku täiendavate funktsioonidega võrguarhitektuuride väljatöötamisele on täheldatud sideliideste hinna langust. See kõik loob sobivad tingimused heterogeensete hierarhiliste tööstussüsteemide väljatöötamiseks, mille juhtfunktsioonid on globaalse ulatusega.

1.4 Hajusjuhtimissüsteemid

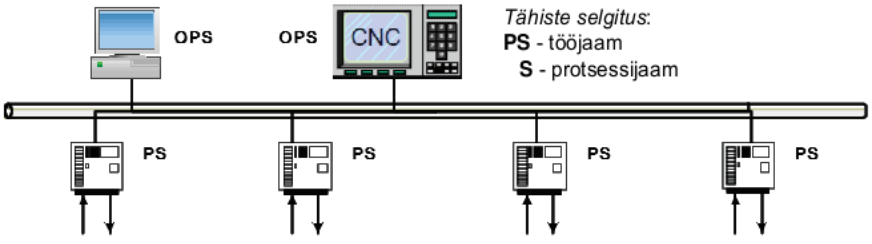
Hajusjuhtimissüsteem (*distributed control system*, DCS) on peamine alamsüsteemide tüüp integreeritud tootmisjuhtimissüsteemides. Hajusjuhtimissüsteeme on kahte põhitüüpi: vertikaalselt integreeritud ja horisontaalselt integreeritud.

1.4.1 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuur – I tüüp

Vertikaalselt integreeritud süsteeme iseloomustab hierarhiline ülesehitus ja vertikaalne infovahetus erinevatele hierarhiatasemetele kuuluvate alamsüsteemide vahel (Joonis 1.2). Sellist tüüpi hajusjuhtimissüsteemide peamine omadus on üleminek avatud süsteemide arhitektuurile, mis põhineb võrgustandarditel ja protokollidel nagu Ethernet koos TCP/IP-ga ning komponentidel, mis toetavad hajusjuhtimissüsteemide alamsüsteemide vahel klient-server-tüüpi infovahetust. Süsteemide detsentraliseerituse tase on madal ja neisse kuuluvad mitmesuguste funktsioonidega seadmed.



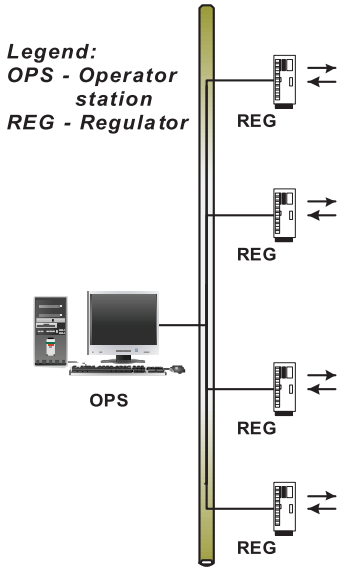
Joonis 1.1 Hierarhiline kolmetasandiline heterogeenne võrk



Joonis 1.2 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud arhitektuur, I tüüp

1.4.2 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuur – II tüüp

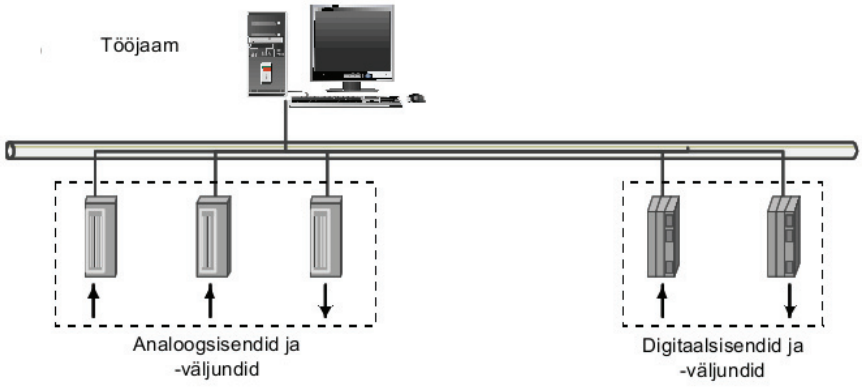
Vertikaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi II tüüpi iseloomustab kõrge detsentraliseerimistase (Joonis 1.3) ja erifunktsioonidega seadmete kasutamine. Kõige sagedamini koosneb seda tüüpi hajusjuhtimissüsteem ühekiibilistel mikroarvutitel põhinevatest kontrolleritest ja tööjaamaks konstrueeritud arvutist.



Joonis 1.3 Detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud arhitektuur, II tüüp

1.4.3 Horisontaalselt integreeritud hajusjuhtimissüsteemi arhitektuurid

Horisontaalselt integreeritud arhitektuurid võimaldavad hajusjuhtimissüsteemi alamsüsteemide vahel nii vertikaalset kui ka horisontaalset infovahetust. Selle arhitektuuriklassi põhiomadus on kaugsisendi ja -väljundiga süsteemid. Hajusjuhtimissüsteem sisaldab nutikaid sisend-väljundseadmeid, samas kui juhtfunktsioone täidab tööjaama rolli täitev arvuti (*Joonis 1.4)*. Puuduseks peetakse nende sõltuvust tööjaama arvutusvõimsusest.



Joonis 1.4 Kaugsisendi ja -väljundiga süsteemid

Juhtimissüsteemide struktuuri aluseks olevaid arvutivõrkusid, mis hõlmavad selliseid nutikaid üksus, nagu regulaatorid, programmeeritavaid kontrollerid, nutiandurid, täiturid jne, nimetatakse tööväljavõrkudeks.

1.5 Võrgusidega automaatsed juhtimissüsteemid

Võrgusidega automaatsed juhtimissüsteemid (*automatic control systems with network communication*, ACSNC) on süsteemid, milles juht- ja terminalüksused on ühendatud sidevõrku.

1.6. Võrgusidega jaotusvõrkude funktsionaalne jaotamine

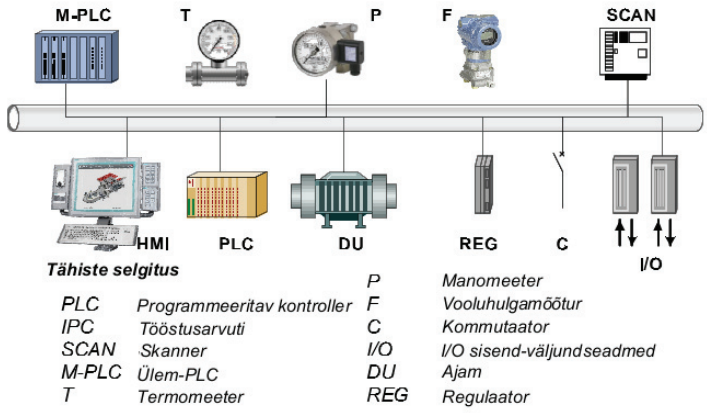
Võrgusidega juhtimissüsteemid saab jaotada kolmeks tasandiks.

1.6.1. Tööväljatasandi süsteemid

Need on ehitatud tööväljа võrkudest programmeeritavate kontrollerite (PLC) ja terminaliüksuste (kontrollerid, andurid, täiturid, nutikad sisend-väljundseadmed jne) vaheliseks sideks. Need süsteemid kasutavad selliseid tööväljaprotokolle nagu Profibus, CAN, Foundation Fieldbus jne. Tööväljavõrgud on võrgusidega juhtimissüsteemide hierarhia aluseks (Joonis 1.5). Neid kasutatakse katkematute tootmisprotsesside, juhtelementide, kontrollerite, andurite jm tootmisprotsessis kasutatavate üksuste juhtimiseks. Neid iseloomustab lihtne ülesehitus. Tööväljavõrkude nutikad sisend-väljundseadmed täidavad mitmeid selliseid lisafunktsioone, nagu diagnostika ja sisend-väljundsignaalide eel- ja järeltöötlus. Need töötavad reaalajas ja toetavad ajaliselt piiratud ja kaugsidet hajus-juhtimissüsteemi alamsüsteemide vahel.

Tööväljavõrkudel on tavaliste võrgustruktuuridega võrreldes mitmeid eeliseid:

- Need tagavad suurema andmeturbe, kaasates juhtimisinfo.
- Võimaldavad andmete edastamisel suuremat täpsust, sest rakendavad täielikult digitaalset sidet.
- Võimaldavad kaugseadistust ja võrguseadmete diagnostikat.
- Vähendavad oluliselt kaablisüsteemide vajadust, toetades mitmete hajusate loogilise juhtimise, lukustuse ja signaliseerimise juhtskeemide ja -struktuuride manustamist.
- Mitmevariandiline juurdepääsuvõimalus, mille korral kasutatakse andureid erinevate protsessiparameetrite lugemiseks.



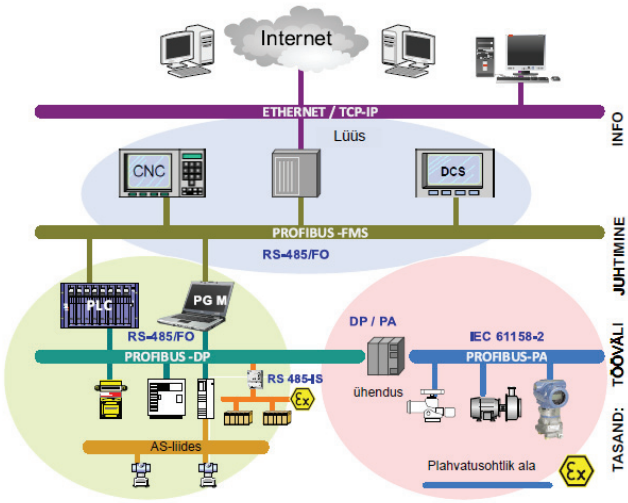
Joonis 1.5 Tööstuslik tööväljavõrk

1.6.2. Juhtimistasandi süsteemid

Juhtimistasandi süsteemid koosnevad programmeeritavatest kontrolleritest (PLC) deterministlikes kohtvõrkudes. Need võimaldavad protsesside juhtimist reaalajas ning erinevat tüüpi programmeeritavate kontrollerite, arvutite, tööjaamade, programmeerimis- ja diagnostikaüksuste vahelist sidet.
Sellele tasandile kuuluvad võrgud tagavad ühenduse seadmete vahel, mis vahetavad rakendatud infot kindlal eelmääratud viisil. Nende ülesanne on lihtsustada tehnoloogiaprogrammide vahetamist ning koordineerida ja juhtida programmeeritavate kontrollerite vahelist infovahetust. Võrgud peavad vastama neile esitatud rangematele nõuetele seoses andmeülekande mahu, turvalisuse, andmeedastuskiiruse, müratakistuse ja reaalaja toimingute ettemääratusega.

1.6.3. Infotasandi süsteemid

Infotasandi süsteeme kasutatakse juhtimiseks ja info vahetamiseks ettevõtte tasandil (Joonis 1.6). Nende eesmärk on lahendada ettevõtte haldamise põhiülesandeid. Nende süsteemide ühised olemuslikud probleemid on seotud andmete hulga ja edastuskiirusega, turvalisusega ja kaitsega loata juurdepääsu eest. Selle tasandi tänapäevased süsteemid kasutavad laialdaselt Ethernetina tuntud spetsifikatsiooni.
Infotasandi võrke iseloomustab suur andmeedastuskiirus ja need on ette nähtud suurte andmemassiivide vahetamiseks. Erinevalt enamikust konkureerivatest tehnoloogiatest on nende oluline eelis regulaarne hinna langemine.



Joonis 1.6 Tööstusvõrgu kolm hierarhiatasandit

1.7. Teadmiste kontroll

1. Mitmeks tasandiks jaotatakse automaatsed juhtimissüsteemid?
    a. kolmeks
    b. kaheks
    c. neljaks
    d. viieks
    e. kuueks

2. Mis on võrgusidega automaatsete juhtimissüsteemide otstarve?
    a. tootmisprotsesside juhtimine
    b. terminalide ühendamine sidevõrku
    c. protsessijaotus sidevõrgus
    d. sidevõrgu automaatne seadistus
    e. juht- ja terminaliüksuste ühendamine sidevõrku

3. Millised hajusjuhtimissüsteemid on olemas?
    a. detsentraliseeritud vertikaalselt integreeritud
    b. tsentraliseeritud laskuv
    c. horisontaalselt integreeritud vertikaalse infovahetusega
    d. horisontaalselt integreeritud horisontaalse infovahetusega
    e. vertikaalselt integreeritud horisontaalse infovahetusega

4. Millisteks tasanditeks jaotatakse võrgusidega juhtimissüsteemid?
    a. töövälja-, juhtimis- ja infotasand
    b. töövälja- ja infotasand
    c. info- ja juhtimistasand
    d. algne, operatiiv- ja juhtimistasand
    e. ei jagune tasanditeks

5. Mis iseloomustab tööväljavõrke?
    a. Need on osa juhtimistasandi võrkudest.
    b. Need töötavad reaalajas.
    c. Neil on keeruline ülesehitus.
    d. Neil on lihtsustatud ülesehitus.
    e. Need sisaldavad diagnostikaseadmeid.

2 SIDEVÕRK

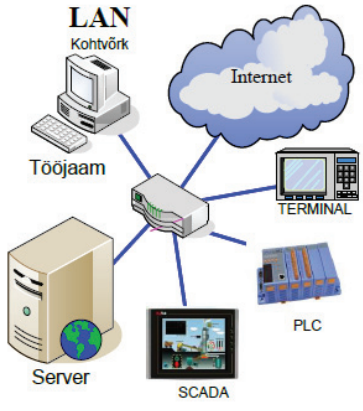
2.1 Sidevõrk. Võrgutüübid

Võrk koosneb kahest või enamast seadmest, mis on üksteisega ühendatud vajalike riist- ja tarkvaravahendite abil, võimaldades vahetada andmeid omavahel ja muude seadmetega. See on mehhanism, mis võimaldab hajutatud sideseadmetel ja nende kasutajatel omavahel ressursse jagada. Tööstuslikke sidevõrke luuakse järgmistel eesmärkidel:

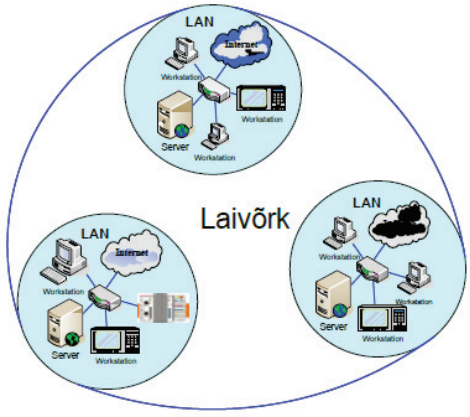
- Andmevahetus kahe erineva seadme vahel.
- Ühiste jagatud ressursside kasutamine: seadmed, tarkvara ja info.
- Hajustöötlus ehk erinevad seadmed töötlevad andmeosasid, mis on salvestatud muudes seadmetes.

Kõige lihtsam füüsiline süsteem kahe teineteisest eemal paikneva arvuti vahel on side loomine telefoniliini kaudu, ühendades liini otstesse kaks modemit (seadmed, mis muundavad andmed telefoniliini kaudu edastatavateks signaalideks ja tagasi).

Sideseadmete füüsiline ühendamine võrku ei pruugi veel tähendada, et need seadmed on võimelised koos töötama. Seetõttu on vajalik, et mõlemad seadmed kasutavad sama võrguprotokolli, mis võimaldab infovahetust erinevate seadmete ja programmide vahel.



Joonis 2.1 Kohtvõrk (Local Area Network, LAN)



Joonis 2.2 Laivõrk (Wide Area Network, WAN)

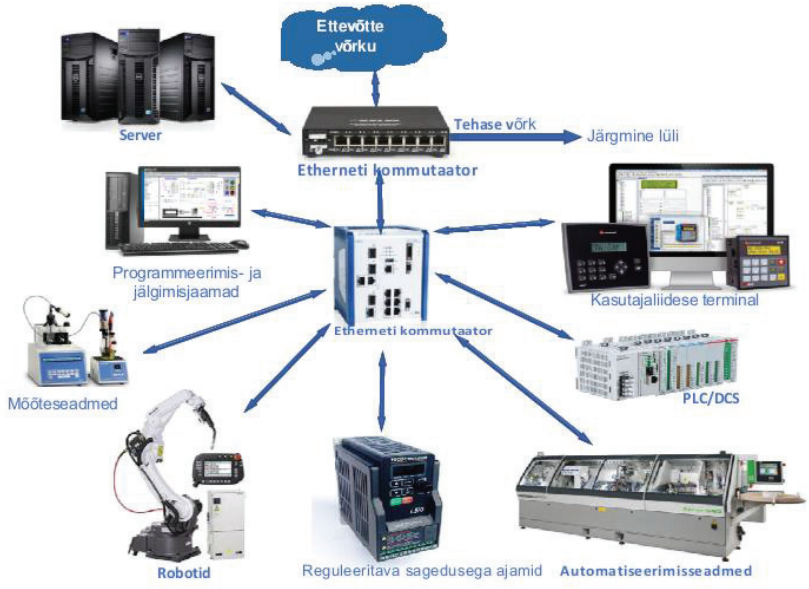
Riistvaraline ühendus üksikute arvutite, kontrollerite ja muude võrku kuuluvate perifeeriaseadmete vahel luuakse kaablite (koaksiaalkaabel, keerdpaarkaabel, kiudoptiline kaabel) või mõne traadita tehnoloogia (IRDA, Bluetooth jne) abil.
Võrgusisese andmeedastuse määravad spetsiaalsed reeglistikud, mida nimetatakse võrguprotokollideks (TCP/IP, NetBEUI, AppleTalk, PPTP, DHCP jne). Üldiselt on võrke nelja tüüpi:

- **kohtvõrk (*Local Area Network*, LAN)** – kohalik arvutivõrk, mis teenindab ühte organisatsiooni ja paikneb ühes või mitmes külgnevas hoones (Joonis 2.1)

- **regionaalvõrk (*Metropolitan Area Network*, MAN)** – katab asustatud ala või suure hoone, mida jagab mitu organisatsiooni
- **laivõrk (*Wide Area Network*, WAN)** – globaalne võrk, mis kasutab erinevates geograafilistes kohtades paiknevate arvutite ühendamiseks kiiret kaugsidet või satelliite (Joonis 2.2)
- **salvestusvõrk (*Storage Area Network*, SAN)** – andmete salvestamise võrk, mida kasutatakse suurte andmemassiivide ühendamiseks kobarserveritesse.

2.2 Võrgutüübid

Kohtvõrke (LAN) on kahte tüüpi. Neid eristab võrku ühendatud seadmete volitamine ja volituste omandamine. Võrdvõrgus on igal võrguseadmel muude seadmetega samad volitused, kuid klient-server-tüüpi võrgu korral määrab muude võrgus osalejate pääsuvolitused server eeldusel, et iga arvuti-klient on esitanud vastava taotluse. Tööstuslikku tüüpi võrk on tavaliselt mõlema tüübi kombinatsioon.



Joonis 2.3 Võrdvõrk

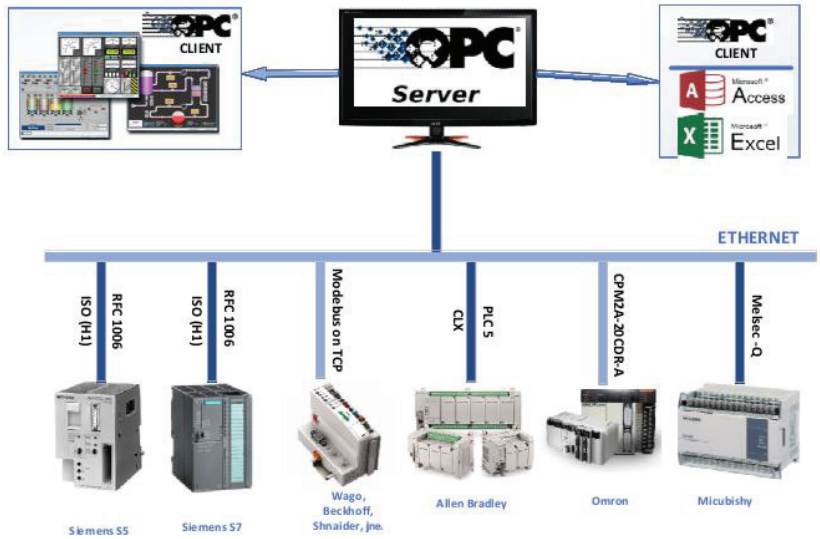
2.2.1 Võrdvõrk

Seda tüüpi võrgus (Joonis 2.3) on kõik seadmed võrdõiguslikud ja võivad kindlal ajahetkel toimida nii serveri kui ka kliendina. Juurdepääsu jagatud võrguressurssidele ei hallata eraldi serverist nagu klient-server-tüüpi võrkude korral. Seda tüüpi võrke kasutatakse siis, kui seadmeid on suhteliselt vähe ja puudub vajadus failide ja ressursside keskse salvestamise järele.

Sellist tüüpi võrkude oluline eelis seisneb nende väikeses paigalduskulus ja individuaalsete sõlmede lihtsas haldamises. Puudub vajadus haldamise ja seadistamise eest vastutava süsteemihalduri järele.

2.2.2 Klient-server-tüüpi võrk

Sellist tüüpi võrkudes (Joonis 2.4) on üksikute seadmete eesmärk algusest peale kindlaks määratud: võrku kuuluvatele tööjaamadele jagab pääsuõigusi ressurssidele ja teenustele üks (või mitu) server(it). Kõigile seadmetele juurdepääsetavaid faile ja rakendusi säilitatakse serveris. Andmekaitse tase tagatakse võrgus ressursside prioriteetide abil. Seda tüüpi võrgud on kiiremad kui võrdvõrgud ja võimaldavad lisada rohkem seadmeid, eeldusel et jagatud ressursside terviklus säilib. Teisalt on selliste võrkude ülesseadmiseks vajalikud seadmed mitu korda kallimad, vaja on süsteemihaldurit, kes peab peale muude nõuete tegelema ka andmeturbega, eriti kui võrk on ühendatud interneti või mõne muu võrguga.



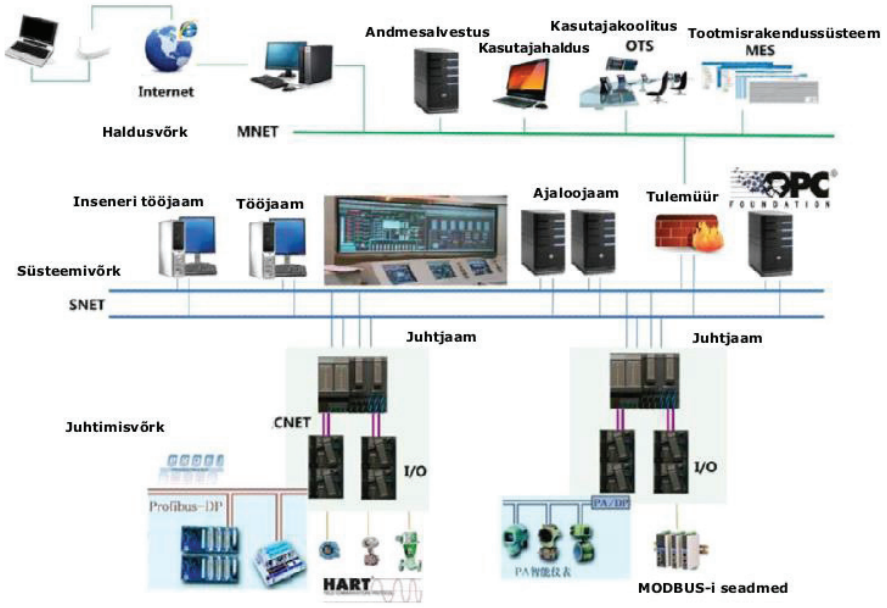
Joonis 2.4 Klient-server-tüüpi võrk

2.2.3 Liittüüpi võrgud

Sellist tüüpi võrgud (Joonis 2.5)on kahe eespool kirjeldatud tüübi kombinatsioon. Erinevates organisatsioonides täidetavad spetsiifilised ülesanded annavad liittüüpi võrkudele konkreetsete nõuete täitmisel eelise.

Nagu on näha joonisel 2.5, siis kindel osa võrguseadmetest, mis kuuluvad ühte töörühma, moodustavad võrdvõrgu, milles ühiseid ressursse jagatakse ilma serverita. Samal ajal on need seadmed ühenduses ka serveriga, mis on osa klient-server-tüüpi võrgust. Seega

ühelt poolt juhib server kõige olulisemaid ressursse, mida vajab kogu võrk, kuid teiselt poolt ei jaota see ressursse nende seadmete juhtimiseks, mis on vajalikud võrdvõrku ühendatud töörühma kuuluvate arvutite tööks.



Joonis 2.5 Liittüüpi võrgud

2.3 Teadmiste kontroll

1. Millised on kohtvõrgu tüübid?
    a. võrdvõrk
    b. klient-server-tüüpi võrk
    c. liittüüpi võrk
    d. ülem-alluv-tüüpi võrk
    e. kõik ülalnimetatud

2. Võrgu andmeedastust reguleerivad spetsiaalsed reeglistikud, mida kutsutakse võrgu-protokollideks. Millised järgmistest lühenditest on protokollid?
    a. TCP/IP
    b. NetBEUI
    c. AppleTalk
    d. MAC
    e. DHCP

3. Millist võrgutüüpi kasutatakse suurte andmemassiivide ühendamiseks kobarserveritesse?
    a. salvestusvõrk (*Storage Area Network*, SAN)
    b. laivõrk (*Wide Area Network*, WAN)
    c. regionaalvõrk (*Metropolitan Area Network*, MAN)
    d. kohtvõrk (*Local area network*, LAN)
    e. õiget vastust ei ole

4. Mis eesmärkidel luuakse tööstuslikke arvutivõrke?
    a. Andmevahetus erinevate seadmete vahel.
    b. Ühiste ressursside (riistvara, tarkvara ja andmete) jagamine.
    c. Hajustöötlus ehk erinevad seadmed töötlevad andmeosasid, mis on salvestatud muude seadmete mälus.
    d. Võrguühenduseta eriseadmete juhtimine.
    e. Andmehõive andurite abil.

5. Milline võrgutüüp on kiireim?
    a. võrdvõrk
    b. klient-server-tüüpi võrk
    c. liittüüpi võrk
    d. ülem-alluv-tüüpi võrk
    e. kõik ülalnimetatud

3 VÕRGU TOPOLOOGIAD JA MUDELID

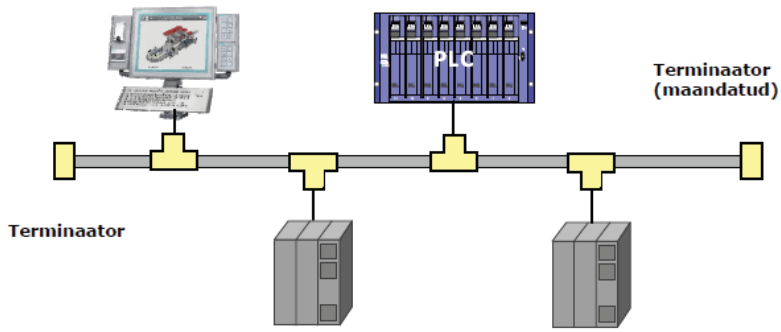
3.1 Võrgu topoloogiad

Topoloogia määratleb sidevõrgu struktuuri: seadmete ühendusmeetodid ja andmeteed. Eristatakse kahte tüüpi topoloogiat: loogiline ja füüsiline. Füüsiline topoloogia määrab ühenduskaablite, võrguseadmete ja võrgus olevate tööjaamade konfiguratsiooni. Loogiline topoloogia määrab kasutajate võrgule juurdepääsu meetodi ja võimalikud marsruudid andmevahetuseks võrgusõlmede vahel.

3.2 Füüsiliste topoloogiate tüübid

3.2.1 Siinitopoloogia

Siinitopoloogia korral läbib ühest tööjaamast saadetud info kogu edastusmeediumi ja seda võivad vastu võtta kõik tööjaamad (Joonis 3.1). Ühel ajahetkel on lubatud infopakette saata ainult ühel tööjaamal.

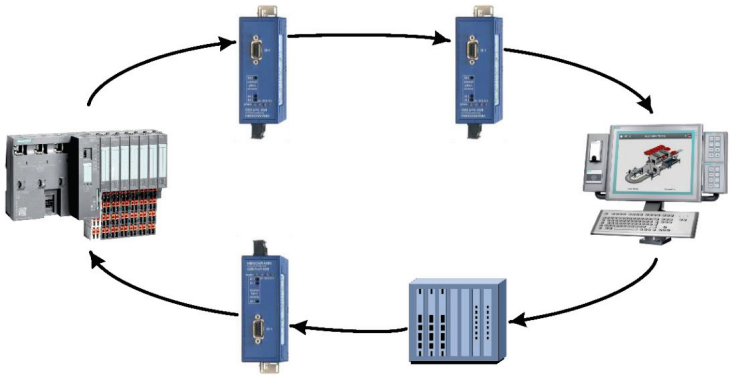


Joonis 3.1 Siinitopoloogia

See tekitab vajaduse hallata ja juhtida juurdepääsu meediumile. Andmed edastatakse pakettidena, mis sisaldavad vastuvõtva jaama aadressi, saatja aadressi ja muud teenuseteavet. Edastatavad andmed saadetakse kõigile seadmetele ja igaüks neist kontrollib andmeid, tuvastamaks kas vastuvõtja aadress vastab selle enda omale. Kui nii ei ole, ei võta asjakohane seade andmeid vastu. Siini mõlemasse otsa tuleb lisada lõpukoormis (terminaator). See väldib niinimetatud signaalipeegeldusi ja tõrkeid võrgus. Terminaatori puudumise korral peegeldub signaal kaablilõigu lõpust, mis moonutab muid saadetavaid signaale. Üks võrgu ots peab olema maandatud. Siinitopoloogia puuduseks on see, et üks võrgukonflikti põhjustav seade peatab ka kõigi muude võrguseadmete töö. Peale selle on keeruline ka seda tüüpi võrgu diagnostika. Siinitopoloogia ei võimalda võrguliikluse andmekaitset, sest kõik sõnumid edastatakse mööda ühist magistraalliini. Siinitopoloogia eelisteks on kiire paigaldus ja väiksem kaablikulu.

3.2.2 Ringtopoloogia

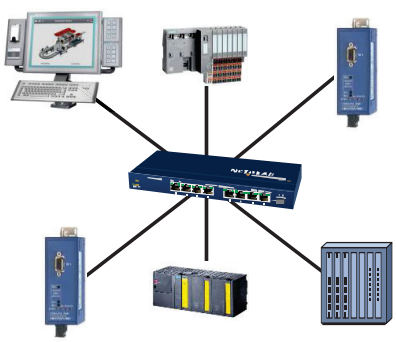
Ringtopoloogias ühendatakse kõik seadmed omavahel, nii et moodustub suletud ring (joonis 3.2). Nii saavutatakse ringikujuline füüsiline ühendus.



Joonis 3.2 Ringtopoloogia

Ringtopoloogiaid on kahte tüüpi: ühe ja kahe ringiga. Ühe ringi korral on iga võrgusõlm ühendatud kahe teise sõlmega, kusjuures esimene ja viimane sõlm on ühendatud üksteisega, moodustades ringi. Kahe ringi korral on kõik võrgusõlmed ühendatud kahe teise sõlmega kahe kanali kaudu. Neis kahes ringis kulgevad paketid vastupidistes suundades (üht ringi kasutatakse ühes suunas kulgeva side jaoks ja teist vastassuuna jaoks). Tavaliselt edastatakse pakette ainult ühes ringis, kuid probleemide esinemisel luuakse kahe ringi vahele ühendus paketiedastuse jätkumiseks varuringis. See tagab andmeedastuse töökindluse ka juhul, kui ühes ringidest peaks toimuma tõrge. Ringtopoloogia olulisim probleem on kõigi tööjaamade võrdne võimalus pääseda võrku. Uue tööjaama lisamiseks võrku ja kaabeldustööde tegemiseks tuleb olemasoleva võrgu töö peatada.

3.2.3 Tähttopoloogia



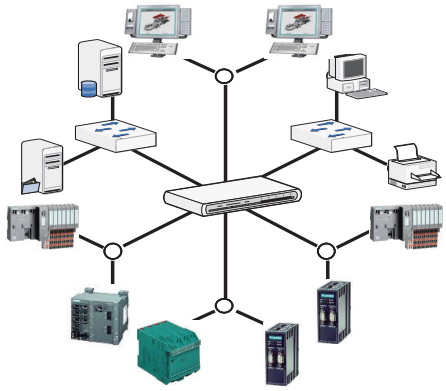
Tähttopoloogia on levinuim võrgustruktuuri tüüp. Selle topoloogia korral ( ) on iga tööjaam ühendatud keskse sideüksusega (nt kommutaatoriga) kahe ühesuunalise ühenduse abil. Tähttopoloogiate spetsiifiline eelis on see, et mõnel võrguüksusel võib olla suurem prioriteet kui teistel. Nii saab sideüksus kontrollida kõrgema prioriteediga tööjaamadest tulevaid sõnumeid enne teiste üksuste päringute vastuvõtmist. Peale selle võimaldab tähttopoloogia kõigi võrgufunktsioonide tsentraliseeritud diagnostikat.

Joonis 3.3 Tähttopoloogia

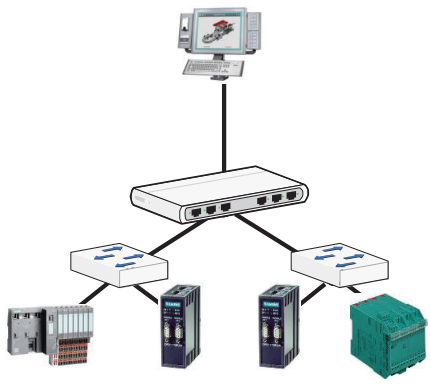
Et kõik sõnumid saadetakse keskseadmele, on individuaalsetelt tööjaamadelt tulevaid sõnumeid lihtne analüüsida. See topoloogia võimaldab lisada uusi tööjaamu ja analüüsida üksikasjalikult võrgujõudlust. Tähttopoloogia peamine puudus on see, et sideüksuse vea või tõrke korral on halvatud kogu võrgu töö.

3.2.4 Laiendatud tähttopoloogia

Laiendatud tähttopoloogia on tähttopoloogia teisend. Seda tüüpi topoloogia korral on mitmed tähed ühendatud ühisesse konfiguratsiooni (Joonis 3.4). Laiendatud tähttopoloogia eelis on see, et keskseadme tõrge ei peata kogu sidevõrgu tööd.



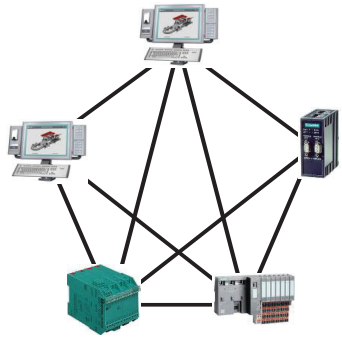
Joonis 3.4 Laiendatud tähttopoloogia



Joonis 3.5 Hierarhiline topoloogia

3.2.5 Hierarhiline topoloogia

Hierarhiline topoloogia (Joonis *3.5*) kasutab ainult ühte laiendatud tähttopoloogia haru puukujulise struktuurina.



Joonis 3.6 Silmustopoloogia

3.2.6 Silmustopoloogia

Silmustopoloogiat (Joonis 3.6) kasutatakse siis, kui katkestused sidevõrgus on lubamatud. See võimaldab igal üksusel olla ühenduses mitme teise üksusega. Marsruudi katkemise korral luuakse muude seadmete kaudu alternatiivne ühendus.

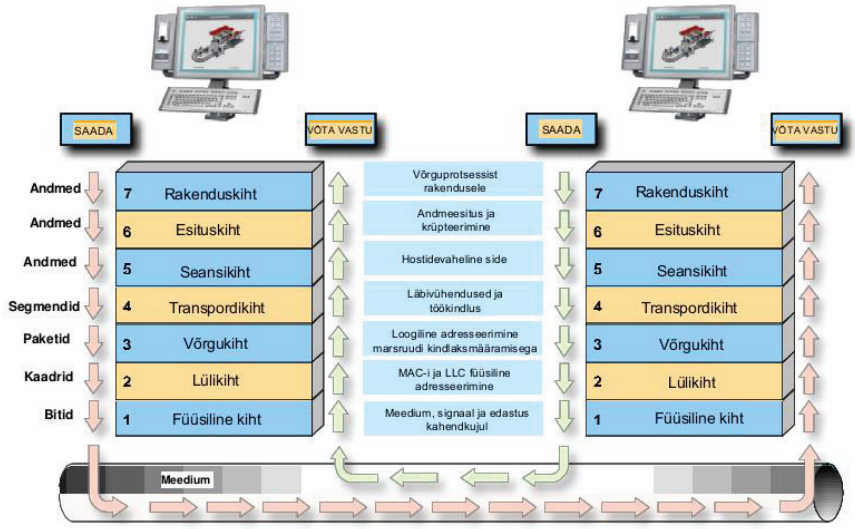
3.3 Võrgumudelid

Võrgumudelid kujutavad endast formaliseeritud viisi kirjeldamaks sideprotsessi erinevaid etappe (kihte) ja faase. Kaks kõige levinumat mudelit on OSI (*Open Systems Interconnection, avatud süsteemide ühendamine*) ja DoD (*Department of Defense*, USA kaitseministeeriumi võrgumudel).

3.3.1 OSI võrgumudel

OSI võrgumudel kirjeldab baasarhitektuuri, milles pakettkommutatsiooniga võrguside on jaotatud seitsmeks iseseisvaks kihiks (Joonis 3.7). Seda standardit kasutavad võrguseadmete tootjad seadmete, operatsioonisüsteemide ja protokollide väljatöötamisel ning sel on järgmised spetsiifiline omadused:

- iga kiht suhtleb külgnevate kihtidega ainult standardiseeritud protokollide abil
- igal kihil on täpselt määratletud funktsioonid
- enne andmete edastamist ühest kihist teise jagatakse need andmepakettideks – infoüksusteks, mis edastatakse ühtsena ühest seadmest teise
- saatja poolel edastab võrgutarkvara andmepaketid jadamisi ühest kihist teise, kusjuures igal paketikihil toimub lisavormindamine või adresseerimine
- vastuvõtja poolel käib andmepakett läbi kihtide vastupidises järjestuses, iga kiht eemaldab selle kihi edastamise ajal lisatud lisainfo. Kui andmepakett jõuab rakenduskihti, eraldatakse aadressiinfo täielikult.



Joonis 3.7 OSI võrgumudel

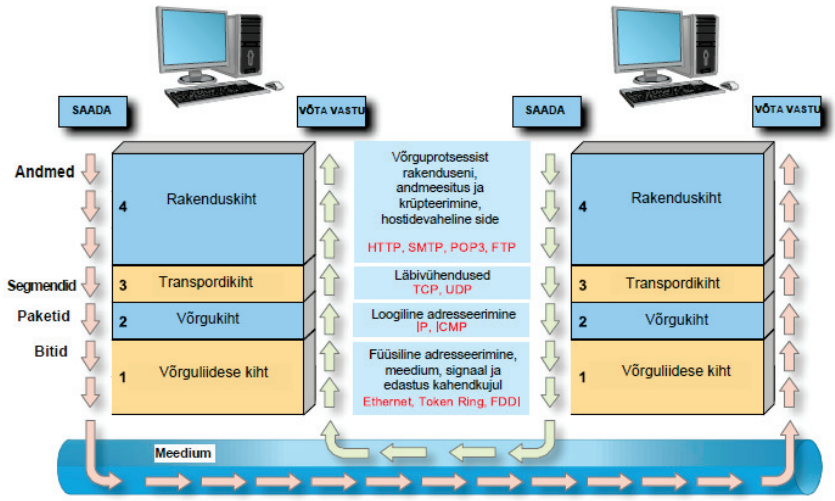
- ***Rakenduskiht (7).*** Rakenduskiht töötab tarkvararakenduste ja võrguteenuste vahendajana. Etherneti võrgustandardi korral töötavad selles kihis sellised protokollid nagu HTTP, FTP, Telnet, SMTP, POP3, IMAP4 ja SNMP. Modbusi võrguspetsifikatsioonis kasutatakse selles kihis Modbusi rakendusprotokolli (*Modbus Application Protocol*). Kihi põhiülesanne on juhtida üldist võrgu juurdepääsu, andmevoogusid ja veaparandust. Rakenduskiht hõlmab tarkvaravahendeid ja töödeldavaid andmeid, mis võivad osaleda andmevahetuses muude võrgusõlmedega. Igale sõnumile lisatakse päis. See on infostruktuur, mis identifitseerib edastava ja vastuvõtva tööjaama.

- ***Esituskiht (6).*** See määrab kindlaks andmevahetuse formaadi. Rakenduskihist vastuvõetud andmed esitatakse universaalsete andmepakettide kujul. Vastuvõtja poolel konverteeritakse andmed universaalsetest andmepakettidest vastuvõtva jaama rakenduskihi kasutatavasse formaati. See kiht võimaldab andmete pakkimist, andmete krüpteerimist loata juurdepääsu tõkestamiseks ja protokollide transleerimist, et võimaldada erinevate seadmete ja operatsioonisüsteemide vahelist sidet. Igale sõnumile lisatakse päis, mis sisaldab infot pakkimis- ja krüpteerimismeetodite ning andmete kirjutamise formaadi kohta.
- ***Seansikiht (5).*** See kiht loob kahe võrguseadme vahel seansikanali. Programmide vahel on iga seansi jooksul dialoog. Seansid võimaldavad kahesuunalist sidet dupleks- või poolduplekssrežiimil. Kasutatav ühendusmeetod on kirjutatud seansikihi päisesse. Seansikiht juhib ja sünkroonib andmeedastust ning kaitseb edastuskatkestuste eest.
- ***Transpordikiht (4).*** See kiht transpordib andmepakette õiges järjekorras ning ilma vigade ja kadudeta. Peale selle on see kiht võimeline liiklust optimeerima, ühendades järjestikuseid mittetäielikke andmepakette. Sellel kihil töötavad transpordiprotokollid nagu TCP, UDP ja domeeninimede süsteemi (DNS) teenus. Transpordikiht tagab andmeedastuse kaitse ja arhiveerib edastatud andmed uuesti edastamiseks vea korral. Selles kihis arvutatakse kontrollsummad, mis võimaldavad tuvastada ja parandada andmeedastuse ajal tekkivaid vigu. Sõnumi päisesse lisatakse kontrollsumma ja andmepaketi positsiooni andmed. Vastuvõtvas jaamas pakitakse andmepaketid lahti ja paigutatakse algsesse järjekorda, millele järgneb nende vastuvõtmise kinnituse saatmine.
- ***Võrgukiht (3).*** See kiht adresseerib sõnumid ja määrab kindlaks marsruudi, mida mööda edastatakse andmepaketid lähtejaamast sihtjaama. Aadressid lisatakse sõnumitele päise kujul. Kiht jälgib liiklust ja juhib andmeprioriteete (*Quality of Service*, QoS). Sellel kihil töötavad IP-protokoll ja ruuterid.
- ***Lülikiht (2).*** See kiht saadab andmekaadreid võrgukihilt füüsilisele kihile. See jaguneb kaheks alamkihiks: meediumipöörduse juhtimiskiht (*Media Access Control*, MAC) ja loogilise lüli juhtimiskiht (*Logical Link Control*, LLC). MAC eraldab tööjaamadele juurdepääsu operatiivmeediumile ja määratleb MAC-aadressid. LLC määrab kindlaks loogilise struktuuri. Vastuvõtja poolel pakib lülikiht füüsilise kihi järjestikbitid andmekaadrite formaati. Iga kaadri saatmisele järgneb selle vastuvõtmise kinnituse genereerimine. Kaadrid, mille kohta ei ole vastuvõtmise kinnitust või mis ei läbi veakontrolli, edastatakse uuesti. Lülikihil töötavad sild ja kommutaator.
- ***Füüsiline kiht (1).*** See kiht pakub andmekaadrite krüpteerimist elektriliste või valgussignaalide kujule ja nende edastamist võrgumeediumile. Selles kihis määratletakse kaablite ühendamisviisid võrgujaamade väljundterminalidesse. Samuti määratletakse selles kihis andmeedastustehnoloogia mööda võrgukaablit, nagu ka andmete krüpteerimine ja bittsünkroonimine. Määratletakse iga biti kestus ja see, kuidas bitid muudetakse võrgukaabli jaoks kas elektri- või valgusimpulsiks. Sellel tasandil töötavad seadmed on võrgukaardid, repiiterid, kontsentraatorid ja muundurid.

3.3.2 DoD mudel

DoD (*Department of Defense*) võrgumudel koos TCP/IP-ga töötati välja osana ARPAneti projektist enne OSI mudelit. Seepärast tuntakse DoD mudelit ka TCP/IP mudeli nime all. DoD koosneb neljast kihist (Joonis 3.8):

- rakenduskiht – mudeli kõrgeim kiht, mis kombineerib OSI mudeli kolme kõrgema kihi funktsioone
- transpordikiht – vastab OSI mudeli transpordikihile
- võrgustikukiht – vastab OSI mudeli võrgukihile
- võrguliidese kiht – vastab OSI mudeli lülikihile ja füüsilisele kihile.



Joonis 3.8 DoD mudel

3.4 Seadmed füüsilise ja loogilise võrgu struktureerimiseks

Sidevõrkude rajamise korral kasutatakse füüsiliste ja loogiliste struktuuride koostamiseks erinevaid seadmeid. Ühendusseadmed jaotatakse kolme rühma:

- *passiiv*seadmed
- *aktiiv*seadmed
- *seadmed* võrgu konfigureerimiseks segmentideks ja alamvõrkudeks.

Joonis 3.9 Profibusi ühenduspistik

3.4.1 Passiivseadmed

Passiivseadmed on sidevõrgu ühenduspunktid, mis ei muuda sisendisse saabuva signaali parameetreid. Sellesse seadmete rühma kuuluvad: ühenduspistikud, seinapesad, kaablipaneelid ja passiivjaoturid.

Ühenduspistikud (Joonis 3.9) ja joonis 3.10) on passiivseadmed, mida kasutatakse võrgukaabli pikendamiseks.

Joonis 3.10 Ühenduspistik, seinapesa ja pistikupesa RJ-45

Joonis 3.11 Etherneti kaablipaneel

Seinapesa (Joonis 3.10) on ühenduspaneel ühe tööjaama jaoks, millel on tavaliselt üks või kaks porti.
Kaablipaneel (Joonis 3.11) on ühendus- ja jaotuspunkt kaablite korraldamiseks.
Passiivjaotur (Joonis 3.12) on keskne ühendusseade, mille abil luuakse ühendus tööjaamade vahel. See ei sisalda elektroonilisi komponente ega vaja seega elektritoidet. Mistahes porti saabuv sisendsignaal edastatakse kõigisse muudesse portidesse.

Joonis 3.12 Etherneti passiivjaotur

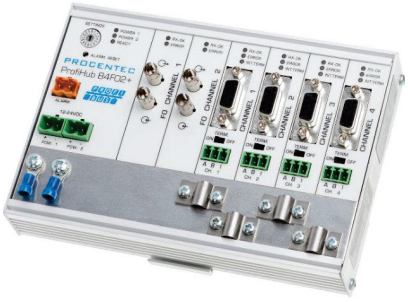
3.4.2 Aktiivseadmed

Aktiivseadmed võimendavad sisendsignaali. Peale selle suudavad need muundada signaali ühest edastusmeediumi tüübist teise. See rühm hõlmab järgmisi seadmeid: *edastusmeediumi muundurid, repiiterid ja aktiivjaoturid.*

- ***Edastusmeediumi muundurid.*** Need on tuntud kui adapterid või edastusmeediumi translaatorid/konverterid, mis konverteerivad võrguliiklust kahe erinevat tüüpi edastusmeediumiga sidevõrgu segmendi vahel. Näiteks kiudoptiline muundur loob ühenduse varjestamata keerdpaarkaabli võrgu ja kiudoptilise kaabli võrgu vahel.

- ***Repiiter.*** See seade töötab füüsilisel tasandil. See on ette nähtud sidevõrgu kogupikkuse suurendamiseks. Taastab signaalitugevust ja parandab impulsi tugevust suuremate vahemaade korral. Repiiterid ei filtreeri neid

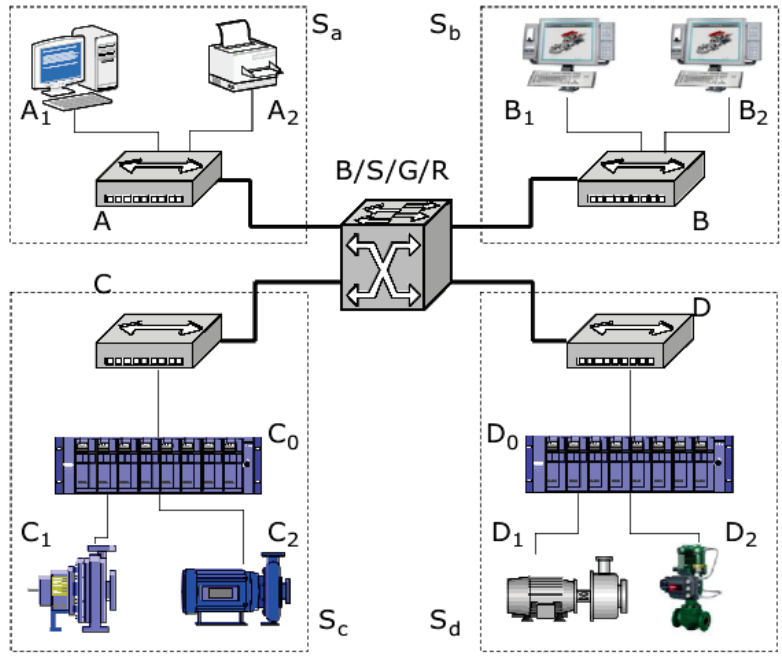
läbivaid signaale vaid regenereerivad ainult kõiki signaale, sealhulgas teenussõnumeid, müra ja häiringuid.
Nende põhirakendus on sama võrgu kahe võrgusegmendi ühendamine. Repiitereid saab kasutada mitme eri tüüpi edastusmeediumi ühendamiseks, kuid neid ei saa kasutada selliste segmentide ühendamiseks, mis kasutavad erinevaid struktuure või pääsumeetodeid.



- ***Aktiivjaotur (jaotur).*** Aktiivjaotur või lihtsalt jaotur on mitme sisendiga repiiter, millega luuakse tähtühendus võrguliidestega seadmete vahel samas võrgus. See muudab võrgu füüsilist topoloogiat, kuid mitte selle loogilist struktuuri. Kõik selle pordid on võrdse prioriteediga. See ei sünkrooni erinevatel kiirustel töötavaid porte. Vastuvõetud andmepakette ei puhverdata. Seetõttu on andmevahetuskiirus väike. Võrku ühendatud füüsiliste seadmete hulga suurendamiseks saab jaotureid üksteisega ühendada.

3.4.3 Seadmed võrgu konfigureerimiseks segmentideks ja alamvõrkudeks

Sidevõrkude loogiliseks struktureerimiseks kasutatakse selliseid seadmeid, nagu sillad, kommutaatorid, ruuterid ja lüüsid (Joonis 3.13).



Tähiste selgitus

S_a, S_b, S_c, S_d - segment
B/S/G/R - sild/kommutator/lüüs/ruuter
C_0, D_0 - PLC
A, B, C, D - jaotur
A_1, A_2, B_1, B_2 - tööjaamad
C_1, C_2, D_1, D_2 - täiturid

Joonis 3.13 Sidevõrkude loogiline struktureerimine ja selleks ettenähtud seadmed

- ***Sild.*** See jaotab võrgu loogilisteks segmentideks ja sõnumid edastatakse ühest segmendist teise üle silla pordi, kui vastuvõtja ainulaadne võrguaadress (MAC) kuulub vastavasse segmenti. See seade sisaldab mõlema segmendi seadmete aadressitabelit.

Silla peamine eesmärk on filtreerida segmentide vahelist liiklust ülekoormuse vähendamiseks suuremates kohtvõrkudes. Sillad võivad toimida eraldiseisva seadmena või olla osa arvutist. Sillad töötavad OSI võrgumudeli lülikihis (andmepakettide tasandil). Neid kasutatakse võrkudes, mis on ehitatud jaoturitega, et vähendada andmepakettide valet edastamist või ühendada kahte eemalasuvat kohtvõrku üheks. Samuti eraldavad need ühe konkreetse segmendi liikluse ülejäänud osa liiklusest ja tõstavad kogu võrgu mahtu ning kiirust. Kaks silla abil ühendatud kohtvõrku on füüsiliselt küll eraldatud, kuid loogiliselt moodustavad need ühe võrgu.

- ***Kommutaator.*** See tagab info paralleelse töötlemise. Kommutaator on kõige enam kasutatud seade tööjaamade ühendamiseks tähttopoloogia võrkudes. Kui jaoturid edastavad vastuvõetud signaali kõikidesse portidesse, siis kommutaatorid filtreerivad info ja edastavad selle ainult sihtseadmetele. Paketi saabumise korral kommutaatori kindlasse porti kontrollib see paketi õiget vastuvõttu, seejärel viitab oma tabelile, et kontrollida, kas selles on vastuvõtja MAC-aadressi kirje. Kui MAC-aadressi kirjet tabelis ei ole, edastab kommutaator andmepaketi kõigisse oma portidesse ja pärast seda saab sihtseadmelt vastuse. Vastavustabelisse luuakse kirje, mis näitab, milline väljundport sellele MAC-aadressile vastab. Kõik järgnevad sama aadressi kandvad andmepaketid edastatakse otse vastavasse porti. MAC-aadressi kirje olemasolul edastab kommutaator paketi otse vastavasse porti. Kommutaatorite tüüpe eristatakse olenevalt sellest, millises OSI mudeli võrgukihis need töötavad. Tavapärased kommutaatorid töötavad OSI mudeli teises kihis. Kõrgema klassi kommutaatorid töötavad OSI mudeli kolmandas ja neljandas kihis. Need on kommutaatorid, mis täidavad ka ruuteri funktsioone. Tavaliselt on nende ühendus piiratud ühe MAC-aadressiga ja ühenduse edastuskiirus võib samuti olla piiratud. Kommutaatoril on iga pordi jaoks spetsiaalne protsessor, mis töötleb sissetulevaid andmepakette (kaadreid) ülejäänud portide protsessoritest eraldi. See võimaldab igal tööjaamal edastada andmeid üle edastusmeediumi ilma muude tööjaamadega konkureerimata. Kommutaator kontrollib sellesse ühendatud seadmete MAC-aadresse. Kommutaator võimaldab ühendada mitut eraldiseisvat seadet ja võrgusegmenti, millest igaühel võib olla veel sellesse ühendatud terminale. See puhverdab andmeid (vahehoidega edastus) enne vastuvõtja ühendusparameetrite tuvastamist. Kommutaatorid suhtlevad omavahel dupleksrežiimil, mis võimaldab andmeid edastada ja vastu võtta samal ajal.

- ***Ruuter.*** *Ruuter* on seade, mida kasutatakse andmepakettide jaotamiseks erinevate võrkude või võrgusegmentide vahel (joonis 3.14). See võimaldab jagada kohtvõrgu kaheks või enamaks alamvõrguks. Erinevalt jaoturitest ja sildadest töötab ruuter OSI võrgukihis loogiliste IP-aadressidega. Sillaga võrreldes isoleerib ruuter liiklust tõhusamalt, kasutades individuaalsete sõlmede aadresse. Ruuterid saavad valida võimalike olemasolevate marsruutide hulgast parima otsetee kindlale aadressile. Andmeedastuse marsruudi määramiseks ja andmepakettide edastamiseks kasutab ruuter enda marsruutimistabelit, milles on salvestatud teiste ruuterite IP-aadressid.

Joonis 3.14 Ruuter

Ruuter genereerib selle tabeli ise, kogudes asjakohast infot ja muutuste korral uuendab tabelit teiste ruuterite abil. Ruutereid kasutatakse kohtvõrgu ühendamisel internetti või kahe või enama kohtvõrgu üksteisega ühendamise korral. Need vähendavad võrguliiklust võrkude vahel ja parandavad kohtvõrgu turvalisust.

Joonis 3.15 CAN-Etherneti lüüs

- ***Lüüs.*** Lüüs ühendab kahte võrku, mis kasutavad erinevaid juurdepääsuprotseduure ja protokolle (nt DeviceNet ja CANopen) (Joonis 3.15). See eristab ja tuvastab erinevate võrkude liiklust kummalgi pool lüüsi. Lüüs teisendab erinevaid protokolle OSI mudeli transpordikihis. Kõige sagedamini kasutatakse lüüse kohtvõrgu ühendamiseks globaalsesse võrku või kahe eemaloleva kohtvõrgu ühendamiseks üle globaalse võrgu füüsilise meediumi.

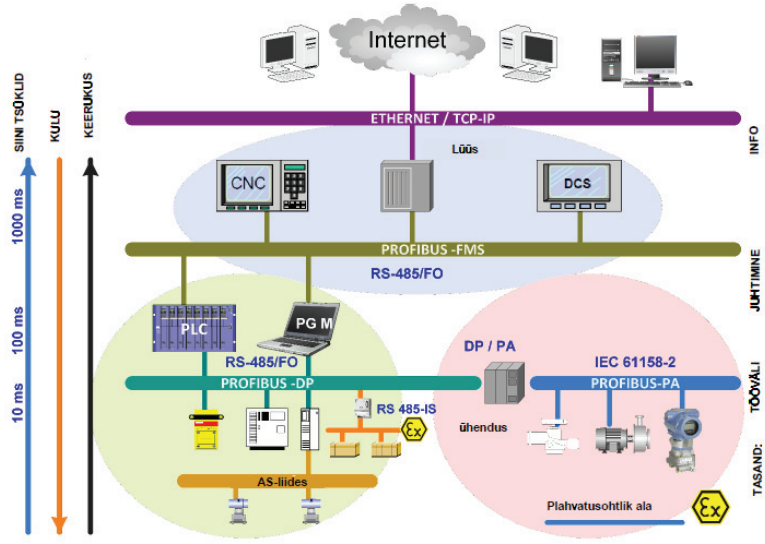
3.5 Teadmiste kontroll

1. Mille määrab võrgu topoloogia?
   a) võrguseadmete paiknemise võrgus
   b) võrguseadmete arvu ja eesmärgi
   c) loogilised ja füüsilised seosed võrgus
   d) võrguseadmete arhitektuuri
   e) sidevõrgu struktuuri
2. Millised on tööstuslike võrkude topoloogia põhitüübid?
   a) füüsiline
   b) tööväli
   c) info
   d) sõlm
   e) loogiline
3. Millised järgmised füüsilised topoloogiad on õiged?
   a) siin
   b) ring
   c) trapets
   d) laiendatud ring
   e) täht
4. Millised järgmised seadmed on ette nähtud võrgu loogiliseks struktureerimiseks?
   a) edastusmeediumi muundur
   b) sild
   c) ruuter
   d) lüüs
   e) repiiter
5. Mitu kihti on OSI mudelis, mida sideprotsess läbib?
   a) 10
   b) 5
   c) 7
   d) 12
   e) 9

4 TÖÖSTUSLIKUD TÖÖVÄLJAVÕRGUD. ÜLDISED OMADUSED

4.1 Tööstuslike tööväljavõrkude omadused

Tööstuslikud tööväljavõrgud paiknevad tööstuslike juhtimissüsteemide hierarhia mädalaimail tasemel (Joonis 4.1). Nende põhiülesanne on pidada sidet tööväljaterminalide ja kõrgemal hierarhilisel tasemel olevate seadmete vahel. Tööväljavõrke iseloomustab lihtne struktuur, paindlikkus ja laiendatavus. Need pakuvad suure töökindlusega ühendust hajusa võrgusidega automaatse juhtimissüsteemi (ACSNC) sõlmede vahel ja lihtsustavad oluliselt ACSNC diagnostikat ja seadistamist.



Joonis 4.1 Tööväljavõrkude koht tööstussüsteemide hierarhias

Tööväljavõrkude ülesehitus võimaldab integreerida erinevate tootjate seadmeid. Tööväljavõrkude paljuräägitud avatusest hoolimata näitab praktika, et erinevate tootjate seadmed ei ühildu täielikult. Seadmete ühilduvuse määravad nende omadused, mille hulka kuuluvad:

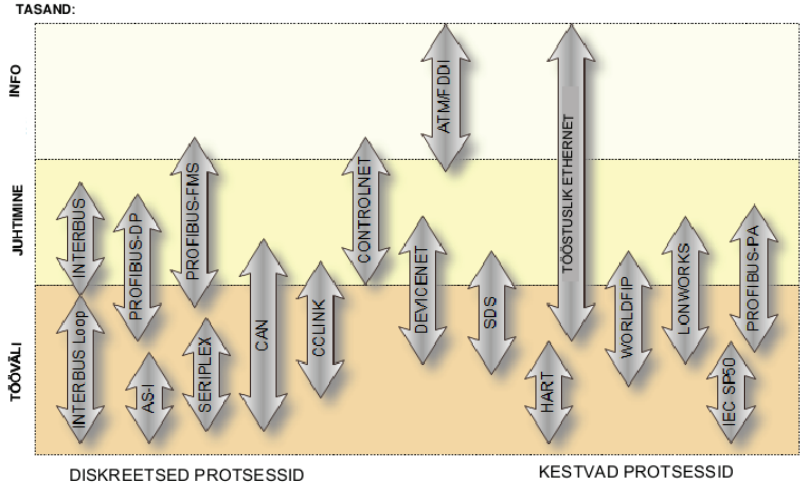
- seadmete füüsilise võrkuühendamise komponendid
- erinevate seadmete võrkuühendamise protseduurid, ilma toidet ja muude sõlmede vahelist sidet katkestamata
- erinevad funktsioonid seadmete diagnostikaks
- seadmete automaatseadistus
- seadmete standardprofiilide kasutamine
- funktsioonid seadmete enesediagnostikaks
- funktsioonid kriitilise seisundi ennustamiseks.

Olenevalt seadmete tüübist ja otstarbest jagunevad tööväljataseme võrgud kolme kategooriasse:

- andurivõrgud
- keerukate seadmete võrgud
- protsessivõrgud.

Anduri tööväljavõrke rakendatakse diskreetses tootmises. Need ühendavad erinevat liiki andureid, lüliteid, nuppe, täitureid, mootorikäiviteid ja muid lihtsustatud funktsioonidega seadmeid. Neid iseloomustab lühikeste sõnumite edastamine, nt sõnumid seadmete sisse- ja väljalülitamiseks või sisse- või väljalülitatud seisundi tuvastamiseks. Need võrgud katavad tavaliselt lühikesi kuni keskmisi vahemaid ja kasutavad 2 või 4 juhti. Tavalised spetsifikatsioonid andurivõrkude jaoks on ASI, BiSS-I, CAN, IEEE 1451, Interbus, Seriplex, FIP, Profibus-DP.

Keerukate seadmete võrgud on välja töötatud kõrgetasemeliste seadmete nõuete täitmiseks, sageli kiirete ja diskreetsete operatsioonide korral, mis vajavad lühisõnumitest koosnevat kiiret sidet. Sageli kasutavad seda tüüpi võrke mootorijuhtimisüksused. Spetsifikatsioonist olenevalt võib sõnumi suurus olla mõnest baidist kuni rohkem kui 200 baidini. Seepärast saab neid kasutada mitte ainult diskreetsete signaalide „sees“ ja „väljas“ jaoks, vaid ka perioodiliseks seadistuseks ja analoogandmesideks. Need võrgud pakuvad suuri kiirusi lühikestel vahemaadel ja väiksemaid kiirusi pikemate vahemaade korral. Seda tüüpi võrkude rajamiseks sobivad spetsifikatsioonid DevicesNet, Profibus-DP, Profibus-FMS, SDS ja Interbus-S. Protsessivõrgud sobivad kõige paremini protsessi automatiseerimise juhtimiseks ja diagnoosimiseks, sest need pakuvad suure töökindlusega kahesuunalist sidet nutiseadmete ja süsteemide vahel ajakriitilistes rakendustes. Need on optimeeritud mitut reaalmuutujat sisaldavate sõnumite edastamiseks. Need võrgud on digitaalseks alternatiiviks 4–20 mA analoogsidele. Spetsiifiliste nõuete tõttu on neil



Joonis 4.2 Tööstuslike tööväljavõrkude spetsifikatsioonid olenevalt nende rakendusest erinevates tehnoloogiaprotsessides

väiksem andmeedastuskiirus kui kahel eelmainitud rühmal. Tavalised spetsifikatsioonid protsessivõrkude jaoks on Foundation Fieldbus ja Profibus-PA.
Joonis 4.2 on esitatud valik tööstuslike tööväljavõrkude spetsifikatsioone olenevalt nende rakendusest erinevate tootmistehnoloogiaprotsesside juhtimissüsteemides.

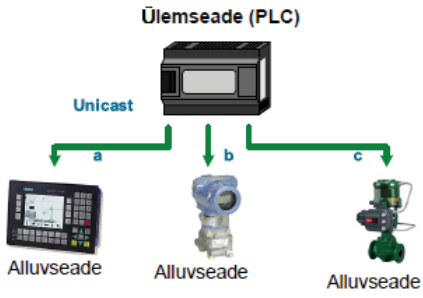
4.2 Tööväljavõrkude funktsioonid

Tööväljavõrgud täidavad võrgusidega automaatsetes juhtimissüsteemides järgmisi funktsioone:

- andmete edastamine terminalide vahel
- seadmete konfiguratsiooniga seotud lisainfo edastamine.

Tööväljavõrkude üks omadusi on võimalus ehitada jaotatud süsteeme, sest puudub vajadus võrgustruktuuri keskse juhtimise järgi.

4.3 Tööväljavõrkudes kasutatavad andmeedastusmeetodid



Tööväljavõrkude andmeedastusmeetodid võimaldavad edastada infot ühele või mitmele sõlmele võrgus.

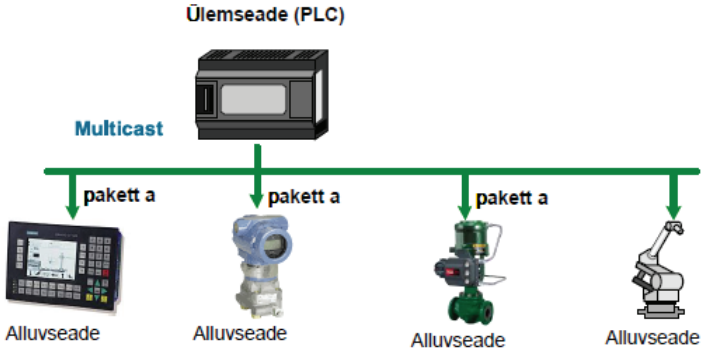
Üksikedastus (üks ühele)

Selle meetodi korral edastatakse andmepakett saatjalt ühele vastuvõtjale (Joonis 4.3). Saatja adresseerib andmepaketi vastuvõtja aadressi abil ja seejärel saadetakse pakett üle võrgu sihtpunkti.

Joonis 4.3 Üksikedastus (üks ühele)

Multiedastus (üks mitmele)

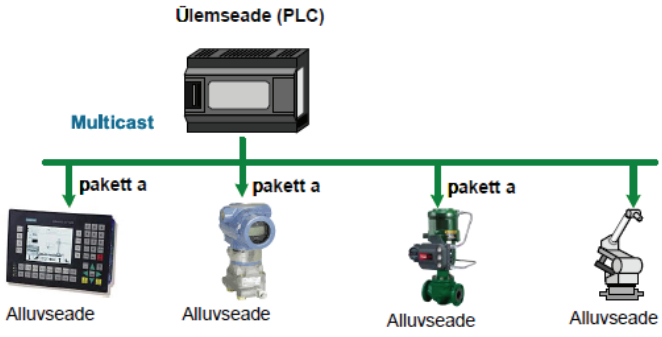
Multiedastusmeetodi korral edastab saatja andmepaketi mitmele vastuvõtjale võrgus. Saatja adresseerib paketi vastuvõtjate multiaadressi abil ja seejärel saadetakse see üle võrgu igale multiaadressis olevale saajale (Joonis 4.4).



Joonis 4.4 Multiedastus (üks mitmele)

Leviedastus (üks kõigile)

Leviedastusmeetodi korral edastatakse andmepakett kõigile võrgus olevatele seadmetele. Saatja adresseerib paketi leviaadressi abil ja seejärel saadetakse see üle võrgu kõigile seadmetele (Joonis 4.5).



Joonis 4.5 Leviedastus (üks kõigile)

4.4 Tööväljavõrkudes kasutatavate seadmete klassid

Tööväljavõrkudes jaotatakse seadmed järgmistesse klassidesse.

- *Ülemseadmed*

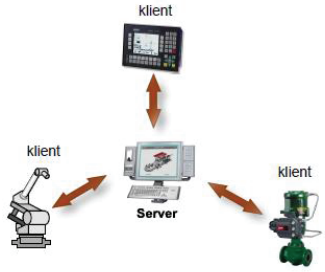
Ülemseadmed määravad andmevahetusmeetodid võrgus ja täidavad juhtimis- või info-juhtimisfunktsioone. Need on aktiivseadmed, mis saadavad võrgus sõnumeid ilma eelnevate päringuteta, kui neil on võrgule juurdepääsuõigus. Neid saab kasutada ka diagnostikaks ja seadmete konfigureerimiseks.

- *Alluvseadmed*

Alluvseadmed on lõppseadmed (terminalid): andurid, täiturid, regulaatorid, sisend-väljundmoodulid, mõõteseadmed. Need on passiivseadmed, millel on piiratud juurdepääs võrku. Need kinnitavad juhtseadmelt vastu võetud või juhtseadmele edastatud sõnumeid.

4.5 Tööväljavõrkude sidemehhanismid

Sidemehhanismid määravad seadmete vahelised loogilised ühendused, sideprotokolli ja ühendused seadmetes olevate objektide vahel. Tööväljavõrkudes kasutatakse kõige sagedamini järgmisi sidemehhanisme .



- *Klient/server*

Klient/server on tänapäevaste sidevõrkude peamine sidemudel. Tööstuslikes võrkudes pakub klient (alluvseade) oma ressursse ja vastab serveri (ülemseadme) päringutele. Võrgule juurdepääsu korraldamise funktsioonidega tegeleb server. Server kasutab klientide ressursse. Ülemseadme funktsiooni saab täita programmeeritav kontroller või personaalarvuti (joonis 4.6). Alluvseadmed on algandmete allikad või muud seadmed, nagu täiturid, kaugsisend-/väljundmoodulid jne.

Joonis 4.6 Klient-server-tüüpi mehhanism

Selle mehhanismi oluline eelis on võrguandmete lihtsustatud käsitlemine. Andmete ja kogu võrgu turvasüsteem on samuti lihtsustatud. Selle oluline puudus on, et kogu võrgu töövõime võib ülemseadme kahjustuse korral ohtu sattuda.

- *Tootja-tarbija*

Tootja-tarbija-tüüpi mehhanismi korral edastatakse andmed perioodiliselt üle võrgu leviedastusmeetodi abil. Edastav seade kirjutab andmepaketi päisesse ühenduse tunnuse (ID). Pärast andmepaketi võrku saatmist tuvastab ühenduse ID-d lugev iga seade, kas see info on talle mõeldud ja kas ta vajab seda. Seda mehhanismi kasutatakse laialdaselt spetsifikatsioonides DeviceNet, ControlNet ja Fieldbus Foundation. Tootja-tarbija meetod võimaldab täielikku võrgumeediumi kasutamist ja võrguliikluse vähendamist.

- *Allikas-sihtpunkt*

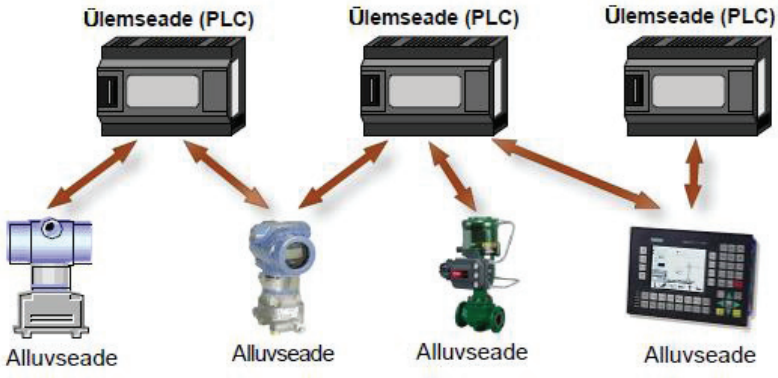
See mehhanism on tootja-tarbija mehhanismi alternatiiv. Selle korral saavad seadmed ainult neile adresseeritud pakette. Kui mitu seadet vajavad sama infot, siis tuleb seda edastada mitu korda. Sellised protseduurid on ebatõhusad ja võivad põhjustada reaalajas sünkroonimise ja käitamise korral mitmeid probleeme, sest identset infot vajavad seadmed saavad selle kätte erinevatel ajahetkedel. Allikas-sihtpunkti mehhanismi kasutatakse sellistes spetsifikatsioonides, nagu Profibus-DP, Modbus Plus ja Interbus S. Selle mehhanismi korral on side aeglasem kui tootja-tarbija-tüüpi mehhanismi korral, sest võrgus liikuvad andmepaketid sisaldavad sõnumi adresseerimiseks vajalikku lisainfot.

Joonis 4.7 Võrdvõrgu mehhanism

- *Võrdvõrk*

Selle mehhanismi tüüpiline omadus on see, et kõik võrku ühendatud seadmed on võrdväärsed ja võivad samal ajal toimida nii alluvana kui ka ülemana (Joonis 4.7). Võrdvõrku kasutatakse identifitseeriva info vahetamiseks alluv- ja ülemseadmete vahel ja seda kasutatakse tööstuslikes võrkudes nagu Profibus-FMS, LonWorks ja WorldFIP.

- *Mitme ülemseadmega süsteem*



Joonis 4.8 Mitme ülemseadmega mehhanism

Mitme ülemseadmega sidemehhanismi kasutatakse siis, kui mitu ülemseadet vajavad juurdepääsu ühe ja sama alluvseadme andmetele (Joonis 4.8). Mistahes ajahetkel saab alluvseadmeid juhtida ja konfigureerida ainult üks ülemseade. Mitme ülemseadmetega mehhanismi rakendatakse sellistes tööstuslikes võrkudes, nagu Profibus-DP, DeviceNet jne.

- *Pollimine*

  Pollimise korral saadab ülemseade andmevahetuse eesmärgil päringu igale alluvseadmele. Alluvseade annab päringule tingimusteta vastuse.

- *Grupipäring*

  Selle mehhanismi korral saadab ülemseade andmevahetuse eesmärgil päringu kõigile alluvseadmetele. Sellele päringule saadavad vastuse ainult seadmed, mis on levisõnumis määratud.

- *Otsesõnumid*

  Otsesõnumeid saavad genereerida kõik võrgus olevad seadmed. Sõnumi vastuvõtja peab saatma eduka vastuvõtmise kohta kinnituse. Otsesõnumite mehhanismi rakendatakse võrguseadmete esmase tuvastamise, konfigureerimise ja diagnostika korral.

- *Killustatud sõnumid*

  Killustatud sõnumite mehhanismi kasutatakse juhul, kui on vaja edastada sõnumit, mis ületab korraga edastatavat andmemahtu. Selle mehhanismi korral on andmed jaotatud osadeks, mis hiljem vastuvõtja poolel algseks sõnumiks kokku pannakse.

- *Tsüklilised sõnumid*

  Tsüklilisi sõnumeid kasutatakse olenevalt tööprotsessist andmete perioodiliseks edastamiseks alluvseadmetelt ülemseadmetele. See vähendab võrguliiklust ja ülemseadmete tööd.

- *Seisundimuutus (Change of state, COS)*

  Selle mehhanismi korral on alluvseadmed konfigureeritud saatma andmeid ülemseadmetele ainult siis, kui nende seisund muutub. See vähendab tuntavalt võrguliiklust.

- *Ülalkirjeldatud mehhanismide erinevad kombinatsioonid.*

4.6 Tänapäevased tööväljavõrkude spetsifikatsioonid

Allpool kirjeldatud tööväljavõrgud on vaid murdosa tööväljavõrkude suurest valikust, mis võimaldavad üles seada tänapäevase võrgusidega automaatse juhtimissüsteemi.

- *AS-liides*
  - Seda kasutatakse andurite ja täiturite ühendamiseks andurivõrkudega. AS-liidese töötas välja Siemens Automation.
  - Kasutab siini-, ringi-, puu- ja tähttopoloogiaid võrgu pikkusega kuni 100 m. Võimaldab ühendada kuni 31 alluvseadet.
  - Kasutab kahesoonelist kaablit 24 V toiteks ja digitaalsignaalide edastamiseks.
  - AS-liides on dokumentidel IEC 62026-2 ja EN 50295 põhinev avatud standard.
- *CAN-liides*
  - Tagab andmeedastuse suure töökindluse.
  - Toetab erinevaid rakendusi ja laia valikut mitmesuguste omadustega seadmeid erinevatelt tootjatelt.
  - Andmeedastuskiirus on 10 kbit/s kuni 1 Mbit/s. Maksimaalne edastatavate sõnumite pikkus on 94 bitti.
  - Teoorias võimaldab kaasata piiramatu arvu seadmeid.
- *DeviceNet*
  - Majanduslikult tõhus võrgulahendus, kus kontrollerid ja terminalid on otse-ühenduses.
  - Andmeedastuskiirus on 125–500 kbit/s. Võimaldab võrku ühendada kuni 64 alluvseadet.
  - Võimaldab ühendada seadmed otse ühise võrgukaabli külge, mis pakub nii toidet kui ka sideühendust.
  - DeviceNeti võrkude ehitamine isehäälestuvate tööväljaseadmetega lihtsustab oluliselt süsteemi seadistusprotsessi.
  - CAN-il põhinev võrk. Määratleb CAN-võrkude rakenduskihi.
- *Profibus*
  - Tööväljavõrgu avatud standard, mida rakendatakse laialdaselt tootmise automatiseerimises andmevahetuseks programmeeritavate kontrollerite, sisend-väljundseadmete ja terminalide vahel.
  - Kasutab siini-, täht- ja ringtopoloogiaid pikkusega kuni 100 m.

- Andmeedastuskiirus on 9,6–12 Mbit/s. Võimaldab võrku ühendada kuni 127 seadet.

- *Modicon Modbus Plus*
  - Deterministlik tööväljavõrk, mis võimaldab klient-server-tüüpi sidemehhanismi ja suurt andmevahetuskiirust programmeeritavate kontrollerite ja terminalide vahel.
  - Kasutab kuni 1800 m pikkust lineaarset topoloogiat.
  - Võimaldab kuni 1 Mbit/s sünkroonset HDLC-protokolli andmevahetust RS-485 füüsilises kihis. Võimaldab võrku ühendada kuni 64 seadet.
- *HART*
  - Hõlmab kõiki tööstusalasid, sealhulgas energia, naftakeemia jne.
  - Võimaldab edastada samal ajal digitaal- ja analoogsignaale suurendatud turvalisusega võrkudes plahvatusohtlikus ja kõrge riskitasemega keskkonnas.
  - Sidemeetod on ülem/alluv, igas HART-i silmuses on kuni kaks ülemseadet.
  - HART-i protokolli sidekiirus on 1200 bit/s, kuid see võimaldab seadmetel toimida valangedastusrežiimil, mis võimaldab kiiremat sideühendust.
- *LonWorks*
  - Võrdvõrgu standard, mida kasutatakse suure hulga terminalidega süsteemides.
  - Kasutab kuni 2000 m pikkusi siini-, ring- ja tähttopoloogiaid kiirusega 78 kbit/s.
  - Võimaldab ühendada kuni 32 000 seadet.
- *Foundation Fieldbus*
  - Välja töötatud spetsiaalselt suure tundlikkusega rakenduste jaoks, mis vajavad turvalisuse ja jõudluse kõrget taset.
  - Sobib kasutamiseks ohtlikus tööstuskeskkonnas, sest selle põhiomaduseks on juhtimise ja side täpne sünkroonimine.
  - Kasutab siini- ja tähttopoloogiaid koos toite edastusega. Edastusmeediumiks võib olla valguskaabel või keerdpaarkaabel.
  - Võimaldab ühte segmenti ühendada kuni 240 seadet, võrgus lubatud segmentide maksimaalne arv on 65 000.
  - Kasutab ühe või mitme ülemseadmega mehhanismi. Andmeedastuskiirus on 30 kbit/s (1900 m) kuni 2,5 Mbit/s (500 m).
- *EtherNet/IP*
  - Võimaldab reaalajas sidet tööstuslikes rakendustes. Ethernet/IP on tööstuslik laiend Ethernet TCP/IP-le.
  - Toetab üldist tööstusprotokolli (*Common Industrial Protocol*, CIP) rakenduskihis koos standarditega ControlNet ja DeviceNet, mis võimaldavad reaalajas sisend-väljundsidet ja otsesõnumeid.
  - On suure jõudlusega ja kasutab füüsilises kihis laialt levinud Etherneti adaptereid.
  - Ethernet/IP kasutab protokolli TCP/IP. Tõhusa tööväljaside saavutamiseks pakub Ethernet/IP universaalset tööväljataset TCP/IP kapselduse abil.
  - Ethernet/IP kasutab UDP/IP protokolli reaalajas sõnumite saatmiseks, mis võimaldab sõnumeid töödelda ja saata nii kasutajarühmadele võrgus (multi-edastus) kui ka kaudseid sõnumeid.

4.7 Teadmiste kontroll

1. Mis on tööväljavõrkude peamised funktsioonid võrgusidega automaatsetes juhtimissüsteemides?
    a) liiklustihendus
    b) andmeedastus infotasandi võrkudele
    c) konfigureerimisega seotud andmeedastus
    d) liikluse jaotus seadmete vahel
    e) terminalide andmeedastus
2. Millised on andmeedastusmeetodid tööväljavõrkudes?
    a) väljaedastus
    b) ainuedastus
    c) topeltedastus
    d) multiedastus
    e) leviedastus
3. Millised on tööväljaseadmetena kasutatavad seadmed?
    a) tööjaamad
    b) tööstusarvutid
    c) andurid
    d) ruuterid
    e) mõõteseadmed
4. Valige tööväljavõrkudes kasutatavad sidemehhanismid.
    a) võrdvõrk
    b) ühe ülemseadmega süsteem
    c) mitme ülemseadmega süsteem
    d) multi-klient
    e) tootja-tarbija
5. Millised järgmistes võrguspetsifikatsioonidest on tööväljavõrgud?
    a) CAN
    b) HART
    c) ControlNet
    d) Ethernet
    e) DeviceNet

5 TÖÖVÄLJAVÕRGU PROFIBUS SPETSIFIKATSIOON

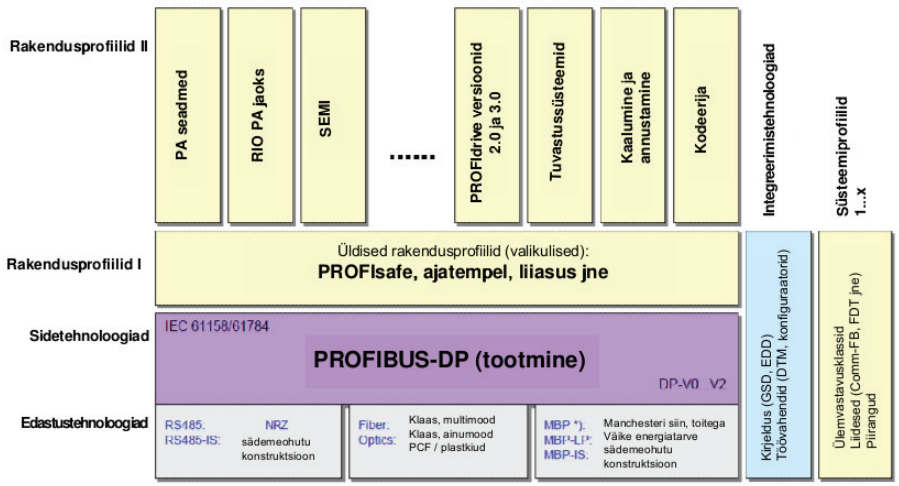
5.1 Sissejuhatus

PROFIBUS on tööväljaprotokoll, mille töötasid välja Siemens, Bosch ja Klockner-Moeller, et vastata nii diskreetse tootmise kui ka Euroopa standardite EN50170 ja EN50254 nõuetele. Profibus võimaldab andmesidet erinevate tootjate seadmete vahel ilma spetsiaalse liidese kohandamiseta. Profibusi saab kasutada kiiretes rakendustes ja komposiitandmevahetuses.

5.2 Protokolli kirjeldus

See on sobiv ka erinevate automatiseerimisülesannete lahendamiseks nii tööväljal seadmete tasandil kui ka kõrgemate hierarhiatasandite süsteemides. Profibus eristub jadatööväljasüsteemide tehniliste spetsifikatsioonide poolest, mis võimaldavad ühendada hajusintelligentsusega digitaalseid programmeeritavaid kontrollereid ühisesse võrku. Võrgu topoloogia poolest on Profibus mitme ülemseadmega süsteem, mis võimaldab mitme automatiseeritud süsteemi ja nende hajutatud perifeeriate tegutsemist samal magistraalliinil.

See sidetehnoloogia hõlmab kolme põhitüüpi protokolle: **DP, FMS** ja **PA** (Joonis 5.1).



Joonis 5.1 PROFIBUS-i protokollid

PROFIBUS-FMS (*Fieldbus Message Specification*, tööväljasiini sõnumi spetsifikatsioon) on olnud kasutusel alates 1990. aastast. See töötati välja kõrgema hierarhiatasandi side jaoks ega sobi seega sidevahendiks tööväljatasandi seadmete korral.

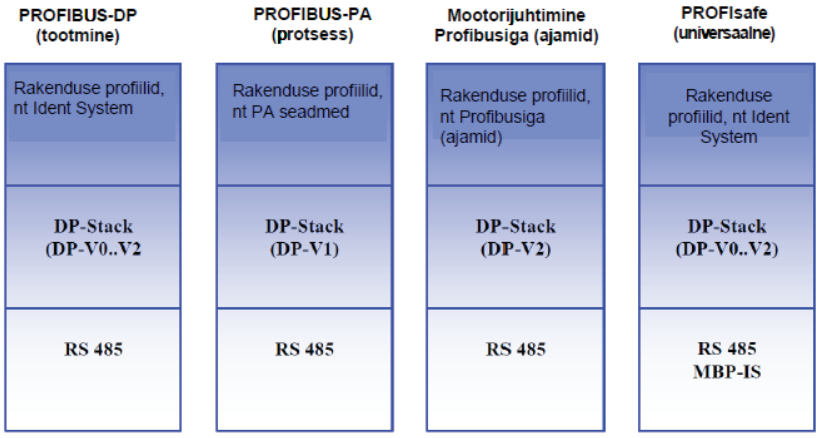
PROFIBUS-DP (detsentraliseeritud perifeeria) (1992) on välja töötatud andmevahetuseks programmeeritavate kontrollerite ja heterogeensete objektidega ühendatud seadmete vahel. See võimaldab andmevahetust kiirusega 12 Mbit/s. Sidemeetod on ülem/alluv või

võrdvõrk. Füüsiliselt on edastusmeediumiks keerdpaarkaabel. Profibus DP võrku saab ühendada üle saja sõlme (seadme). Selle tüüpilisteks rakendusaladeks on protsessihaldus ja tööstuslik automatiseerimine (Joonis 5.2).

PROFIBUS-PA (*Process Automation*) (1997) on välja töötatud andmevahetuseks töö-väljatasandi süsteemide vahel konventsionaalses või plahvatusohtlikus kohas (suurema turvalisusega alal). See protokoll vastab rahvusvahelise standardi IEC 61158-2 nõuetele.

See on ette nähtud ühendama kontrollerite, andurite ja täiturite haldamise süsteeme.

Profibus PA on omadustelt sarnane FOUNDATION Fieldbusiga, kuid Profibus PA korral on andmeedastuskiirus umbes 30 kbit/s, magistraalliin on kas ülem/alluv või võrdvõrk ja maksimaalne sõlmede arv on üle 250 ühes võrgus.



Joonis 5.2 PROFIBUS-i tüüpilised rakenduspõhised omadused

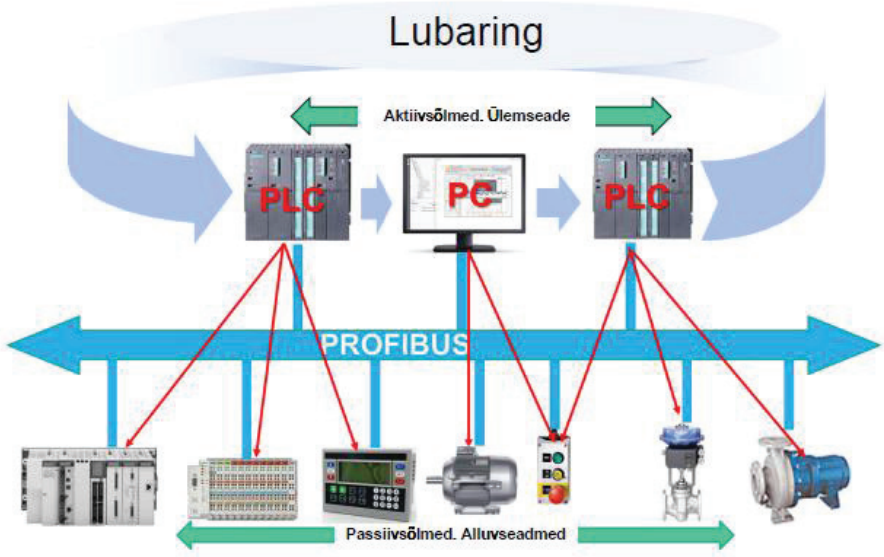
5.3 PROFIBUS DP tööpõhimõte

DP tähistab detsentraliseeritud perifeeriat (*decentralized periphery*), mis tähendab, et hajusad sisend-väljundseadmed on ühendatud keskse kontrolleriga kiire jadaühenduse kaudu. See võrk tugineb universaalsetele rahvusvahelistele standarditele ja vastab avatud süsteemide ühendamise (*Open System Interconnection, OSI*) mudelile, milles igal sidekihil on oma täpselt määratletud ülesanne (Joonis 5.3).

Saatja	Vastuvõtja	Kihtide nimetus ja funktsioon	
7	7	Rakenduskiht	Liidesest rakendusprogrammile rakenduspõhiste käskudega (lugemine, kirjutamine)
6	6	Esituskiht	Andmete esitus (kodeering) analüüsiks ja tõlgenduseks järgmises kihis
5	5	Seansikiht	Ajutiste ühenduste loomine ja lahtiühendamine: sideprotsesside sünkroonimine
4	4	Transpordikiht	Andmeedastuse juhtimine 5. kihis (transpordivead, pakettideks lahutamine)
3	3	Võrgukiht	Ühenduste loomine ja lahtiühendamine, võrgu ülekoormuse vältimine
2	2	Lülikiht	Siinipöörduse protokolli kirjeldus (Medium Access Control, MAC), sealhulgas andmeturve
1	1	Füüsiline kiht	Andmeülekande meediumi (riistvara), kodeeringu ja andmeedastuskiiruse määratlus
Edastusmeedium			

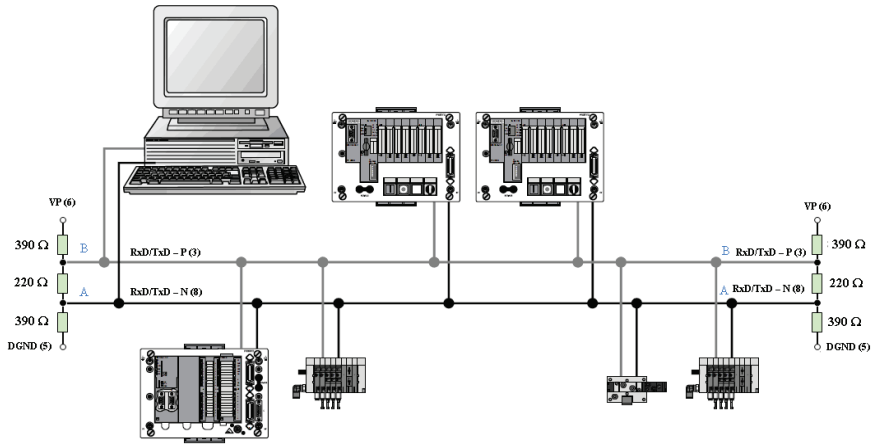
Joonis 5.3 OSI mudeli kihid ProfiBusis

Selle mudeli esimene kiht määratleb andmeside füüsilised näitajad. Teine kiht on lülikiht, mis määratleb juurdepääsu edastusmeediumile. Seitsmes kiht on rakenduskiht ja määratleb kasutaja funktsioonid. Profibusi võrk kasutab ainult OSI mudeli 1. ja 2. kihti ning kasutajaliidest. 3.7 ei kasutata. Profibusi süsteem kasutab Profibusi ülemseadet, mis teeb mööda RS 485 magistraalliini (Joonis 5.5) hajutatud alluvseadmete pollimist (Joonis 5.4).



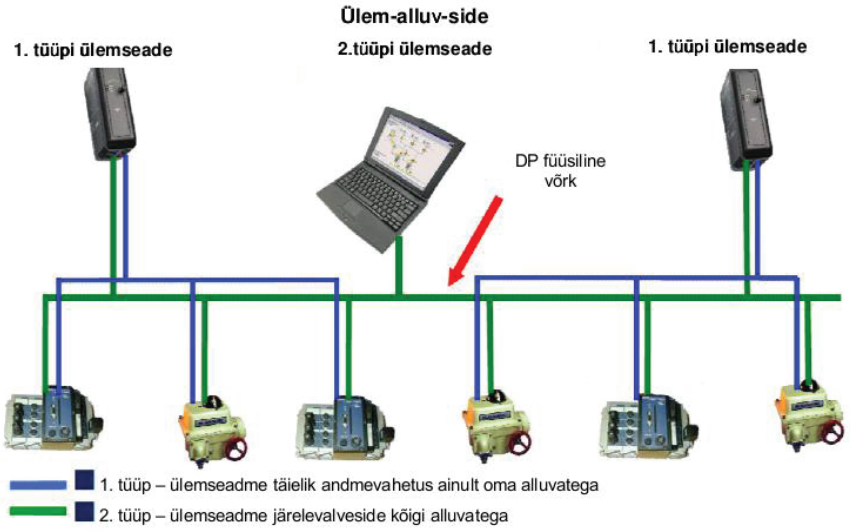
Joonis 5.4 Seadmete pollimisahel

Alluvseadmed (andurid, täiturid, ajamid või mõõteseadmed) on passiivsed võrguseadmed, millel on piiratud juurdepääs võrku. Need saavad ainult kinnitada vastuvõetud sõnumeid või vastata ülemseadme päringutele. Meeles tuleb pidada, et kõik alluvseadmed on võrdse tähtsusega ja side algatab alati ülemseade.



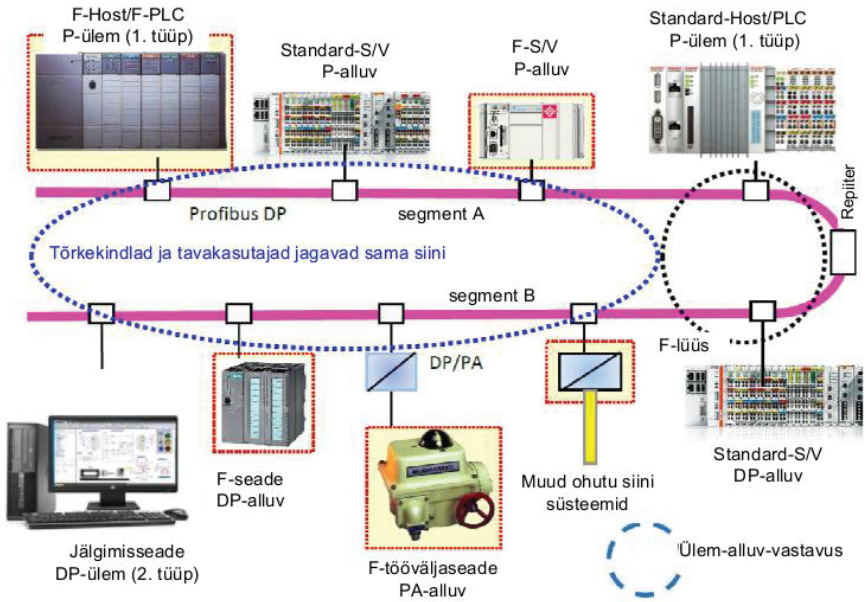
Joonis 5.5 PROFIBUS-i füüsiline kiht (RS 485)

Ülemseade (ülem-Profibus) on võrgus aktiivne jaam. Profibusi spetsifikatsioon eristab kahte tüüpi ülemseadmeid. 1. tüüpi ülemseade säilitab tavapärast sidet ja andmevahetust sellega seotud alluvseadmetega (Joonis 5.6). 2. tüüpi ülemseade on spetsiaalne seade, mida kasutatakse peamiselt tarbijarakenduste üleslaadimiseks alluvseadmetesse diagnostika eesmärgil. Mõned ülemseadmed suudavad täita mõlemat tüüpi ülemseadme ülesandeid. Tavaliselt ei ole Profibusi tööväljavõrgus ülemseadmete vahel side lubatud, välja arvatud siis, kui ülemsüsteem annab teisele ülemseadmele juurdepääsuloa selle alluvuses olevatele alamseadmetele.

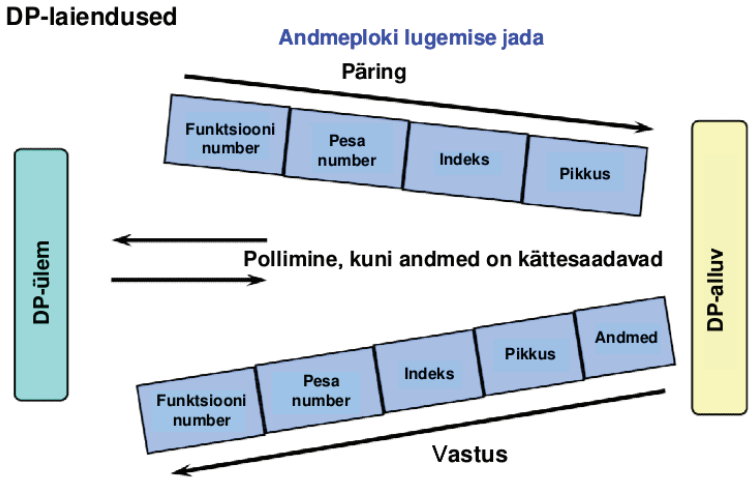


Joonis 5.6 Alluvseadmete juhtimine Profibusi võrgus

Lubaringvõrgu (*token ring*) seadistus on võimalik ainult füüsiliselt ühendatud seadmete vahel (võrgukaadri siseselt). Ülemseadmete omavaheline side kahe võrgu vahel, milles on üks ülemseade (Joonis 5.7), on võimalik DP_DP-lüüsi kaudu.

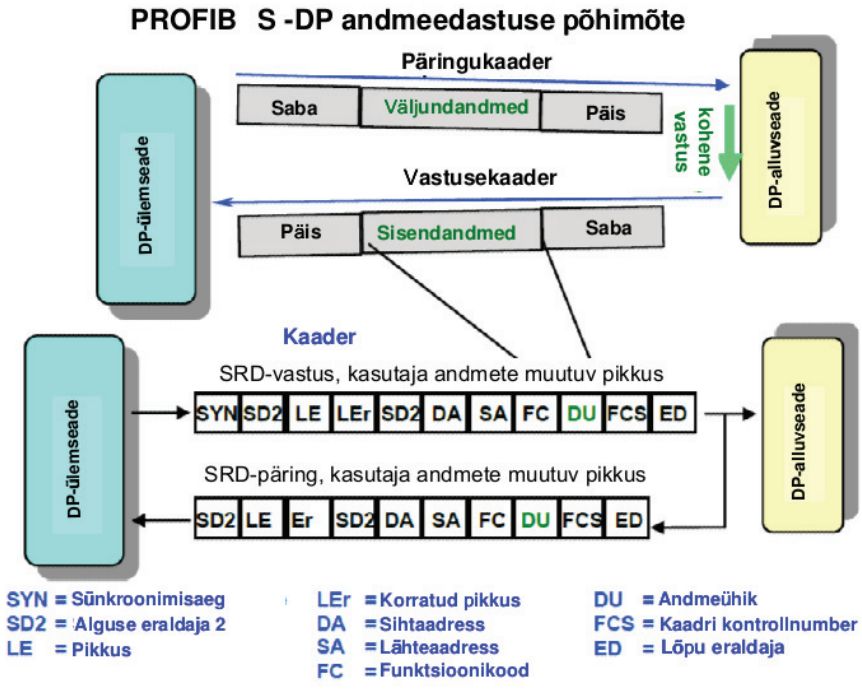


Joonis 5.7 Ülemseadmete omavaheline side kahe võrgu vahel, milles on üks ülemseade



Joonis 5.8 PROFIBUS-DP sideskeem

Ülemseade võib pöörduda üksiku alluvseadme poole, teha multiedastust, pöördudes alluvseadmete rühma poole või leviedastust, saates sõnumi kõigile alluvseadmetele. Alluvseade vastab kõigile otse temale suunatud sõnumitele, kuid ei vasta multi- ja leviedastussõnumitele. Grupisõnumeid (levi- ja multiedastus) kasutatakse Profibusi võrgus üldjuhtimissõnumitena aadressiga 127 ja alluvseadmete sihtgrupi grupinumbriga. Alluvseadmelt ülemseadmele edastatavate sisend-väljundandmete pikkus on eelmääratud alluvseadme andmebaasis või GSD-failis. Kõikide võrku ühendatud seadmete GSD-failid on salvestatud 2. tüüpi ülemseadmes parameetrikirjena, mis sisaldab andmeid konfiguratsiooni kohta, parameetrite aadressi jaotusnimekirja ja kõigi ühendatud jaamade võrguparameetreid.



Kaadri formaat

SD	LE	LE_r	S	DA	SA	FC	DSAP	SSAP	DU	FCS	ED
68	X	X	X	8	8	X	62/3	60/3	X	X	16

SD: alguse eraldaja
LE: võrguandmete pikkus + DA, SA, FC, DSAP, SSAP
LE: korduv pikkus
DA: sihtaadress
SA: lähteaadress
FC: funktsioonikood (FC = 13, signaalide diagnostika andmed)
DSAP: sihtpunkti teenusepääsupunkt
SSAP: lähtepunkti teenusepääsupunkt
FCS: kaadri kontrollnumber
ED: lõpu eraldaja

Joonis 5.9 Sideprotokoll PROFIBUS-DP

Tööväljavõrgu parameetrikirje laaditakse ülemseadmesse riistvara konfigureerimise etapis. Käivitumise ajal võtab ülemseade ühendust iga temaga seotud alluvseadmega ja aktiveerib tsüklilise andmehulga. Sel hetkel on igal alluvseadmel ainulaadne aadress vahemikus 0–125. Dünaamilise adresseerimisega seadmed (ehk aadress 126 varustuse sisselülitamise korral) ootavad 2. tüüpi ülemseadme käsku „Set Slave Address“ (määra alluva aadress) enne parameetrite omistamist. Sideprotokoll ja selle kaader on esitatud Joonis 5.8 ja Joonis 5.9.

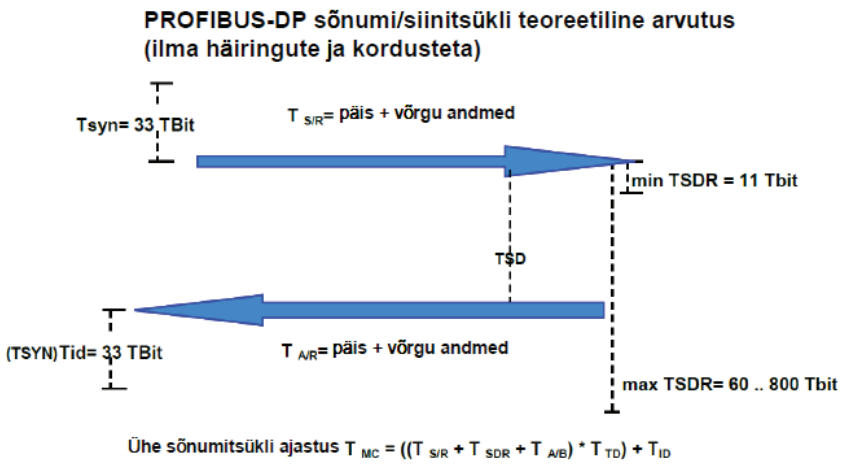
5.4 Siini ajastamine

Võrgus kasutatakse asjakohase ülemseadme tehtud pollimist. Reageerimisaeg (aeg, mis kulub alluvseadmel ülemseadmele vastamiseks) on konstantne (Joonis 5.10) isegi juhul, kui kasutatakse 2. tüüpi ülemseadet alluvseadme diagnoosimiseks ajal, kui see suhtleb 1. tüüpi ülemseadmega. Sidetsüklite vahele jäävat aega kasutatakse diagnostika jaoks.

Bitiaeg (T_{bit}) on ajahulk, mis on vajalik ühe biti info edastamiseks olenevalt edastuskiirusest.

Sünkroonimisaeg (T_{SYN}) on miinimumaeg, mille jooksul tööjaam peab jääma jõudeolekusse, enne kui muutub kättesaadavaks järgmisele päringule. Profibus DP korral on see $33T_{bit}$.

Alluvseadme reageerimisaeg (T_{SDR}) on aeg, mille jooksul peab alluvseade andma vastuse ülemseadme päringule. Miinimumväärtus ($minT_{SDR}$) määratakse alluvseadme häälestamise käigus parameetri valiku käsu abil. Maksimumväärtus ($maxT_{SDR}$) oleneb andmeedastuskiirusest ja on vastavast andmeedastuskiirustest olenevalt määratud seadme GSD-failis. Profibus DP korral on vastavate aegade väärtused järgmised: $\min T_{SRD} = 11T_{bit}$ ja maksimumväärtus on $256T_{bit}$.



Joonis 5.10 Aja arvutamise diagramm

5.5 Teadmiste kontroll

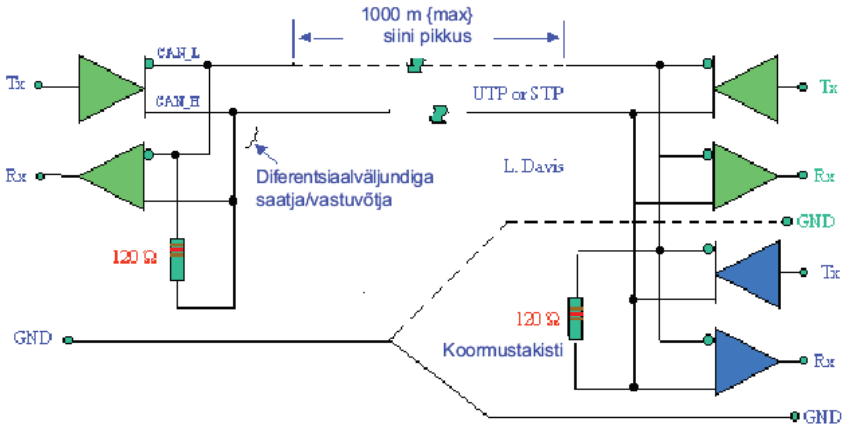
1. Millistest protokollidest koosneb Profibusi sidetehnoloogia?
    a) PROFIBUS-FMS
    b) PROFIBUS-DP
    c) PROFIBUS-EA
    d) PROFIBUS-PA
    e) PROFIBUS RS 485
2. Profibusi võrgud on:
    a) võrdvõrgud
    b) klient-server-tüüpi võrgud
    c) liittüüpi võrgud
    d) ülem-alluv-tüüpi võrgud
    e) kõik ülalnimetatud tüübid on kasutusel Profibusi eri variatsioonide korral
3. Dünaamilise adresseerimisega seadmetel on Profibusis järgmine aadress:
    a) 0
    b) 1
    c) 126
    d) 127
    e) 255
4. Levi- ja multiedastust kasutatakse Profibusi võrgus üldjuhtimissõnumitena aadressiga:
    a) 0
    b) 126
    c) 127
    d) 255
    e) alluvseadmete sihtgrupi grupinumber
5. Milline protokoll on välja töötatud pakkuma ühendusi kontrollerite, andurite ja täiturmehhanismide juhtsüsteemide vahel?
    a) PROFIBUS-FMS
    b) PROFIBUS-DP
    c) PROFIBUS-EA
    d) PROFIBUS-PA
    e) PROFIBUS RS 485

6 SIDEPROTOKOLLID CANBUS JA MODBUS

6.1 Sideprotokoll CANBUS

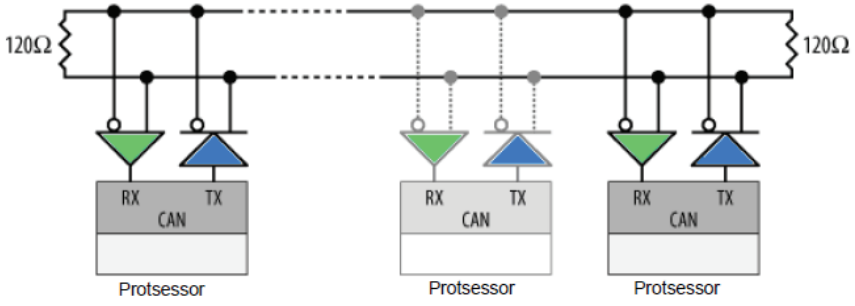
6.1.1 Protokolli kirjeldus

Kontrollervõrk (CAN-siin) on suurepäraste veaparandusvõimalustega jadaliides reaalajas andmeedastuseks kiirusega kuni 1 Mbit/s. Seda kasutatakse ka standardi ISO 11898 kohases kiires andmeedastuses ja standardi ISO 11519 kohastes aeglastes rakendustes. Seadmete vahel kasutatakse andmesideks OKI, MICROCHIP-i, MOTOROLA ja muude tootjate liideseadaptereid.
Füüsiline võrk on paralleeljuhtmetega liin (Joonis 6.1).



Joonis 6.1 Füüsiline keskkond andmete edastamiseks

CAN-siini kaudu saadetakse edastatavad andmed korraga kõigile võrguseadmetele (Joonis 6.2).



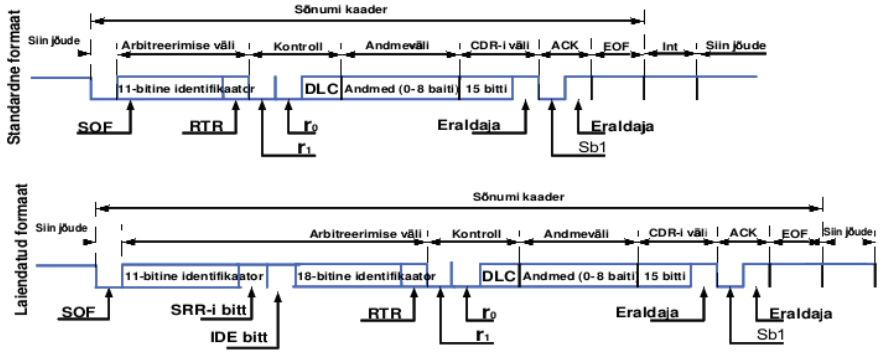
Joonis 6.2 Seadmevõrgu korraldus CAN-protokolli abil

6.1.2 Tööpõhimõte

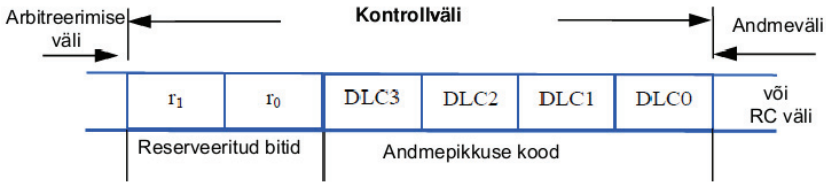
CAN-võrkude tööpõhimõte seisneb selles, et iga moodul on võimeline sõnumeid edastama, kui on olemas vaba siin. Et igal sõnumil on prioriteet, siis antakse mitme ülekandemooduli korral juurdepääs kõrgeima prioriteediga sõnumile. Analoogselt, kui mõnda moodulisse jõuab korraga mitu sõnumit, siis võetakse neid vastu nende prioriteetide alusel. Iga CAN-võrgus olev moodul võib nõuda sõnumite saatmist, edastades selleks päringuid. Igat õigesti vastu võetud sõnumit kinnitatakse jaatussõnumiga. Vastus saadetakse ka siis, kui konkreetset sõnumit ei ole vea tõttu saadud. CAN-võrk tunneb ära püsivigade esinemise ja sulgeb tõrkega mooduli automaatselt. Sõnumi sisu kodeeritakse spetsiaalse CAN-võrgule iseloomuliku identifikaatoriga, mis sisaldab infot edastatava sõnumi kohta **(t, P, F)**. Kõik vastuvõtjad võtavad info vastu ja igaüks neist kontrollib identifikaatorit, et määrata sõnumi sisu. Kui sõnum on vastuvõtja jaoks sobiv, võetakse see vastu ja töödeldakse, kui mitte, siis jäetakse see sõnum vahele. Identifikaator sisaldab infot sõnumi prioriteedi kohta, mis jaotatakse vähemalt kaheks tasemeks: kõrge ja madal. Infot edastatakse paralleel-keerdpaarjuhtme või telefoniliini kaudu, kui tekkivad häiringud ei ole tugevad.
CAN-võrk on paindlik ja võimaldab lisada uusi seadmeid juba olemasolevasse CAN-võrku, ilma et selles oleks vaja teha riistvara- või tarkvaramuudatusi. CAN kasutab andmete kodeerimiseks baasita meetodit (*non-return-to-zero*, NRZ). NRZ-kodeerimine tekitab lühikesed sõnumid minimaalse edastuste arvuga ega ole välistest häiringutest oluliselt mõjutatav. CAN-võrkudes antakse prioriteet neile parameetritele, mis muutuvad teistest kiiremini. Näiteks sõiduki mootori pöörlemissagedus muutub sagedamini kui selle temperatuur. Parameetrite prioriteedi määramiseks kasutatakse **liikluse ja põrke tuvastusega multipöördust** (*Carrier Sense, Multiple Access with Collision Detect* (CSMA/CD)). Sõnumi prioriteet salvestatakse identifikaatorisse süsteemi kavandamise esimeses etapis. Kõrgeim prioriteet antakse madalaima digiväärtusega identifikaatorile.

6.1.3 Andmepaketi kirjeldus

CAN-süsteemides edastatakse ja saadakse infot andmepaketi vormis (sõnumi kaader, *message frame*). CAN-ist on kaks versiooni: 2.0A ja 2.0B. Versiooni 2.0A iseloomustab 11-bitine identifikaator ja autentne Boshi protokoll ning versioonil 2.0B on 21-bitine identifikaator, mis on välja töötatud USA-s Ameerika autotööstuse jaoks. Versioonile 2.0A vastavad CAN-võrgud võtavad vastu ja edastavad infot seadmete vahel, mis on ehitatud ainult selle standardi kohaselt. Versioon 2.0B võtab vastu ja saadab infot segavõrkudes, mis sisaldavad mõlema versiooni kontrollereid. Versiooni 2.0A kaadri formaati on kujutatud Joonis 6.3. Infokaadri kontrollväli on esitatud Joonis 6.4. Tsükkelkoodkontrolli formaat on toodud Joonis 6.5.

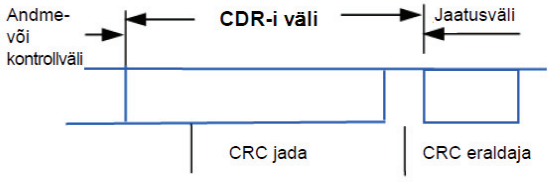


Joonis 6.3 Versiooni 2.0A kaadri formaat, d – dominantne, r – retsessiivne

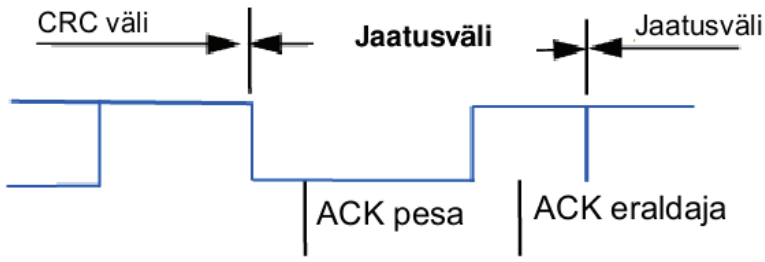


Joonis 6.4 Infokaadri kontrollväli

Andmebaitide arv	*Andmepikkuse kood*			
	DLC3	**DLC2**	**DLC1**	**DLC0**
0	D	d	d	d
1	D	d	d	r
2	D	d	r	d
3	D	d	r	r
4	D	r	d	d
5	D	r	d	r
6	D	r	r	d
7	D	r	r	r
8	R	d	d	d

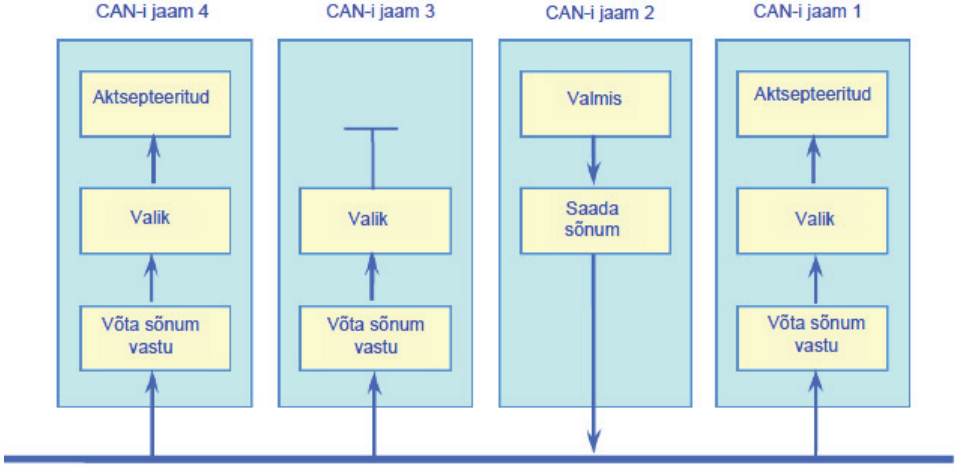


Joonis 6.5 Tsükkelkoodkontrolli formaat



Joonis 6.6 Jaatusimpulsi (ACK) formaat

Kõigepealt edastatakse mööda liini impulss kõrgelt potentsiaalilt madalale, mida kutsutakse alguskaadriks (*Start Of Frame, SOF*). Sellele järgneb 11-bitine identifikaator (*arbitration*), millesse on kodeeritud edastuse sisu. Pärast seda järgneb 1-bitine info kaugedastuspäringuga (*Remote Transmission Request, RTR*), millega küsitakse saatjalt luba saata info vastuvõtjale. Bitid r0 ja r1 on protokollis tühjad. Andmepikkuse koodi (*Data Length Code, DLC*) välja suurus on 4 bitti ja sisaldab infot edastatava andmemahu kohta, mis edastatakse andmeintervalli ajal. Selle intervalli pikkus on 0–8 impulssi, mis on väljendatud andmepikkuse koodiga. Järgmised 15 bitti moodustavad tsükkelkoodkontrolli (*Cycle Redundancy Code, CRC*), mida kasutatakse vastuvõetud info õigsuse kontrollimiseks. Sellele järgneb DEL-ajavahemik. Et tuvastada infot edastavat seadet, kasutatakse kahte jaatusimpulssi (ACK). Andmepakett lõpeb kaadrilõpumärgiga (*End Of Frame, EOF*), mille pikkus on 7 impulssi. Paketi lõppu tähistatakse 3 vaheaja (*INTERMISSION*) bitiga, seejärel vabastatakse liin.



Joonis 6.7 Leviedastus

6.1.4 Retsessiivne ja dominantne bitt

Edastusmeediumist isoleerimise huvides väldib CAN binaarsete väärtustega 0 ja 1 sõnumi kirjeldamist. Selle asemel võetakse vastu retsessiivseid ja dominantseid signaale. Näiteks optilise ühenduse korral võib retsessiivne signaal olla pimedus ja dominantne valgus. Elektrisignaalide korral võib retsessiivne tähendada kõrgel tasemel elektrisignaali ja dominantne selle puudumist.

6.1.5 Kaadrite tüübid

CAN-protokollis eristatakse nelja kaadrit:

- andmekaader – edastab andmeid
- päringukaader – esitab andmekaadrite edastamise päringuid konkreetse identifikaatori kohta
- ülekoormusekaader – tagab andmekaadrite või päringute vahelised vahed
- veakaader – edastatakse sõlmest, kus viga tuvastati.
  Andmekaadrid ja päringud eraldatakse eelnevatest kaadritest vahedega.

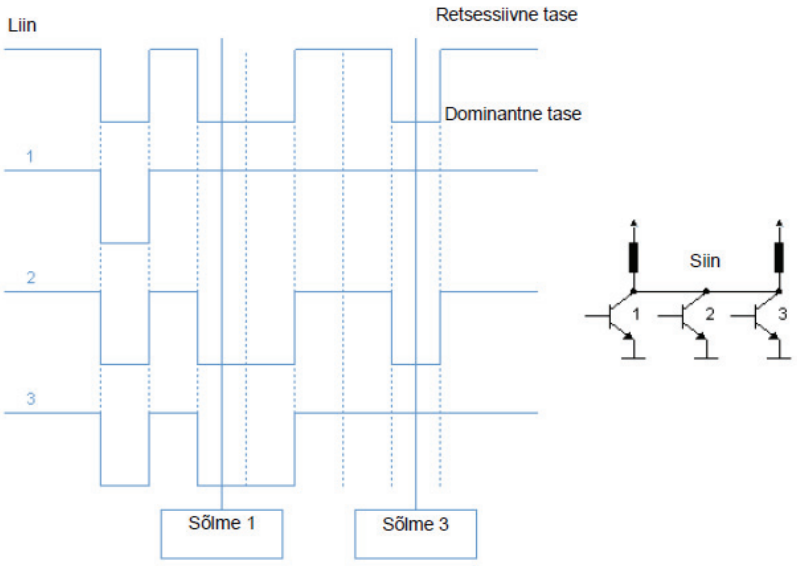
Päringukaadri formaat vastab CAN-i standardsele või laiendatud formaadile kahe erandiga:

- RTR-väljal on dominantse signaali **asemel** retsessiivne
- puudub andmeväli.

6.1.6 Arbitreerimine andmeedastuse ajal

Kui siin on vaba, võib iga sõlm alustada mistahes ajal andmete edastamist. Andmeedastuse arbitreerimine toimub siis, kui kahest või enamast sõlmest edastatakse mitu kaadrit samal ajal (Joonis 6.8).

Prioriteet edastatakse koos sõnumiga, mis on salvestatud seadme 11-bitisesse identifikaatorisse (seadme aadress). Madalaima binaarväärtusega identifikaator on kõrgeima prioriteediga. Prioriteet määratakse võrgu väljatöötamise ajal, mistõttu ei saa seda dünaamiliselt muuta. Mitme kaadri edastamise ajal toimuvad kaadrite kokkupõrked lahendatakse igas jaamas omistatud identifikaatori numbrite võrdlemise teel. Joonisel 6.8 on esitatud kirjeldatud juhtumi näide. Selles näites soovivad andmeid edastada kolm CAN-sõlme. Erinevalt Ethernetist ei ole CAN-is pakettide kadu ega kokkupõrgete tekitamine lubatud. Suurim puudus on, et madala prioriteediga sõnum ei pruugi jõuda CAN-võrku.



Joonis 6.8 Andmeedastuse arbitreerimine

6.1.7 Veatõrje

CAN-il on mitmeid veatõrje ja vigade vältimise mehhanisme.

- **Andmeedastuse juhtimine:** andmeedastuse ajal võrreldakse võrgu bititasandit edastatavate bittidega.
- **Bititäitmine:** pärast viie samasuguse biti järjestikust edastamist järgneb automaatselt vastupidise tähendustega biti edastamine. Nii on kõik andmeväljad ja päringukaader kodeeritud, välja arvatud kontrollsumma eraldaja ja EOF-märk.
- **Kontrollsumma**: saatja arvutab andmepaketi kontrollsumma ja lisab selle edastatavasse kaadrisse. Vastuvõtja loeb juhtahelat reaalajas, arvutab vastuvõetud kaadri kontrollsumma ja võrdleb neid.
- **Välja väärtuse kontrollimine edastamise ajal**.

6.1.8 Edastuskiirus ja võrgu pikkus

6.1.9 Kiiruse (sageduse) vahemik

Kõik võrgu sõlmed peavad töötama samal kiirusel/sagedusel. CAN-standard ei määra kindlaks edastuskiirust, kuid enamik sisseehitatud süsteeme kasutab katkematut edastust kiirusega 20 kbit/s kuni 1 Mbit/s. Loomulikult on olemas ka lahendusi, mis töötavad väljaspool seda vahemikku.

6.1.10 Võrgu kriitiline pikkus

Ülalkirjeldatud veatõrje meetodid eeldavad üle kogu võrgu hajutamist kuni selle arvutamise hetkeni. See omakorda määrab võrgu maksimaalse pikkuse. Mida suurem on edastuskiirus, seda väiksem on võrgu pikkus. Järgmisena on esitatud näitena sõnumi edastuskiirus ja sellele vastava võrgu kriitiline pikkus standardi ISO 11898 kohaselt:

- 1 Mbit/s – 40 m
- 500 kbit/s – 100 m
- 125 kbit/s – 500 m
- 10 kbit/s – 5000 m.

6.1.11 Kõrgtaseme/kihi protokollid

CAN-i põhispetsifikatsioon pakub mitmeid võimalusi, nagu 8 baidist pikema andmehulga edastamine, automaatne identifikaatorite jagamine sõlmede vahel, erinevat tüüpi ja erineva jõudlusega seadmete homogeenne juhtimine. Seetõttu on kõrgema taseme CAN-protokolli modifikatsioonid olnud selle väljatöötamisest saadik pidevas arenduses. Need on:

- CANopen
- DeviceNet
- CAN Kingdom
- J1939
- SDS.

6.1.12 CAN-i eelised

- Võimalus töötada fikseeritud reaalajarežiimil.
- Lihtne rakendada ja minimaalsed tegevuskulud.
- Kõrge häiringukindlus.
- Võrgule juurdepääsu arbitreerimine ilma mahukadudeta.
- Usaldusväärne veatõrje sõnumi edastamise ja vastuvõtmise ajal.
- Suur sõnumi edastuskiiruste vahemik.
- Ulatuslik seadmevalik.

6.1.13 CAN-i puudused

- Võrgu kriitiline pikkus on pöördvõrdelises seoses edastuskiirusega.
- Suur teenusega seotud andmete hulk paketis (võrreldes kasulike andmetega).
- Kõrgema tasandi protokollide konventsionaalse standardi puudumine.

Standardne võrk pakub laialdasi võimalusi praktiliseks ja turvaliseks andmeedastuseks sõlmede vahel. Järgmistes informatiivsetes tabelites on esitatud CAN andmesides kõige sagedamini kasutatavad pistikud ja ühenduseks sobivad kontaktid.

9 Pin (male) D-Sub CAN Bus PinOut		
Kontakti nr	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	Reserveeritud	Ülenduse rada
2	CAN_L	Dominantne, madal
3	CAN_GND	Maandus
4	Reserveeritud	Ülenduse rada
5	CAN_SHLD	Varjestus, valikvarustus
6	GND	Maandus, valikvarustus
7	CAN_H	Dominantne, kõrge
8	Reserveeritud	Ülenduse rada
9	CAN_V+	Toide, valikvarustus

10-Pin Header CAN Bus PinOut		
Kontakti nr	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	Reserveeritud	Ülenduse rada
2	GND	Maandus, valikvarustus
3	CAN_L	Dominantne, madal
4	CAN_H	Dominantne, kõrge
5	CAN_GND	Maandus
6	Reserveeritud	Ülenduse rada
7	Reserveeritud	Ülenduse rada
8	CAN_V+	Toide, valikvarustus
6	Reserveeritud	Ülenduse rada
7	Reserveeritud	Ülenduse rada

7-Pin Open Style CAN Bus PinOut		
Kontakti nr	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	CAN_GND	Maandus
2	CAN_L	Dominantne, madal
3	CAN_SHLD	Varjestus, valikvarustus
4	CAN_H	Dominantne, kõrge
5	CAN_V+	Toide, valikvarustus

5-Pin Micro/Mini CAN Bus PinOut		
Kontakti nr	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	CAN_SHLD	Varjestus, valikvarustus
2	CAN_V+	Toide, valikvarustus
3	CAN_GND	Maandus
4	CAN_H	Dominantne, kõrge
5	CAN_L	Dominantne, madal

RJ10, RJ45 CAN Bus PinOut			
RJ45 kontakti nr	**RJ10 kontakti nr**	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	**2**	CAN_H	Dominantne, kõrge
2	**3**	CAN_L	Dominantne, madal
3	**4**	CAN_GND	Maandus
4	-	Reserveeritud	Ülenduse rada
5	-	Reserveeritud	Ülenduse rada
6	-	CAN_SHLD	CAN-i varjestus, valikvarustus
7	-	CAN_GND	Maandus
8	**1**	CAN_V+	Toide, valikvarustus

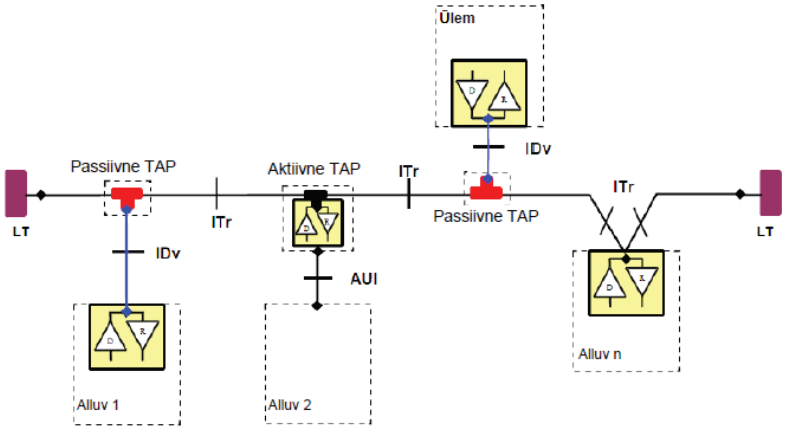
CAN-siini sisendi/väljundi omadused	
CAN-siini signaali tüüp	**Digiliides**
Väljundpinge (kõrge)	VOH +4 V min, +5,5 V max
Väljundpinge (madal)	V_{OL} +0 volti min, +1,5 volti max
Väljundpinge	+16 V (absoluutne maksimum)
Väljundvool	100 mA
Näivtakistus	124 Ω lõpetamine +/- terminalide vahel
Vooluahela tüüp	Diferentsiaalne
Bitiajad	1uS 1Mb/s korral, 2uS 5Mb/s korral, 4uS 25Mb/s korral
Kodeerimisformaat	Baasita (*non-return-to-zero*, NRZ)
Edastuse/vastuvõtu sagedus	1Mb/s (40 m korral)
Topoloogia	Punkt-punkt
Meedium	Varjestatud keerdpaarkaabel (STP) 9 kontaktiga D-Sub korral
Juurdepääsu juhtimine	Liikluse ja põrke tuvastusega multipöördus (CSMA/CD) Bitikaupa säilearbitreerimine

Ümara kujuga CAN Bus PinOut				
9-kontak-tilise nr	**8-kontak-tilise nr**	**7-kontak-tilise nr**	**Signaali nimi**	**Signaali kirjeldus**
1	**3**	**3**	CAN_H	Dominantne, kõrge
2	**4**	**4**	CAN_L	Dominantne, madal
3	**5**	**2**	CAN_GND	Maandus
4	**6**	-	-	Reserveeritud
5	**7**	-	-	Reserveeritud
6	**8**	-	-	Reserveeritud
7	**1**	**1**	CAN_V+	Toide, valikvarustus
8	**2**	-	GND	Maandus
9	-	-	-	Reserveeritud
-	-	**5**	DIL-1	DIP-lüliti 1 ühendatud CAN_V+ külge
-	-	**6**	DIL-2	DIP-lüliti 2 ühendatud CAN_V+ külge
-	-	**7**	DIL-3	DIP-lüliti 3 ühendatud CAN_V+ külge

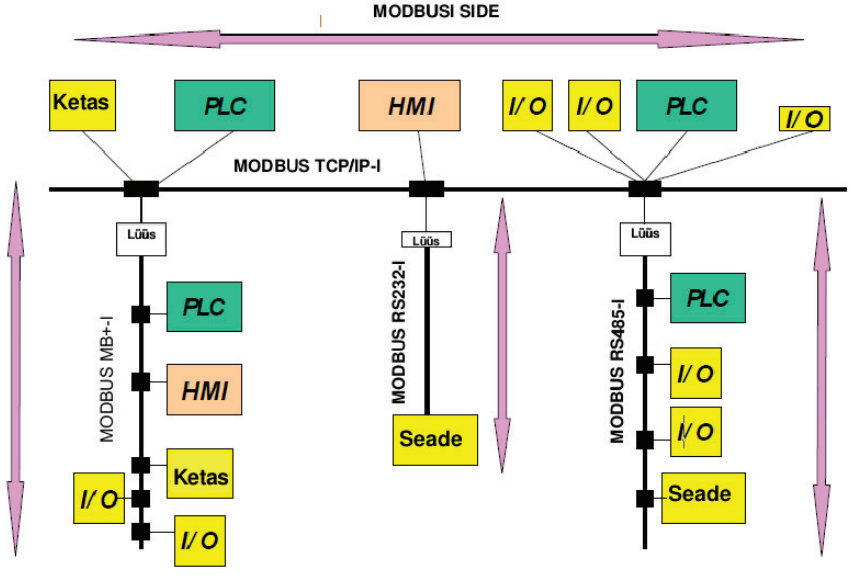
6.2 Sideprotokoll Modbus

6.2.1 Protokolli kirjeldus

Sideprotokoll Modbus põhineb klient-server-arhitektuuril. Seda kasutatakse laialdaselt tööstuses kontrollerite vahelise andmeside loomiseks. Andmete edastamiseks kasutatakse jadakanaleid, nagu RS-485, RS-422, RS-232 (Joonis 6.9), või TCP/IP-tüüpi võrku (Modbus TCP) (Joonis 6.10).



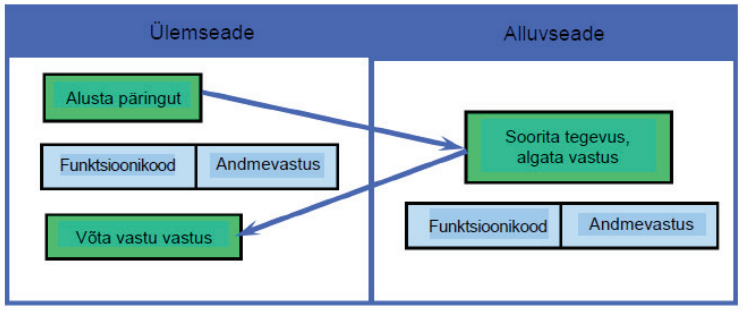
Joonis 6.9 Järjestikku ühendatud MODBUS-süsteemi infrastruktuur



Joonis 6.10 Modbus TCP-süsteemi infrastruktuur

Modbus on seotud OSI võrgumudeli rakendustasandi protokollidega. Modbusi võrgus töötavad kontrollerid kasutavad andmeedastuseks klient-server-mudelit, mis koosneb päringutest ja vastustest.

Tavaliselt on võrgus ainult üks ülemseade ja mitu alluvseadet. Ülemseade algatab andmeedastused (sidepäringud). Alluvseadmed saadavad ülemseadmele nõutud info. Ülemseade saab pöörduda individuaalselt iga alluvseadme poole või alluvseadmete grupi poole (Joonis 6.11). Alluvseade omakorda moodustab sõnumi ja tagastab selle saatjale. Grupipäringu saamise korral vastust ei moodustata.



Joonis 6.11 Ülem-alluv-side

6.2.2 Kaadri formaat

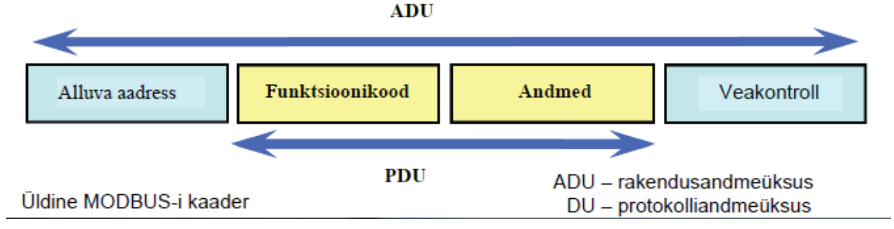
Modbusi spetsifikatsioon kirjeldab päringute ja vastuste kaadrite formaati. Elementaarse paketijuhtimise tasandil nimetatakse neid kaadreid ka protokolliandmeüksusteks (*Protocol Data Unit*, *PDU*). Protokolliandmeüksuse ülesehitus ei olene ühendusliini tüübist ning see sisaldab **funktsioonikoodi ja andmevälja**.

Modbus PDU	
Funktsiooni number	**Andmed**
1 bait	N < 253 (baiti)

Joonis 6.12 PDU struktuur

Funktsioonikood on kodeeritud ühe baidi pikkusesse välja ning ja saab vastu võtta väärtusi vahemikus 1–127. Vahemik 128–255 on reserveeritud veakoodile. Andmeväli on muutuva pikkusega ja protokolliandmeüksuse andmepaketi suurus on piiratud 253 baidiga (Joonis 6.12).

Protokolliandmeüksus paneb kahe lisavälja sisu teise paketti, et võimaldada paketi edastamist mööda ühenduse füüsilist liini. Seda andmepaketti nimetatakse rakendusandmeüksuseks (*Application Data Unit, ADU*). Selle formaat oleneb ühendusliini tüübist.



Joonis 6.13 Üldine MODBUS-i pakett

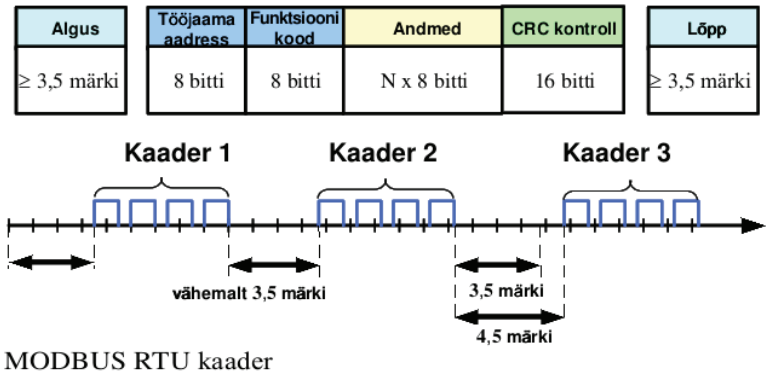
Protokollil Modbus on kolm peamist rakendust. Kaks andmete edastamiseks mööda jadaliidest, modem EIA/TIA-232-E (RS-232), EIA-422, EIA/TIA-485-A (RS-485), optiline ja raadioühendus

- Modbus RTU
- Modbus ASCII

ja rakendus andmete edastamiseks mööda Etherneti TCP/IP võrku:

- **Modbus TCP**

Rakendusandmeüksuse üldstruktuur on järgmine (Joonis 6.14):



Joonis 6.14 MODBUS-i andmepakett, ADU kaader

kus:

- **Tööjaama aadress** – alluvseadme aadress, millele kirje on adresseeritud.
- Iga seade vastab ainult ühele aadressile. Vastus algab samamoodi alluvseadme aadressiga. Seadmete aadressid on vahemikus 1–247. Aadressi 0 kasutatakse seadmete paketi adresseerimiseks ja seda tunnevad kõik seadmed. Aadressid 248–255 on reserveeritud.
- **Funktsioonikood –** ühebaidine väli, milles hoitakse täitmiskäsku.
- **Andmed –** sisaldavad infot, mida seade vajab ülemseadme käsu täitmiseks või infot, mida vajatakse vastamiseks. Selle välja pikkus oleneb funktsiooni numbrist ja on vahemikus 0–252 baiti.
- **Veakontroll (tsükkelkoodkontroll, CRC) –** kontrollsumma kaadrisiseseks veakontrolliks. Liini sõnumi edastuse ajal kirjutatakse esimesena madalama järgu kontrollsumma bait.

Rakendusandmeüksuse maksimaalne suurus jadavõrgus RS232/RS485 on 256 baiti ja TCP-võrgus 260 baiti. Modbus ASCII infokaadri formaati on kujutatud Joonis 6.15.

Algus	Aadess	Funktsioon	Andmed	LRC	Lõpp
1 märk	2 märki	2 märki	0 kuni 2x252 märki	2 märki	2 märki CR,LF

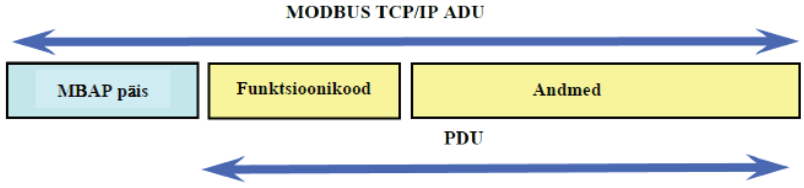
Joonis 6.15 Modbus ASCII infokaader

Üksikute väljade funktsioonid on esitatud tabelis 6.1.

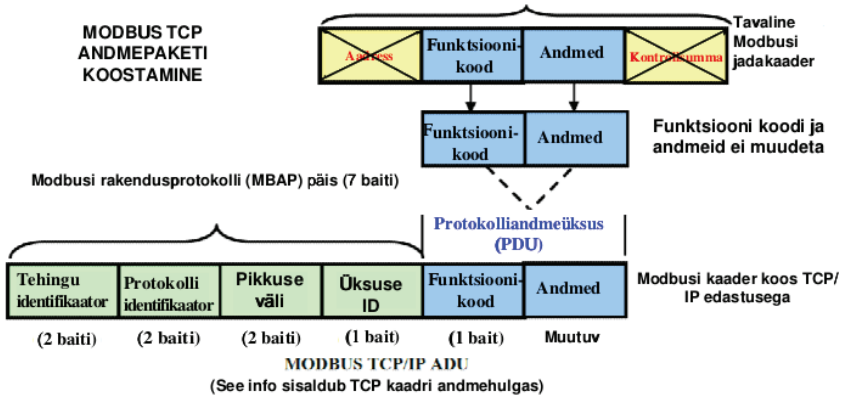
Tabel 6.1 Väljade funktsioonid Modbus ASCII kaadris

Nimi	Pikkus	Funktsioon
Algus	1 märk	*Algab kooloniga (☺(ASCII väärtus on 3A hex)*
Aadress	2 märki	*Tööjaama aadress*
Funktsioon	2 märki	*Näitab funktsioonikoode, nt „Loe väärtusi/sisendeid“*
Andmed	n märki	*Andmed + pikkus olenevalt sõnumi tüübist*
LRC kontroll	2 märki	*Veakontrollid*
Lõpp	2 märki	*Lõppu tähistatakse tagasijooksu ja reavahetuse (CRLF) märgipaariga (ASCII hex väärtused 0D ja 0A)*

Modbus TCP infokaader on järgmist tüüpi (Joonis 6.16 ja Joonis 6.17):



Joonis 6.16 Modbus TCP infokaader



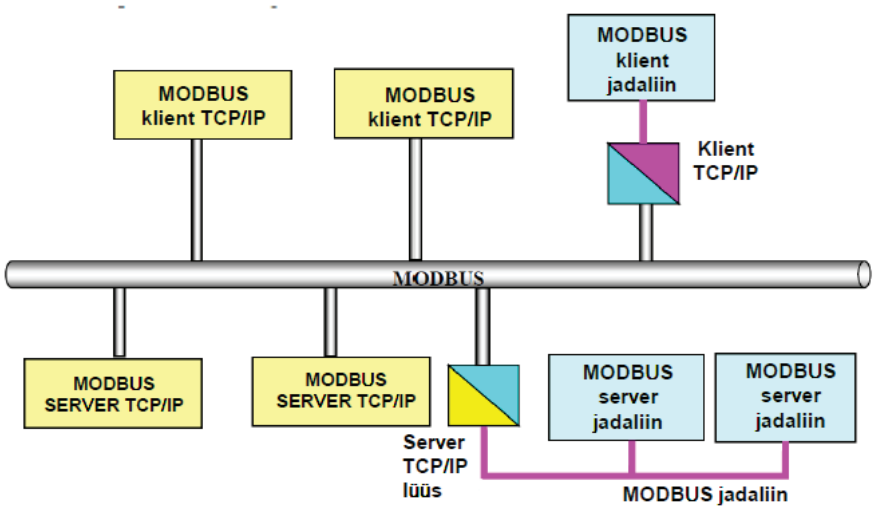
Joonis 6.17 Modbus TCP/IP infokaader

kus:

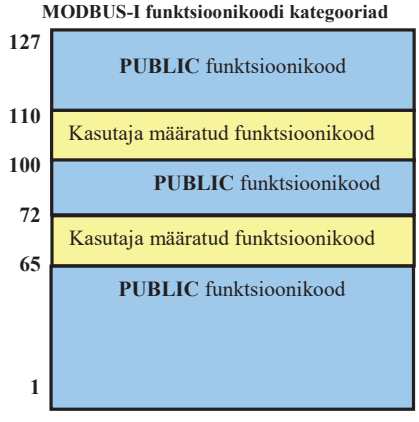
- **tehingu ID** – tehingu kahebaidine identifitseerimisnumber
- **protokolli ID** – protokolli kahebaidine identifitseerimisnumber
- **pikkus** – kaks baiti, mis sisaldavad edastatud andmete pikkust

- **üksuse ID** – selle seadme aadress, kuhu päring on adresseeritud. Tavaliselt eiratakse, kui suhtlus toimub ainult ühe seadmega.

Modbus TCP kaadril ei ole kontrollsumma välja. MODBUS TCP/IP ühenduse arhitektuur on esitatud Joonis 6.18.



Joonis 6.18 MODBUS TCP/IP ühenduse arhitektuur



Joonis 6.19 Funktsioonide jagunemine MODBUSis kategooriate kaupa

6.2.3 Funktsioonikoodide kategooriad

Modbusis kasutatavates protokollides on kolm funktsioonikoodide kategooriat: standardiseeritud käsud, kasutaja käsud ja reserveeritud käsud (Joonis 6.19).

6.2.4 Standardiseeritud käsud

Nende kirjeldus tuleb avaldada ja selle kinnitab Modbus-IDA. See kategooria hõlmab nii jaotatud kui ka vabu koode (Tabel 6.2).

Tabel 6.2 Standardiseeritud käsud Modbus-is

Funktsiooni nr	Päring/vastus					
1 (0x01) ***Loe väljundi väärtus***	A_1	A_0	Q_1	Q_0		
	N	D (N baiti)				
2 (0x02) *Loe diskreetseid sisendeid*	A_1	A_0	Q_1	Q_0		
	N	D (N baiti)				
3 (0x03) *Loe hoideregistreid*	A_1	A_0	Q_1	Q_0		
	N	D (N baiti)				
4 (0x04) *Loe sisendregistreid*	A_1	A_0	Q_1	Q_0		
	N	D (N baiti)				
5 (0x05) *Kasuta üksikut väärtust*	A_1	A_0	D_1	D_0		
	A_1	A_0	D_1	D_0		
6 (0x06) *Algseada üksik register*	A_1	A_0	D_1	D_0		
	A_1	A_0	D_1	D_0		
15 (0x0F) *Kasuta mitut väljundit*$_s$	A_1	A_0	Q_1	Q_0	N	D (N baiti)
	A_1	A_0	Q_1	Q_0		
16 (0x10) *Algseada mitu registrit*	A_1	A_0	Q_1	Q_0	N	D (N baiti)
	A_1	A_0	Q_1	Q_0		

- **A_1** ja **A_0** – elemendi aadress
- **Q_1** ja **Q_0** – elementide arv
- **N** – andmebaitide arv
- **D** – andmed

6.2.5 Andmete lugemine

Väärtuste lugemiseks kasutatakse käske väärtustega 1–4.

- **1 (0x01)** (loe väljundi väärtus) – tagastab väärtuse mitmele seisundiregistrile
- **2 (0x02)** (loe diskreetseid sisendeid) – tagastab väärtuse mitmele diskreetsele sisendile
- **3 (0x03)** (loe hoideregistreid) – tagastab väärtuse hoideregistritele
- **4 (0x04)** (loe sisendregistreid) – tagastab väärtuse mõnele sisendregistrile.

Päring koosneb tabeli esimesest elemendi aadressist, väärtusest, mille jaoks seda tuleb lugeda ja loetavate elementide arvust. Nii aadress kui ka suurus omistatakse 16-bitise numbrina. Päritud andmed saadakse vastusega. Andmetele eelneb bait, mis sisaldab edastatud andmete suurust.

6.2.6 Kasutaja käsud

Need sisalduvad kahes koodivahemikus (65–72 ja 100–110), kus kasutaja saab rakendada mitmeid erinevaid funktsioone. Siiski ei saa tagada, et need käsud ei ole kasutusel muudes seadmetes muude funktsioonide rakendamiseks.

6.2.7 Reserveeritud käsud

See funktsioonide sisendkoodide kategooria Tabel 6.3 ei ole standardiseeritud, kuid neid kasutatakse siiski erinevate ettevõtete toodetud seadmetes. Need koodid on: 9, 10, 13, 14, 41, 42, 90, 91, 125, 126 ja 127.

Tabel 6.3 Alamfunktsiooni kood

Alamfunktsiooni kood		Nimi
Hex	Dec	
00	00	Tagasta päringu andmed
01	01	Taaskäivita ühenduse valik
02	02	Tagasta diagnostikaregister
03	03	Muuda ASCII sisenderaldajat
04	04	Kasuta ainult kuulamise režiimi
J	05–09	Reserveeritud
0A	10	Nulli loendurid ja diagnostikaregister
0B	11	Tagasta siini sõnumiloenduri väärtus
0C	12	Tagasta siini sidevigade loenduri väärtus
0D	13	Tagasta siini erandolukordade loenduri väärtus
0E	14	Tagasta alluvseadme sõnumiloenduri väärtus
0F	15	Tagasta alluvseadme puuduvate vastuste loenduri väärtus
10	16	Tagasta alluvseadme eituste loenduri väärtus
11	17	Tagasta alluvseadme hõivatud seisundi loenduri väärtus
12	18	Tagasta siini märkide ülejooksu loenduri väärtus
13	19	Reserveeritud
14	20	Nulli ülejooksu loendur ja lipp
N.A	21–65 535	Reserveeritud

6.2.8 Andmemudel

Üks selle protokolli standardiseeritud tegevusi on kontrollerite registrites andmete lugemine ja kirjutamine. Protokolli spetsifikatsioon määrab neli andmetabelit, mis on esitatud tabelis (Tabel 6.4).

Tabel 6.4 Andmetabelid Modbus-is

Primaarsed tabelid	*Objekti tüüp*	*Tegevuse tüüp*	*Kommentaarid*
Diskreetne sisend	Üksik bitt	Kirjutuskaitstud	Seda tüüpi andmeid annab sisend-väljundsüsteem.
Väärtus	Üksik bitt	Lugemine-kirjutamine	Seda tüüpi andmeid saavad muuta kõik rakendusprogrammid.
Sisendregistrid	16-bitine sõna	Kirjutuskaitstud	Seda tüüpi andmeid annab sisend-väljundsüsteem.
Hoideregistrid	16-bitine sõna	Lugemine-kirjutamine	Seda tüüpi andmeid saavad muuta kõik rakendusprogrammid.

Igas tabelis toimub elementidele juurdepääs 16-bitise aadressi abil, kus esimene asukoht vastab aadressile 0. Nii võib iga tabel sisaldada 65 536 elementi. Spetsifikatsioon ei määra tabelis olevate elementide füüsilist pikkust ega sisemist aadressi, millele need vastavad. Näiteks on lubatud moodustada kattuvaid tabeleid. Sel juhul võivad kõik käsud, mis töötavad diskreetsete andmetega ja 16-bitiste registritega, adresseerida tegelikult sarnaseid andmeid.

6.2.9 Veatõrje Modbus RTU protokollis

Andmevahetusel võib tekkida kahte tüüpi vigu:

- vead, mis on seotud andmete moonutamisega andmeedastuse käigus
- loogikavead.

Esimest tüüpi vead tuvastatakse kaadri sümboli, paarsuskontrolli ja tsükkelkoodkontrolli summa CRC-16-IBM (kasutatakse numbrilist polünoomi = 0xA001) abil.
Teist tüüpi vigade tuvastamiseks eeldab Modbus RTU protokoll, et seade ei ole vastust kätte saanud või vastus sisaldas veakoodi (Tabel 6.5). Seda, kas vastus võib sisaldada veasõnumit, näitab käsukoodi kõrgeima järgu bitt. Loogikavea tuvastamiseks töötab Modbus allpool esitatud skeemi järgi:

- Kui alluvseade on saanud õige päringu ja on võimeline seda töötlema standardsel moel, saadab see tagasi standardse vastuse.
- Kui alluvseade ei ole saanud ühtegi väärtust, ei genereeri see ühtegi vastust. Sel juhul diagnoosib ülemseade aegumisvea.
- Kui alluvseade on saanud päringu, kuid on ühtlasi tuvastanud ka vea (paarsus, LRC või CRC), siis ei genereeri see ühtegi vastust. Sel juhul diagnoosib ülemseade aegumisvea.

- Kui alluvseade on saanud päringu, kuid ei suuda seda mingil põhjusel töödelda, genereerib see vastuse, mis viitab vea tüübile (Tabel 6.6).

Tabel 6.5 Vastuse kaader (alluv→ülem) vigade tekkimise korral Modbus RTU-s

Andmeedastuse suund	*Alluvseadme aadress*	*Funktsiooni number*	*Andmed (või veakood)*	*CRC*
Järjekord (ülem→alluv)	0x01	0x77	0xDD	0xC7 0xA9
Päring (alluv→ülem)	0x01	0xF7	0xEE	0xE6 0x7C

Tabel 6.6 Standardsed veakoodid MODBUS-i protokollis

Vea nr	*Veateade*
0	Vigu ei ole
1	Keelatud tegevus
2	Keelatud andmeaadress
3	Keelatud andmeväärtus
4	Ülemseade – aegumine
5	Side puudub
6	Üksuse ID ei sobi
7	Käsk ei sobi
8	Sõnumi pikkus
9	Funktsiooni ei toetata
10	Keelatud formaat
11	Vastuvõetud andmed ei sobi

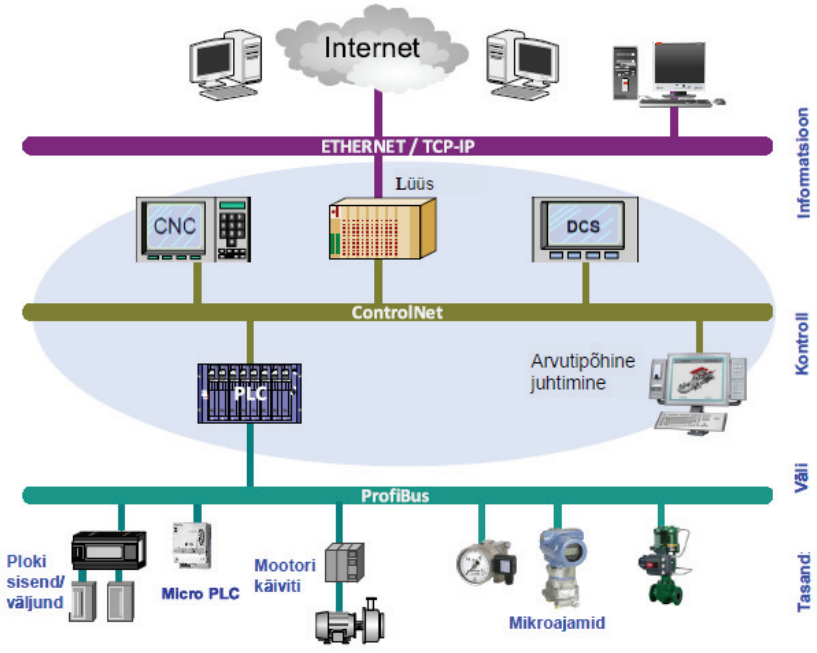
6.3 Teadmiste kontroll

1. CAN-süsteemides edastatakse ja saadakse infot:
    a) bittides
    b) baitides
    c) andmepaketi vormis
    d) bittides või baitides, nagu kasutaja soovib
    e) õiget vastust ei ole
2. CAN-protokollides eristatakse järgmisi kaadreid:
    a) andmekaader
    b) päringukaader
    c) jaatuskaader
    d) ülekoormusekaader
    e) veakaader
3. Millised loetletud protokollidest on CANBUS-i protokolli modifikatsioonid?
    a) CANopen
    b) DeviceNet
    c) CAN Kingdom
    d) J1939
    e) SDS
4. Multiedastussõnumeid kasutatakse Modbusi võrgus paketi adresseerimiseks ja nende aadress on:
    a) 0
    b) 1
    c) 126
    d) 127
    e) 255
5. Modbusi kaader koosneb järgmistest osadest:
    a) alguse väli
    b) adressaadi aadress
    c) saatja aadress
    d) funktsiooni number
    e) andmeväli

7 JUHTIMISTASANDI TÖÖSTUSLIKUD VÕRGUD. CONTROLNET-VÕRGU SPETSIFIKATSIOON

7.1 Juhtimistasandi tööstuslikud võrgud

Selle tasandi võrgud ja süsteemid hõlmavad sidesüsteemide tänapäevase arhitektuuri teise tasandi (Joonis 7.1). Sel tasandil tehakse protsesside reaalajas haldamine ning eri tüüpi kontrollerite, operaatorjaamade, diagnostika- ja programmeerimisseadmete vaheline konfigureerimine ja vastastikune andmete vahetamine. Siin toimuv infovoog koosneb peamiselt programmide, parameetrite, andmete ja kontrollerite juhtimisinfo vahetusest.



Joonis 7.1 Juhtimistasand võrgusidega automaatses juhtimissüsteemis

Juhtimistasandi side on intensiivne, väikeste ja keskmiste suurustega andmepakettidega ning esitab kõrgemaid nõudmisi täpsusele, häiringukindlusele ja determinismile. Need iseloomulikud omadused on tingitud sellest, et suurem osa edastatavatest andmetest on ette nähtud protsesside juhtimiseks reaalajas. Juhtimistasand ühtlustab S/V-andmevahetusfunktsioonid ja võrdvõrgu ühendused üksikute programmeeritavate kontrollerite ja detsentraliseeritud juhtimissüsteemide ning selliste arvutisüsteemide vahel, mida kasutatakse kasutajaliidesena (*Human Machine Interface*, HMI), sündmusearhiividena või järelevalve tegemiseks. Nii saavutatakse suur andmesidekiirus kõigi seadmetega, millel on otsene juurdepääs infole. Peale selle võimaldavad selle tasandi võrgud mitmete tsükliliste ja diskreetsete juhtimisstruktuuride kaasamist loogilise juhtimise, signaliseerimise ning blokeerimise jaoks. See võimaldab oluliselt vähendada juhtmeühendusi ning sarnase standardi raames kasutada erinevate tootjate funktsionaalplokke. Võrgud põhinevad

tootja-tarbija sidemehhanismil. See võimaldab võrgumeediumi tõhusat kasutamist ja võrguliikluse vähendamist, sest andmed edastatakse ühe korra ja kõik sõlmed võivad sõnumit kasutada olenemata tarbijate arvust. Võrku on võimalik lisada muid seadmeid nii, et ei kahjustata võrgu sünkroonimist ega andmeid, mida edastatakse korraga kõigile punktidele.

Juhtimistasandi võrkudel on veel järgmised spetsiifilised omadused:

- võrguside determinism
- kiire andmeedastuse toetamine (5–12 Mbit/s)
- sisend-väljundandmete paindlik juhtimine
- lihtsustatud programmeerimine ja automaatne võrgu konfigureerimine
- erinevate tootjate sisend-väljundseadmete ja programmeeritavate kontrollerite kasutamine.

Juhtimistasandi tööstuslikke võrke kasutatakse avatud juhtimissüsteemides, sest need pakuvad paindlikke lahendusi installimise ja töötamise protsessis. Sellistele spetsifikatsioonidele vastavad näiteks ControlNet ja Profibus ning veel sagedamini kasutatav Ethernet/IP.

7.2 ControlNet-võrgu spetsifikatsioon

ControlNet-võrk vastab võrgusidega automaatsete juhtimissüsteemide juhtimistasandi ja kiirete reaalajas rakenduste nõuetele. See on kiire determineeritud võrk, mida kasutatakse ajakriitiliste andmete edastamiseks. Samuti on see avatud sideprotokoll ja üldise tööstusprotokolli (*Common Industrial Protocol*, CIP) rakendus, nagu ka DeviceNet. Joonisel 7.2 on näidatud seos CIP, ControlNeti ja OSI mudeli vahel. ControlNet kasutab samaaegse hulgipöörduse (*Concurrent Time Domain Multiple Access*, CTDMA) meetodit, kus seadmed edastavad andmeid iga võrguintervalli jooksul ja võrguliiklus on rangelt määratud täpsete ajahetkedega.

ControlNet-võrk põhineb tootja-tarbija sidemehhanismil ja sel on järgmised eelised:

- mitmed võrgusõlmed saavad vastu võtta samu andmeid ühelt saatjalt
- võrgusõlmi saab sünkroonida
- programmeerimiseks ja sisend-väljundsõnumite jaoks kasutatakse sama keskkonda.

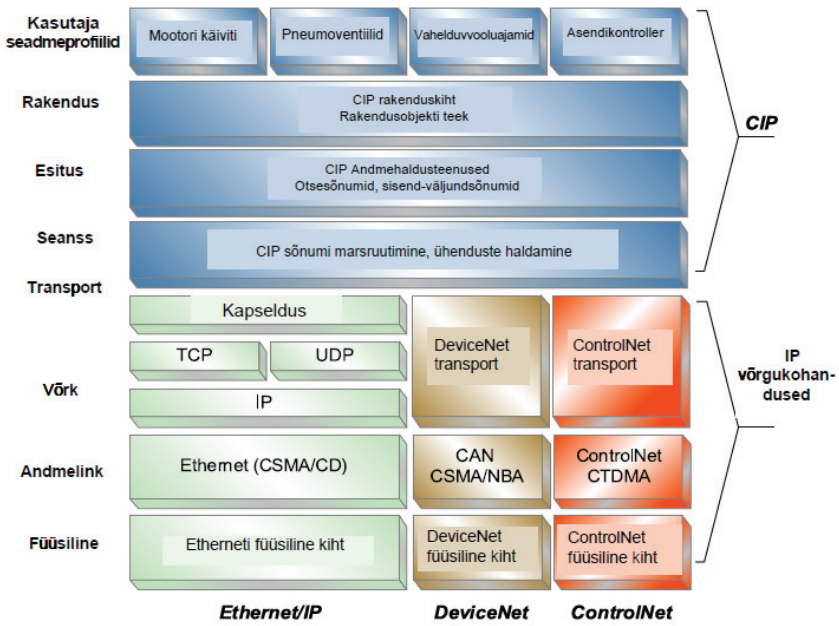
ControlNeti füüsiline tasand kasutab RG-6 tüüpi varjestatud koaksiaalkaablit ja BNC-pesi. Valguskaableid kasutatakse segmentide laiendamiseks maksimumpikkuseni ja elektromagnetiliste häiringute eest kaitsmiseks. Andmeedastuskiirus on 5 Mbit/s ja andmete kodeerimiseks kasutatakse Manchesteri tüüpi bitte.

Sidevõrgu tööpikkused on olenevalt sõlmede arvust, repiiteritest ja kaablitüüpidest järgmised:

- 1000 m koaksiaalkaabli kasutamise ja kahe sõlme korral
- 250 m koaksiaalkaabli kasutamise ja 48 sõlme korral
- 5000 m koaksiaalkaabli ja repiiterite kasutamise korral mitmes segmendis
- 3000 m kiudoptilise kaabli kasutamise korral
- 30 km kiudoptilise kaabli ja repiiterite kasutamise korral mitmes segmendis.

See spetsifikatsioon säilitab liini niinimetatud kuuma reservi. Kõik seadmed on ühendatud võrku kahe kaabli abil ja kuulavad püsivalt signaali. Seadmed kasutavad liini, mis pakub parema kvaliteediga signaali.

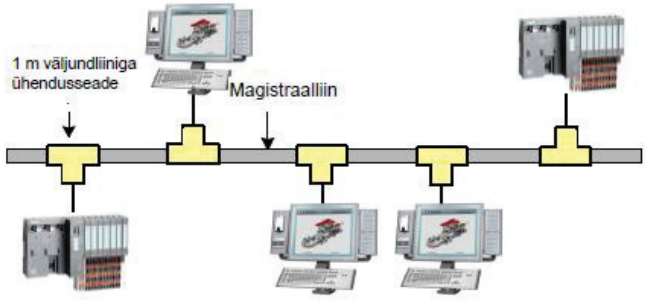
ControlNet sobib rakendustele, mis nõuavad determinismi, jõudlust, suure andmehulga edastamist, S/V-andmeedastust suure vahemaa taha ja sünkroonitud juhtimist. ControlNeti võrke kasutatakse erinevates koordineeritud elektriajamite, suurte andmehulkade, suure hulga loogikakontrollerite ja kasutajaliidestega protsesside juhtimissüsteemides.



Joonis 7.2 Ühendus CIP, ControlNeti ja OSI mudeli vahel

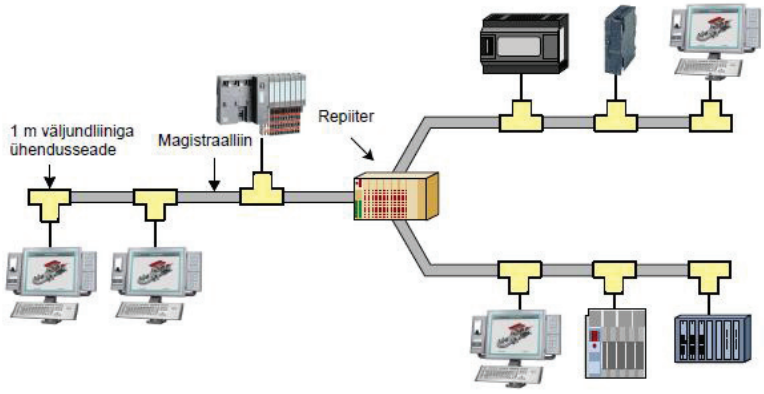
7.3 ControlNeti võrkude topoloogia

ControlNeti spetsifikatsioon kasutab erinevaid topoloogia tüüpe, sealhulgas siini (lineaarne), puud, ringi ja nende kombinatsioone, (Joonis 7.3 – 7.5).

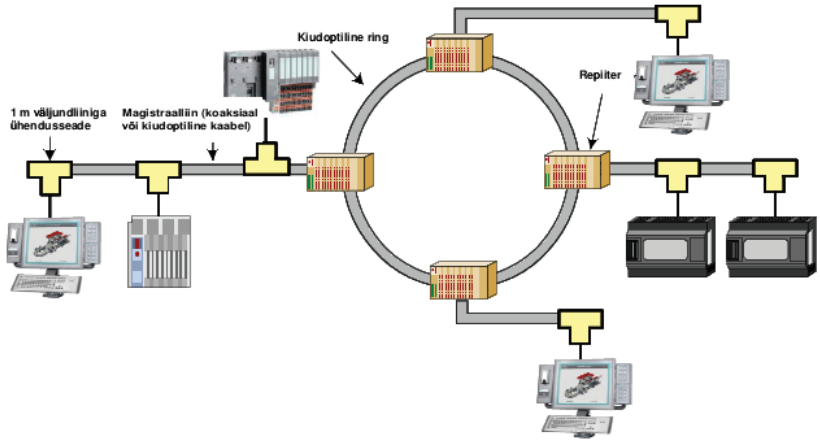


Joonis 7.3 ControlNeti võrgu lineaarse struktuuri näide

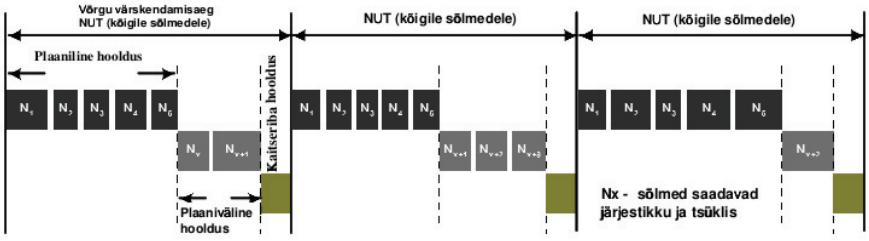
ControlNet kasutab magistraalliini, kuhu üksikud sõlmed on ühendatud kuni ühe meetri pikkuste väljundliinide ja ühendusseadmete abil. Lõppseadmete (sõlmede) aadressid ControlNeti võrgus on vahemikus 0–99.
Kanalitasemel kasutab ControlNet CTDMA meetodit, kus juurdepääsu keskkonnale hallatakse ajastusalgoritmiga ja absoluutne aeg on jagatud korduvateks intervallideks – võrgu värskendamisajaks (Network Update Time, NUT) (Joonis 7.6).



Joonis 7.4 ControlNeti võrgu puustruktuuri näide



Joonis 7.5 ControlNeti võrgu hübriidstruktuuri näide



Joonis 7.6 ControlNeti keskkonna juurdepääs

NUT-i väikseim seatav pikkus on 2 ms. Igas NUT-is on edastusaeg jagatud kolme vahemikku – plaaniline, planeerimata ja kaitsevahemik. Reaalajas andmeid edastavate sõlmede jaoks on planeeritud kindel ajavahemik. See ajavahemik on igas NUT-i kaadris määratud rakenduse nõuete kohaselt. Ülejäänud andmete edastusaega kasutatakse mitte-ajakriitiliste andmete vahetamiseks. See vaba ja planeerimata intervall ei ole reserveeritud üksikute sõlmede jaoks, vaid seda kasutatakse vajaduse korral. Selle ajavahemiku jooksul edastatud andmed ei mõjuta sidet planeeritud intervallis, kuid sel on siiski maksimaalne kohaletoimetamise aeg. Enne NUT-i lõppu seatakse üles kaitsevahemik, mis on pühendatud sõlmede sünkroonimisele. Sel ajal saadab madalaima aadressiga sõlm moderaatorkaadri, mis sünkroonib ülejäänud võrgusõlmed.

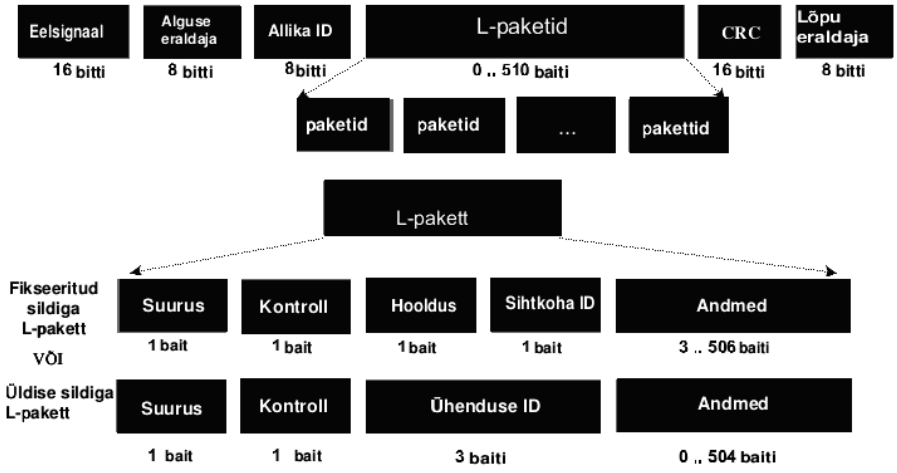
7.4 Sõnumitüübid ControlNetis

ControlNeti võrgud toetavad kahte tüüpi sõnumeid – otsesõnumid ja sisend-väljund-sõnumid.

- Otsesõnumid – võivad olla ühendatud ja ühendamata. Kahte tüüpi otsesõnumeid edastatakse NUT-i planeerimata osas. Ühendatud otsesõnumite jaoks on vaja, et ühendus on loodud enne edastamist. Ühendamata otsesõnumeid kasutatakse ainult planeerimata ja harvade päringute korral.
- Sisend-väljundsõnumid – edastatakse NUT-i plaanilises osas ning alati koos linkide kasutamisega. Iga seade saab oma ajavahemikus edastada ainult ühe kaadri. Iga kaader võib sisaldada mitut L-paketti (joonis 7.7), nii et andmed saab saata mitmele sõlmele ühe NUT-i jooksul.

7.5 ControlNeti kaadri struktuur

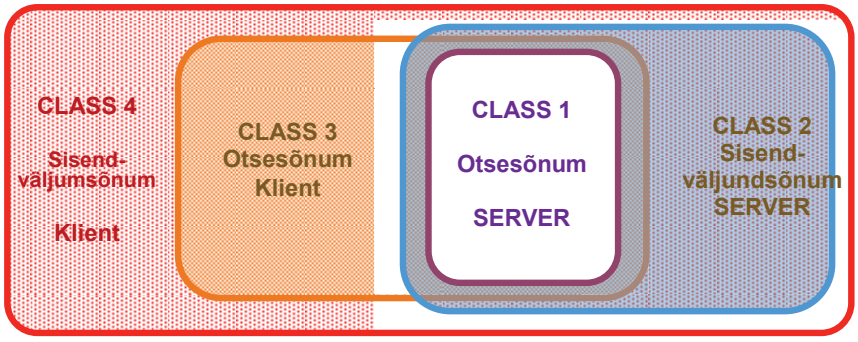
ControlNeti kaadrid sisaldavad kuut välja (Joonis 7.7). Iga konkreetne kaader saab edastada andmeid või sõnumeid. Andme- ja sõnumiväli (L-pakett) on piiratud 510 baidiga, ning võib sisaldada üht või mitut L-paketiga sama tüüpi struktuuri. Peale andmete või sõnumite sisaldab L-pakett mitut erinevat hooldusinfo sektsiooni.
L-pakette on kahte tüüpi: fikseeritud silt ja üldistatud silt. Esimest tüüpi kasutatakse ühenduseta sõnumites (Unconnectedmessaging) ja teist tüüpi kasutatakse kõigis ühendatud sõnumites (Connectedmessaging).



Joonis 7.7 ControlNeti kaadri struktuur

7.6 ControlNeti võrkude seadmete klassid

ControlNet toetab nelja seadmeklassi (Joonis 7.8):



Joonis 7.8 ControlNeti seadmete klassid

- *Klass 1 (otsesõnum – server / ainult sihtkoht)* – seadmed, mis vastavad ainult otsesõnumitele. Need toetavad ainult ühendatud ja ühendamata sõnumeid, et laadida / alla laadida programme, andmeid, seisundi seadeväärtust, diagnostikat jne.
- *Klass 2 (sisend-väljundsõnum – server / ainult sihtkoht)* – seadmed, mis täiendavad klassi 1 funktsioone funktsioonidega, mis toetavad sisendväljund-sõnumeid. See lisaomadus muudab need sellise klassi seadmeteks, mis on võimelised saatma

erineva iseloomuga sõnumeid. Selle klassi tüüpilised esindajad on piiratud funktsioonidega sisend-väljundseadmed, täiturid, pneumoseadmed jne.

- *Klass 3 (otsesõnum – klient/algataja + server/sihtkoht)* – seadmed, mis toetavad klassi 1 funktsioone ja ühenduse kontrollimise funktsioone. Need on otsesõnumite vastuvõtjad ja algatajad. Tüüpilised esindajad on arvuti võrgukaart ja kasutaja-liidese seade.
- *Klass 4 (sisend-väljundsõnum – klient/algataja + server/sihtkoht)* – tuntakse ka kui S/V-skannerid. Need seadmed toetavad kõikide seadmeklasside funktsioone. Need on nii otsesõnumite kui ka sisend-väljundsõnumite vastuvõtjad ja algatajad. Tüüpilised seadmed on programmeeritavad kontrollerid ja S/V-skannerid.

7.7 Teadmiste kontroll

1. Millised on juhtimistasandi võrkude peamised funktsioonid ja omadused?
    a) tööväljatasandi jaoks kavandatud andmete krüpteerimine
    b) üksiku tootja seadmete juhtimine
    c) võrguühenduse determinism
    d) sisend-väljundandmete juhtimine
    e) terminalide andmevahetus

2. Mis iseloomustab ControlNeti?
    a) väike andmeedastuskiirus
    b) reaalajas toimimine
    c) juurdepääsu CTDMA kasutamine
    d) juurdepääsu CSMA/CD kasutamine
    e) Manchesteri tüüpi krüpteerimine

3. Millised järgmistest võrgu topoloogiatest on iseloomulikud ControlNetile?
    a. lineaarne
    b. ring
    c. pikendatud täht
    d. täht
    e. hierarhiline

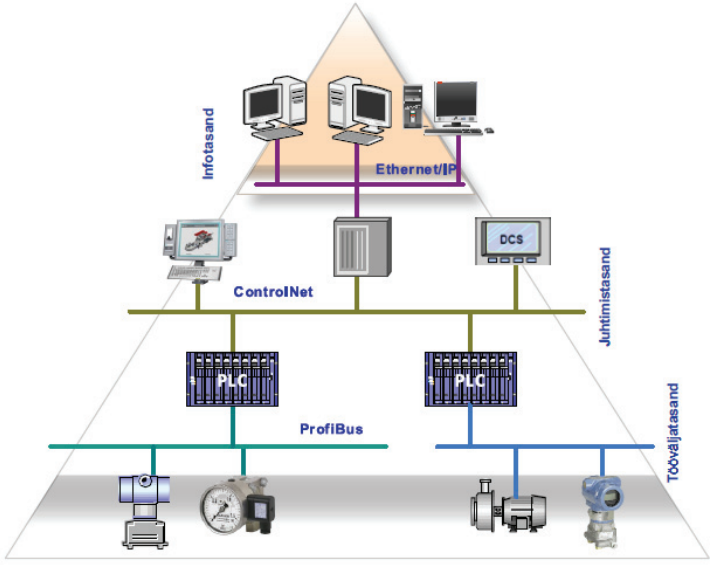
4. Mis seadmeid kasutatakse ControlNetis?
    a. mõõteseadmed
    b. sisend-väljundsõnumite serverid
    c. otsesõnumite serverid
    d. adapterid otsesõnumi klientidega
    e. nutiseadmed

5. Milliseid loetletud ajavahemikest kasutatakse NUT-is?
    a. hõivatud
    b. vaba
    c. kaitstud
    d. kuulamine
    e. reserveeritud

8 INFOTASANDI TÖÖSTUSLIKUD VÕRGUD

8.1 Võrkude üldised omadused ja nõuded

Infotasand hõlmab võrgusidega automaatse juhtimissüsteemi hierarhias kõige ülemise kihi (Joonis 8.1). Selle tasandi süsteeme kasutatakse ettevõtte tasemel info vahetamiseks ja haldamiseks. Kõik eri tasandeid puudutavad olulised parameetrid ja andmed kogutakse ja arhiveeritakse andmebaasi, mis on vajalik juhtimisotsuste tegemiseks. Võrreldes muude tasandite võrkudega on infotasandi võrkudel suurem läbilaskevõime ja need on ette nähtud suurte andmemassiivide vahetamiseks. Neid iseloomustab mittekriitiliste andmete kiire edastamine.



Joonis 8.1 Infotasand võrgusidega automaatses juhtimissüsteemis

Enamik neile iseloomulikke probleeme on seotud järgmiste omadustega:

- edastatava info hulga ja kiiruse optimeerimine
- edastatud andmete turvalisus
- andmekaitse loata juurdepääsu eest
- ühise lähenemise puudumine tööstusliku automatiseerimise rakenduskihi defineerimisel. Mitmete võrkude lahendused on kokkusobimatud, sest need erinevad sidesüsteemi arhitektuuri, rakenduskihi protokollide, objektorienteeritud modelleerimise ja süsteemide konfiguratsioonimudelite poolest.

Kõige laialdasemalt kasutatav võrk selle tasandi tänapäevastes süsteemides on Ethernet. Etherneti tüüpi LAN- ja WAN-võrkude kasutamine ja Interneti kiire areng on peamised põhjused, miks Ethernet ja TCP/IP/UDP on tööstusliku automatiseerimise huviorbiidis.

Kiire Ethernet, programmeeritavad kommutaatorid ja dupleksrežiimil side rakendamine võimaldavad sel tasandil koostada järjest tõhusamaid info- ja juhtimissüsteeme. Tööstuslikus automatiseerimises kasutatavat Etherneti standardversiooni kutsutakse tööstuslikuks Ethernetiks. Mitmed organisatsioonid on ühendanud jõud, et töötada välja tööstusliku Etherneti ühtne protokoll. Siiski iseloomustab nende organisatsioonide lahendusi operatsioonide kokkusobimatus. Mõned populaarsed spetsifikatsioonid on:

- Ethernet / IP (Open DeviceNet Vendor Association)
- Foundation Fieldbus High-Speed Ethernet (Foundation Fieldbus)
- Interbus on Ethernet (Interbus Club)
- Open Modbus (Modconnect)
- Profinet 1.0 / 2.0 (Profibus User Organization)
- IDA (IDA Group).

8.2 Infotasandi võrkude töö reaalajas

Allpool on esitatud mõned olulisemad põhjused, miks Ethernet ei ole võimeline tagama ajavahemikku, mille jooksul süsteem peaks vastama välisele sündmusele.

- Suuri andmemassiive vahetavad seadmed blokeerivad sõlmede juurdepääsu võrgule määramata ajaks.
- Kahe või enama seadme samaaegsel andmeedastusel tekkivad kokkupõrked, mis tõkestavad liikluse kõigisse seadmetesse. Mida rohkem on seadmeid võrgus, seda suurem on kokkupõrke tõenäosus.
- Ei saa eristada kõrge ja madala prioriteediga liiklust.
- Puudub garantii minimaalse viivitusega ühenduskanali loomiseks reaalajas andmevahetuse jaoks.
- Sagedusriba on jagatud.

8.3 Infotasandi võrkudes kasutatavad seadmed

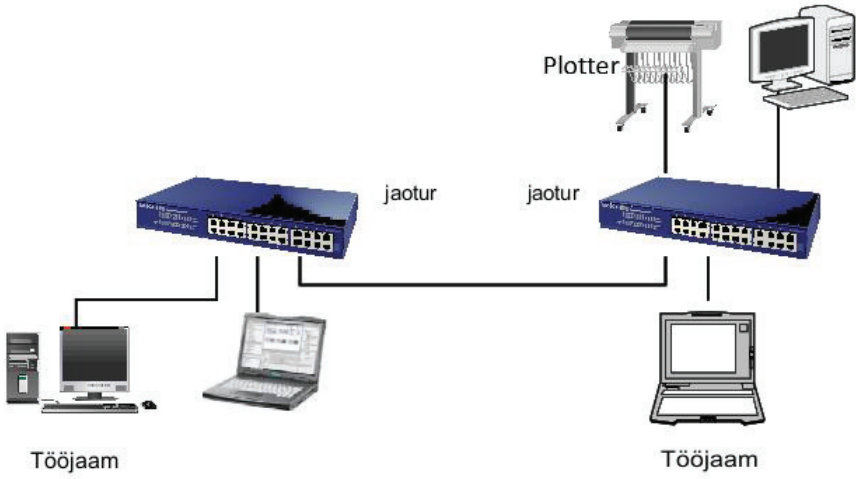
- Suured juhtarvutid, mis võimaldavad hallata suuri andmehulki ja lahendada keerukaid arvutusülesandeid. Need on võimelised haldama sadu ja isegi tuhandeid kasutajaid.
- Operaatorjaamad ja kasutajaliidesed.
- Sisend-väljundmoodulid ja adapterid.
- Programmeeritavad kontrollerid, robotid ja süsteemid.

8.4 Tarkvara sisu

- Konfigureerimise, häälestamise, andmete kogumise ja haldamise rakendused kiire võrgu segmentides.
- Ajakriitilised rakendused reaalajas tootmisprotsessi juhtimiseks.
- Ärijuhtimissüsteemid.

8.5 Infotasandi võrkude topoloogia

Infotasandit iseloomustab tähttopoloogia kasutamine (Joonis 8.2), mis hõlmab kakspunktringis kommutaatoriga ühendatud seadmete rühmi, tagades sellega järgmise:



Joonis 8.2 Tähttopoloogia kasutamine Ethernetis

- Võrgusõlmed säilitavad kommutaatorite abil kohandatud andmeedastuskiiruse 10/100/1000 Mbit/s.
- Võimalused kasutada lihtsustatud struktuuriga kaabeldust, lihtne hooldamine ja diagnostika.

8.6 Infotasandi andmevahetuse tüübid

Infotasandil kasutatakse järgmisi peamisi andmevahetustüüpe:

- Sisend-väljundandmed:
  - andmepaketid edastatakse UDP/IP protokollide abil, mille peamine eelis on UDP suur läbilaskevõime
  - andmevahetus toimub väikeste ajakriitiliste pakettidega läbi pikaealiste kaudsete ühenduste.
- Üldine andmevahetus:
  - andmepaketid edastatakse protokollide TCP/IP abil
  - seda kasutatakse suurte andmemassiivide korral, mis ei ole ajakriitilised
  - andmevahetus toimub läbi lühiealiste konkreetsete ühenduste.
- Reaalajas sünkroonitud tsükliline andmevahetus:
  - andmepaketid edastatakse UDP protokolli abil
  - see sünkroonib tsüklilist andmeedastust masina-tootja ja juhusliku arvu tarbijate vahel.

8.7 Teadmiste kontroll

1. Millised on infotasandi võrkude peamised funktsioonid ja omadused?
    a) väikeste andmemassiivide vahetamine
    b) keskmine-suur edastuskiirus
    c) suur edastuskiirus
    d) suurte andmemassiivide vahetamine
    e) terminalide otsejuhtimine

2. Millised on infotasandile iseloomulikud andmevahetustüübid?
    a) asünkroonne vahetus reaalajas
    b) sisend-väljundandmed
    c) reaalajas sünkroonitud tsükliline andmevahetus
    d) üdine andmevahetus
    e) terminalide andmevahetus

3. Millist võrgustruktuuri kasutatakse infotasandil kõige rohkem?
    a) hierarhiline
    b) ühendatud
    c) lineaarne
    d) ring
    e) täht

4. Milline tarkvara on iseloomulik infotasandi võrkudele?
    a) mitte-ajakriitiline
    b) andmete konfigureerimise ja kogumise rakendused
    c) ajakriitiline
    d) äriotsuseid tegevad rakendused
    e) andmebaasi haldussüsteemid

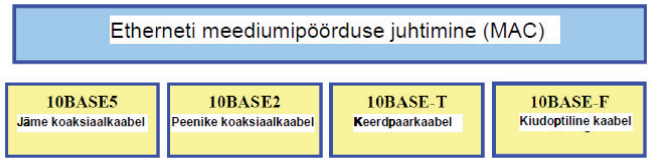
5. Milliseid seadmeid kasutatakse infotasandi võrkudes?
    a) suurarvutid
    b) tööjaamad
    c) andurid
    d) kasutajaliidesed
    e) täiturmehhanismid

9 ETHERNETI VÕRGU SPETSIFIKATSIOON

Ethernet on Xeroxi, Digitali ja Inteli välja töötatud võrguarhitektuur, mis on leidnud tänapäevastes arvutivõrkudes laialdast kasutust. Füüsiliselt on see konfigureeritud siini või tähena ja see kasutab liikluse ja põrke tuvastusega multipöördust (CSMA/CD). Etherneti korral võrguseadmed konkureerivad andmete edastamise loa saamisel. See arhitektuur jaguneb kiiruse järgi:

- **Ethernet** andmeedastuskiirusega 10 Mbit/s
- **kiire Ethernet**, mis töötab kiirusega 100 Mbit/s
- **Gigabit Ethernet**, mille kiirus on üle 1 Gbit/s.

Standardne Ethernet-süsteem töötab edastuskiirusel 10 Mbit/s ja koosneb standardis IEEE 802.3 kirjeldatud neljast linkimiselemendist (Joonis 9.1)



Joonis 9.1 IEEE 802.3 standard

Tabel 9.1 10 Mbit/s Etherneti omaduste kokkuvõte

	10Base5	10Base2	10BaseT	10BaseF	10Broad36
Sidemeedium	Koaksiaal-kaabel DB15	Koaksiaal-kaabel RG-58/U (50 Ω)	Kaks paari UTP kategooria 3/4	Paar optilisi kiude (λ = 850 nm)	Koaksiaal-kaabel RG-6 (75 Ω)
Kaabli diameeter	~13 mm	~6 mm	0,4–0,6 mm	62,5/125 μm	0,4–1,0 mm
Pistikute tüübid	AUI	BNC	RJ-45, MDI või MDI-X	ST või SC	
Andmeedastus, kodeerimise viis	otsene, Manchester	otsene, Manchester	otsene, Manchester	otsene, Manchester	moduleeritud edastus
Füüsiline topoloogia	siin/puu	siin/puu	täht	täht	siin/täht
Segmendi maksimaalne pikkus	500 m	185 m	100 m (kontsentraa-torist sõlmeni)	2000 m (kontsentraa-torist sõlmeni)	1800 m
Sõlmede arv segmendis	100, segasegme nt	30, segasegment	1024 (kogu võrgus), kakspunkt	1024 (kogu võrgus), kakspunkt	
Maksimaalselt kaetud ulatus	2500 m 4 repiiteriga	925 m (4 repiiteriga)	500 m	2 km	3600 m
Eelised	sobib põhivõrgu jaoks	madal hind	lihtne hooldada	sobib hoonete vahel kasutamiseks	pakub maksimaalset ulatust

IEEE identifikaator 10BASE-T sisaldab kolme infosegmenti. Esimene neist, 10, tähendab meediumi kiirust 10 Mbit/s. Sõna BASE esindab signaalile omase põhiühenduse iseloomu. Segmendi tüüpi või selle pikkust näitab identifikaatori kolmas osa. Paksu koaksiaalkaabli korral tähistab 5 segmendi maksimumpikkust. Peenikese koaksiaalkaabli korral näitab 2 pikkust 200 m või pigem 185 m (tabel 9.1) ühe segmendi kohta. Tähed T ja F tähistavad andmeedastusmeediumit, vastavalt keerdpaarkaabel ja optiline kiud. Keerdpaarkaabel on arvutite ühendamiseks kõige enam kasutatav meedium.

9.1 Kiire Ethernet (100 Mbit/s)

1995. aasta juunis esitleti standardit 802.3u (kiire Ethernet), mis võimaldab andmeedastuskiirust kuni 100 Mbit/s. Standardist on erinevaid versioone, nende omadused on esitatud Tabel 9.2.

Tabel 9.2 Kiire Etherneti (100 Mbit/s) omadused

	100BaseTX	**100BaseFX**	**100BaseT4**
Sidemeedium	Kahe paariga STP või UTP kategooria 5	Kiudoptiliste kiudude paar	Neli paari UTP kategooria 3/5
Maksimaalne kaugus kontsentraatorist sõlmeni	100 m	2000 m	100 m
Eelised	Duplekssside kiirusel 100 Mbit/s	Duplekssside kiirusel 100 Mbit/s + suuremad kaugused	Kasutatakse kaablit UTP kategooria 3

100BaseTX standardi korral kasutatakse sõlme ühendamiseks kontsentraatoriga kahte keerdpaarkaabli paari (üks vastuvõtmiseks ja teine edastamiseks). Samal eesmärgil kasutatakse 100BaseFX standardis ainult ühe keerdpaariga kiudoptilist kaablit. 100BaseT4 standard töötati välja suurema kiirusega andmeedastuse lihtsustamiseks telefonikaablite (UTP kategooria 3) kaudu. Selleks on vaja kasutada nelja juhtmepaari.

9.2 Ülikiire Ethernet (Gigabit Ethernet)

1998. aasta juunis esitleti standardit 802.3z kiudoptilise kaabli jaoks ja 1999. aasta märtsis võeti kasutusele standard 802.3ab UTP kategooria 5 kaabli jaoks. Need standardid võimaldavad andmeedastuskiirust 1 Gbit/s. Gigabit Etherneti standard on kombinatsioon 802.3 ja ANSI X3T11 kiudkanali standarditest. Tabelis 9.3 on esitatud Gigabit Etherneti standardi erinevate versioonide omadused.

Tabel 9.3 Gigabit Etherneti omadused

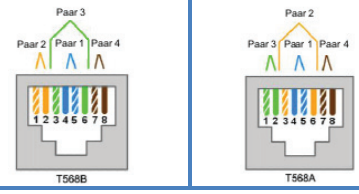
	1000BaseCX (802.3z)	**1000BaseT (802.3ab)**	**1000BaseSX (802.3z)**	**1000BaseLX (802.3z)**
Sidemeedium	150 keerutatud kaabel STP (uut tüüpi kaabel)	UTP kaabel, kategooria 5	Paar optilisi multimood-kiude	Paar optilisi multimood-kiude
Maksimaalne kaugus kontsentraatorist sõlmeni	25 m	100 m	500 m	3 km
Eelised	Ruumi ulatuses	Külgnevad ruumid	Ehitise põhivõrguna	Ehitistevahelise põhivõrguna

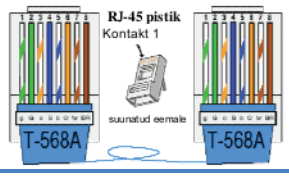
9.3 Edastusmeedium

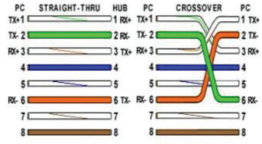
LAN-kaablite hulgas on kõige populaarsem edastusmeedium UTP-kaabel (varjestamata keerdpaarkaabel), mille kaudu saavutatakse võrreldes koaksiaalkaabliga suurem andme-edastuskiirus (Tabel 9.4).

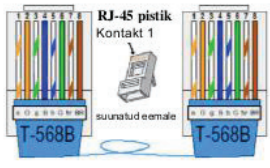
Tabel 9.4 UTP-kaabli ühendusviisid

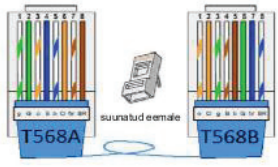
Kontakt	TIA/EIA 568B	TIA/EIA 568A
KONTAKT1	oranž-valge	roheline-valge
KONTAKT2	oranž	roheline
KONTAKT3	roheline-valge	oranž-valge
KONTAKT4	sinine	sinine
KONTAKT5	sinine-valge	sinine-valge
KONTAKT6	oranž	oranž
KONTAKT7	pruun-valge	pruun-valge
KONTAKT8	pruun	pruun











UTP-kaableid toodetakse nende funktsiooni ja suure andmeedastuskiiruse kohaselt erinevate arvutivõrgu kategooriate jaoks. Juhtmetevaheliste häiringute vähendamiseks/ vältimiseks tehakse transpositsioon, mille põhiidee seisneb selles, et häiring tekitab juhtmepaarides (faasis ja nullis) identsed voolud, mis neutraliseerivad üksteist. Samal põhjusel on igal paaril erinev transpositsioonide arv jooksva meetri kohta. Paare tähistatakse eri värvidega ja kaks värvimustrit on standardiseeritud. EIA/TIA T568A ja T568B.

Kaableid ühendatakse kahe mustri abil: otse ja risti. Kui mõlema kaabliotsa juhtmed on paigutatud rea A või B järgi, siis on kaabel otse. Kui ühes otsas on rida A ja teises B, siis on kaabel risti. Otsekaabliga ühendatakse arvuti ja kommutaator või arvuti ja jaotur,

ristkaabliga ühendatakse arvuti ja arvuti, kommutaator ja kommutaator või jaotur ja jaotur. Kaabli nimetuses olev FL (100BaseFL) tähendab kiudlinki (*fiber link*). Neid kaableid kasutatakse moduleerimata signaalide edastamiseks mööda kiudoptilist kiudu, milles nullid ja ühed edastatakse elektrisignaalide asemel valgusimpulssidega. Erinevalt vask-juhtmetest on need pika maa taha edastamise korral häiringute ja signaalitugevuse kao eest kaitstud. FL-i märgistust kandev kaablisegment võib olla kuni 2000 m pikk.

9.4 Sideprotokollid$_S$

Seda tüüpi protokoll on reeglistik, mis juhib kahe identse ja ühel funktsioonitasandil oleva võrgusõlme vahelist dialoogi. Need reeglid määravad liidestamise ja ühenduse vabastamise protseduurid, andmevormingud, plokiandmete edastamise jada, hooldusprotseduurid andmete taastamiseks vigade korral jne. Sideprotokollid transpordivad ja marsruudivad andmeid integreeritud võrgus ja pakuvad eri tüüpi teenuseid füüsilisel ja loogilisel tasandil. Sõlmede asukoha määramiseks kasutatakse meediumipöörduse juhtimist (*Media Access Control*, MAC). See aadress koosneb 6 baidist ja on esitatud kuueteistkümnendsüsteemis, näiteks 00:13:D4:8A:5D:83.

Esimesed kolm aadressibaiti vastavad tootja unikaalsele identifikaatorile ja neid jagab IEEE. Kolm viimast baiti tähistab tootja enda reeglite kohaselt. Ethernetis jagatakse andmeid pakettideks ja edastatakse kaadritena. Etherneti kaadrite formaate on mitu:

- versioon 1 (ei ole enam kasutusel);
- Etherneti versioon 2 või Ethernet-kaader II, mida nimetatakse ka DIX-iks (selle algsete arendajate DEC-i, Inteli ja Xeroxi esitähtedest koosnev lühend);
- Novell – IEEE 802.3 sisemine modifikatsioon ilma loogilise lüli juhtimiskihita (*Logical Link Control*, LLC);
- kaader IEEE 802.3 LLC;
- kaader IEEE 802.2 LLC/SNAP;
- kaader IEEE 802.12, mis vastab formaadile 100VG-AnyLAN.

Etherneti kaadri **Ethernet II DIX kaader** (Joonis 9.2) pikkus võib olla 64–1518 baiti, sest kaadrisse sisestatud teenuseinfo on minimaalselt 18 baiti.

64 bitti	48 bitti		48 bitti	16 bitti	368–12 000 bitti (46–1500 baiti)	32 bitti
Eelsignaal	Individuaalse/grupi aadressi bitt	Siht-aadress	Lähte-aadress	Tüüp	Andmed	Kaadri kontroll-number

56 bitti	8 bitti	48 bitti			48 bitti	16 bitti	368–12 000 bitti (46–1500 baiti)	32 bitti
Eelsignaal	SFD	Individuaalse/grupi aadressi bitt	Globaalselt/lokaalselt administreeritud aadressi bitt	Siht-aadress	Lähte-aadress	Pikkus	LLC/andmed	Kaadri kontroll-number

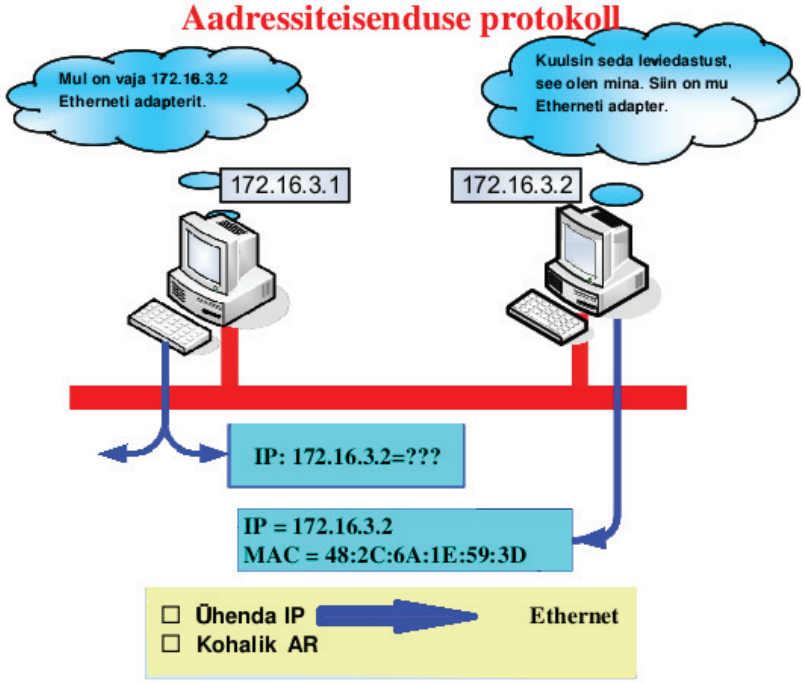
Joonis 9.2 Ethernet II DIX kaader. Kaadri formaat

Sel põhjusel on andmeid ühes Etherneti kaadris 46–1500 baiti. Võrkudes kasutatakse kahte, mõningase formaadierinevusega Etherneti kaadrit: Ethernet II DIX kaader ja IEEE 802.3/LLC kaader. Viimast kasutatakse rohkem.

Andmepaketi edastamise ajal näeb iga Etherneti võrgusõlm paketti. Saatja ja vastuvõtja info sisaldub Etherneti protokollis sõnumile lisatud päises. See sõnum võib olla leviedastuse tüüpi ehk ette nähtud kõigi jaoks. Iga Etherneti pakett sisaldab päist, milles on kirjas Etherneti algus- ja lõppaadress, kasutatud võrguprotokolli tüüp ja see, millisele protokollile tuleb pakett töötlemiseks edastada.

9.5 Aadressiteisenduse protokoll (Address Resolution Protocol, ARP) ja võrguaadressi (sõlme) pöörd-aadressiteisenduse protokoll (Reverse Address Resolution Protocol, RARP)

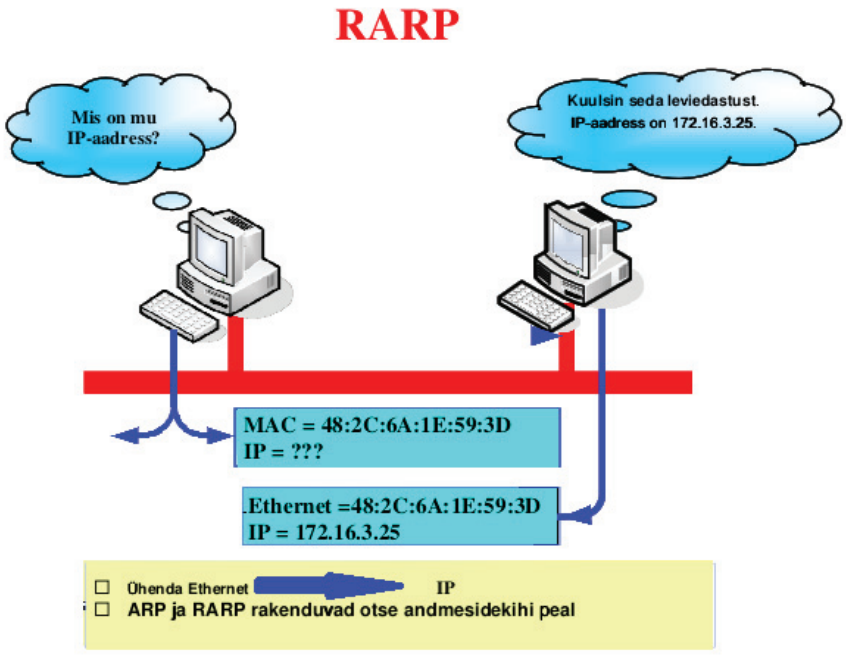
Üks peamisi probleeme võrguühenduste rakendamise korral tööjaamade vahel, mis on kohtvõrkude konfiguratsioonis, on võrgu ja kanali aadressidevaheline interaktsioon. Globaalne andmeedastus toimub üle võrguaadressi, samas kui võrgupakett edastatakse kohtvõrku spetsiifilise kanali protokolli kohaselt.



Joonis 9.3 Aadressiteisenduse protokolli (ARP) funktsioonid

Aadressiteisenduse protokolli (ARP) kasutatakse kohtvõrgu seadmetele omistatud IP-aadresside ja MAC-aadresside vastavustabeli koostamiseks. See tabel võimaldab luua andmeedastusmeediumil põhineva võrguühenduse kohtvõrgus (LAN), näiteks IEEE 802.3 Ethernetil. Kui sihtmärgiks olev IP-aadress on teada, tuleb võrguühenduse loomiseks leida ARP tabelist sellele vastav MAC-aadress. Kui sellist seost ARP tabelist ei leita, saadetakse

sihtaadressiga IP datagramm kutsutud sihtaadressile, mis on pakitud leviedastuse MAC-kaadrisse. See kaader jõuab kõigi kohtvõrgus olevate MAC-aadressideni ja selle tööjaamani, mille IP-aadress on sihtmärgi IP-aadress. Tööjaam kinnitab datagrammi, sest kanalikihis on moodustatud kaader kanali sihtaadressiga, võrguühenduse algataja aadressiga, lähtekanali aadressiga ja kutsutud MAC-aadressiga.



Joonis 9.4 Pöörd-aadressiteisenduse protokolli (RARP) funktsioonid

Kinnitus jõuab algatanud tööjaama ja selle ARP tabel uuendatakse puuduva MAC-aadressiga, luues sellega võimaluse kasutada MAC-i edastusmeediumil põhinevat võrguühendust – vt joonist (Joonis 9.3).

RARP on funktsionaalsuse poolest ARP-i vastand. Selle protokolliga lahendatakse vastupidine ülesanne, et leida teadaoleva MAC-aadressi abil sellele vastav IP-aadress. Sarnase lähenemisega saadetakse leviedastuse IP-datagramm võrgutasandil ja selle kinnituseks saadakse vastav IP-aadress. Vt joonist (Joonis 9.4).

9.6 Protokollid TCP/IP

Edastusohje protokollistik internetiprotokolli peal (TCP/IP) on Etherneti võrgu baasprotokoll. TCP/IP on võrkudes kasutataval tarkvaral põhinev sideprotokoll. See on kahe protokolli – TCP ja IP – kombinatsioon, mis pakub andmete edastamise meetodit ühest arvutist teise.

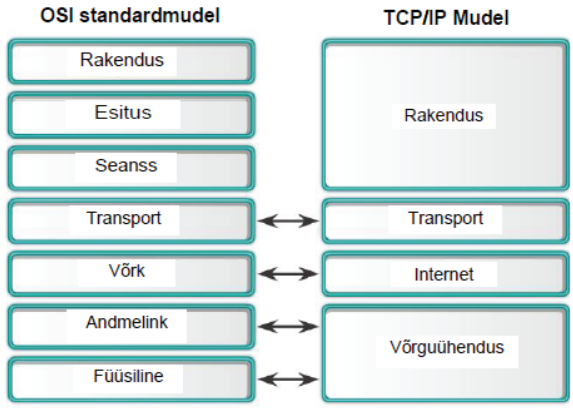
TCP on edastusohje protokoll, mis funktsioneerib transpordikihil ja määrab viisi, kuidas info tuleb andmepakettideks jagada ja mööda sidekanalit edastada. TCP juhib andme-

voogu ja parandab andmeedastusvigu. See paigutab andmepaketid vajalikku järjekorda ja kontrollib edastuse ajal iga andmepaketi vigade puudumist.

TCP/IP-mudel koosneb neljast funktsionaalsest kihist (Joonis 9.5):

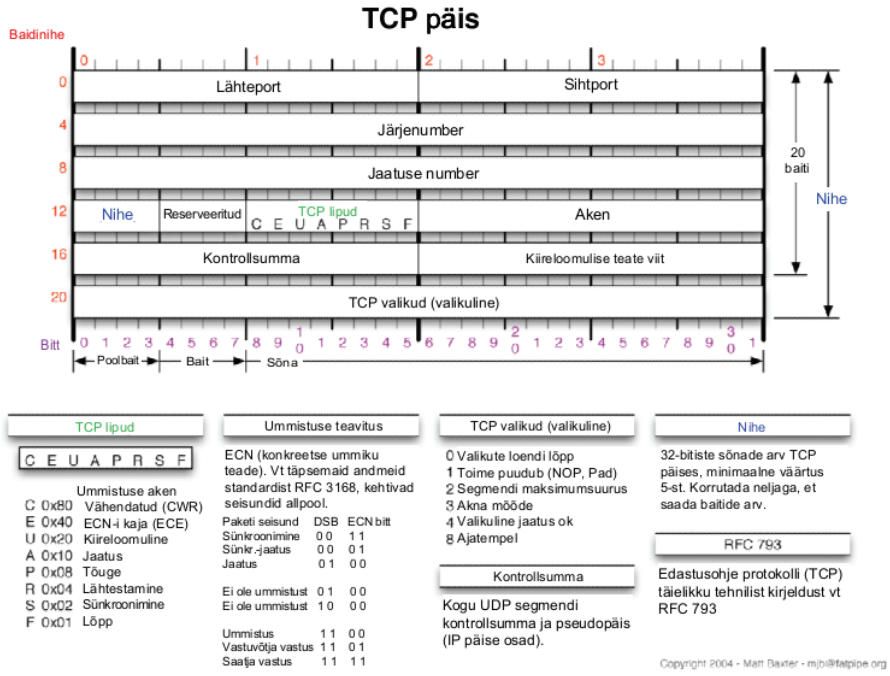
- võrkupääs
- Internet
- punkt-punkt
- protsess/rakendus.

Neil kihtidel on nõrk ühendus OSI mudeli seitsme kihiga, ilma nende funktsionaalsust ohustamata.



Joonis 9.5 TCP/IP kihid OSI mudelis

TCP võimaldab ühendusest sõltuvat andmevahetust ühe või mitme seadme vahel. See on suuteline haldama andmevooge, võimaldab veatõrjet ja pakettide ümberpaigutamist, kui need saabuvad juhuslikus järjekorras.



Joonis 9.6 TCP päise formaat

TCP segmendi edastamine toimub interneti datagrammide formaadis. Datagrammi päise andmeplokk sisaldab erinevaid andmevälju, sealhulgas paketi saatja ja vastuvõtja aadressi. TCP päise ploki formaat on esitatud joonisel (Joonis 9.6).

TCP päise plokk hõlmab minimaalselt 20 oktetti ja sisaldab järgmisi välju:

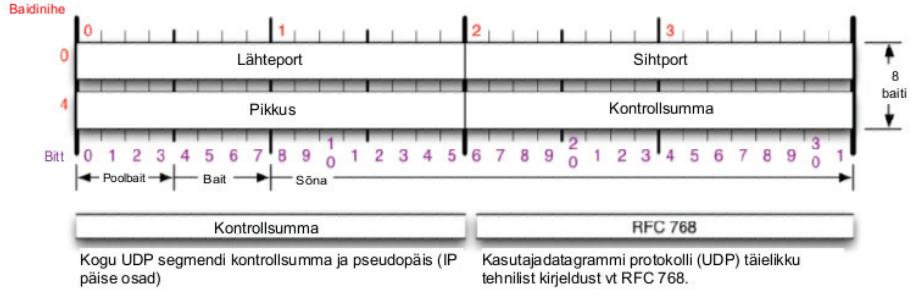
- TCP lähteport (16) – sisaldab pordinumbrit, mis alustas kommunikatsioonijada. Allika port ja IP-aadress moodustavad paketi vastusaadressi.
- TCP sihtport (16) – sisaldab pordinumbrit, millele info on ette nähtud. See port sisaldab vastuvõtva arvuti rakenduse liideseaadressi, millele info on ette nähtud. See port sisaldab vastuvõtva arvuti rakenduse liideseaadressi, kuhu selle paketi andmed edastatakse.
- TCP järjenumber (32) – sisaldab vastuvõtva arvuti kasutatavat järjenumbrit, et taastada killustatud andmed algsele kujule. Dünaamiliselt marsruuditud võrgus on täiesti võimalik, et mõned paketid on läbinud pikema vahemaa ja jõuavad seetõttu kohale alles pärast neid pakette, mis edastati hiljem. Seda välja kasutatakse jadamisi kohaletoimetamise kompenseerimiseks.
- TCP jaatusnumber (32) – TCP kasutab seda 32-bitist välja järgmises prognoositavas segmendis sisalduvate andmete esimese okteti jaatuseks. TCP arvutab selle numbri, suurendades eelmise okteti numbrit iga TCP segmendi oktettide arvu

võrra. Iga jaatusnumbri tuvastamiseks kasutatav number on jaatuspaketi järjenumber.

- Andmenihe (4 bitti) – see väli sisaldab TCP päise suurust mõõdetuna 32-bitistes sõnades.
- Reserveeritud 6-bitine väli – reserveeritud tulevikus kasutamiseks.
- Lipud (6 bitti) – sisaldab kuut ühebitist lippu, mis võimaldavad juhtida funktsioone: kiireloomulise teate väli, olulise välja jaatus, ühenduse lähtestamine, jada sünkroonimine, andmeedastuse lõpetamine.
- Akna suurus (16 bitti) – kasutab vastuvõtja, et näidata allikale TCP segmendist vastuvõetavat andmehulka.
- Kontrollsumma (16 bitti) – see väli sisaldab kontrollsummat veakontrolli jaoks. Allikas arvutab segmendi sisust oleneva kontrollsumma. Vastuvõtja teeb sama arvutuse. Kui sisu on saabunud puutumatuna, peavad mõlema arvutuse vastused olema identsed, mis tõestab andmete kehtivust.
- Lisa – sellele väljale lisatakse nullid, et TCP päise saaks alati jagada 32 bitiks.

9.7 *Kasutajadatagrammi protokoll (User Datagram Protocol, UDP)*

Kasutajadatagrammi protokoll (*User Datagram Protocol*, UDP) on üks kahest transpordikihi protokollist, mida kasutatakse protokollide TCP/IP pinus. UDP võimaldab rakendusprogrammidel edastada nende sõnumeid mööda võrke miinimumnõuetega, mis on seotud protokollide teisendamisega rakenduse tasandilt IP-le. Rakendusprogramm ise kinnitab sõnumi vastuvõtu.



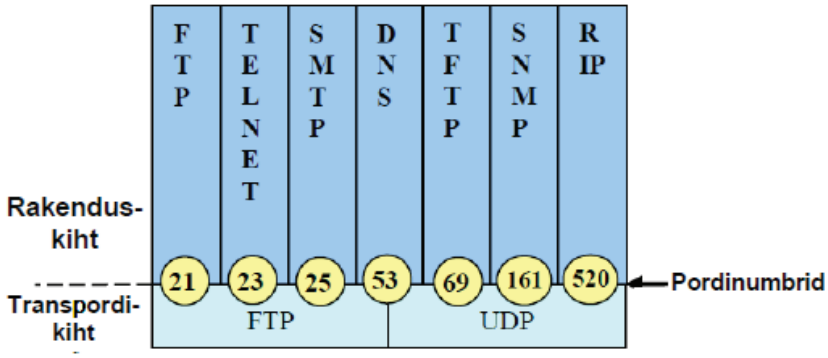
Joonis 9.7 UDP päise formaat

UDP protokolli päisel on järgmine struktuur (Joonis 9.7):

- UDP lähteport (16 bitti) – sisaldab allikaarvuti pordi numbrit. Nii port kui ka allika IP-aadress moodustavad paketi vastusaadressi.
- TCP sihtport (16 bitti) – sisaldab pordinumbrit, mille jaoks on info ette nähtud. See port sisaldab vastuvõtva arvuti rakenduse liideseaadressi, kuhu selle paketi andmed edastatakse.

- UDP kontrollsumma (16 bitti) – sisaldab kontrollsummat. Allikas arvutab segmendi sisust oleneva kontrollsumma. Vastuvõtja teeb sama arvutuse. Kui sisu on saabunud puutumatuna, peavad mõlema arvutuse vastused olema identsed, mis tõestab andmete kehtivust.
- UDP sõnumi pikkus (16 bitti) – see väli informeerib vastuvõtjat sõnumi pikkusest, pakkudes sellega lisamehhanismi sõnumi kehtivuse kontrollimiseks.

Päise pordid määravad UDP protokolli kui multiplekseri, mis võimaldab sõnumite kogumist rakendustest ja saadab neid protokollitasandil. Võrgu kaudu vastastikku toimivad rakendused saavad kasutada erinevaid porte – see fakt ilmneb paketi päisest. TCP ja UDP kasutavad sokli numbri identifikaatoreid usaldusväärseks infovahetuseks protokollide ja kõrgema tasandi teenustega – Joonis 9.8.



Joonis 9.8 TCP ja UDP pordid

Porte/sokleid kasutatakse võrguühenduse multipleksimiseks.
Võrgurakendused on välja töötatud portide jagamiseks tuntud ahela tingimustes, mis on määratletud soovituses RFC-1700. Näiteks eemal paikneva terminali juurdepääsu (rakendusteenus TELNET) on rakendatud standardiseeritud pordi 23 abil. Andmevahetusseanssе, mille jaoks ei ole numbreid määratud, rakendatakse pordinumbri juhusliku valimise põhimõttel kasutamata portide hulgast siis, kui päring saabub.
TCP ja UDP portide jaotus on esitatud allpooltoodud tabelites (Joonis 9.9).
Mõned pordid on reserveeritud nende kahe protokolli jaoks ja rakendused ei saa neid porte kasutada. Portide jaotumise põhimõte on järgmine:

- Pordid numbritega kuni 255 on üldiseks kasutamiseks.
- Pordid numbritega 256–1023 on ette nähtud süsteemirakenduste jaoks.
- Pordid numbritega üle 1023 on defineerimata.

Kokkuvõtteks võib öelda, et peamine funktsionaalne erinevus TCP ja UDP vahel on usaldatavus. TCP on kõrge usaldusväärsusega protokoll, UDP on lihtne mehhanism, mis pakub parima võimaliku andmetega varustatuse.

Reserveeritud TCP pordid					
Kümnend	**Märksõna**	**Kirjeldus**	**Kümnend**	**Märksõna**	**Kirjeldus**
0		Reserveeritud	**67**	BOOTPS	Buudiprotokolli server
1-4		Määramata	**68**	BOOTPC	Buudiprotokolli klient
5	RJE	Tööte kaugsisestus	**69**	TFTP	Triviaalne failiedastusprotokoll
7	ECHO	Kaja	**75**		Mistahes privaatne väljahelistamisteenus
9	DISCARD	Tühistamine	**77**		Mistahes privaatne RJE teenus
11	USERS	Aktiivsed kasutajad	**79**	FINGER	Sõrm
13	DAYTIME	Päevaaeg	**95**	SUPDUP	SUPDUP-i protokoll
15	NETSTAT	Kes on võrgus või NETSTAT	**101**	HOSTNAME	NIC hosti nimeserver
17	QUOTE	Päevatsitaat	**102**	ISO-TSAP	ISO-TSAP
19	CHARGEN	Märgigeneraator	**113**	AUTH	Autentimisteenus
20	FTP-DATA	Failiedastusprotokoll (andmed)	**117**	UUCP-PATH	UUCP teekonnateenus
21	FTP	Failiedastusprotokoll	**123**	NTP	Võrguaja protokoll
23	TELNET	Terminali ühendus	**133-159**		Määramata
25	SMTP	Lihtne meiliedastuse protokoll	**160-223**		Reserveeritud
37	TIME	Aeg	**224-241**		Määramata
39	RLP	Ressursi asukohaprotokoll	**242-255**		Määramata
42	NAME-SERVER	Hosti nimeserver			
43	NICNAME	Kes on			
53	DOMAIN	Domeeninimeserver			

Reserveeritud UDP pordid						
Küm-nend	**Võtmesõna**	**Kirjeldus**		**Küm-nend**	**Võtmesõna**	**Kirjeldus**
0		Reserveeritud		**67**	BOOTPS	Buudiprotokolli server
1-4		Määramata		**68**	BOOTPC	Buudiprotokolli klient
5	RJE	Tööte kaugsisestus		**69**	TFTP	Triviaalne failiedastusprotokoll
7	ECHO	Kaja		**75**		Mistahes privaatne väljahelistamisteenus
9	DISCARD	Tühistamine		**77**		Mistahes privaatne RJE teenus
11	USERS	Aktiivsed kasutajad		**79**	FINGER	Sõrm
13	DAYTIME	Päevaaeg		**123**	NTP	Võrguaja protokoll
15	NETSTAT	Kes on võrgus või NETSTAT		**133-159**		Määramata
17	QUOTE	Päevatsitaat		**160-223**		Reserveeritud
19	CHARGEN	Märgigeneraator		**224-241**		Määramata
20	FTP-DATA	Failiedastusprotokoll (andmed)		**242-255**		Määramata
21	FTP	Failiedastusprotokoll				
23	TELNET	Terminali ühendus				
25	SMTP	Lihtne meiliedastuse protokoll				
37	TIME	Kellaaeg				
39	RLP	Ressursi asukohaprotokoll				
42	NAME-SERVER	Hosti nimeserver				
43	NICNAME	Kes on				
53	DOMAIN	Domeeninimeserver				

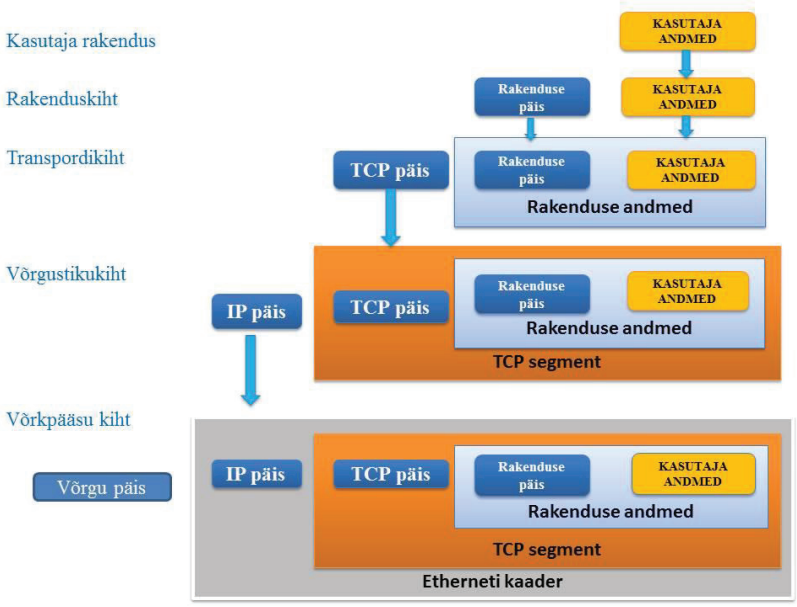
Joonis 9.9 Portide jaotus

9.8 Internetiprotokoll IP

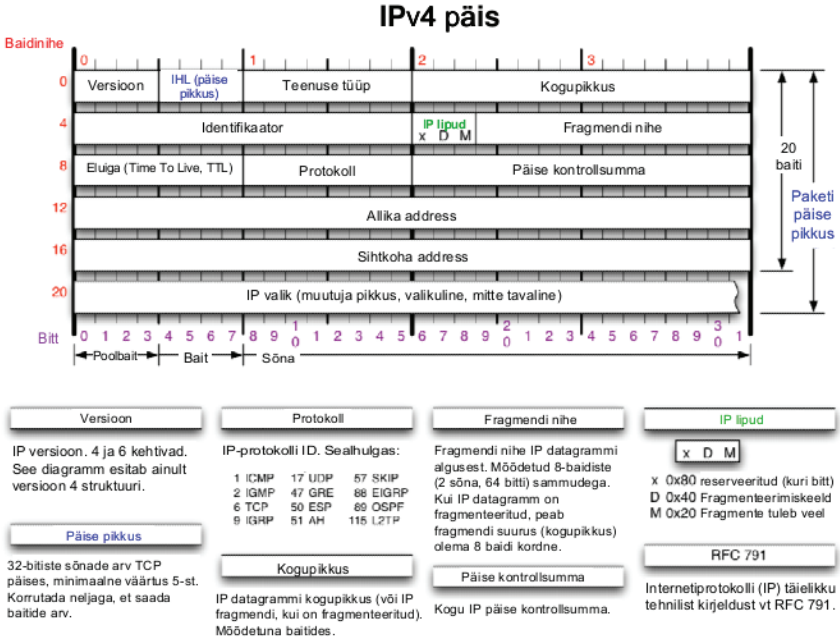
Internetiprotokoll tagab andmepakettide edastamise allikast vastuvõtjani omavahel ühendatud võrkude grupi abil. Vastuvõtmise kinnitamise, edastuse ohjamise ja edastatud pakettide järjekorra salvestamiseks ei ole IP-s funktsiooni. Selles mõttes ei võimalda IP usaldusväärset kohalejõudmise kinnitusega andmeedastust (Joonis 9.10). Kõik kinnituse saamisega seotud funktsioonid on turvatud kõrgema tasandi protokollidega. See toetab hierarhilist aadresseerimisloogikat ja tagab ülemaailmse datagrammide vahetuse.

Internetiprotokoll töötleb igat paketti kui eraldiseisvat objekti, mis on muudest pakettidest sõltumatu. Pakettide töötlemise korral kontrollib internetiprotokoll vastuvõtja IP-aadressi ja määrab seejärel marsruutimise protokollide abil parima teekonna nende edastamiseks. Mõnikord sooritab internetiprotokoll pakettide suuruse teisenduse. Näiteks juhul, kui pakett on saabunud võrgust, mis põhineb Ethernetil (kaadri suurus on 1500 baiti) ja tuleb saata standardile FDDI vastavasse võrku (mille kaadri suurus on 4470 baiti), peab IP ühendama mitu Etherneti kaadrit kokku üheks FDDI kaadriks või vastassuunalise andmeedastuse korral jaotama FDDI kaadri mitmeks Etherneti kaadriks.

Tänapäeval kasutatakse kahte internetiprotokolli: IP versioon 4 (IPv4) ja IP versioon 6 (IPv6). IPv4 standardile vastavad IP-aadressid on 32-bitised numbrid. Mugavuse huvides kirjutatakse need punktiga eraldatud nelja baidina (nt 194.145.63.12). Protokolli päiseplokki on kujutatud Joonis 9.11.

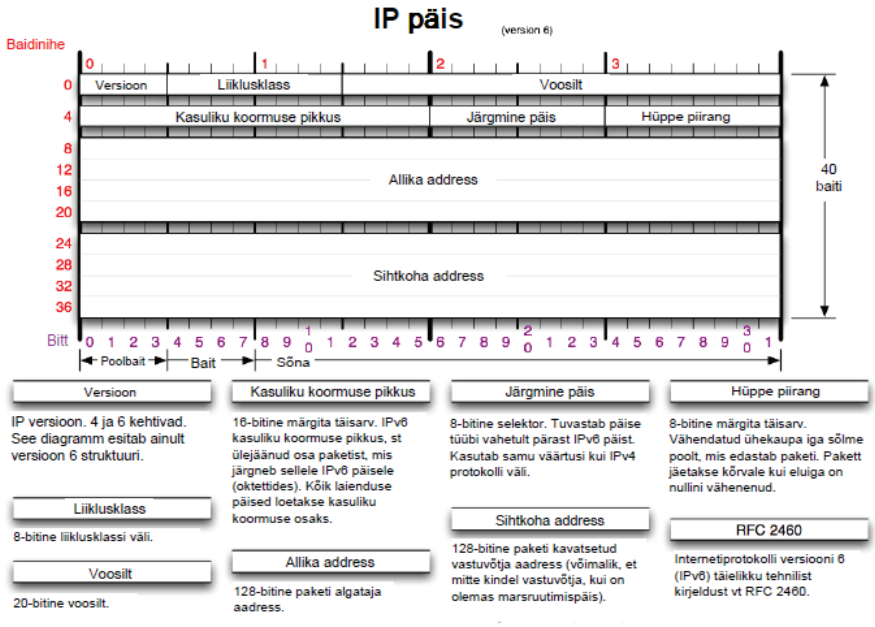


Joonis 9.10 Andmete kapseldus TCP/IP kaadris



Joonis 9.11 IPv4 päis

Kõik IPv6 standardile vastavad IP-aadressid on 128-bitised numbrid. Need IP-aadressid esitatakse kaheksa 16-bitise täisarvuna, mis on eraldatud kooloniga. Iga numbri kõrgemas järgus on keelatud omistada nulle. IPv6 saab esitada IPv4-st tuntud standardsel moel. Selle protokolli päiseplokk on esitatud joonisel (Joonis 9.12).



Joonis 9.12 IPv6 päis

9.9 Teadmiste kontroll

1. Millised väited internetiprotokolli (IP) kohta on tõesed?
   - **a)** IP usaldusväärsuse parandamiseks kasutatakse ICMP-d (veakontrolli).
   - b) Internetiprotokolli kasutatakse arvuti adresseerimiseks.
   - c) Igas edastatud infopaketis on viidatud sõnumit edastava arvuti IP-aadress.
   - d) IP-aadress koosneb neljast numbrirühmast, mis on eraldatud punktidega.
2. Milliste IEEE 802.3 standardis määratletud linkimissegmentide põhjal on ehitatud Etherneti standardsüsteem?
   - a) 10BASE5 jäme koaksiaalkaabel
   - b) 10BASE2 peenike koaksiaalkaabel
   - c) 10BASE-T keerdpaarkaabel
   - d) 10BASE-F kiudoptiline kaabel
   - e) 10BASE-E pikendatud
3. Info saatmine konkreetsesse arvutivõrguga ühendatud arvutisse toimub … olemasolu korral:
   - a) tähe, ringi ja siini topoloogiaga arvutivõrgud
   - b) kohalikud ja laia ulatusega arvutivõrgud
   - c) server/host ja tööjaamad
   - d) telefoni-, kaabli-, traadita, satelliit- ja segakeskkond
   - e) IP-aadressid ja DNS-aadressid
4. Mitut funktsionaalset kihti on TCP/IP mudelis?
   - a) 2
   - b) 3
   - c) 4
   - d) 5
   - e) 7
5. TCP on edastusohje protokoll, mis funktsioneerib:
   - a) transpordikihil
   - b) füüsilisel kihil
   - c) seansikihil
   - d) võrgukihil
   - e) võrgustikukihil

10 TRAADITA SIDE TÖÖSTUSLIKUS KESKKONNAS

10.1 Traadita võrkude sisu ja taust

Traadita kohtvõrgud põhinevad raadiolainetehnoloogial. Need on ette nähtud keskmiste andmepakettide edastamiseks ning mitmesuguste jälgimise, korrastamise ja haldamisega seotud ülesannete täitmiseks.

Traadita andmesidet iseloomustab:

- Suur paindlikkus võrgu topoloogia ülesseadmise korral.
- Puuduvad juhtmed, nii et edastusmeediumi mehaanilist kulumist ei toimu.
- Laiendatud mobiilsus ja kõigi võrguseadmete vaba liikumine.
- Otspunktide vaheline väiksem võrguliiklus tänu üksikute süsteemisegmentide vahelisele kõrgema tasandi mitte-koostoimele.
- Mõistlik andmeedastuskiirus.
- Ühilduvus tööstuslike automatiseerimisstandarditega nagu DeviceNet, Ethernet jne.
- Kõigi võrguseadmete lihtne ja kiire käivitamine jne.

10.2 Traadita võrkude rühmad

Tänapäevane traadita kohtvõrk (WLAN) suhtleb tavaliselt üle vahemaa, mis varieerub ühest kuni mõnesaja meetrini ja edastab ainult digitaalseid andmeid (Tabel 10.1). Maksimaalse läbilaskevõime alusel saab tehnoloogiad jaotada kolme rühma.

10.2.1 Suure läbilaskevõimega tehnoloogia

Esimene rühm on suure läbilaskevõimega tehnoloogia, mille maksimaalne kiirus on vähemalt 12 Mbit/s. Tehnoloogiat HIPERLAN/2 kasutatakse andmete, kõnede ja piltide edastamiseks tööstus-, haldus- ja eluhoonetes. Selle tehnoloogia abil on realiseeritud kärglühiulatusega WLAN, mis peaks ulatuma kõrgema tasandi tööstusliku jagamiseni.

Tabel 10.1 Traadita tehnoloogia omadused

№	*Võrk*	*Standard*	*Maksimaalne andmekiirus, ribalaius*	*Ülekande ulatus*	*Sagedus*	*Rühm*
1	HIPERLAN/2	ETSI Project BRAN	54 Mbit/s	-	5 GHz	Suure läbilaskevõimega tehnoloogia
2	UWB	IEEE 802.15.3a	100 Mbit/s	10 m	3,1–10,6 GHz	
3	Wi-Fi	IEEE 802.11a	54 Mbit/s	50 m	5 GHz	
4	Wi-Fi	IEEE 802.11b	11 Mbit/s	50 m	2,4 GHz	Keskmise läbilaskevõimega tehnoloogia
5	HomeRF	N/A	10 Mbit/s	5 m	2,4 GHz	
6	Bluetooth	IEEE 802.15.1	2 Mbit/s	10 m	2,45 GHz	
8	ZigBee	IEEE 802.15.4	250 kbit/s	30–500 m	2,4 GHz, 868, 915 MHz	Väikese läbilaskevõimega tehnoloogia
7	Z-Wave	N/A	40 kbit/s	30 m	2,4 GHz	
9	EnOcean	N/A	120 kbit/s	300 m	868,3 MHz	
10	DECT	N/A	32 kbit/s	100 m	1,96 GHz	
11	KONNEX	KNX;EN50090	38,4 kbit/s	-	868 MHz	

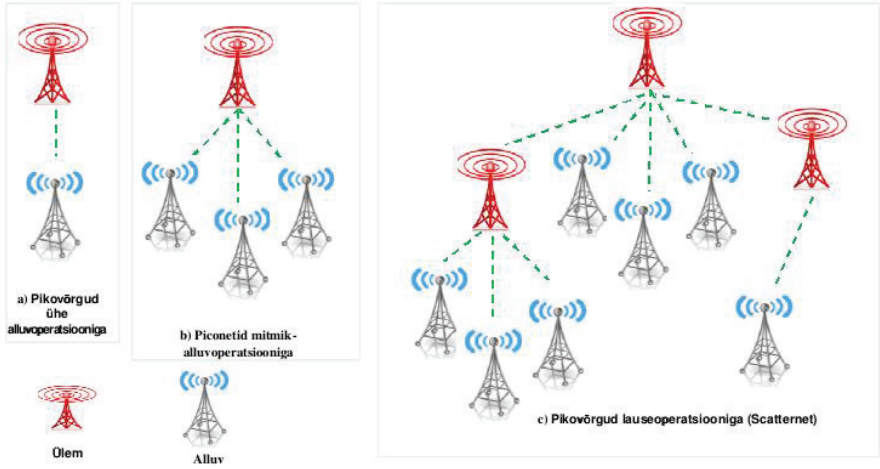
Definitsiooni kohaselt on ultralairibatehnoloogia (*Ultra Wideband Technology*, UWB) kanali laius vähemalt 20% selle keskmisest sagedusest ja mitte vähem kui 500 MHz. Wi-Fi (*Wireless Fidelity,* raadiokohtvõrk) tehnoloogia on ette nähtud võrkudele, mis toimivad IEEE 802.11 standardi kohaselt, mille jaoks termin Wi-Fi tähendab sama, mis Ethernet tähendab IEEE 802.3 standarditele. Sellest tehnoloogiast on kaks versiooni, kuid ainult see, mis vastab IEEE802.11a standardile, võimaldab suurt kiirust. Seda iseloomustab 300 MHz sagedusala 15 kanaliga, igas 52 kandjat.

10.2.2 Keskmise läbilaskevõimega tehnoloogia

Keskmise läbilaskevõimega tehnoloogiad toimivad kiirustel vahemikus 1–11 Mbit/s. Üldiselt kasutatakse neid arvutivõrkudes, personaalvõrkudes (*Personal Area Network*, PAN) ja avalikes juurdepääsusüsteemides (*Public Access System*, PAS). Siia kuulub Wi-Fi teine versioon (IEEE 802.11b standardi kohaselt), mille sagedusala on 80 MHz ja millel on 14 kanalit. Koduraadiovõrk (*HomeRF technology*) viitab selle põhifunktsioonile. Sellel tehnoloogial on mõned ühendatud seadmed, võime suhelda muud tüüpi võrkudega ja rakendada osalisi võrgufunktsioone siis, kui arvuti on välja lülitatud. Külgnevate võrkude olemasolu, näiteks tehase töökodades, ei häiri nendega seotud tööd, sest seadmetel on 24-kohaline identifikaator.

10.2.3 Bluetooth-tehnoloogia

Bluetooth on mistahes tüüpi traadita ühenduste tehnoloogia. See on ette nähtud sülearvutite, pihuseadmete, mobiiltelefonide ja muude autonoomse toitega mobiilsete süsteemide vaheliseks raadiosideks väikeste ja ökonoomsete seadmete abil (Joonis 10.1).
Seda iseloomustab saatjate madal väljundvõimsus Po, mis on väikese leviulatuse põhjus ja üks eeldustest, mis tagab lähestikku paigaldatud võrkude soovimatu mõju üksteisele. Kasutatakse kolme klassi. Klass 1: Po = 100 mW ja leviulatus 100 m, klass 2: Po = 2,5 mW ja leviulatus 20 m ning klass 3: Po = 1 mW ja leviulatus 10 m.
Bluetooth-seadmed kasutavad sagedust 2,4 GHz koos Wi-Fi/IEEE 802.11b seadmetega. Häiringute vältimiseks Wi-Figa kasutab Bluetooth signaali edastusmeetodit, mida kutsutakse *sagedushüplemisega spektrilaotuseks (Frequency-Hopping Spread Spectrum),* mis lülitab täpse sageduse Bluetoothi sessiooni ajal 1600 korda sekundis mööda Bluetoothi 79 kanalit. Bluetooth on välja töötatud spetsiaalsete ajutiste võrkude jaoks, kus kaks seadet suhtlevad ainult selle aja vältel, mis on neile vajalik andmete edastamiseks. Seejärel ühendus katkestatakse.
Bluetooth-seadmed ühenduvad teineteisega kohe, kui satuvad saatja-vastuvõtja leviulatusse ja ühenduse loomisega, autentimisega jne tegeleb tarkvara.
Tavaliselt on Bluetoothi võrgud ***ülem-alluv***-tüüpi, kus alluvseadmeid võib olla kuni 7. Neist eraldi võib olla veel piiramatu arv passiivseid alluvseadmeid, mis on ülemseadmega ühenduse loonud ja ootavad vaba ruumi, et andmeid edastada. Seda tüüpi seadmetevahelist ühendust nimetatakse **pikovõrguks** (joonis 10.1a).
Pikovõrgu ühenduse kaadris saab olla ainult üks ülemseade. Vajaduse korral saab ülemseadme külge ühendatud alluvseade muuta oma seisundi ülemseadmeks, moodustades sellega oma pikovõrgu struktuuri. Seda tüüpi liitstruktuuri nimetatakse Scatternetiks (joonis 10.1c), milles iga seade saab olla nii ülem kui ka alluv, olenevalt konkreetsest olukorrast ja selle seadme kohast üldstruktuuris.



Joonis 10.1 Bluetoothi võrgu topoloogia

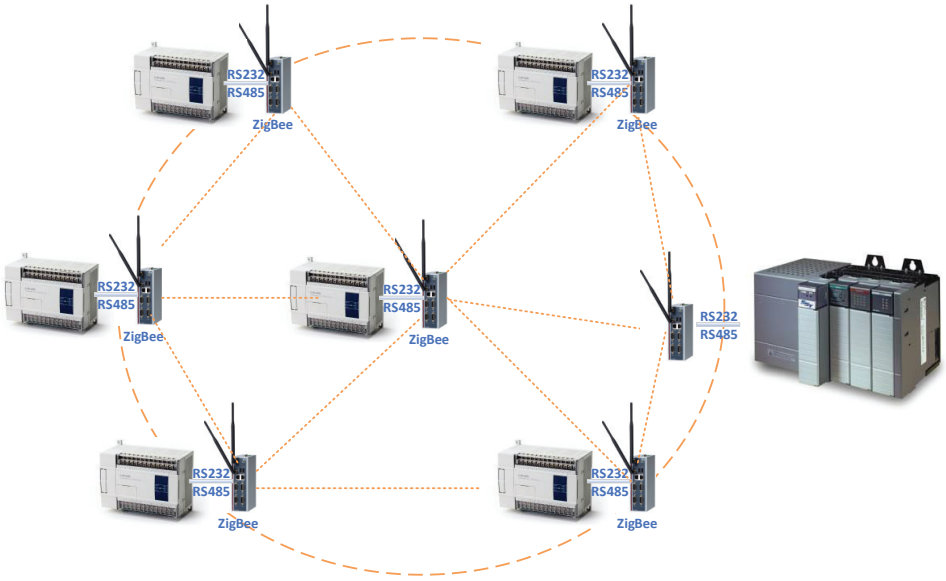
Seadme dubleerimise või muu soovimatu kõrvalekalde vältimiseks suhtleb iga seade teistega erineval ühenduskanalil, erineval sagedusel ja erineva hüplemisparameetriga. Sagedushüplemine on perioodiline sageduse muutumine, mille määrab sagedushüplemise järjekorra parameeter. Algselt sooritab iga mingis ruumis paiknev Bluetooth-seade ühenduskanalite otsingu seadmete tuvastamiseks. Ühendus luuakse või mitte – olenevalt sellest, millisel režiimil leitud seadmed on.

10.2.4 Väikese läbilaskevõimega tehnoloogiad

Need on ette nähtud elektrooniliste seadmete juhtimiseks tööstuslikus ja kodukeskkonnas. Keskmine andmeedastuskiirus on kuni mõnisada kbit/s, pakkudes vastutasuks muid eelised: madal hind ja kasutatavate seadmete väike energiakulu. Mõned sellise tehnoloogia näited on esitatud allpool.

10.2.5 ZigBee võrgud

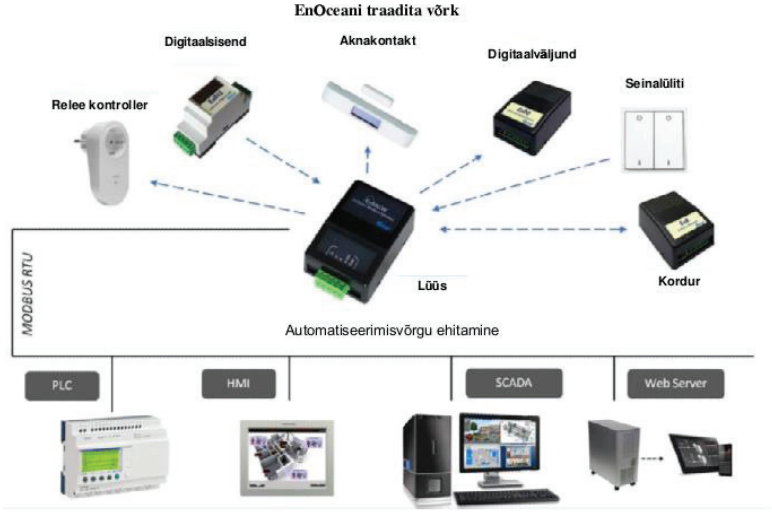
Traadita võrku ZigBee iseloomustab ainulaadne iseseadistus ja isetaastumine sel hetkel, kui eraldiseisvad võrguseadmed lülituvad võrku ja identifitseerivad üksteist. Mõne sellise seadme vea korral taastab võrk ennast ise ja alustab andmete edastamist mööda uut marsruuti. Andmeid, sealhulgas võrgu teenuseinfot, edastatakse kiirusel 250 kbit/s. Traadita võrk ZigBee töötab sageduskanalite vahemikus 868 MHz, 915 MHz ja 2,4 GHz. Sisetingimustes on ulatus mõnikümmend meetrit ja väljaspool hooneid paarsada meetrit.



Joonis 10.2 ZigBee ühenduse näide

10.2.6 EnOcean

See traadita tehnoloogia sarnaneb ZigBee'le ja selle töötas välja EnOcean GmbH, mille asutas 2001. aastal Siemens AG.

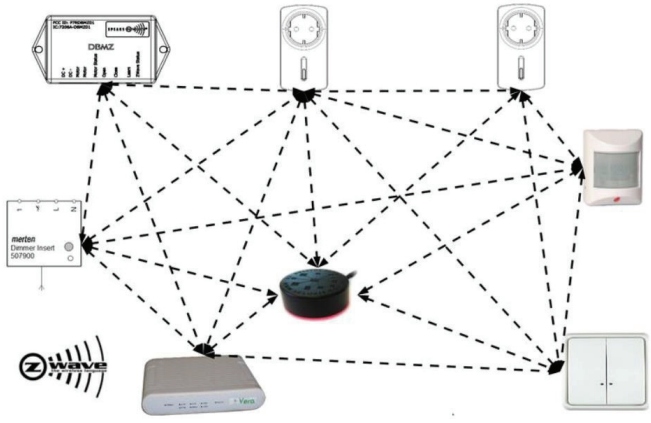


Joonis 10.3 EnOceani sidevõrgu kasutamine

See on täiesti keskkonnasäästlik, sest sellesse kuuluvad seadmed, andurid ja saatjad ei vaja töötamiseks akusid. Need on iselaaduvad, kasutades energia laadimiseks ümbritsevast keskkonnast erinevaid meetodeid. Seda standardit kasutatakse valgustussüsteemides, turvaandurites, erinevat tüüpi meditsiiniseadmetes ja tööstuslikes süsteemides (Joonis 10.3). EnOceani leviulatus on umbes 300 meetrit ja selle andmeedastuskiirus on kuni 120 kbit/s.

10.2.7 Z-Wave

Z-Wave on traadita andmeedastuse protokoll, mis edastab andmeid üle lühikese vahemaa ja minimaalse energiakuluga (Joonis 10.4).



Joonis 10.4 Z-Wave'i võrgu näide

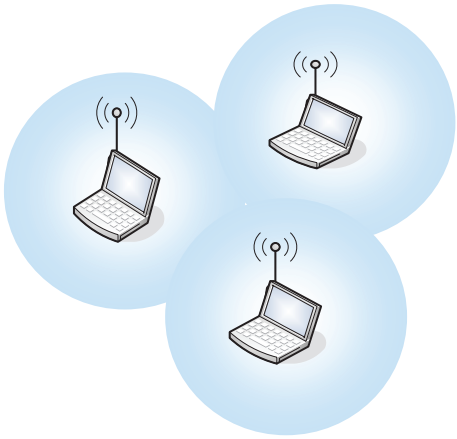
Z-Wave'i protokollil põhinevad seadmed kasutavad suhteliselt väikest kiirust, umbes 40 kbit/s 30 meetri ulatuses ja töötavad ühe akuga kauem kui aasta.
Üldiselt kasutatakse seda tehnoloogiat nutikodu lahendustes, eriti valgustuse ja kütte juhtimissüsteemides, tulekahjuandurites, videovalve- ja kaitsesüsteemides. Z-Wave võimaldab kõiki neid andurite ja seadmete võrke juhtida ühe kaugjuhtimispuldi abil.

10.3 Traadita võrkude loogilised topoloogiad

Traadita võrke ehitatakse erinevate loogiliste topoloogiate järgi**.**

10.3.1 AD-HOC

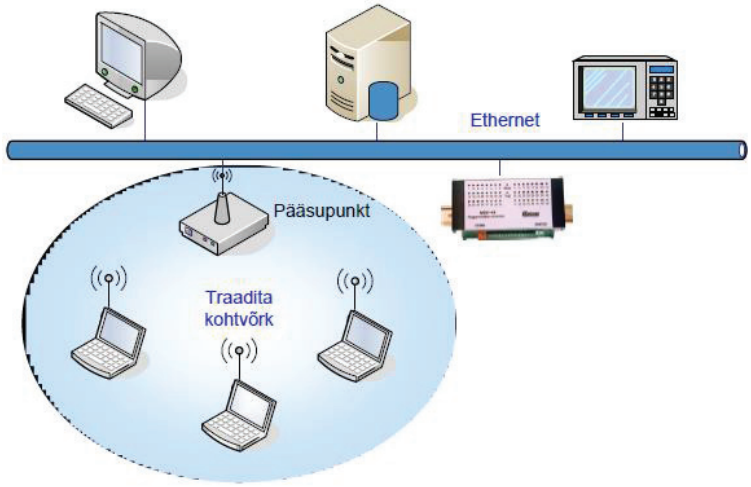
Sellel režiimil (Joonis 10.5), mida kasutatakse kõige enam mobiiliseadmete omavaheliseks ühendamiseks, ei ole vaja, et mõni traadita võrguseade kanali juurdepääsu sünkrooniks. Seda iseloomustab väike jõudlus ja võimalik kokkupõrgete tekkimine.



Joonis 10.5 Iseorganiseeruv võrdvõrgu tüüpi traadita võrk (AD-HOC)

10.3.2 Pääsupunkt-klient

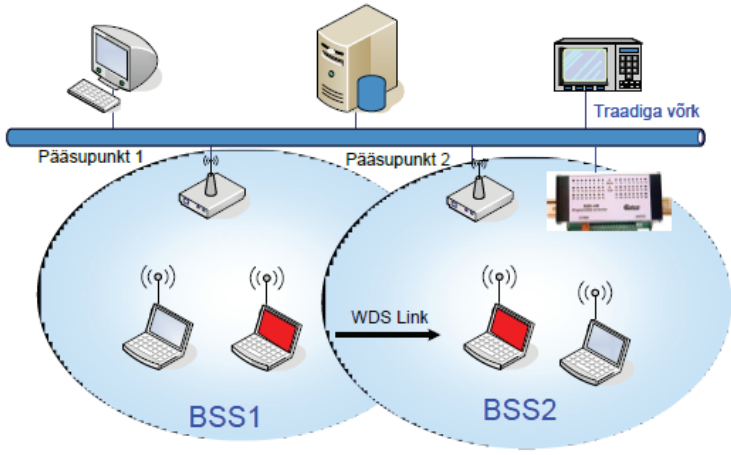
See on praktikas kõige enam kasutatav topoloogia seadmete ühendamiseks traadita võrku (Joonis 10.6). Suur hulk mobiilseadmeid kasutab ühe tugijaama (*base station*, BS), mida nimetatakse ka pääsupunktiks (*Access Point*, AP) ja mis juhib/haldab kõiki sellega seotud kliente. Tugijaam teatab kliendile, millist kanalit andmete edastamiseks kasutada ja millal. Olenevalt omistatud reeglitest võivad mõned kliendid saada teiste klientide ees prioriteete (QoS). Nii-öelda varjatud terminalidelt kokkupõrkeohtu ei ole, sest kõik kliendid peavad võrku pääsemiseks kasutama pääsupunkti. Teisisõnu – pääsupunkt näeb kõiki kliente, kuid nemad üksteist ei näe.



Joonis 10.6 Iseorganiseeruv pääsupunkt-kliendi tüüpi traadita võrk

10.3.3 Traadita jaotussüsteem (*Wireless Distribution System*, WDS)

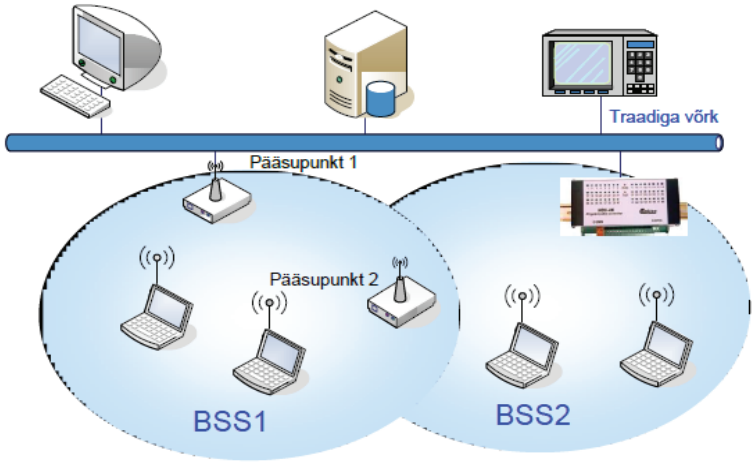
Traadita jaotussüsteemid kasutavad pääsupunkt-kliendi topoloogiat, kus iga pääsupunkt moodustab kuuldava tsooni (Joonis 10.7). Erinevus pääsupunkt-kliendi topoloogiast seisneb erinevate pääsupunktide traadita sides, mis võimaldab juurdepääsu viitevõrku. Kõik pääsupunktid peavad töötama samal raadiokanalil ja neil peab olema WDS-võrgu moodustavate muude MAC-aadresside loend.



Joonis 10.7 Traadita jaotussüsteem (WDS)

10.3.4 Repiiter

Repiiter kasutab sama kanalit kui pääsupunkt, mis võimaldab juurdepääsu viitevõrku (Joonis 10.8).

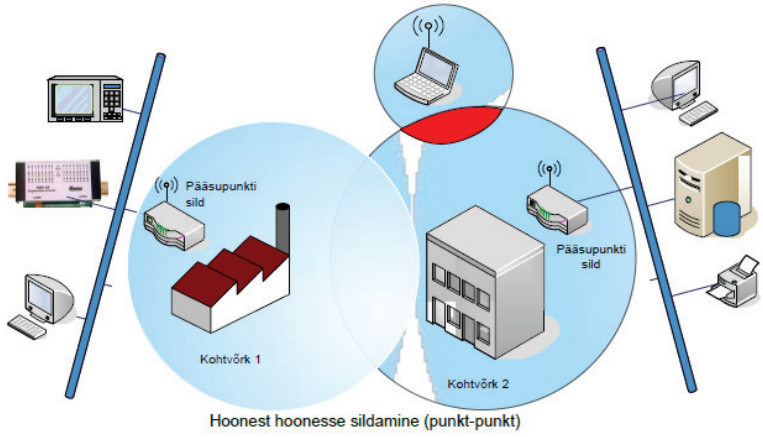


Joonis 10.8 Iseorganiseeruv traadita võrk repiiteriga

Repiiterile on antud MAC-aadress, mis võimaldab läbipaistvat viidatud pääsupunkti imiteerimist kaugtsoonis. Viidatud pääsupunkt on kaugtsoonis teada oma algse nime ja parameetritega, ainus erinevus on MAC-aadress ja kaugvõrgus on see MAC-aadress repiiteri oma.

10.3.5 Sild

Sild on ette nähtud kahe võrgusegmendi läbipaistva ühenduse loomiseks, mis võimaldab kohtvõrkude traadita ühendust eemalolevates kontorites (Joonis 10.9). Traadita ühendus on võimalik ainult nende kahe seadme vahel, mis töötavad pääsupunkt-silla (*AP Bridge*) režiimil. Nii annavad need läbipaistvalt üle iga paketi ühest lokaalsest kohtvõrgusegmendist eemalolevasse segmenti.



Joonis 10.9 Iseorganiseeruv traadita võrk sillaga

10.4 Andmekaitse

Kõikides traadita tehnoloogiates on andmete kaitsmiseks kasutusel ühel või teisel viisil kodeerimine. Standardile IEEE 802.11 vastavad võrgud kasutavad andmete kodeerimiseks WEP-krüpteerimisfunktsioone ja olenevalt seadme klassist võib krüpteerimine olla 64-bitine või 128-bitine. Bluetoothil on kolm andmekaitse viisi, kus enim kaitstud on Security Mode 3 (viidatasandil täidetud turvalisus). See töötab seansivõtmetega, mis luuakse kahe seadme ühendamise käigus ja kasutatakse ka kahe seadme vahelises linkimise, identifitseerimise ja andmeedastuse protsessis.

802.11b tagab andmehalduse MAC-i tasemel ja haldab ka krüpteerimismehhanisme, nt andmeturbeprotokolli WEP (*Wired Equivalent Privacy*), mida saab sisse ja välja lülitada. Kui WEP on sisse lülitatud, kaitseb see ainult andmepaketti, mitte selle päist, võimaldades kõigil võrguseadmetel edastatavaid andmeid läbi vaadata. Juurdepääsukontrolli tagamiseks on igasse pääsupunkti installitud ESSID (või WLAN Service Area ID), ilma milleta ei saa jaam pääsupunkti ühenduda. Peale selle saab see salvestada kõigi autoriseeritud seadmete lubatud MAC-aadresside loendi. Nii võimaldab see loendisse kuuluvatel seadmetel võrku ühenduda. Andmete krüpteerimine toimub RC4 algoritmide abil 40-bitise võtmega, kuid on ka lihtsamaid krüpteerimisviise.

10.5 Teadmiste kontroll

1. Millised traadita tehnoloogiad on väikese läbilaskevõimega tehnoloogiad?
    a) ZigBee võrgud
    b) Bluetoothi tehnoloogia
    c) EnOceani tehnoloogia
    d) Z-Wave'i tehnoloogia
    e) Wi-Fi tehnoloogia

2. Bluetoothi võrgud on enamasti ülem-alluv-tüüpi ja alluvseadmeid võib olla kuni:
    a) 2
    b) 5
    c) 7
    d) 10
    e) piiramatult

3. Mitu andmekaitse viisi on Bluetooth-süsteemides?
    a) 1
    b) 2
    c) 3
    d) 4
    e) Spetsiaalsed andmekaitse viisid puuduvad.

4. Millised on loogilised topoloogiad traadita võrkude ehitamiseks?
    a) sild
    b) pääsupunkt-klient
    c) traadita jaotussüsteem (*Wireless Distribution System*, WDS)
    d) repiiter
    e) täht

5. Milline on kõige levinum topoloogia seadmete ühendamiseks traadita võrkudesse?
    a) AD-HOC
    b) pääsupunkt-klient
    c) repiiter
    d) traadita võrk (*Wireless Distribution System*, WDS)
    e) sild

VASTUSED ENESEKONTROLLI KÜSIMUSTELE

Chapter №	Questions				
	1	2	3	4	5
1	a	e	a, c, d	a	b, c, d.
2	a, b, c	a, b, c, e	a	a, b, c	b
3	e	a, d	a, b, e	b, c, d	c
4	e	b, d, e	d, e	a, c, e	a, b, d,
5	a, b, c	d	c	c,	d
6	c	a, b, d, e	a, b, c, d, e	a	a, b, d, e
7	c, d	b, c,	a, b, e	b, c, d	b, c, e
8	c, d	b, c, d	e	b, c, d, e	a, b, d
9	a, b, c, d	a, b, c, d	d	c	a
10	a, c, d	c	c	a, b, c, d	b

VIITED

[1] S. Djiev, Industrial Networks for Communication and Control (book in Bulgarian), ISBN 954-438-360-3, TU Sofia, 2002.
[2] Electronic library in discipline "Industrial Computer Networks" (In Bulgarian). Technical university of Gabrovo, http://umis.tugab.bg/e-mat.
[3] A. I. Series Software Reference, Rockwell Software, 1997.
[4] Bender, K., (editor), Profibus – the Fieldbus for Industrial Automation., Prentice Hall, 1992.
[5] BOSCH CAN Specification – Version 2.0, Part A. 1991, Robert Bosch GmbH.
[6] DeviceNet Specification, Open DeviceNet Vendor Association, Inc., Volume I, II, 2.03, 1997.
[7] Fieldbus Foundation., Fieldbus Foundation specifications, 1994.
[8] SIEMENS. SIMATIC. Step 7 – Micro Programming. Reference manual., Siemens AG, 1995.
[9] Computer networks. Online e-course (In Bulgarian), http://193.192.57.240/po/courses/komputarni%20mrezi/start.html.
[10] An Educator's Guide to School Networks, http://fcit.usf.edu/network/default.htm.
[11] In the network. Lessons for computer networks and security (In Bulgarian), http://vmrejata.info/.
[12] Computer Experts Group. Networks (In Bulgarian). http://comexgroup.com/comm/lan_all/lan.htm.
[13] MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION http://www.Modbus-IDA.org.
[14] MODBUS MESSAGING ON TCP/IP IMPLEMENTATION GUIDE http://www.Modbus-IDA.org.
[15] Profibus Technology and Applicatin http://www.Modbus-IDA.org.4

Euroopa tööstuslike väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete innovatiivse ja aruka kasvu strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas (MechMate)

ÕPPEAINE 07: PLC SÜSTEEMID [M007ET]

ÕPIK

AUTORID

ELMO PETTAI, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)
MARGUS MÜÜR, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)
VAHUR MAASK, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)

2018

Info selle dokumendi kohta

Õpik (sisuline tekst) on mõeldud kasutamiseks õppeaines **PLC süsteemid**.

.

Sisukord

Info selle dokumendi kohta 3
Jooniste loetelu 9
Tabelite loetelu 14
Sissejuhatus 15
Lühendid 16
1 Programmeeritav loogikakontroller 17
1.1 Automatiseeritud valmistussüsteem 17
1.2 Mõiste – programmeeritav loogikakontroller 19
1.3 Programmeeritava loogikakontrolleri riistvara 20
1.3.1 PLC toitemoodul 20
1.3.2 PLC keskjuhtimismoodul 20
1.3.3 PLC signaalimoodul 21
1.3.4 Muud PLC moodulid 22
1.3.5 Siemens S7-1200 seeria PLC riistvara 23
1.4 PLC tüübid 24
1.4.1 Kompakt-PLC 24
1.4.2 Moodul-PLC 25
1.4.3 Operaatorpaneeliga PLC 26
1.4.4 Tööstusarvuti 26
1.4.5 Kaart-PLC 27
1.4.6 Tarkvaraline PLC 27
1.5 PLC poolt töödeldavad signaalid 27
1.5.1 Binaarsignaal 28
1.5.2 Digitaalsignaal 29
1.5.3 Analoogsignaal 29
1.6 Kuidas töötab SIMATIC S7-1200 PLC? 30
1.7 Multitegumtöö 32
1.8 Teadmiste kontroll 34
2 PLC programmeerimine 36
2.1 Standard IEC 61131-3 36
2.2 Programmi ülesehituse plokid 37
2.3 PLC programmeerimiskeeled 42
2.3.1 Käsulist (Instruction List - IL) 42
2.3.2 Struktureeritud tekst (Structured Text - ST) 43
2.3.3 Funktsiooniplokkskeem (Function Block Diagram - FBD) 43
2.3.4 Kontaktaseskeem (Ladder Diagram - LD) 44
2.3.5 Järjestatud funktsioonide kaart (Sequential Function Chart – SFC) 44
2.3.6 SIMATIC S7-1200 PLC programmeerimiskeeled 45
2.4 Muutujate adresseerimine STEP 7 kohaselt 46
2.5 PLC's kasutatavad andmetüübid 48
2.5.1 Elementaarsed andmetüübid 49
2.5.2 Kompleksandmetüübid 51
2.6 Programmeerimine standardi IEC 61499 abil 53
2.7 PLC juhtimisprogrammi loomine 55
2.8 Teadmiste kontroll 58
3 Esimene projekt Siemensi S7-1200 seeria PLC'ga 60
3.1 Uue projekti loomine 60
3.2 PLC riistvara seadistamine projektis 62
3.3 Muutujate deklareerimine 66
3.4 Programmi kirjutamine 67
3.5 Programmi testimine 68
3.6 Seadistuste ja programmi kontrollerisse laadimine 73

4 Binaarloogika funktsioonid 76
4.1 NING- ja VÕI-lülid 76
4.2 Eitus 78
4.3 VÄLISTAV-VÕI-lüli 80
4.4 SR- ja RS-trigerid 80
4.5 Signaali väärtuse muutuse avastamine 83
4.6 Loogikatehted mitmebitiliste operandidega 87
4.7 Ülesanded 90
4.7.1 Ühe nupuga ühe lambi välja lülitamine 90
4.7.2 Ühe lambi sisse lülitamine ühe või teise nupuga 90
4.7.3 Ühe lambi sisse lülitamine kolme nupuga 90
4.7.4 Kahe nupuga ühe lambi lülitamine 90
4.7.5 Kolme nupuga mitme lambi lülitamine 90
4.7.6 Ühe nupuga ühe lambi lülitamine 91
4.7.7 Ühe nupuga kahe lambi lülitamine 91
4.8 Teadmiste kontroll 91
5 Arenenud binaarloogika funktsioonid 93
5.1 PLC programmis kasutatavad numbrisüsteemid 93
5.1.1 Kümnendsüsteem 93
5.1.2 Kahendsüsteem 93
5.1.3 Kaheksandsüsteem 94
5.1.4 BCD arvusüsteem 94
5.1.5 Kuueteistkümnendsüsteem 95
5.1.6 Märgiga kahendarvud 95
5.1.7 Reaalarvud 96
5.1.8 Arvude esitus PLC mälus 96
5.2 Taimerid ehk viivituse teostajad 97
5.2.1 Sisselülitusviivitusega taimer 99
5.2.2 Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer 99
5.2.3 Väljalülitusviivitusega taimer 100
5.2.4 Impulsstaimer 101
5.2.5 Lisa funktsioonid taimerite kasutamiseks 101
5.3 Loendur 102
5.4 Komparaator 104
5.5 Nihkefunktsioonid 107
5.6 Ülesanded 109
5.6.1 Ühe lülitiga ühe lambi viitega väljalülitus 109
5.6.2 Ühe nupuga kahe lambi sisse lülitamine ajalise viitega 109
5.6.3 Ühe nupuga ühe lambi sisse lülitamine määratud ajaks 109
5.6.4 Ühe lambi vilgutamine 109
5.6.5 Lambi lülitamine kümnendal vajutusel 110
5.6.6 Kolme lambi lülitamine kahe nupuga 110
5.7 Teadmiste kontroll 111
6 Ülekande- ja programmi juhtimisfunktsioonid 113
6.1 Ülekandefunktsioonid 113
6.2 Programmi juhtimisfunktsioonid 115
6.2.1 Hüppefunktsioonid 115
6.2.2 Ploki aktiveerimine 116
6.2.3 Ploki töö lõpetamine 117
6.3 Lisa funktsioonid SCL keeles programmi juhtimiseks 119
6.4 Ülesanded 121
6.4.1 Ühe nupuga ühe lambi lülitamine 122
6.4.2 Ühe nupuga kahe lambi lülitamine 122
6.4.3 Ühe lambi vilgutamine 122

6.4.4 Kahe nupuga ühe lambi lülitamine 122
6.4.5 Kahe nupuga kolme lambi juhtimine 122
6.5 Teadmiste kontroll 123
7 Matemaatilised ja teisendusfunktsioonid 125
7.1 Aritmeetilised tehted 125
7.2 Arvfunktsioonid 127
7.2.1 Väärtuse märgi muutmine (NEG) 127
7.2.2 Väärtuse suurendamine ja vähendamine (INC, DEC) 127
7.2.3 Absoluutväärtuse leidmine (ABS) 128
7.2.4 Suurima ja väikseima tagastamine (MIN, MAX) 128
7.2.5 Väärtuse piiramine (LIMIT) 128
7.2.6 Ruut ja ruutjuur (SQR, SQRT) 129
7.2.7 Naturaallogaritm ja eksponentfunktsioon (LN, EXP, EXPT) 129
7.2.8 Trigonomeetrilised funktsioonid 130
7.2.9 Murdosa tagastamine (FRAC) 131
7.3 Matemaatilised tehted aja muutujatega 131
7.4 Teisendusfunktsioonid 132
7.4.1 Teisendusfunktsioon CONV 133
7.4.2 Komakohaga arvu ümardamine täisarvuks 135
7.4.3 Aja andmetüüpide teisendamisfunktsioonid 136
7.4.4 Skaleerimine ja normeerimine (SCALE_X, NORM_X) 137
7.5 Ülesanded 139
7.5.1 Kolme lambi lülitamine kahe nupuga 139
7.5.2 Seadistatav ühe lambi vilkumine 1 139
7.5.3 Muutuva ajaga ühe lambi töötamine 139
7.5.4 Seadistatav ühe lambi vilkumine 2 140
7.5.5 Seadistatav kolme lambi vilgutamine 140
7.6 Teadmiste kontroll 141
8 PID-regulaator 143
8.1 Reguleeritav süsteem 143
8.2 Suletud kontuuriga reguleerimismeetod 144
8.3 Reguleerimissüsteemi dünaamilise toime kirjeldus 146
8.4 Regulaatori tüübid 147
8.4.1 PID regulaatori ajaline toime 148
8.4.2 Proportsionaalne regulaator 148
8.4.3 Integraalne regulaator 149
8.4.4 Diferentseeriv regulaator 150
8.4.5 Mitme tüüpregulaatori kombinatsioon 150
8.5 Häälestamise kriteeriumid ehk “Kuidas me teame, millal see on hääles?” 152
8.5.1 Ekstreemsused: ebastabiilsus või mittereageerimine 152
8.5.2 Mitteformaalsed meetodid 152
8.6 PID-reguleerimine S7-1200 PLC’s 153
8.7 Teadmiste kontroll 156
9 Ühe pneumosilindriga rakenduse juhtimine 158
9.1 Pneumoskeem 158
9.2 Elektriskeem 158
9.3 PLC Programm 159
10 Kahe pneumosilindriga rakenduse juhtimine 161
10.1 Pneumoskeem 161
10.2 Elektriskeem 162
10.3 PLC Programm 162
11 Sagedusmuunduriga rakenduse juhtimine 170
11.1 Rakenduse näide 170
11.2 Elektriskeem 171

11.3 PLC Programm 172
12 PLC valik, ohutus ja kasutuselevõtt 180
12.1 PLC valimine 180
12.2 PLC ohutus 181
12.3 Kasutuselevõtmine 183
12.3.1 Riistvara kontroll 183
12.3.2 Tarkvara ülekandmine ja testimine 183
12.3.3 Tarkvara optimeerimine 184
12.3.4 Kogu süsteemi kasutuselevõtmine 184
12.4 Teadmiste kontroll 185
Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused 187
References 188

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Automatiseeritud valmistussüsteemi struktuur 17
Joonis 1.2. Pingestavad (a) ja maandavad (b) digitaal-signaalimoodulid 22
Joonis 1.3. Siemens S7-1200 PLC riistvaraline ülesehitus 23
Joonis 1.4. Kompaktsed PLC'd (vasakul on Festo FEC FC660 , keskel Siemens Logo ja paremal S7-200 PLC) 24
Joonis 1.5. Siemensi kompakt-PLC S7-1200 25
Joonis 1.6. Moodul-PLC'd paigutatud kinnitusliistule (vasakul on Siemens S7-1500, keskel S7-300 ja paremal Allen-Bradley CompactLogix PLC) 25
Joonis 1.7. Moodul-PLC'd paigutatud spetsiaalsesse kasseti (vasakul on Siemens S7-400 ja paremal Festo CPX PLC) 26
Joonis 1.8. Operaatorpaneeliga PLC (Unitronics M90) 26
Joonis 1.9. Siemensi (vasakul) ja B&R Automation (paremal) tööstusarvutid 27
Joonis 1.10. PLC ning sellega seotud erinevate sisend- ja väljundseadmete vahelised signaalid 28
Joonis 1.11. Binaarsignaali (24 V DC) pinge väärtuste vahemik (a) ning 1 baidine digitaalsignaal (b) 29
Joonis 1.12. Analoogsignaal 30
Joonis 1.13. PLC protsessitsükkel 31
Joonis 2.1. Mitme erineva peaprogrammi OB kasutamine 39
Joonis 2.2. Näide OB kaudu välja kutsutava FB1 eksemplaridest ja nende eraldi andmeblokkidest 39
Joonis 2.3. Tsükliline programmi täitmine PLC's 41
Joonis 2.4. STL keele näide STEP 7's 42
Joonis 2.5 Käsulisti IL (ka STL) struktuuri elemendid 42
Joonis 2.6. SCL keele näide STEP 7's 43
Joonis 2.7. FBD keele näide STEP 7's 43
Joonis 2.8. LAD keele näide STEP 7's 44
Joonis 2.9. GRAPH keele näide STEP 7's 45
Joonis 2.10. Mälupiirkonna absoluutne adresseerimine 46
Joonis 2.11. Mälupiirkonna jagunemine ja andmestruktuuride paiknemine 47
Joonis 2.12. Siemensi S7-1200 PLC moodulite I/O'de adresseerimine 48
Joonis 2.13. Massiivi näide 52
Joonis 2.14. Struktuuri näide 53
Joonis 2.15. Näide andmeploki (Andmed [DB6]) sisust kus on kasutatud struktuure ja massiive 53
Joonis 2.16. Juhtimisprogrammi loomise etapid 55
Joonis 3.1. TIA Portal aken 60
Joonis 3.2. Uue projekti loomise alustus 61
Joonis 3.3. Uue projekti nime ja asukoha määramine 61
Joonis 3.4. Uus loodud projekt TIA Portal'is 61
Joonis 3.5. CPU'ks on valitud CPU 1214C DC/DC/DC 62
Joonis 3.6. SB 1232 AQ kaardi otsing 63
Joonis 3.7. PLC riistvara seadistamine TIA Portal'is 63
Joonis 3.8. Laiendus kaardi SB 1232 AQ valimine ja lisamine PLC riistvara seadistusse 64

Joonis 3.9. Ülevaade seadistatud PLC'st 65
Joonis 3.10. Projekti salvestamine 65
Joonis 3.11. PLC IP aadressi leidmise ja seadistamise koht 66
Joonis 3.12. Muutujate deklareerimise tabeli avamine 66
Joonis 3.13. Muutujate deklareerimise tabel TIA Portal'is 67
Joonis 3.14. Juhtplokki OB1 avamine 67
Joonis 3.15. Valmis PLC programm 68
Joonis 3.16. TIA Portal'i aken PLC programmi kirjutamiseks 68
Joonis 3.17. S7-PLCSIM enne(a) ning pärast (b) PLC riistvara ja programmi laadimist 69
Joonis 3.18. Programmi S7-PLCSIM käivitamine TIA Portal'is 69
Joonis 3.19. *Load preview* aken programmi laadimisel S7-PLCSIM'i 70
Joonis 3.20. *Load results* aken programmi laadimisel S7-PLCSIM'i 70
Joonis 3.21. S7-PLCSIM'i ning uue projekti loomise aken 71
Joonis 3.22. S7-PLCSIM koos PLC programmis kasutatud muutujatega 71
Joonis 3.23. Programmi täitmise jälgimine TIA Portal'is 72
Joonis 3.24. Programm, kui kõik PLC sisendid on aktiivsed (TÕESED) 72
Joonis 3.25. *Online* menüü TIA Portal's 72
Joonis 3.26. Programmi ja riistvara seadistuse laadimine PLC'sse 73
Joonis 3.27. *Extended download to device* aken ühenduse loomiseks reaalse PLC'ga 74
Joonis 3.28. *Load preview* aken programmi laadimisel reaalsesse PLC'sse 75
Joonis 3.29. *Load results* aken programmi reaalsesse PLC'sse 75
Joonis 4.1. Binaarloogika NING-lüli signaalide olekutabel ning selle kujutamine FBD, SCL ja LAD keeltes 76
Joonis 4.2. Binaarloogika VÕI-lüli signaalide olekutabel ning selle kujutamine LAD, SCL ja FBD keeltes 77
Joonis 4.3. NING-VÕI- (a) ja VÕI-NING-loogikalülide (b) kujutamine FBD ja SCL keeltes 78
Joonis 4.4. SCL keeles NING-lüli IF tingimuslauses 78
Joonis 4.5. Binaarloogika erituse signaalide olekutabel ning selle kujutamine FBD, SCL ja LAD keeltes 79
Joonis 4.6. EI-NING- (a) ja EI-VÕI-lülid (b) FBD ja SCL keeltes 79
Joonis 4.7. Loogikalüli väljundi inverteerimine FBD ja LAD keeltes 79
Joonis 4.8. Inverteeriv väljund FBD ja LAD keeltes 80
Joonis 4.9. Binaarloogika VVÕI-lüli signaalide olekutabel ja funktsioon LAD, SCL ja FBD keeltes 80
Joonis 4.10. SR-trigeri signaalide diagramm ning selle kujutamine FBD ja LAD keeltes 81
Joonis 4.11.SR-trigeri signaalide diagramm ning selle kujutamine FBD ja LAD keeltes 81
Joonis 4.12. NING- ja VÕI-lülidest koostatud SR- (a) ja RS-trigerid (b) FBD keeles 82
Joonis 4.13. SET ja RESET funktsioonide rakendamine FBD ja LAD keeltes 82
Joonis 4.14. SR-triger SCL keeles 82
Joonis 4.15. Signaali väärtuse muutuse avastamise. Impulsi pikkus. 83
Joonis 4.16. Tõusva (a) ja langeva (b) frondi avastamise muutujate signaalide olekud 84
Joonis 4.17. Tõusva frondi avastamine P_TRIG funktsiooniga FBD ja LAD keeltes 84
Joonis 4.18. Tõusva frondi avastamine (P) funktsiooniga FBD ja LAD keeltes 84
Joonis 4.19. Tõusva frondi avastamine |P| funktsiooniga FBD ja LAD keeltes 85
Joonis 4.20. Tõusva frondi avastamine R_TRIG funktsiooniga LAD ja SCL keeltes 85
Joonis 4.21. Tõusva frondi avastamine SCL keeles 85

Joonis 4.22. Langeva frondi avastamise funktsioonid FBD keeles. 86
Joonis 4.23. Langeva frondi avastamine SCL keeles 86
Joonis 4.24. Positiivse (a) ja negatiivse (b) frondi avastamine NING lüli ja SR- ning RS-trigeritega 86
Joonis 4.25. Mitmebitilised loogikatehted FBD, LAD ja SCl keeles 87
Joonis 4.26. Mitmebitiline NING-tehe LAD keeles. 88
Joonis 4.27. Mitmebitiline VÕI-tehe LAD keeles 88
Joonis 4.28. Mitmebitiline VVÕI-tehe LAD keeles 89
Joonis 4.29. Mitmebitiline EI-tehe LAD keeles 89
Joonis 4.30. Ülesande elektriskeem 90
Joonis 5.1. Arvude esitamine PLC mälus 96
Joonis 5.2. BCD arvu esitus WORD andmetüübis 97
Joonis 5.3. Sisselülitusviivitusega taimer LAD, FBD ja SCL keeltes 98
Joonis 5.4. Sisselülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm 99
Joonis 5.5. Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer FBD ja SCL keeltes ning selle signaalide diagramm 100
Joonis 5.6. Väljalülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm 100
Joonis 5.7. Impulsstaimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm 101
Joonis 5.8. Taimer jagatud erinevate programmi osade vahel FBD keeles 101
Joonis 5.9. Taimer jagatud erinevate programmi osade vahel SCL keeles 102
Joonis 5.10. Üles-alla loendur SCL, FBD ja LAD keeltes 103
Joonis 5.11. Üles-alla loenduri signaalide diagramm 104
Joonis 5.12. IEC 61131 kohased võrdlused 105
Joonis 5.13. Võrdne komparaator FBD ja LAD keeltes 105
Joonis 5.14. SCL keeles on esitatud kaks varianti komparaatorist võrdne 105
Joonis 5.15. Muutuja väärtuse piiridesse jäämise kontrollimise funktsioonid LAD keeles ... 106
Joonis 5.16. Muutuja väärtuse piiridesse jäämise kontrollimine SCL keeles 106
Joonis 5.17. Näited nihkefunktsioonide kohta SCL, FBD ja LAD keeltes 107
Joonis 5.18. STEP 7 nihke funktsioonid SHL (a) ja SHR (b) 108
Joonis 5.19. SHR funktsioon negatiivse bitimustri puhul (DInt) 108
Joonis 5.20. STEP 7 nihke funktsioonid ROL (ülevalpool) ja ROR (allpool) 109
Joonis 6.1. Funktsioon MOVE FBD ja SCL keeltes 113
Joonis 6.2. Ülekandefunktsiooni kirjeldus 113
Joonis 6.3. Funktsioon MOVE_BLK 114
Joonis 6.4. Funktsioon FILL_BLK 114
Joonis 6.5 Näidis programm hüppe käskudega FBD (a) ja SCL (b) keeltes 116
Joonis 6.6. FB ja FC plokkide aktiveerimine FBD ja SCL keeltes 117
Joonis 6.7. Programmi katkestamise funktsioon FBD, LAD ja SCL keeltes 118
Joonis 6.8. SCL keeles koostatud PLC programm, mis on jaotatud erinevateks plokkideks .. 119
Joonis 6.9. CASE lause näide 120
Joonis 6.10. FOR tsükli näide 120
Joonis 6.11. WHILE-DO ja REPEAT-UNTIL funktsioonide ülesehitus 120
Joonis 6.12. Näited WHILE-DO ja REPEAT-UNTIL funktsioonide kasutamisest 121
Joonis 6.13. Näide CONTINUE käsu kasutamise kohta 121
Joonis 7.1. Näide aritmeetikafunktsioonide kohta FBD keeles 126
Joonis 7.2. Näide aritmeetikatehte kohta SCL keeles 126

Joonis 7.3. CALCULATE funktsioon FBD keeles 127
Joonis 7.4. NEG funktsioon FBD ja SCL keeltes 127
Joonis 7.5. INC ja DEC funktsioonid FBD ja SCL keeltes 128
Joonis 7.6. ABS funktsioon FBD ja SCL keeltes 128
Joonis 7.7. MIN ja MAX funktsioonid FBD ja SCL keeltes 128
Joonis 7.8. LIMIT funktsiooni FBD ja SCL keeltes 129
Joonis 7.9. SQR ja SQRT funktsioonid FBD ja SCL keeltes 129
Joonis 7.10. LN ja EXP funktsioonid FBD ja SCL keeltes 129
Joonis 7.11. EXPT funktsioon FBD ja SCL keeltes 130
Joonis 7.12. Funktsioonide ASIN, ACOS ja ATAN väljundväärtused radiaanides 130
Joonis 7.13. SIN ja ACOS funktsioonid FBD ja SCL keeltes 131
Joonis 7.14. FRAC funktsioon FBD ja SCL keeltes 131
Joonis 7.15. T_ADD ja T_SUB funktsioonid FBD ja SCL keeltes 131
Joonis 7.16. T_DIFF funktsioon FBD ja SCL keeltes 132
Joonis 7.17. CONV funktsioonid erinevate andmetüüpidega FBD keeles 133
Joonis 7.18. Teisendusfunktsiooni näited SCL keeles 135
Joonis 7.19. Automaatne teisendusfunktsioon 135
Joonis 7.20. Komakohaga väärtuse teisendamine täisarvu kujule kasutades erinevaid STEP 7 teisendusfunktsioone 136
Joonis 7.21. Näiteid komakohaga arvu teisendusfunktsioonide kohta SCL, FBD ja LAD keeltes 136
Joonis 7.22. T_CONV funktsiooni näited SCL, FBD ja LAD keeltes 137
Joonis 7.23. SCALE_X skaleerimisfunktsioon FBD ja SCL keeltes 138
Joonis 7.24. NORM_X normeerimisfunktsioon FBD ja SCL keeltes 138
Joonis 7.25. Normaliseerimis- ja skaleerimisfunktsioonid koos 139
Joonis 8.1. Reguleeritava süsteemi plokkdiagramm 143
Joonis 8.2. Veevanni reguleerimise süsteem 143
Joonis 8.3. Suletud kontuuriga regulaatori funktsioneerimise põhimõte (regulaator on osa süsteemist) 144
Joonis 8.4. Vooluhulga juhtimine suletud kontuuriga regulaatori abil 145
Joonis 8.5. Suletud juhtimisahel koos regulaatoriga 145
Joonis 8.6. Veevanni vee temp (a) ja ventiili (b) reguleerimissüsteemi ajalised toimed 146
Joonis 8.7. Hüppekaja 147
Joonis 8.8. Ventiili süsteemi staatiline karakteristik 147
Joonis 8.9. P regulaatori ajaline toime 148
Joonis 8.10. Erinevate regulaatorite toimet iseloomustavad siirdekõverad 149
Joonis 8.11. I regulaatori ajaline toime 149
Joonis 8.12. D regulaatori ajaline toime 150
Joonis 8.13. PI regulaatori ajaline toime 150
Joonis 8.14. PD regulaatori ajaline toime 151
Joonis 8.15. PID regulaatori ajaline toime 151
Joonis 8.16. Laine langus veerandväärtuseni 152
Joonis 8.17. Seadesuuruse muutusest tingitud ülereguleerimine 152
Joonis 8.18. S7-1200 PLC PID regulaatori funktsioonid FBD keeles 153
Joonis 9.1. Rakenduse paigutus hoones katusel 158
Joonis 9.2. Juhtpaneel akna juhtimiseks 158

Joonis 9.3. Pneumoskeem 159
Joonis 9.4. Elektriskeem 159
Joonis 10.1. Rakenduse seadmete paigutus 161
Joonis 10.2. Pneumoskeem 161
Joonis 10.4. Kahepoolse toimega lineaarne pneumosilinder (1.0) 161
Joonis 10.3. Kahepoolse toimega pöördsilinder (2.0) 161
Joonis 10.5. Elektriskeem 162
Joonis 10.6. GRAFCET diagramm kahe pneumosilindriga rakenduse kirjeldamiseks 166
Joonis 11.1. Laohoone skemaatiline läbilõige 171
Joonis 11.2. Ventilatsioonisüsteemi jõuosa elektriskeemi 172
Joonis 11.3. Ventilatsioonisüsteemi juhtimisosa elektriskeem 172
Joonis 11.4. Ventilaatori juhtimise blokkskeem 175
Joonis 11.5. Õhuklappide juhtimise blokkskeem 177

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1. Analoogsignaali muundamine digitaalsignaaliks 30
Tabel 2.1. STEP-7 juhtplokid S7-1200 seeria kontrolleri jaoks 38
Tabel 2.2. Elementaarsed andmetüübid STEP 7's [5]] 49
Tabel 2.3. Kompleksandmetüübid STEP7's [5] 51
Tabel 2.4. DTL komponendid 52
Tabel 4.1. Binaarloogika põhielemendid 76
Tabel 4.2. Trigerites kasutatavad operandid ja tähistused 83
Tabel 4.3. Trigerites kasutatavad operandid ja tähistused 87
Tabel 4.4. Mitmebitilise NING, VÕI ja VVÕI-tehtes kasutatavad operandid ja tähistused 89
Tabel 5.1. Kümnendarvu esitamine kahendarvuna 93
Tabel 5.2. Kaheksandarvu näide 94
Tabel 5.3. Kümnendarvude esitaine BCD arvudena 94
Tabel 5.4. Kuueteistkümnendarvu näide 95
Tabel 5.5. STEP 7 taimerid koos programmeerimiskeeltes kasutavate lühenditega 97
Tabel 5.6. Taimeri sisendid ja väljundid. 98
Tabel 5.7. Loenduri sisendid ja väljundid 103
Tabel 5.8. Komparaatori sisendid ja väljundid 105
Tabel 5.9. IN_RANGE ja OUT_RANGE funktsioonide sisendid ning väljundid 106
Tabel 5.10. Nihkefunktsioonid 107
Tabel 5.11. Nihkefunktsioonide sisendid ja väljundid 108
Tabel 6.1. MOVE funktsiooni sisendid ja väljundid 113
Tabel 6.2. Hüppekäsud FBD ja SCL keeltes [7] 115
Tabel 7.1. STEP 7 matemaatiliste funktsioonidega kasutatavad andmetüübid 125
Tabel 7.2. STEP 7 aritmeetikafunktsioonid 126
Tabel 7.3. STEP 7 trigonomeetrilised funktsioonid 130
Tabel 7.4. Funktsioonide T_ADD ja T_SUB kasutatavad sisendid ja väljundid 132
Tabel 7.5. T_DIFF funktsiooni sisendid ja väljundid 132
Tabel 7.6. IEC 61131 teisendusfunktsioonide nimed ja kirjeldus 133
Tabel 7.7. CONV funktsiooni sisendid ja väljundid 133
Tabel 7.8. CONV funktsioonis valitavad andmetüübi kombinatsioonid 134
Tabel 7.9. SCL keele teisendusfunktsioonis kasutatavad andmetüübid 134
Tabel 7.10. T_CONV funktsiooni sisendid ja väljundid 137
Tabel 9.1. PLC programmi muutujad 159
Tabel 10.1. GRAFCET sümbolid 163
Tabel 10.2. PLC programmi muutujad 166
Tabel 11.1. Määratud sageduste valimine vastavalt sagedusmuunduri sisendite olekule 170
Tabel 11.2. Blokkskeemi põhisümbolid 173
Tabel 11.3. PLC programmi muutujad 175

SISSEJUHATUS

Nüüdisaja tööstusettevõtted on võimelised tootma erinevaid kaupu ja müüma neid tarbijatele vajalikes kogustes. Tootmistehnika areng võimaldab toodete valmistamise kiiret automatiseerimist. Toodete valmistamise automatiseerimisel on tähtsal kohal programmeeritav kontroller (PLC), mis on automatiseeritud tehnoloogiliste protsesside ja töömasinate juhtimissüsteemi põhiosa. Programmeeritavasse kontrollerisse salvestatud automaatne juhtimisprogramm annab väljundmoodulite kaudu töömasina täiturseadmetele vajalikud käsud. Sisendmoodulite kaudu kogutakse infot toote valmistuse edenemise ja kvaliteedi kohta.

Raamatu „Programmeeritavad kontrollerid ja tööstusaarvutid" esmaseks eesmärgiks on pakkuda väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete töötajatele teadmisi automatiseeritud tootmissüsteemi juhtimises kasutatavate programmeeritavate kontrollerite kohta. Raamat koosneb kaheteistkümnest peatükist.

Esimene peatükk esitab programmeeritava kontrolleri mõiste, kirjeldab programmeeritava kontrolleri riistvara, kontrolleri põhilisi tüüpe ja tööpõhimõtet Siemensi PLC näitel. Teises peatükis antakse ülevaade PLC programmeerimiskeelte, programmi struktuuri, andmetüüpide ja muutujate adresseerimise kohta. Kolmandas peatükis antakse ülevaade kuidas luua esimene projekt Siemensi S7-1200 kontrollerile. Neljandas peatükis vaadeldakse binaarloogika operatsioone (funktsioone), mille alusel saab koostada automatiseeritud protsesside ja töömasinate lihtsaid juhtimisprogramme. Viies peatükk käsitleb arenenud binaarloogika operatsioone (funktsioone), mis hõlmab taimereid, loendureid, komparaatoreid ja nihkefunktsioone. Kuuendas peatükis vaadeldakse ülekande- ja PLC programmi juhtimisfunktsioone. Need juhtimisfunktsioonid võimaldavad teostada mittelineaarset programmi täitmist ja täita ka alternatiivseid programmiosasid. Seitsmes peatükk tutvustab PLCs kasutatavaid matemaatika tehteid (funktsioone) nagu liitmine, lahutamine, korrutamine, jagamine, naturaallogaritm, siinus, argustangens, absoluutväärtus jne. Kirjeldatud on ka andmetüüpide teisendusfunktsioone. Kaheksas peatükk tutvustab proportsionaalse-integraalse-diferentsiaalse (PID) automaatregulaatori tüüpe, juhtimisosasid ja käitumist. Näidisrakendusi koos PLC juhtimisprogrammiga esitletakse peatükkides 9, 10 ja 11. Nendes esitatakse vastavalt ühe ja kahe pneumaatilise silindriga ning sagedusmuunduriga näidisrakendused. Viimane, kaheteistkümnes peatükk käsitleb PLC valiku kriteeriume ja ohutust, samas arutletakse PLC programmi kasutuselevõtmise üle, kuna programmis on alati võimalik teha parandusi ja kohandada seda vastavalt muutunud nõudmistele. Peaaegu iga peatüki lõpus on esitatud teadmiste kontrollküsimused õpilaste edasijõudmise taseme hindamiseks.

Raamat sobib kasutamiseks väikese ja keskmise suurusega ettevõtete töötajate, õpilaste ja töötute kvalifikatsiooni tõstmiseks ja täiend- ning ümberõppe programmides. Õpik eeldab põhiteadmiste olemasolu matemaatikas, füüsikas, ja infotehnoloogias samuti kogemus andurite, täiturite ja programmeerimise valdkonnas. Raamat sobib ka keskastme spetsialistide ja üliõpilaste väljaõppeks tööstussüsteemides kasutatavate programmeeritavate kontrollerite alal.

Autorid

Lühendid

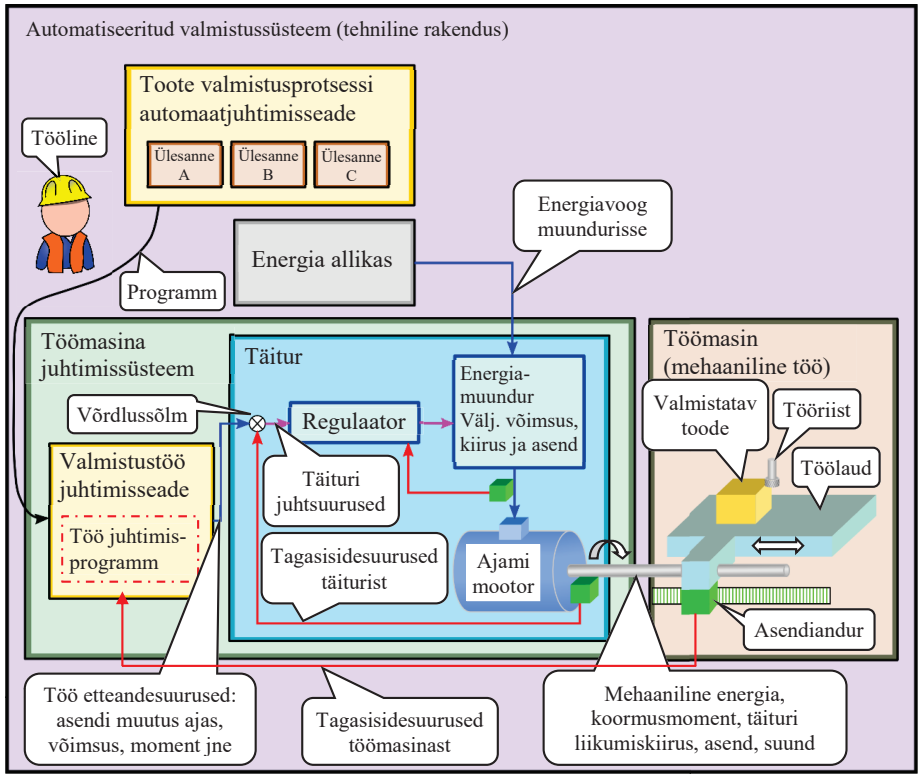
A/C	Adaptiivjuhtimine	Adaptive Control
AC	Vahelduvvool	Alternating Current
ACCU	Akumulaator (protsessori register)	Accumulator
AI	Analoogsisend	Analogue Input
AO	Analoogväljund	Analogue Output
BCD	Kahend-kümnendkood	Binary Decoded Decimal
CAD	Arvutiga juhitud projekteerimine	Computer Aided Design
CAE	Arvutiga juhitud arendus	Computer Aided Engineering
CAM	Arvutitega juhitud valmistamine	Computer Aided Manufacturing
CP	Andmesideprotsessor	Communication Processor
CPU	Tsentraalne protsessorimoodul	Central Processing Unit
D	Diferentsiaallüli	Derivative controller
DB	Andmeblokk	Data Block
DC	Alalisvool	Direct Current
DI	Digitaalsisend	Digital Input
DO	Digitaalväljund	Digital Output
FB	Funktsiooniblokk	Function Block
FBD	Funktsioonibloki diagram	Function Block Diagram
FC	Funktsioon, teostus	Function
FM	Funktsionaalne moodul	Function Module
HEX	Kuueteistkümnendarv	Hexadecimal
HMI	Inimene-masin liides	Human-Machine Interface
I	Integraallüli	Integral controller
I/O	Sisend-väljund	Input/Output
IL	Käsulist	Instruction List
IM	Liidesemoodul	Interface Module
LAD	Redel-loogika skeem	Ladder Logic
LCD	Vedelkristall displei	Liquid Crystal Display
LD	Redel diagramm	Ladder Diagram
LED	Valgusdiood	Light-Emitting Diode
OB	Organisatsiooniblokk, koostiseblokk	Organization Block
P	Proportsionaallüli	Proportional controller
PS	Toitemoodul	Power supply
PID	Proportsionaalne–Integraalne–Differentsiaalne	Proportional–Integral–Derivative
PLC	Programmeeritav loogikakontroller	Programmable Logic Controller
POU	Programmi koostise moodul	Program Organization Unit
PS	Elektritoide	Power Supply
RLO	Loogilise tehte tulemus	Result of the Logic Operation
S7-GRAPH	Graafiline programmeerimiskeel	Graphical Programming Language
SCL	Struktureeritud juhtimiskeel	Structured Control Language
SFC	Järjestatud funktsioonide diagramm	Sequential Function Chart
SM	Signaalimoodul	Signal Module
ST	Struktureeritud tekst	Structured Text
STL	Käsulist	Statement List

1 PROGRAMMEERITAV LOOGIKAKONTROLLER

1.1 Automatiseeritud valmistussüsteem

Toodete valmistamiseks ja/või teenuste osutamiseks kasutab inimene erinevaid töömasinaid. Need võivad olla näiteks käsitsi juhitavad treipink, arvuti programmiga juhitav (inglise keeles lühend *CNC*) tööpink, puurpink, automatiseeritud valmistusliin (nt nutitelefone koostav valmistusliin) jne [1]. Üldiselt kutsutakse selliseid seadmeid või nende kooslusi valmistussüsteemideks. Kui toote valmistamiseks vajalike põhi- ja abiseadmetes teostatavate protsesside ning ülesannete juhtimisel lisaks programmeeritud arvutitele osalevad veel ka töötajad siis nimetatakse sellist kooslust **automatiseeritud valmistussüsteemiks**. Automatiseeritud valmistamissüsteemide abil saab suurendada tööviljakust ja vabastada inimest raske, üksluise ning tervist kahjustava töö teostamisest.

Tootmissüsteem ehk ettevõte sisaldab valmistussüsteeme ja teisi funktsionaalseid mooduleid mille käigus hoidmises osalevad töötajad tegeledes tootmise planeerimise, toodete projekteerimise, turunduse, majandusarvestuse jne osakondades. Automatiseerimise objektiks on sageli üksluised või inimeste tervisele ohtlikud tööd.



Joonis 1.1. Automatiseeritud valmistussüsteemi struktuur

1.1 kirjeldab automatiseeritud valmistussüsteemi struktuuri [2]. Automatiseeritud valmistusprotsessi käigus ei tee inimene ise vahetult füüsilist energiat nõudvat tööd ja ei juhi otseselt töömasinate teostatavaid valmistusülesandeid. Valmistusprotsesse juhitakse automaatsete juhtimisseadmete vahendusel. Sellest hoolimata võtab inimene toote valmistamisest osa, käivitades toote valmistuseks vajaliku tehnilise rakenduse ning jälgides ja optimeerides selle juhtimisprotsesse. Valmistusprotsessi ülesannete ja tööde täpseks juhtimiseks vajalike andmete saamiseks (tagasisideks) on täituris ja töömasinas kasutusel andurid.

Andur on seade, mis mõõdab ja edastab infot töömasinast ja täituritest juhtimissüsteemile. Voolu- ja pingeanduri abil näeb kui palju energiat täituri mootor tarbib ja kui kiiresti mehaanilised osad liiguvad (kas on vaja muuta töölaua liikumiskiirust). Asendianduri (1.1) abil teab juhtimisseade kus kohas paikneb töölaud ja valmistatav toode tööriista suhtes. Avarii stopp nupu abil saab tööline peatada masina töö, kui tekib hädavajadus (nt tööriist ja töölaud põrkuvad omavahel kokku).

Täitur on juhtimisseadme poolt juhitav (sageli elektromehaaniline) seade toote valmistustöö teostamiseks. Täituri kaudu liigub välise allika energia toote valmistuskohta. Täituris (ajami mootor 1.1) toimub rakendusvälise allika elektrilise, hüdraulilise või pneumaatilise energia muundamine ja edastamine valmistustööks kasutatava masina mehaanilise liikumise energiaks (füüsikaliseks tööks), mille tulemusena võib muutuda valmiva toote ja valmistusseadmete sisu või vorm. Peale elektrimootorite võivad automatiseeritud valmistussüsteemi täituriteks olla tööstusrobotid, pneumaatilised silindrid, hüdraulilised silindrid, keevituspüstol, jne.

Juhtimissüsteem on seadmete komplekt, mis juhib tehnilise rakenduse täiturite teostatavat tööd anduritelt tulevate signaalide ja valmistusprotsessi automaatjuhtimisseadmes ning töömasina juhtimisseadmes oleva programmi (seda kutsutakse ka *kasutaja programmiks*) järgi. Juhtimisseadmed jagunevad üldiselt riistvaralisteks (nt elektro-mehaaniline relee) ja tarkvaralisteks.

Riistvaralisi juhtimisseadmeid kasutatakse juhtudel, kus töömasina mistahes ümberprogrammeerimine ei tule kõne alla ja teostatava valmistustöö iseloom nõuab spetsiaalse juhtimisseadme väljatöötamist. Siin võidakse kasutada pneumaatilisi, hüdraulilisi, elektrilisi ja elektroonilisi juhtimisseadmeid. Tihti kasutatakse töömasina juhtimiseks nende kombinatsioone.

Kui töömasina poolt teostatav töö ei nõua spetsiaalse juhtimisseadme väljatöötamist või kui töömasina operaator/insener peab tegema töö juhtimisprogrammis muudatusi, siis eelistatakse kasutada universaalset elektroonilist juhtimisseadet, millesse saab salvestada muudetud/täiendatud valmistustöö juhtimisprogrammi. Selline juhtimisseade on programmeeritav loogika kontroller (PLC - inglise keeles *programmable logic controller*)
.

1.2 Mõiste – programmeeritav loogikakontroller

Mõiste PLC võeti esimest korda kasutusele eelmise sajandi kaheksakümnendate alguses [3]. Kõnekeeles kustutakse PLC-d veel kontrolleriks, programmeeritavaks kontrolleriks, tööstuskontrolleriks ja tööstusarvutiks. Esimesed programmeeritavad kontrollerid võeti kasutusele juba kuuekümnendate lõpus General Motors'i tehastes. Tehastes kasutatava PLC nimi oli Modicon 084 pooljuht jadaloogika lahendaja ja selle arendasid välja Bedford Associates ja Modicon (viimane ettevõtte loodi Bedford Associates'is töötanud arendusinseneride poolt). Enne seda kasutati programmeeritava kontrolleri tähistamiseks lühendit PC (inglise keeles *programmable controller*).

Veel varem kasutati töömasinate, tootmisliinide, jne juhtimiseks releedel baseeruvaid juhtimisseadmeid. Iga töömasina juhtimisseade koosnes vähemalt mitmest sajast releedest ja taimeritest ning kui üks neist läks rikki, siis lõpetas vastav masin või terve valmistusliin töötamise. Enamasti kulus vea otsimiseks ja kõrvaldamiseks mitu tundi. Samuti kulus väga palju aega nt autode tootmisliini ümber seadistamiseks (uue automudeli tootmise programmeerimiseks), sest kõik releede, taimerite, andurite ja täiturite vahelised elektrilised jõu- ja juhtkaablid tuli uuesti vedada, et tagada masina/tootmisliini vigadeta töötamist.

Iga PLC põhiliseks ülesandeks on sisendsignaalide vastuvõtmine, mälus salvestatud juhtimisprogrammi teostamine protsessori abil ja tulemuseks saadud väljundsignaalide ühendamine väliste seadmetega. Binaaralgebra moodustab matemaatilise baasi juhitava masina/valmistamisliini operatsioonide (tehete) jaoks. Binaaralgebra tunnistab muutuja kahest määratletud olekust (0 ja 1) ainult ühte. Algelise PLC väljund omas ainult kahte olekut: sees/tõene ja väljas/väär.

Eelmise sajandi seitsmekümnendate lõpus täiendati PLC'd. Olemasolevate binaarsete sisendite ja väljundite kõrvale tekkisid kontrolleris analoogsed sisendid ja väljundid võimaldades edastada täpsemalt määratud andmete väärtusi erinevate juhtimissüsteemi seadmete vahel. Paljud tänapäeva tehnilised rakendused vajavad analoogsignaalide töötlemist, mis võimaldab võrrelda suuruste etteantud analoogväärtusi tegelike mõõdetud analoogväärtustega nt veeboileris olev temperatuur, freespingis väljalõigatud metalldetaili mõõdud, töölaua asukoht, jne.

Peale binaaralgebra võimaluste on PLC'd täiendatud muude juhtimisfunktsioonidega ja funktsiooniplokkidega: erinevad taimerite ja loendurite funktsioonid, mäluregistrite väärtuste seadmine ja lähtestamine (nullimine), erinevad matemaatilised tehted, PID regulaatori rakendamine, andmeside (võrgu) liidesed, inim-masin liidese koostamine ja salvestamine PLC'sse, veebiserverid, liikumise positsioneerimisfunktsioonid. PLC'd on võimelised hoidma käigus mitut juhtimisprogrammi korraga ja on ühendatavad teiste automaatsete juhtimissüsteemide ja nende komponentidega, võimaldades tootmise komplekssemat automatiseerimist.

Standard IEC 61131-1 defineerib **PLC** järgmiselt: Digitaalselt toimiv elektrooniline süsteem, mis on mõeldud kasutamiseks tööstuskeskkonnas, mis kasutab kasutaja määratud juhiseid ja funktsioonie nagu loogika, järjestus, ajastus, loendus ja aritmeetika salvestamiseks programmeeritavat mälu ning juhib digitaal- või analoogsisendite ja -väljundite kaudu mitmesuguseid masinaid või protsesse. Nii PLC kui ka sellega seotud välised seadmed on projekteeritud nii, et neid saab hõlpsasti integreerida tööstusliku

juhtimissüsteemi ning neid saab kergelt kasutada kavandatud juhtimisfunktsioonide teostamiseks.
Lihtsalt öeldes on **programmeeritav loogikakontroller** spetsiaalne tööstusarvuti, mis on seotud juhitva masina andurite ja täituritega ning juhib nende abil masinas teostatava protsessi ülesandeid ja töid varem koostatud juhtimisprogrammi järgi. Vajadusel saab PLC'd ümber programmeerida ja kohandada uue toote/protsessi joaks.
Praegu turul pakutavad PLC'd on kohandatud kliendi kasvanud nõudmistele ja on kasutatavad peaaegu igas rakenduses. Tööstuses kasutatakse kontrollereid masina juhtimiseks (87%), mingi masina protsessi juhtimiseks (58%), liikumise juhtimiseks (40%), seeriatootmise juhtimiseks (26%), diagnostikaks (18%) ja muude asjade (3%) jaoks. Peale tootmise kasutatakse PLC ka mujal, nt elektrijaamades, alajaamades, hoone automaatikas, jne. Neid kasutatakse ka tööstusroboti juhtimiseks. Erilisi ohutusnõudeid rahuldavad PLC'd on saadaval laevandus- ja kaevandusülesannete jaoks.

1.3 Programmeeritava loogikakontrolleri riistvara

Standardi IEC 61131-2 järgi koosneb lihtne PLC toite-, keskjuhtimis- ja signaalimoodu-li(te)st [4].

1.3.1 PLC toitemoodul

Toitemoodul (PS – inglise k. *Power Supply* või PM – inglise k. *Power Module*) varustab PLC'd energiaga, mis saadakse 120/230 V vahelduvvooluvõrgust või 24 V alalis-vooluvõrgust. Mõned PLCd ei oma eraldiseisvat toitemoodulit kui keskjuhtimismooduli sisse on ehitatud toiteplokk kas alalispingesisendga 24 V (DC) või vahelduvvoolu-pingesisendiga 230 V (AC).

1.3.2 PLC keskjuhtimismoodul

Keskjuhtimismoodul (CPU – inglise k. *Central Processing Unit*) on elektroonikaseade mis sisaldab mikroprotsessorit ja seda teenindavaid elektrronilisi komponente. Keskjuhti-mismoodul on PLC aju mis juhib automatiseeritud seadme protsessi või töömasinat. Protsessori käskude baasil koostatud juhtimisprogramm salvestatakse PLC programmi-mälusse. Kasutatakse neli tüüpi mälusid.

1. Püsimälu (ROM – inglise k. *Read-Only-Memory*). Seda saab ainult ühe korra programmeerida
2. Muutmälu (RAM – inglise k. *Random-Access-Memory*). Sageli kasutatakse muutmälu ka kasutaja määratud andmete salvestamiseks. Sel juhul peab muutmälu olema varustatud akutoitega, sest pinge kadumisel kustub mälu sisu. Mõningatel muutmälu tüüpidel säilib salvestatud info lühikest aega ka ilma elektritoiteta.
3. Kustutatav ja uuesti programmeeritav püsimälu (EPROM – inglise k. *Eraseable Programmable Read Only Memory*). EPROM-mälu salvestab andmeid „igavesti", just nagu püsimälu ROM. Aga EPROM-i mälu saab kustutada ultraviolett-kiirgusega. Uuesti programmeerimiseks on vaja spetsiaalset püsimälu program-maatorit.

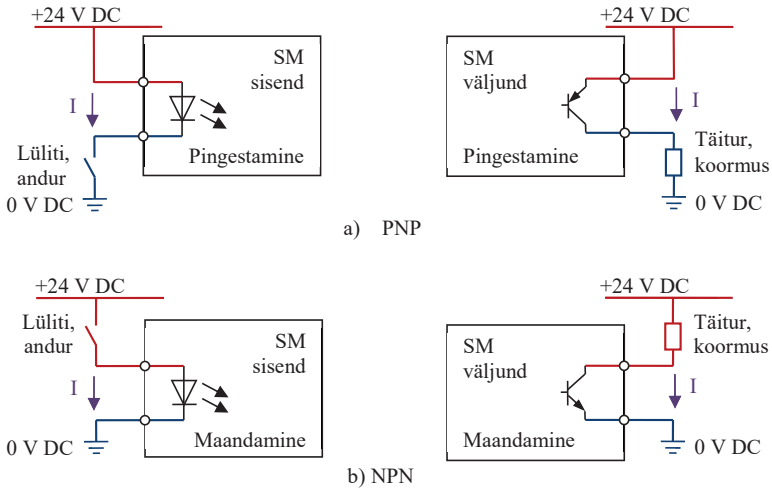
4. Elektriliselt kustutatav programmeeritav püsimälu (EEPROM – inglise keeles *Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*). EEPROM-mälu omab muutmälu paindlikkust ja kustutatava püsimälu eeliseid. Tema sisu saab elektriliselt kustutada ja piiratud arv kordi uuesti programmeerida (tänapäeval teatud juhtudel juba kuni miljon korda). Siia alla kuulub ka välkmälu ehk Flash mälu, mida kasutatakse nt USB mälupulkades.

Varem kasutati Siemensi PLC'des EPROM-mälu operatsioonisüsteemi ja püsivara (firmware) salvestamiseks. Nüüd kasutatakse selleks EEPROM-mälu. Vabalt juurdepääsetavat mälu (RAM-mälu) kasutatakse toote valmistusprotsessi ja selle juhtumisprogrammi andmete hetkväärtuste talletamiseks. Mõnikord salvestatakse juhtimisprogramm ka EEPROM-mälusse.
Peale juhtimisprogrammi täitmist määrab CPU teiste PLC's olevate moodulite parameetreid, haldab andmesidet programmeerimisseadmega, PLC laiendusmoodulitega, teiste PLC'(de)ga ja/või teiste seadmetega nagu näiteks operaatoripaneel. CPU võib omada eraldi toitesisendit, mälulaienduspesa (nt SD kaardi jaoks) ja ühte või mitut andmesideliidest.
Enamus CPU'del on võimalik valida PLC töörežiimi kas mingi nupu või arenduskeskkonna abil. Praegused Siemensi PLC'd omavad kaht töörežiimi: TÖÖ (RUN) režiim kasutaja programmi täitmiseks, ja STOPP (STOP) režiim, mil kasutaja programmi täitmine on peatatud. Mõlema töörežiimi ajal saab PLC'st laadida üles programmeerimisseadmesse (personaalarvuti) või sealt alla PLC'sse masina juhtimisprogrammi. Vanad Siemensi PLC'd omasid ka kolmandat töörežiimi, mida kutsuti TÖÖ-P (RUN-P) režiimiks. Selliste PLC'de puhul sai kasutaja laadida programme üles ainult STOPP või TÖÖ-P režiimis. TÖÖ režiimis täideti ainult kasutaja programmi ja samas ei saanud kasutaja programmi muuta (TÖÖ-P režiimis sai seda teha). Uuematel Siemensi PLC'del on töörežiimi valiku nupp kadunud. Töörežiimi saab valida ainult arenduskeskkonna abil.

1.3.3 PLC signaalimoodul

Signaalimoodulid (SM – inglise k. *Signal Module*) on sisend-väljundmoodulid (I/O – inglise k. *Input/Output*). Kasutusel on moodulid digitaalsete signaalide edastamiseks (DI – digitaalsisend, DO – digitaalväljund) ja analoogsete signaalide edastamiseks (AI – analoogsisend, AO – analoogväljund). SM teisendab saabuvad signaalid niisugusesse vormi, mida PLC protsessor suudab töödelda ning toimetab vastupidiselt väljuvate signaalidega. Enamasti kasutavad digitaalsignaali moodulid oma töös alalispinget väärtusega 24 V või vahelduvpinget väärtusega 120/230 V. Analoog-signaalimoodulite juures on kasutusel veel alalispinge väärtusega kas ±10 V, 0 – 10 V või 1 – 5 V ja alalisvool väärtusega kas 4-20 mA või 0-20 mA. Digitaal-väljundmoodulitest väljuvate signaalide edastamiseks on kasutusel optronid, transistorid ja releed, mis peavad kaitsma signaalmoodulit lühise, ülepinge ja ülekoormuse eest. Releedega saab lülitada erinevaid (DC ja AC) pingeid ja suuremaid voole võrreldes transistoridega, kuid relee lubatud lülituste arv on tunduvalt väiksem kui transistoril. Üks digitaal-signaalimoodul võib omada 8, 16 või 32 sama tüüpi sisendit ja/või väljundit ning analoog-signaalimoodul kuni 2, 4, 6 või 8 sama tüüpi sisendit ja/või väljundit.

Digitaal-signaalimoodulite kirjeldustes, kui mooduli toiteks kasutatakse alalisvoolu, kohtab sõnu SOURCING (eesti keeles pingestamine ja lühend PNP) ja SINKING (maandamine ja lühend NPN). Need sõnad kirjeldavad toitevoolu liikumist SM'lis. Pingestamisel ühendatakse andurite väljundid või täiturite sisendid läbi SM +24 V DC toitega. Vool liigub toiteahelast edasi läbi SM ja siis edasi täituri või anduri poole (1.2 a). Maandamise puhul ühendatakse andurite väljundid või täiturite sisendid läbi SM'i DC toite 0 V potentsiaaliga. Vool toiteallikast liigub siis kõigepealt läbi anduri või täituri ja siis edasi SM poole (1.2 b). Enamasti kasutatakse Euroopas maandavaid digitaalsisendiga SM'd ja pingestavaid digitaalväljundiga SM'd. On olemas ka SM'd, milles on mõlemad lahendused sisse ehitatud. Digitaalsete I/O SM'de valimisel jälgida, et need sobivad kokku olemas olevate (valitud) andurite ja täituritega.



Joonis 1.2. Pingestavad (a) ja maandavad (b) digitaal-signaalimoodulid

1.3.4 Muud PLC moodulid

Peale eespool loetletud moodulite võib PLC kooseisus olla järgmisi mooduleid/ seadmeid:

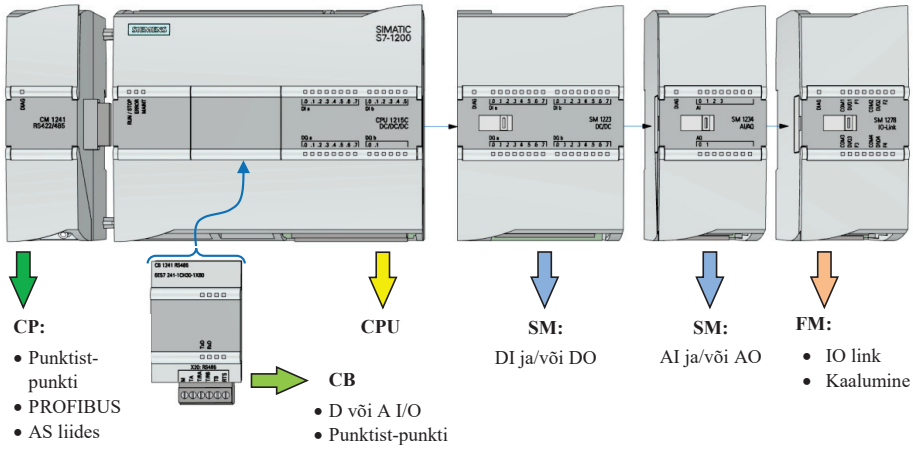
- kassetti/siin on süsteem, millesse on ehitatud andmeside siiniga ühendatakse eraldi olevad PLC moodulid kokku üheks terviklikuks PLC seadmeks;
- liidesmoodul (IM) ühendab mitmed eraldiseisvad kassetid üheks PLC'ks;
- funktsioonimoodul (FM) on seade, mis tegeleb keeruliste või aeg-kriitiliste protsessidega mis tuleb teostada CPU'st sõltumatult (nt kiire loendamine, PID- ja positsioonjuhtimine);
- andmeside moodul (CP või CM) ühendab PLC tööväljasiiniga (nt Industrial Ethernet, PROFIBUS, ASi liides);

- laienduskaart (CB) võimaldab laiendada CPU enda küljes olevate I/O'de arvu, andmeside liideste arvu või mingi muu (näiteks ekraaniga kasutajaliides) asja võrra ilma suure lisa mooduli juurde panemata;
- lisa mälukaart (MC), mis paigaldatakse CPU'sse. Seda saab kasutada lisa mäluna andmete ja programmi hoidmiseks, programmi laadimiseks PLC'sse ning mõnede CPU'de puhul saab nendes olevat firmware'i uuendada.
- jadaühendusmoodulid;
- kasutajaliidese moodul (nt operaatoripaneel);
- hajutatud sisend-väljund moodulid;
- kiiretoimelised signaalimoodulid, jne.

Iga PLC moodul omab lihtsat kasutajaliidest andmeside, patarei, I/O, PLC operatsiooni jne olekute ning vigade näitamiseks. Selleks kasutatakse väikseid vedelkristallekraane (LCD) või valgusdioode (LED).

1.3.5 Siemens S7-1200 seeria PLC riistvara

1.3 kujutab Siemens S7-1200 seeria kontrolleri riistvaralist koosseisu. CPU'st vasakule pole saab paigutada kuni kolm erinevat CM moodulit ja paremale poole kaks kuni kaheksa SM ja/või FM moodulit. CPU 1211C mooduli puhul ei saa paigutada ühtegi lisa moodulit paremale poole. CB paigutatakse CPU mooduli peale. Selleks tuleb eemaldada vajalikud katted ja kaaned CPU pealt.



Joonis 1.3. Siemens S7-1200 PLC riistvaraline ülesehitus

Siemens S7-1200 seeria kontroller ei vaja eraldiseisvat PS, kuna see on CPU sisse ehitatud. CPU'd võib toita kas ainult 24 V DC või ainult 230 V AC pingega. CPU enda külge on integreeritud DI, DO ja AI (sõltuvalt tüübist on nende arv erinev). CPU DO'de juures kasutatakse kas ainult transitore või releesid. Seetõttu on S7-1200 seeria kontrollerite CPU'd valik suur.

1.4 PLC tüübid

Sõltuvalt sellest, missugune on kontrolleri CPU mooduli ehitus ja kuidas see on ühendatud teiste moodulitega [7], saab PLC liigitada järgmiselt: kompakt-PLC, moodul-PLC, operaatorpaneeliga PLC, tööstusarvuti, kaart-PLC ja tarkvaraline PLC.

1.4.1 Kompakt-PLC

Kompakt-PLC's on CPU, PS ja SM paigutatud ühte väikesesse korpusesse. Sellisel PLC'l on kindel arv digitaal I/O'sid (mitte üle 40), üks või kaks andmesideliidest (nt üks PLC programmeerimiseks ja teine tööstusandmesideks) ning HMI liides. Kompakt-PLC'ga saab ühendada lisamooduleid sisendite-väljundite arvu suurendamiseks. Lisatavate lisamoodulite arv ei ületa kümmet ning need paiknevad samasuguses korpuses nagu kompakt-PLC.
Kompakt-PLC'sid kasutatakse enamasti juhtimissüsteemides releede asendusena. Üks PLC ei maksa rohkem kui käputäis releesid. Selle programmeerimine on sama paindlik kui juhtmetega releeskeemi koostamine. Sellist tüüpi odavate PLC'de nõrgaks küljeks on vähene mälu programmi ja andmete jaoks, nõrk protsessori jõudlus, taimerite ja loendurite väike arv ning mõned puuduvad andmetüübid (nt komakohaga arv, string). Kuid uuemad ja kallimad kompakt PLC'd omavad samu funktsioone nagu ülejäänud PLC'd. Nende ainsaks puuduseks on piiratud I/O'de arv.

Joonis 1.4. Kompaktsed PLC'd (vasakul on Festo FEC FC660 , keskel Siemens Logo ja paremal S7-200 PLC)

Kompakt-PLC tüüpi on Festo FEC PLC, Siemens Logo, S7-200 PLC (joonis 1.4) ja S7-1200 PLC (joonis 1.5).

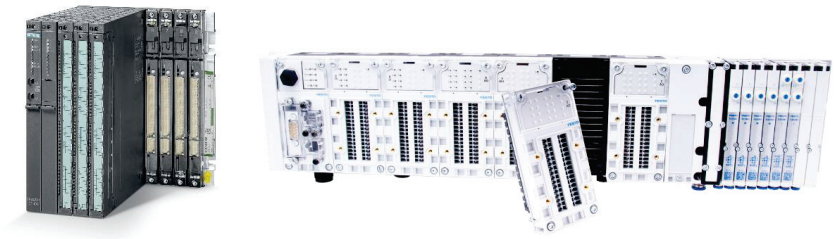
Joonis 1.5. Siemensi kompakt-PLC S7-1200

1.4.2 Moodul-PLC

Moodul-PLC on võimsam ja omab rohkem funktsioone kui kompakt-PLC. Tema osad nagu näiteks CPU, PS, SM, FM, servo-mootori juhtimismoodul, positsioneerimismoodul, CP moodul, jne paiknevad eraldi korpustes. Moodul-PLC osad paigutatakse tavalisele DIN-liistule, spetsiaalse kujuga kinnitusliistule või kasseti ning need suhtlevad CPU'ga läbi sisese siinisüsteemi. Siinisüsteem võib olla üks osa moodulist (ühendus pesad ja pistikud külgedel), omada eraldi korpust (üks osa kassetist) või olla lamekaabel, mis ühendatakse pistikute abil moodulite külge. Kassett omab pesasid PLC moodulite jaoks ja sisest siinisüsteemi, mis on integreeritud tagaseina ning mis võimaldab vahetada informatsiooni eri moodulite vahel. Kassettide eeliseks teiste kinnitusliistude juures on kiirem andmeside PLC moodulite vahel ja moodulite kiirem toimimine.
Siinisüsteemi lisatavate moodulite arv on piiratud, et tagada kiiret andmete vahetust moodulite vahel. Nt Seimens S7-300 PLC'le saab ühele DIN-liistule panna kuni 11 moodulit. Siinisüsteemi saab laiendada kasutades selleks spetsiaalseid laiendus-mooduleid (nt IM). Selle abil saab paigutada Siemens S7-300 PLC nelja DIN-liistu peale. See võimaldab ühendada ühe Siemensi CPU mooduliga kuni 32 moodulit.
Moodul-PLC ehitus võimaldab panna kokku sellise PLC nagu seda nõuab juhitav masin või selle protsess.

Joonis 1.6. Moodul-PLC'd paigutatud kinnitusliistule (vasakul on Siemens S7-1500, keskel S7-300 ja paremal Allen-Bradley CompactLogix PLC)

Moodul-PLC alla liigituvad Siemens S7-300 ja S7-1500 PLC ning Allen-Bradley CompactLogix PLC (1.6). Moodul-PLC alla kuuluvad Siemens S7-400 ja firma Festo CPX PLC (1.7), mille moodulid paigutatakse kasseti.



Joonis 1.7. Moodul-PLC'd paigutatud spetsiaalsesse kasseti (vasakul on Siemens S7-400 ja paremal Festo CPX PLC)

1.4.3 Operaatorpaneeliga PLC

Joonis 1.8. Operaatorpaneeliga PLC (Unitronics M90)

Nagu operaatorpaneeliga PLC (OPLC) nimi juba ütleb, omab antud seade lisaks kontrollerile ka HMI liidest automatiseeritud protsesside või masinate juhtimiseks ja nende töö jälgimiseks. HMI osa koosneb enamasti ekraanist ja klaviatuurist või puuteekraanist. HMI ekraan võib olla tekstipõhine või graafiline. Sellise süsteemi eeliseks võrreldes tavalise PLC'ga, mis kasutab eraldiseisvat operaatorpaneeli, on see, et operaatorpaneeli ei pea kontrollerist eraldi programmeerima. Süsteemi juhtimisprogramm ja HMI liides koostatakse ühes tarkvarakeskkonnas. See aitab kokku hoida süsteemi arendamise aega.
OPLC alla kuuluvad Unitronics M-90 (joonis 1.8), Jazz ja Vision.

1.4.4 Tööstusarvuti

Tööstusarvuti on tavaline personaalarvuti, millesse on integreeritud PLC funktsionaalsus. PLC osa antud süsteemis võib põhineda riistvaral (kaart-PLC) või tarkvaral (virtuaalne PLC). Tööstusarvuteid kasutatakse keskmistes või suurtes automatiseerimisrakendustes, kus on oluline kiire protsessijuhtimine, kiire andmete kogumine ja vahetus koos OPC ja/või SQL serveritega (paigaldatud tööstusarvutisse), süsteemi hea jälgitavus ning selle pikk eluiga. Enamikel juhtudel kasutab tööstusarvuti automatiseeritud protsesside ja/või masinate juhtimiseks andmesidet. Samas võib see omada sisse ehitatud I/O'sid ja teisi PLC mooduleid.
Tööstusarvutid on ehitatud arvuti komponentidest, mis ei kasuta mehhaanilisi liikuvaid osi. Nt kasutatakse kõvaketastena SSD kettaid, arvutis olevat protsessorit jahutatakse passiivsete radiaatoritega, jne. Seetõttu on tööstusarvuti kallim lauaarvutist.
Tööstusarvuti puuduseks on see, et teatud aja möödudes pole võimalik saada varuosi (nt mälu, protsessor, videokaart jne). See tähendab, et tootmises on uued paremad komponendid ja vanu komponente enam ei toodeta.

Joonis 1.9. Siemensi (vasakul) ja B&R Automation (paremal) tööstusarvutid

1.9 kujutab Siemensi BOX PC ja B&R Automation PC 910 tööstusarvutid.

1.4.5 Kaart-PLC

Kaart-PLC on arvutisse paigaldatav spetsiaalne riistvaraline moodul, mis omab kõiki tavalise PLC CPU funktsioone. Enamasti paigutatakse see arvuti emaplaadil olevale PCI või PCI-E pessa, mis võimaldab otsest andmevahetust arvutis oleva HMI ja/või teiste arvutite tarkvaraliste rakendustega. Kaart-PLC'l on vähemalt üks andmesideliides tema ühendamiseks otse tööstuslikku andmesidevõrku (vahetada andmeid hajutatud I/O'dega, teiste PLC'dega või muude juhtimissüsteemi seadmetega).

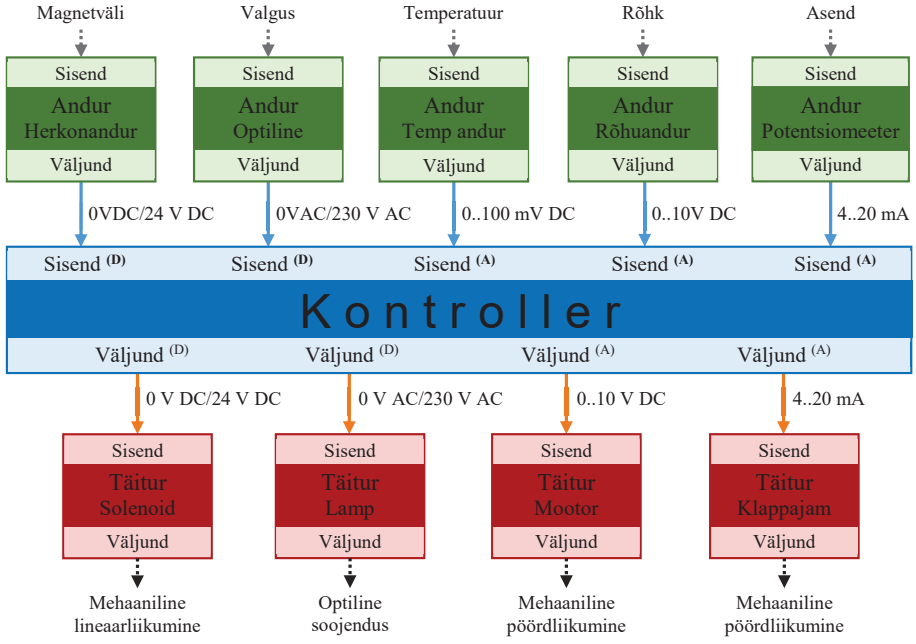
1.4.6 Tarkvaraline PLC

Tarkvaraline PLC ehk virtuaalne PLC on programm, mis töötab personaalarvutis ja emuleerib riistvaralist kontrollerit. Automatiseeritud protsesside või masinate juhtimiseks kasutab see arvutis olevaid andmesideliideseid (Ethernet kaart, Etherneti pesa, COM pesa) või arvutisse asetatavaid spetsiaalseid andmesidekaarte suhtlemaks hajutatud I/Odega ja teiste juhtimissüsteemi seadmetega. Tarkvaralise PLC puuduseks on lisamälu puudumine andmete salvestamiseks. Toitepinge katkemisel (kadumisel) kaotatakse kõik protsessi juhtimisandmed, kuid sellest saab üle täiendava energiasalvestiga. Lisaks on arvuti operatsioonisüsteemi vahetumisel oht, et tarkvaraline PLC ei tööta uues süsteemis. Peale selle puudub garantii, et tarkvaralise PLC'ga samal ajal töötavad teised tarkvaralised rakendused (HMI või OPC server) ei mõjuta PLC tööd (nt protsessi juhtimise kiiruse vähendamine, andmeside katkestused, jne).
Tarkvaralise PLC'na pakub Siemens SIMATIC WinAC RTX, mis vajab arvuti jaoks spetsiaalset andmeside võrgukaarti.

1.5 PLC poolt töödeldavad signaalid

Tootmissüsteemides mõõdetakse füüsikaliste suuruste nagu temperatuur, rõhk, valgustugevus, elektripinge, jne väärtusi. Samas PLC mõistab ja annab välja ainult elektrilisi signaale. Seetõttu tuleb füüsikaliste suuruste väärtused andurites muuta elektrilisteks signaalideks ja PLC väljundist tulevad elektrilised signaalid muundatakse täiturites

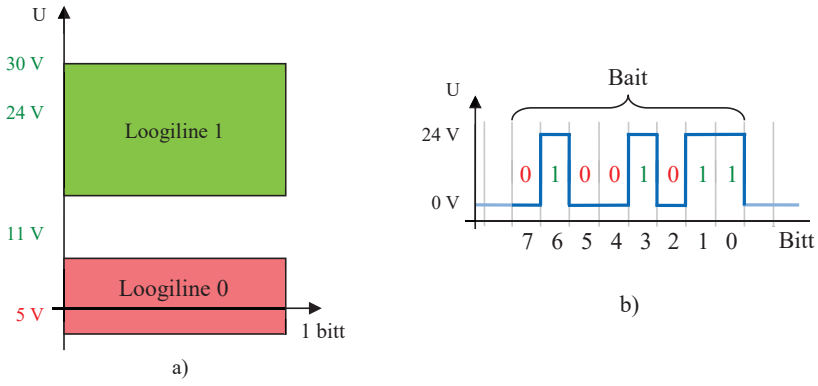
tehtavaks tööks (1.10). PLC puhul eristatakse kolme tüüpi signaale, millega see on võimeline töötama: binaar-, digitaal- ja analoogsignaalid.



Joonis 1.10. PLC ning sellega seotud erinevate sisend- ja väljundseadmete vahelised signaalid

1.5.1 Binaarsignaal

Ühebitisel **binaarsignaalil** on ainult kaks väärtust (0 – madal/väär, ja 1 – kõrge/tõene). Binaarsignaale kustutakse ka diskreetseteks ehk katkelisteks signaalideks, kuna need saavad teatud ajahetkel omada kahest võimalikust väärtusest ainult ühte. Binaarsignaali väljastab näiteks surunupp või lüliti, kui see ühendada pingestatud vooluahelasse. Vooluahelasse ühendatud normaalselt avatud kontakt (välist jõudu rakendamata püsib selline kontakt avatuna) edastab (loogika) signaali väärtusega 0. Kui vooluahelasse ühendatud kontakt jõuga sulgeda siis selle väljund signaali väärtus 1. Elektriseadmetes tuleb siiski arvestada teatud hälvetega. Seetõttu on standardis IEC 61131 loogika-signaale kandva pinge väärtused täpsemalt määratud. 24 V DC toitepingega kontaktivabade andurite väljundis loetakse pingevahemikku -3 – +5 V loogiliseks nulliks ja pingevahemikku 11 – 30 V loogiliseks üheks (joonis 1.11 a). 230 V AC puhul loetakse pingevahemikku 0 – 40 V loogiliseks nulliks ja vahemikku 164 – 253 V loogiliseks üheks.



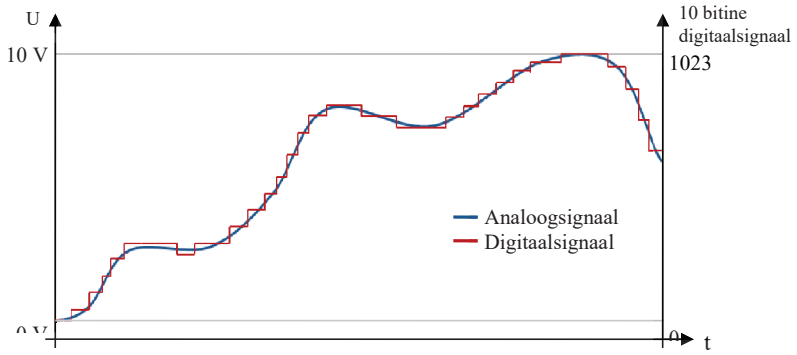
Joonis 1.11. Binaarsignaali (24 V DC) pinge väärtuste vahemik (a) ning 1 baidine digitaalsignaal (b)

1.5.2 Digitaalsignaal

Digitaalsignaal on binaarsignaalide jada, mis edastamisel või salvestamisel moodustab ühe terviku (1.11 b). Igat kohta digitaalsignaalis kutsutakse bitiks. Tüüpilised digitaalsignaali vormid on: terta – 4 bitti (ei ole laialdaselt kasutusel), bait – 8 bitti, sõna (word) – 16 bitti, topeltsõna – 32 bitti, topelt pikk sõna – 64 bitti (ei ole laialdaselt kasutusel). 1.11 b esitab ühe 24 V digitaalsignaali 1 baidi väärtuse, milleks on 75.

1.5.3 Analoogsignaal

Analoogsignaal edastab mingi mõõdetava füüsikalise suuruse (nt temperatuuri) väärtust elektrilise pingega 0 – 10 V (1.12) või vooluga 4 – 20 mA. Analoogsignaale kustutase ka pidevsignaaliseks, kuna nende väärtused muutuvad ajas pidevalt. Nüüdisaegsed PLC'd pole veel võimelised töötlema reaalseid analoogsignaale, seetõttu muundatakse kontrollerisse sissetulev analoogsignaal digitaalsignaaliks (täisarvuks) ja väljuv digitaalsignaal muundatakse analoogsignaaliks. Signaali-muundamine toimub analoog SM's. Kui digitaalsignaalis on rohkem bitte (nt 10 biti asemel 12 bitti), saavutatakse muundamisel suurem eraldusvõime (resolutsioon) ehk suurem analoogsignaali täpsus. Tüüpilise 0 – 10 V väärtusega analoogsignaali viga võib digitaalsignaaliks muundamise järel olla 0,1 V, 0,01 V või 0,001 V (vastavalt digitaalsignaalis kasutatavate bittide arvule).



Joonis 1.12. Analoogsignaal

Tabelis 1.1 on esitatud mõõdetava temperatuuri väärtuse teisendamine pingeks, mis edastatakse PLC'le ja muundatakse analoog SM's digitaalsignaaliks (väärtuseks). Tabelis on esitatud temperatuuri vahemiku väikseim ja suurim väärtus ning neile vastavad analoogsignaali pinge ja digitaalsignaali väärtused. Digitaalsignaali muundureid on kaks, millest ühes kasutatakse analoogsignaali esitamiseks 10 bitti ja teises 12 bitti. Veel on tabelis 1.1 esitatud temperatuuri ja pinge väärtuse muutus, kui digitaalsignaali väärtus muutub 1 võrra.

Tabel 1.1. Analoogsignaali muundamine digitaalsignaaliks

Temp ^{0}C	Analoogsignaal V DC	Digitaalsignaal, 10 bitti	Digitaalsignaal, 12 bitti
-20	0	0	0
40	10	1023	4095
Samm mille võrra muutub digitaalsignaali väärtus			
0,059	0,0098	1	4
0,015	0,0024	0	1

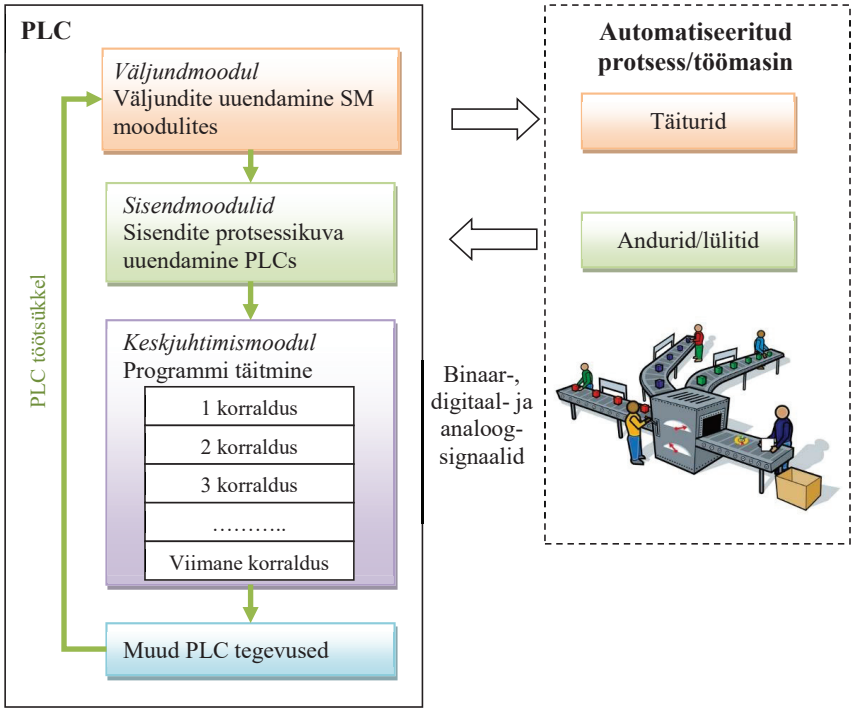
Külmutusseadme temperatuuri väärtuse näitamiseks kasutajale piisab kui kasutada PLC kooseisus SM't mis kasutab 8 bitti analoogsignaali esitamiseks.

1.6 Kuidas töötab SIMATIC S7-1200 PLC?

PLC toimib tsükliliselt (1.13). Iga PLC sisene tsükkel algab väljundite väärtuste uuendamisega SM'tes. Väljundite andmemälus (väljundite protsessikuvas) olevad binaar- või digitaalsignaalid kopeeritakse ja saadetakse SM'tesse, kus need muundatakse täituritele arusaadavasse vormi (nt analoogsignaalideks) ja saadetakse sealt edasi täituritele.

Järgmine samm on PLC sisendite väärtuste (ehk sisendite protsessikuva) uuendamine. SM'tes mõõdetakse sisendsignaalide väärtused ja muudetakse binaar- või digitaal-signaalideks, mis saadetakse sisese siinisüsteemi kaudu CPU'sse ja salvestatakse sisendite andmemälus (sisendite protsessikuvas). Peale seda hakkab CPU täitma programmimälus olevat kasutaja loogika kohaselt loodud programmi (korraga täidetakse üht korralduserida), mis on salvestatud MC7 masinkoodis (sarnaneb Siemens PLC programmeerimiskeelega käsulist). See tähendab, et kõik teistes PLC programmeerimiskeeltes kirjutatud programmid tõlgitakse MC7 keelde enne nende salvestamist PLC'sse. Programmi (korralduserea) täitmise käigus määratakse väljundsignaalidele uued väärtused ja need salvestatakse väljundite andmemällu (väljundite protsessikuva).

Viimaseks sammuks on muud tegevused PLC's. Siia alla kuuluvad andmeside pidamine programmeerimisseadmega, hooldustööd nagu mälu haldamine, moodulite diagnoos-tika, jne. See osa tsüklist tehakse operatsioonisüsteemis nii kiiresti, et kasutaja ei märka seda. Kui viimane osa PLC protsessitsüklist on täidetud, siis PLC alustab uue tsükliga.



Joonis 1.13. PLC protsessitsükkel

Siemens S7-1200 PLC täidab kohe käivituse järel (esimese tsükli kestel) spetsiaalset programmiosa mida nimetatakse käivituseks ehk "Startup" (plokk OB 100). Siinkohal tuleks mainida, et käivitustsükli ajal ei toimu väljundite väärtuste uuendamist SM'tes ning sisendite protsessikuva uuendamist PLC's. Esmalt nullitakse sisendite protsessikuva ja siis lähtestatakse väljundite protsessikuva PLC's. Alles peale käivitust uuendatakse

sisendite protsessikuva PLC-s. Seejärel hakatakse PLC töötsüklit täitma nii nagu seda on kirjeldatud eespool, ehk siis uuendatakse väljundid SM'tes ja sisendite protsessikuva PLC's, täidetakse põhiprogrammi (kasutaja poolt kirjutatud programmi, mis on seotud plokiga OB 1) ning teostatakse muid PLC tegevusi.
Mõnikord katkestatakse põhiprogrammi täitmine mingi sündmuse toimumise tõttu. Näiteks vajutas operaator hädaavarii nuppu, SM riistvara läks katki või mingi ajavahemiku järel tuleb täita teatud kindlat (alam)programmi. Peale katkestuste poolt käivitatud programmi täitmist jätkab PLC jälle põhiprogrammi täitmisega.
Teiste ettevõtete loodud PLC töötsüklid võivad olla teistsuguse ülesehitusega. Nt Allen-Bradley CompactLogic PLC's toimub I/O signaalide väärtuste uuendamine programmi täitmise ajal, mitte enne või pärast seda.

1.7 Multitegumtöö

Tänapäeva PLC'd on võimelised täitma automatiseeritud protsessi juhtimisel korraga mitut ülesannet. Iga ülesanne võib koosneda mitmest eraldi programmist. Tegelikult täidab PLC iga protsessor korraga ainult üht ülesannet (protsessi mingit konkreetset osa). Kuna protsessorid töötavad väga kiiresti, näib kasutajale, et PLC täidab mitut ülesannet korraga.
Standard IEC 61131 määratleb ülesannet kui hierarhiliselt kõrgemat juhtimistasandit PLC programmide täitmisel. PLC on võimeline aktiveerima ülesande kas ajaperioodi (kutsutakse perioodiliseks ülesandeks) või sündmuse baasil (kutsutakse mitteperioodiliseks ülesandeks) ning selles mingi kirjutatud programmi (korralduste kogumiku) täitmist [8]. Perioodilisi ülesandeid täidetakse tsükliliselt programmeerija poolt määratud aja möödudes. Mitteperioodilisi ülesandeid täidetakse käimasoleva ülesande koosseisus oleva programmi töös konkreetse sündmuse ilmnemisel (nt kui mingi olulise andmeelemendi või signaali väärtus muutub 0 → 1).
Tootmisprotsessis multitegumtöö organiseerimisel määrab ülesannete tähtsuse ehk prioriteedi programmeerija. Prioriteedinumbri väärtus algab nullist ja see tähistab kõrgeimat prioriteeti. Suurem prioriteedinumber tähendab täitmisel väiksemat prioriteeti. Kui PLC töös püüavad mitu ülesannet kasutada CPU protsessorit samal ajal, siis määrab ülesande prioriteedinumber esimesena täidetava ülesande. Alustatakse kõige kõrgema prioriteediga ülesande täitmisest ja teised jäävad ootama. Kui mitmel täitmist ootaval ülesandel on sama prioriteet, siis peale eelmise ülesande täitmise lõpetamist (CPU protsessor saab vabaks) alustatakse pikima ooteajaga ülesande täitmist.
Kui mingi programm PLC's ei ole seotud ühegi ülesandega, siis omab see programm kõige madalamat prioriteeti ja seda täidetakse ainult siis, kui protsessor pole hõivatud.
Multitegumtöö jagatakse vastavalt ülesande täitmise katkestusele kaheks: eesõiguseta ja eesõigusega multitegumtöö. Eesõiguseta multitegumtöös täidetakse ülesanne lõpuni isegi siis, kui kõrgema prioriteediga ülesanne nõuab täitmist. Järgmisena jätkatakse kõige kõrgema prioriteedi ja pikima ooteajaga ülesande täitmisega. Eesõigusega multitegumtöös täidetakse mingit ülesannet seni, kuni kõrgema prioriteediga ülesanne muutub aktiivseks ja katkestab eelmise ülesande tegevuse. Seega väiksema prioriteediga ülesande täitmine on ooterežiimis senikaua kuni kõrgema prioriteediga ülesande tegevus on täidetud. Eesõigusega multitegumtöös sama või väiksema prioriteediga

ülesanded ei saa katkestada täidetavat ülesannet. Need peavad ootama kuni käesolev ülesanne on täidetud/lõpetatud. Peale katkestatud ülesande täitmise lõpetamist jätkatakse kõige kõrgema prioriteedi ja pikima ooteajaga ülesande täitmist.
Standard IEC 61131 määrab kindlaks ülesannete täitmise reeglid. Programmeerija peaks neid reegleid teadma.

1. Ülesannet täidetakse, kui see on välja kutsutud (perioodiliselt või mingi sündmuse aktiveerumisel) ja teised allpool esitatud reeglid ei kehti (need ei ole aktiivsed PLS's). See tähendab, et PLC'l on vaba aega ülesande täitmiseks.

2. Kui ootel on rohkem kui üks ülesanne, võetakse täitmisele neist kõrgema prioriteediga ülesanne. Eesõigusega multitegumtöös katkestatakse ülesande täitmine, kui uus aktiveeritud ülesanne omab täidetavast ülesandest kõrgemat prioriteeti. Eesõiguseta multitegumtöös peab uus aktiivne ja kõrgema prioriteediga ülesanne ootama täidetava ülesande tegevuse lõpetamist. Kui väljakutsutud ülesanne (kehtib mõlema multitegumtöö puhul) omab võrreldes täidetava ülesandega sama või väiksemat prioriteeti, siis antud ülesanne peab ootama täidetava ülesande tegevuse lõpetamist. Kui täidetav ülesanne ja täitmist ootav ülesanne jagavad mõningaid programmilõike (programm, funktsiooni plokk, funktsioon), siis täidetakse neid programmilõike. Teisi täitmist ootava ülesande programmilõike ei täideta.

3. Kui PLC's on ootel mitu sama prioriteediga ülesannet, siis vaba CPU protsessori korral hakatakse täitma pikima ooteajaga ülesannet.

4. Programmid (-osad/lõigud), mis pole seotud ühegi ülesandega, omavad kõige madalamat prioriteeti. Neid täidetakse, kui muude ülesannete tegevus või nende endi tegevus on lõpetatud.

Mõnel PLC'l võib-olla CPU's kaks või enam protsessorit. Sellised PLC'd saavad täita mitut ülesannet üheaegselt (multitegumtöö reaalajas) ilma ajalise viivituseta. See võimaldab reageerida kiirelt protsessi või masina mitte regulaarsele käitumistele.

1.8 Teadmiste kontroll

1. PLC on ...
   a. on väike arvuti ühes mikroskeemis, mis sisaldab protsessori tuuma, mälu ja programmeeritavaid sisend/väljund välisseadmeid.
   b. toote elutsükli haldus, mille käigus rakendatakse toote elutsükli hindamise meetodeid
   c. tööstusarvuti, mida kasutatakse töömasina juhtimiseks. Töömasina juhtimiseks vajalike signaalide edastamine toimub kontrolleriga liidetud sisend/väljundmoodulite kaudu.
   d. elektrivõrgu andmeside süsteem, mis võimaldab vahetada infot elektriliinide kaudu.
   e. programmeeritav kontroller, mida kasutatakse elektrimootorite juhtimiseks.

2. Mille alla liigitatakse PLC?
   a. Andur
   b. Juhtimissüsteem
   c. Täitur

3. PLC signaalmoodulid on …
   a. sisend/väljundmoodulid digitaal- ja analoogsignaalide jaoks.
   b. seade digitaalsignaalide muundamaks analoogsignaalideks ja vastupidi.
   c. sagedusmuunduri sisend/väljundmoodulid.
   d. andmeside moodul tootmissüsteemide vahel info vahetamiseks.
   e. seadmed, mida kasutatakse SCADA rakenduste loomiseks.

4. Mida tähendab SINKING (maandamine) signaalimoodulite juures?
   a. Andur/täitur ühendatakse maanduse külge läbi SM mooduli.
   b. Andur/täitur ühendatakse toite 0 V DC külge läbi SM mooduli.
   c. Andur/täitur ühendatakse toite 24 V DC külge läbi SM mooduli.
   d. Andur/täitur ühendatakse kokku läbi SM mooduli.

5. Millises järjestuses on paigutatud Siemens SIMATIC S7-1200 PLC moodulid?
   a. Toite-, signaal-, keskjuhtimis- ja andmeside moodul.
   b. Keskjuhtimis-, signaal- ja liidesmoodul.
   c. Signaal-, keskjuhtimis-, signaal-, toite- ja signaalmoodul.
   d. Keskjuhtimis-, andmeside ja signaalmoodul.
   e. Andmeside , keskjuhtimis- ja signaalimoodul.

6. Tavaline PLC koosneb …
   a. toite-, keskjuhtimis- ja signaalmooduli(te)st.
   b. keskjuhtimis- ja signaalmooduli(te)st.
   c. keskjuhtimis-, toite-, signaalmooduli(te)st, HMI liidesest, andmeside moodulist ja hajutatud sisend/väljund mooduli(te)st.
   d. toite-, andmeside- ja signaalmooduli(te)st.
   e. toite-, keskjuhtimis-, andmeside ja signaalmooduli(te)st.

7. Standard IEC 61131 määrab signaali väärtuseks loogilise ühe (süsteemi toitepinge on 24 V DC) kui
   a. pinge on vahemikus 0 - 40 V.
   b. pinge on vahemikus 13 - 30 V.
   c. pinge on vahemikus 11 - 30 V.
   d. pinge on vahemikus 0 - 11 V.
   e. pinge on vahemikus -3 - 5 V.

8. OPLC on …
   a. PLC, mis koosneb hajutatud juhtimissüsteemist.
   b. PLC, mis peale tavaliste PLC moodulite sisaldab ka inimese-masina liidest.
   c. PLC, mis sisaldab ka veebi serverit.
   d. lauaarvutipõhine PLC, mis omab ka inimese-masina liidest.
   e. PLC, mille iga moodul paikneb eraldi kestas.

9. Tarkvaraline PLC on …
   a. arvutisse paigaldatav PLC kaart, mis juhib automatiseeritud protsesse läbi jahutatud I/O'de.
   b. virtuaalne PLC, mida kasutatakse kirjutatud PLC programmide testimiseks.
   c. reaalne tarkvaral põhinev PLC, mis paigaldatakse arvutisse ja juhib automatiseeritud protsesse läbi hajutatud I/O'de.
   d. PLC, mis on valmistatud pehmest materjalist.
   e. Arvuti, mis täidab ka PLC ülesandeid.

10. Multitegumtöö tähendab, et …
   a. PLC on võimeline täitma mitut ülesannet korraga.
   b. kasutaja programm on jagatud väiksemateks programmilõikudeks.
   c. inimene võib täita mitut ülesannet samal ajal.
   d. kasutaja programmi täidetakse ainult siis, kui seda käsib mingi sündmus.
   e. kasutaja programmi täidetakse ainult teatud aja tagant.

11. Milline järgnev väide on tõene?
   a. Multitegumtöö puhul täidetakse PLC's vähemalt kaht ülesannet ühel ajal.
   b. Multitegumtöö puhul täidetakse väikseima prioriteediga ülesannet ja teised ülesanded peavad ootama selle täitmise lõpetamist.
   c. Multitegumtöö puhul täidetakse kõrgeima prioriteediga ülesannet ja teised ülesanded saavad katkestada selle täitmist, kui uue ülesande prioriteet on väiksem.
   d. Multitegumtöö puhul täidetakse kõrgeima prioriteediga ülesannet ja teised ülesanded peavad ootama selle täitmise lõpetamist.
   e. Multitegumtöö puhul täidab PLC vähemalt kaht ülesannet korraga.

2 PLC PROGRAMMEERIMINE

2.1 Standard IEC 61131-3

Modernsed programmeerimistööriistad peavad vastama teatud nõudmistele, et nendega saaks odavalt luua piisava funktsionaalsusega automatsiseeritud tehnilisi rakendusi. Arendustöö efektiivsuse tõstmiseks kasutatakse erinevaid programmeerimiskeeli. Rakenduse juhtimissüsteemi loomiseks kasutatav programmeerimistööriist peab võimaldama kontrollerisse (PLC) laaditava programmi käivituseelset (inglise k. *Offline*) testimist, simuleerimist ja dokumenteerimist. Sageli on vaja PLC programmi muuta ka masina töö ajal (inglise k. *Online*). PLC programmilõigud peavad pärast dokumenteerimist olema korduvkasutatavad. Rahvusvahelise standardi IEC 61131 kasutuselevõtmisega astuti suur samm edasi nende nõudmiste täitmisel [5].

See rahvusaheline standard defineerib ja seletab lahti mis asi on PLC, millest see koosneb, kuidas see töötab ning kuidas seda saab programmeerida ja kasutada. Standardit haldab ja arendab rahvusvaheline mittetulundusühing *PLCopen*. Neil on olemas oma interneti-leht: *plcopen.org*.

Kuna see standard on väga detailirohke, siis ei rakenda eri firmad oma programmeerimis-süsteemides kõiki selles standardis kirjeldatud võimalusi. Standard pakub võimaluse kirjeldada funktsionaalseid nõudmisi tabeli abil. Tootja peaks tabelis ära märkima need funktsioonid, mida nende tarkvaratööriist ja/või PLC täidab ja missuguses ulatuses. Paljud PLC tootjad toetavad standardit IEC 61131, kuid nende tööriistade vastavus standardi nõudmistele kõigub laias ulatuses. Eri firmade programmeerimistööriistade täieliku vastavuse saavutamine ei ole kerge ülesanne.

Standard EN/IEC 61131 koosneb 9 osast ja arendamisel on 10. osa (2016).

EVS-EN/IEC 61131-1: Üldine informatsioon – seletab lahti mõisteid ja omadusi mis on olulised PLC ja sellega seotud lisaseadmete valikuks ja rakendamiseks [6].

IEC 61131-2: Nõuded seadmetele ja katsetused – täpsustab nõuded PLC'ile ja selle lisaseadmetele, milliseid tahetakse kasutada tööstuses masinate protsesside juhtimiseks. Kui PLC'id ja/või lisaseadmeid tahetakse kasutada mujal (äris, elamutes), siis tuleb lisaks sellele standardile jälgida vastava rakenduse/keskkonna erinõudeid, standardeid ja paigaldustavasid.

EVS-EN/IEC 61131-3: Programmeerimiskeeled – see määratleb kasutavate programmeerimiskeelte põhilised elemendid, süntaksi ja semantika reeglid. See seletab kuidas saavad PLC tootjad kasutada selles standardi osas defineeritud programmeerimis-keeli oma PLC programmeerimiseks ja kuidas kasutajad saavad laadida nende keelte abil koostatud juhtimisprogramme PLC'sse. Selles standardiosas (IEC 61131-3) kirjeldatakse PLC programmeerimiskeeli ja ka juhtimisprogrammi ülesehitust. Standard harmoniseerib laialdaselt kasutatavad programmeerimiskeeled pidades silmas ka tuleviku võimalusi. PLC ostmisel on soovitav jälgida, et see toetab seda standardiosa. Standardile vastavat juhtimisprogrammi on võimalik ehitada üles peaaegu ühesugustest plokkidest.

EVS-EN/IEC 61131-4: Kasutaja juhend – annab lõppkasutajale juhiseid standardile 61131 vastavate PLC'de valimiseks ja rakendamiseks.

EVS-EN/IEC 61131-5: Kommunikatsioon – määratleb kommunikatsiooni võimalused PLC seisukohast. Kuidas saavad erinevad, serverit sisaldavad, seadmed suhelda PLC'ga ning kuidas suhtleb PLC teiste seadmetega.
EVS-EN/IEC 61131-6: Funktsionaalne ohutus – määratleb nõuded PLC'le ja nende lisaseadmetele, mida tahetakse kasutada elektrilistes/elektroonilistes/programmeeritavates elektroonilistes turvalahendusega seotud süsteemides.
EVS-EN/IEC 61131-7: Hajusjuhtimise programmeerimine – määratleb programmeerimiskeele hägusjuhtimise (inglise k. *Fuzzi control*) rakenduste jaoks, kus kasutatakse juhtimisseadmeks PLC'd.
EVS-EN/IEC 61131-8: Juhised programmeerimiskeelte kohaldamiseks ja rakendamiseks – annab juhiseid standardi 61131-3 osas defineeritud programmeerimiskeelte rakendamiseks PLC süsteemides ja PLC'de juhtimisprogrammi arenduskeskkondades, kus koostatakse PLC juhtimisprogramme.
EVS-EN/IEC 61131-9: Digitaalne punktist-punkti kommunikatsiooni liides väikestele anduritele ja täituritele – määratleb digitaalse punktist-punkti kommunikatsiooni liidese tehnoloogia väikestele anduritele ja täituritele, mis ületavad tavaliste digitaalsete sisendite ja väljundite liideste võimalused. See võimaldab edastada mingeid parameetreid seadmetele ja võtta vastu seadmetelt tuleva diagnostika informatsiooni. Seda digitaalset punktist-punkti kommunikatsiooni liidest tuntakse ka kui *IO-Link*.
IEC 61131-10: XML-vorming juhtimisprogrammidele, mis vastavad standardile IEC 61131-3. Määratleb XML keeles vormingu, mis võimaldab vahetada tootmissüsteemide vahel juhtimisprogramme, teeke ja projekte (mis on koostatud standardi IEC 66131-3 järgi), samuti informatsiooni erinevate arenduskeskkondade (programmmeerimise, inim-masin liidese, simulatsiooni, kommunikatsiooni, jne) vahel. See standardi osa on praegu arendamisel ja seda loodetakse avalikustada aastal 2018.

2.2 Programmi ülesehituse plokid

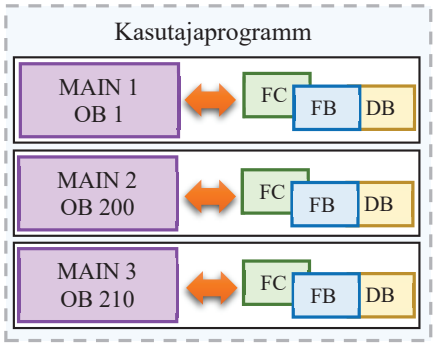
Standardis IEC 61131-3 nimetatakse funktsionaalseid plokke, millest (automatiseerimis)projekt ja selle programmid moodustatakse (koostatakse) nn ülesehituse üksustest (inglise k. *Program Organization Unit*, POU). Tavapärases programmeerimiskeskkonnas vastavad nendele programmiplokid, juhtimisplokid, järjestusplokid ja funktsiooniplokid [9]. Standardi üks oluline eesmärk on piirata eri plokitüüpide mitmekesisust ja seega lihtsustada nende kasutamist. Standard määratleb järgmised POU tüübid: funktsioon (FUN), funktsiooniplokk (FB) ja programm (PROG).
Firma Siemens lõi programmeerimistööriista STEP 7 (uuemas versioonis kuulub see TIA Portal tarkvara koosseisu) oma kontrolleriseeriate S7-300, S7-400, S7-1200 ja S7-1500 programmeerimiseks. Programmeerimiskeskkonnas STEP 7 on POU'd teistmoodi koostatud, ülesehitatud ja tähistatud. STEP 7 kasutatakse POU'dena nn juhtplokke (OB), funktsioone (FC), funktsioonplokke (FB) ja andme plokke (DB) [7].
STEP 7 ülesehituses on OB sama mis on standardis IEC 61131-3 POU tüübinimega programm. Need on liidesed kasutajaprogrammi ja PLC operatsioonisüsteemi vahel.

Juhtplokk on POU , mis vastab mingile määratud sündmusele kontrolleris. OB sees oleva programmi kirjutab programmeerija, kuid see aktiveeritakse (hakatakse täitma) PLC operatsioonisüsteemi poolt teatud tingimuste korral või tsükliliselt. Nt iga CPU

käivitamisel (lülitades TÖÖ režiimi) täidetakse esmalt OB100 või kasutaja poolt määratud muu numbriga (>= 200) OB. Seega reageerib PLC operatsioonisüsteem kindlale sündmusele aktiveerides sellele vastava OB. 2.1 esitab erinevad OB tüübid vastavalt nende funktsionaalsusele ja aktiveerimise tingimustele. Kui vanemas STEP 7 sai vajalikke katkestusi määrata ainult kindlate OB numbrite kaudu, siis alates versioonist 10 saab uue OB200 ploki loomisel määrata ise vajalike sündmusi ja nende parameetreid.

Tabel 2.1. STEP-7 juhtplokid S7-1200 seeria kontrolleri jaoks

OB tüüp	**OB nr**	**Aktiveerimise sündmus rakenduses ja kirjeldus**
Main - tavaliselt tsükliliselt täidetav (Peaprogramm)	1, ≥ 200	Aktiveeritakse pärast igat CPU käivitamist tsükliliselt, et töödelda peamist kasutaja programmi.
CPU käivitused	100, ≥ 200	Aktiveeritakse CPU igal STOP → START üleminekul enne OB1 käivitamist. Seda tehakse ka kontrolleri toite sisse lülitamisel.
Ajaline viivitus katkestus	≥ 200	Programmi osade täitmine aktiveeritakse kasutaja poolt määratud ajavahemiku möödumisel.
Tsükliline katkestus	≥ 200	Aktiveeritakse tsükliliselt määratud ajaintervallide (nt 500 ms) järel, et täita programmi (nt PID kontuur) kindla intervalli järel.
Riistvaraline katkestus	≥ 200	Aktiveeritakse siis kui esineb protsessiseadme või mooduli algatatud katkestus, et täita kasutaja ettekirjutatud hooldusrutiini.
Diagnostilise vea katkestus	82	Käivitatakse, kui moodulis on tuvastatud viga
Aja viga	80	Käivitatakse siis kui: • tsükli maksimaalne aeg on ületatud • välja kutsutud OB on veel töötlemisel (töötab) • järjekorra ületäitumine • katkestuste kadu suure katkestuste koormuse tõttu

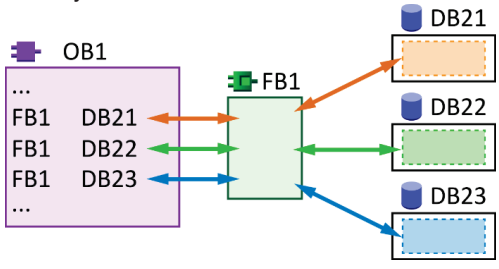


Joonis 2.1. Mitme erineva peaprogrammi OB kasutamine

Erilist tähelepanu väärib OB1, mida võib käsitleda, kui peaprogrammi (automatiseeritud masinas juhtimise protsessitasand). Seda hakatakse tsükliliselt täitma pärast CPU töörežiimi viimist. OB 1 on ainus POU, mis peab programmis kindlalt olemas olema. OB1 kõrval võib olla ka teisi erineva numbriga peaprogrammi OB'sid. Enamasti ei ole need plokid omavahel seotud, kuigi võivad kasutada ühiselt olemasolevaid FB ja FC plokke, ning juhivad eraldi mingi rakenduse protsessi (masinat). Operatsioonisüsteem määrab OB numbri järgi millist OB'd täidetakse kõige enne (vt 2.1).

Funktsioon (FC) on POU, millel võivad olla määratud väärtustega parameetreid, kuid selle sees olevate muutujate väärtusi ei peeta meeles (mälus) pärast FC töö lõppu – samade sisendväärtuste puhul annab FC alati ühesugused väljundväärtused. FC teostab alati kindlat protseduuri ja funktsioonil on reeglina üks väljund. Sellised on näiteks analüütilised funktsioonid.
FC mõte seisneb selles, et mingit kindlat ülesannet täitva programmiosa peab funktsioonina kirjutama vaid ühe korra. Edaspidi, kui on soov seda programmiosa kasutada, ei tule seda iga kord uuesti kirjutada vaid piisab vastava FC välja kutsumisest.

Funktsiooniplokk (FB) on FC'le sarnane POU selle vahega, et sellel on mälu ja selle väljundite väärtus sõltub sisendmuutujate - ja samuti ka plokisiseste (mälus olevate) muutujate väärtustest. FB'l võib olla mitu üheaegset väljundit. Kõikide plokisiseste muutujate (välja arvatud *„Temp"* piirkond) väärtused peetakse FB töö vaheajal meeles (hoitakse mälus). FB seotakse temale vastava andmeplokiga (DB), kus hoitakse pidevalt selle FB muutujate väärtusi. Sama tüüpi FB'st koopiaid tehes võib programmi koosseisu viia mitu FB eksemplari (ingl. k *instance*). Eri eksemplarides kasutatakse tüüpilise FB programmikoodi, kuid iga eksemplari muutujaid hoitakse erinevates andmeplokkides (2.2).



Joonis 2.2. Näide OB kaudu välja kutsutava FB1 eksemplaridest ja nende eraldi andmeblokkidest

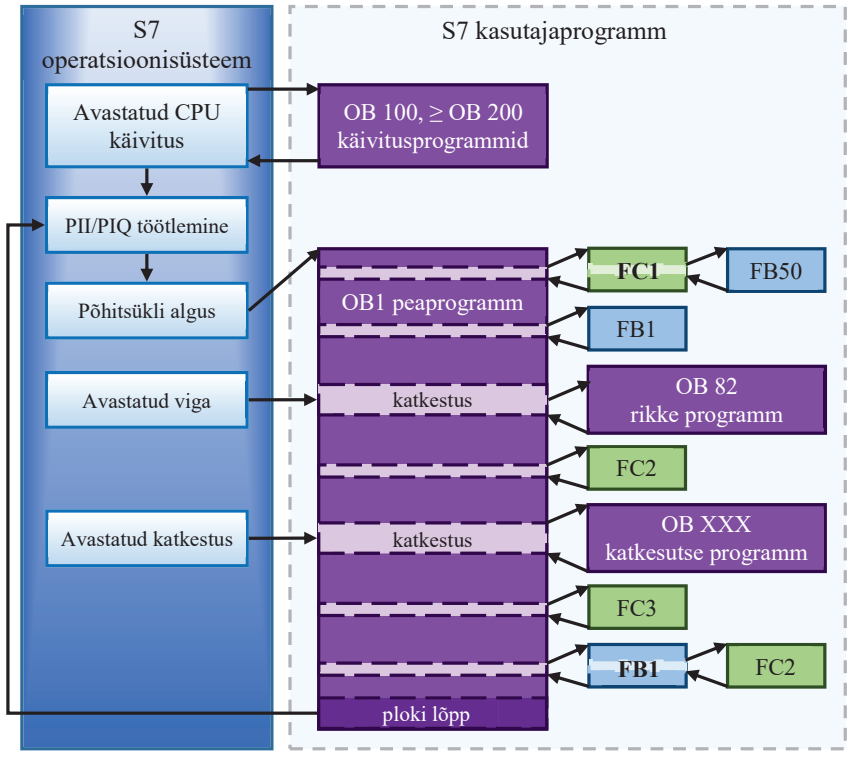
FB kasutamine on mõttekas siis, kui on vaja täita spetsiifilist ülesannet ning selle ülesandega seotud andmeid on vaja meeles pidada. Funktsiooniploki mitme eri eksemplari kasutamine on mõttekas näiteks mitme sarnase seadme (nt sarnaste pumpade) juhtimisel, mille juhtimisega seotud andmed tuleb meeles pidada. Sellisel

juhul oleks näiteks iga pumba kohta eraldi eksemplar pumpade juhtimise FB'st. FB kasutamine ei pea olema ilmtingimata seotud seadmetega.

Andmeplokk (DB) on üksus, mis hoiab endas programmi tööks vajalikke andmeid (muutujad ja nende väärtused). Andmeplokid võivad olla globaalsed ehk kõigile programmiüksustele (OB, FC, FB) vabalt kasutatavad või nö eksemplari andmeplokid, mis on seotud spetsiifilise FB eksemplariga. Vaatamata sellele, et eksemplari andmeplokid on vastava FB-ga seotud, saavad kõik teised POU'd selle poole siiski vajadusel pöörduda olgugi, et see on enamasti ebasoovitav lahendus. Globaalset DB'd tuleks kasutada mingite retseptide, toote parameetrite ja/või muude andmete meelespidamiseks ja andmete vahetamiseks erinevate POU'de vahel.
DB's olevate muutujate poole on võimalik pöörduda sümbolkujul aadressi kaudu, mis võib esitatakse järgmiselt: *„AndmeplokiNimi".MuutujaNimi*.
PLC töötamise ajal DB'sse kirjutatud väärtused ei säili pärast kontrolleri väljalülitamist (säilivad ainult DB loomisel määratud algväärtused). DB'de jaoks kasutatakse enamasti kahte liiki mälu:

- **Programmimälu** (inglise k. *Load memory*), mis on välkmälu baasil säilmälu, kus hoitakse püsivalt DB'de struktuuri ja selle muutujate algväärtusi.
- **Töömälu** (inglise k. *Work memory*), mis on RAM baasil hävimälu, kus hoitakse PLC töö ajal muutujate väärtusi. Pärast toite kadumist andmed kaovad.

DB'd saab hoida ka ainult programmimälus, kuid sellisel juhul tuleb vältida pidevat andmete kirjutamist neisse. Samuti on võimalik aeg-ajalt töömälus olevaid andmeploki muutujate väärtusi programmimällu üle kanda kasutades *WRIT_DBL* funktsiooni.
Peale programmeerija poolt loodavas programmis kasutamiseks mõeldud plokkide (OB, FB, FC ja DB) on arenduskeskkonnas STEP 7's veel kolm eritüüpi **süsteemiplokki** (SFB, SFC ja SDB), mis on integreeritud PLC operatsioonisüsteemi. Programmeerija saab neid kasutada (aktiveerida) oma programmis kuid ei saa nende sisu muuta ja vaadata. Need süsteemiplokid võimaldavad lahendada paljusid tavalisi ülesandeid ja funktsioone ning vähendavad seetõttu oluliselt programmi arendamise aega.



Joonis 2.3. Tsükliline programmi täitmine PLC's

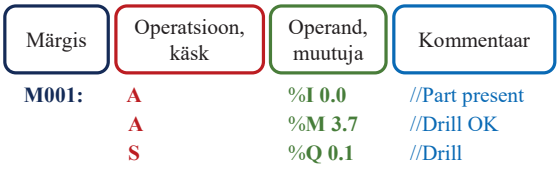
2.3 esitab S7-1200 PLC programmi tsükliline täitmist. Rakenduse põhiprogrammi täitmine toimub OB1 kaudu. Pärast toite sisse lülitamist ja CPU lülitamist TÖÖ (RUN) režiimi täidetakse kasutaja programmist kõigepealt käivitusprogrammiosa OB100 (nt algväärtuste etteandmine, vajalike väljundite sisse lülitamine, jne) ja seejärel OB1. OB1 täidetakse igal PLC tsüklil kuni CPU TÖÖ režiim katkestatakse või toide lülitatakse välja. Kuna OB1 täidetakse tsükliliselt, siis tuleb teised plokid selle abiga aktiveerida (välja kutsuda). Kui mingi plokk oli aktiveeritud OB1 poolt ja see lõpetas oma ülesande (tegevused), siis antakse programmi juhtimine tagasi OB1'le. Ka FB'd ja FC'd võivad aktiveerida teisi plokke. 2.3 kohaselt on aktiveeritud korraga kuni kaks plokki, nt FC1 ja FB50. Nii saab S7-1200 PLC juhtimisprogrammis aktiveerida kuni 16 erinevat POU'd järjest kui esimene ploki aktiveerija on OB1. Teiste OB'de puhul saab aktiveerida kuni 6 POU'd järjest. Kui mingit plokki ei aktiveerita OB'de poolt või teiste plokkide poolt, mis on seotud mingil moel OB'dega, siis selle ploki sees olevat juhtimisprogrammi ei täideta antud hetkel, kuigi see plokk võib PLC's olemas olla.

2.3 PLC programmeerimiskeeled

POU ehk siis programmi ülesehitus ploki loomisel tuleb enamasti määrata ka selle programmeerimise keel. Standard IEC 61131-3 pakub kasutajale programmeerimiseks viit erinevat keelt. Allpool tutvustatakse neid keeli lähemalt.

2.3.1 Käsulist (Instruction List - IL)

Käsulist on masinale kohaldatud programmeerimiskeel, mida toetab enamus programmeerimise tööriistadest. Mõne tarkvara juures kasutatakse seda vahekeelena programmide tõlkimisel teistesse keeltesse. IL keeles kirjeldab üks programmi rida üht korraldust, mis PLC jaoks on üks täidetav käsk. 2.4 kujutab selle rea koostises olevaid elemente. Korraldus algab operatsiooni või käsu sümboliga, millele järgneb üks või mitu komadega eraldatud operandi/muutujat. Enne korraldust võib olla märgis kooloniga. Märgis tähistab programmisisest hüppe aadressi. Kui reas on kommentaar, siis kirjutatakse see rea lõppu ning ümarsulgude ja tärnide (* ... *) vahele. STEP 7's kasutatakse kommentaari alguse tähistamiseks reas kaht kaldkriipsu //.



Joonis 2.4 Käsulisti IL (ka STL) struktuuri elemendid

```
        A       %I10.0
        AN      %I10.1
        JNB     a001
        L       %IW0
        T       %QW0
        SET
        SAVE
        CLR
a001:   A BR
        =       #L_Mem1
        AN      #L_Mem1
        JNB     a002
        L       %MW2
        T       %QW0
a002:   NOP 0
        A       #L_Mem1
        BLD     102
```

Joonis 2.5. STL keele näide STEP 7's

Märgiseid kasutatakse programmisisesteks hüpeteks ühelt programmi realt teisele, jättes mitu rida vahele. Standardis ei ole kirjeldatud hüpped programmi sees, kuid see on lubatud paljudes programmeerimissüsteemides, et parandada programmi täitmist ja lühendada sellega PLC töötsükli aega.

STEP 7's nimetatakse seda keelt STL'iks (inglise k. *Statement List*). Programmiteksti näide on esitatud joonisel 2.5. STEP 7 Basic paketis seda keelt ei ole.

2.3.2 Struktureeritud tekst (Structured Text - ST)

Struktureeritud tekst on kõrgtasemeline programmeerimiskeel ülesannete juhtimiseks ja keeruliste matemaatiliste arvutuste tegemiseks. Antud keele eelis IL ees on selle parem arusaadavus ja jälgitavus inimesele (väga lühikesed ja selged programmilõigud) ning võimsad programmi käskude voo juhtimise elemendid (If-else, For, While, Case). ST algoritm jagatakse mitmeteks sammudeks (avaldusteks), mida kasutatakse väärtuste arvutamiseks ja määramiseks, programmi juhtimiseks ning POU'de kutsumiseks või katkestamiseks. Erinevalt IL'st võib ST avaldis enda alla võtta mitu rida. Samas võib mingi programmi lõigu koondada ühele reale.

```
%Q4.0 := %I0.0 AND %I1.1 OR NOT %I0.1;
IF %Q4.0 = 1 THEN
    GOTO M001;
ELSE
    %Q1.0 := NOT %Q4.0;
END_IF;
M001:
%MW2 := 1 + %MW2;
```

Joonis 2.6. SCL keele näide STEP 7's

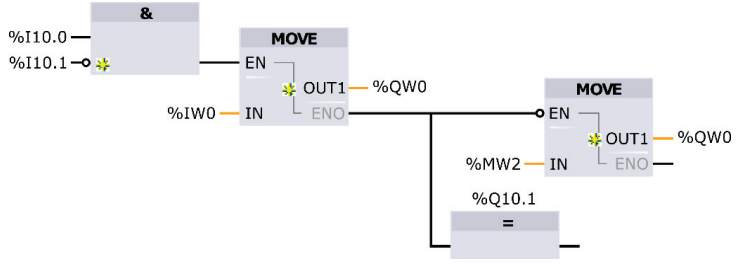
Standard IEC 61131-3 lubab kasutada ka teisi programmeerimiskeeli (nt C++, C#, jne), kui need täidavad standardis määratud algnõudeid.

STEP 7's kutsutakse seda keelt struktureeritud juhtimiskeeleks (*Structured Control Language* - SCL). See sarnaneb programmeerimiskeelele PASCAL (2.6).

2.3.3 Funktsiooniplokkskeem (Function Block Diagram - FBD)

Funktsiooniplokkskeem on graafiline keel aritmeetika, Boole või teiste funktsioonide ja funktsiooniplokkide ühendamiseks. FBD keel on pärit signaali töötluse valdkonnast, kus on olulised reaal- või täisarvud. Selles keeles esitatakse masina juhtimisprogrammi elektroonikaskeemina. Praeguseks on FBD'st saanud universaalne programmeerimiskeel enamuse PLC'de jaoks.

FBD vormis kirjutatud programmikood on jagatud lõikudeks, mida tuntakse segmentidena (inglise k. *Network*). Segmendid võimaldavad struktureerida programmi ja luua ülesehitust POU's. FBD segmendi graafiline osa sisaldab ristkülikuid ja programmi juhtimise avaldusi koos ühendatud horisontaalsete ning vertikaalsete joontega (2.7). Ristkülikute sisendid võivad olla ühendatud kas muutujatega, konstantidega või siis tühjad kasutamata.



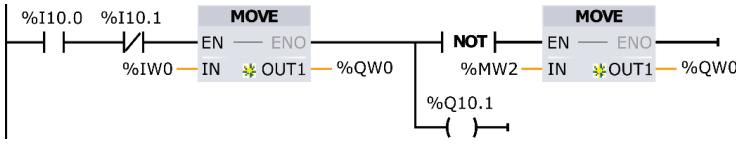
Joonis 2.7. FBD keele näide STEP 7's

FBD kasutatakse horisontaalseid ja vertikaalseid ühendusjooni, mis võivad hargneda mitmeks, erinevate programmiplokkide/funktsioonide/elementide sidumiseks (2.7). Ühe sisendiga ei tohi ühendada mitut väljundit, kuna see võib põhjustada programmi

käitumises ebakõlasid. Programmi juhtimiseks on eraldi olemas käsud lahkumiseks POU'st ja segmentide töötlemise järjekorra muutmiseks.
FBD keeles kirjutatud programmis liiguvad signaalid erinevate I/O'de ja FBD elementide vahel vasakult paremale ning ülevat alla. FBD elementi tulevate sisend signaalide, mis võivad tulla PLC sisenditest/väljunditest või teistest FBD elementidest, alusel teostatakse mingi loogika operatsioon (nt binaarloogika NING lüli) ning selle tulemus suunatakse elemendi väljundisse. FBD elemendi väljundsignaal edastatakse ühendusjoonte abil kas otse PLC väljundi(de)sse või teise/teistesse FBD keele elementi(desse).

2.3.4 Kontaktaseskeem (Ladder Diagram - LD)

Kontaktaseskeem on graafiline keel, mille abil seotakse tõeväärtuslikke (Boole'i tüüpi) muutujaid. LD on võrreldav varasemalt tuntud masina juhtimissüsteemi elektriliste releeskeemidega, milles esitatakse graafiliselt energia liikumist skeemis. Antud programmeerimiskeel on mõeldud tõeväärtuslike signaalide (TÕENE/VÄÄR) töötlemiseks. LD keele segment on piiratud vasakult ja paremalt poolt vertikaalsete siinidega. Vasakult siinilt jõuab energia (loogika signaal väärtusega 1) kõikide temaga seotud elementideni (graafiliste sümboliteni). Sõltuvalt skeemielementide olekust lasevad need energial edasi liikuda paremale järgmise elemendini või katkestavad liikumise.
Nagu FBD puhulgi on ka LD elementide ühendamiseks horisontaalsed ja vertikaalsed ühendusjooned ning ristumispunktid (2.8). Kontakt LD's teostab sissetuleva joonega seotud (nimelise) muutuja väärtusega loogika operatsiooni. Teostatav loogikaoperatsioon sõltub kontakti tüübist. Operatsiooni tulemusel saadud väärtus/signaal antakse kohe edasi väljuvale joonele (ühendatud paremale poole). Väljuvalt joonelt liigub see (operatsiooni tulemus) ühendusjoonte abil edasi kas siis PLC väljundi(te)sse või teise/teistesse LAD keele elementi(desse).



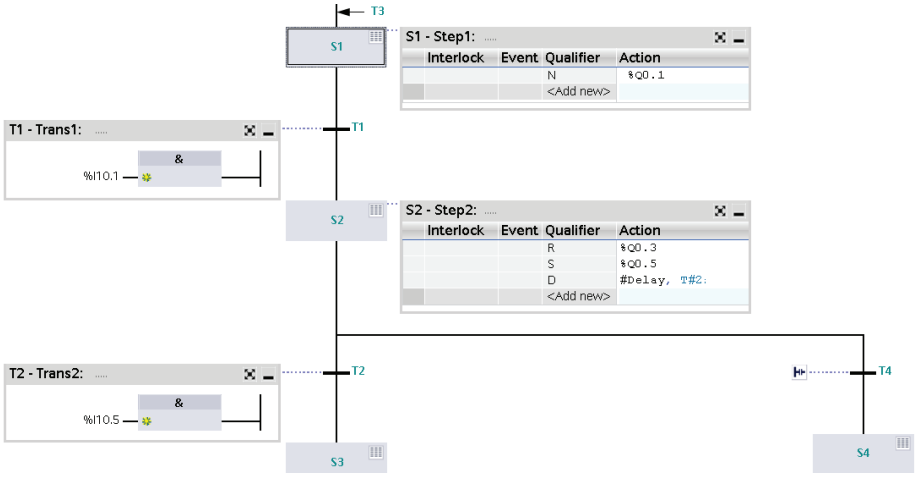
Joonis 2.8. LAD keele näide STEP 7's

Kõikide muutujate andmetüübid on tõeväärtuslikud (TÕENE/VÄÄR) ja LD elementide vahelised seosed kannavad edasi ainult tõeväärtusi.
STEP 7 kustutakse seda keelt LAD'iks (inglise k. *Ladder Logic*). Skeemi näide on esitatud joonisel 2.8.

2.3.5 Järjestatud funktsioonide kaart (Sequential Function Chart – SFC)

Järjestatud funktsioonide kaart on graafiline programmeerimiskeel tootmisliini juhtimiseks ning selle kui tervikliku funktsionaalse rakenduse jaotamiseks väiksemateks osadeks (protsessideks). Graafiline skeem näitab ilusti protsessi voogu (näiteks sisulist

liikumist toote valmistamisel) ja on seetõttu oluline tööriist PLC programmi struktureerimiseks. SFC keeles on võimalik saavutada rakenduse protsesside järjestikust ja paralleelset täitmist.
Väiksemate programmiosade (nt protsess, ülesanne) samm-sammuline täitmine sõltub nii programmi voos defineeritud tingimustest kui ka I/O'de käitumisest. Programmi samm programmeeritakse tavaliselt standardis IEC 61131-3 defineeritud teistes keeltes. Samas võimaldavad osad tootajad (nt Siemens) programmeerida samme ka SFC keeles. Selleks on nad loonud spetsiaalsed käsud ja funktsioonid (2.9).
Esimene SFC struktureerimistase on segment koos selle alla kuuluva sammu ja siirdeelemendiga (2.9). Üks samm saab olla aktiivne või mitteaktiivne. Aktiivse sammuga täidetakse temaga seotud juhiseid (käskusid), kuni ta muutub mitteaktiivseks. Sammu oleku muutus aktiivsest passiivseks määratakse siirde tingimusega, mis esitatakse tõeväärtusavaldise kujul. Kui aktiivse sammu taga oleva siirdetingimuse väärtus muutub „TÕESEKS", siis aktiveerub selle siirde järel olev samm ja eelnev lõpetab tegevuse. Siirde aktiveerimisega antakse eelneva sammu atribuudi „aktiivne" väärtus edasi järgmisele sammule või sammudele. Aktiivsus liigub läbi sammude, mis kõik koos moodustavad võrgu. Paralleelsete harude puhul programmis jagatakse „aktiivne" olek mitmeks osaks ning harude lõpus liidetakse see uuesti kokku.



Joonis 2.9. GRAPH keele näide STEP 7's

STEP 7's kutsutakse seda keelt Graphical Programming Language'ks (GRAPH) (2.9). STEP 7 ≤ 5.x versioonides tähistati seda S7-GRAPH.

2.3.6 SIMATIC S7-1200 PLC programmeerimiskeeled

Siemensi PLC programmeerimistööriist STEP 7 Basic sisaldab tavakeeli nagu SCL, FBD ja LAD. Teisi keeli nagu STL ja GRAPH saab eraldi juurde osta näiteks STEP 7 Professional tarkvarapaketiga. S7-1200 PLC toetab ainult SCL, FBD ja LAD keeli (2017 aasta seisuga).

2.4 Muutujate adresseerimine STEP 7 kohaselt

PLC programmi loomisel kasutatakse palju muutujaid, mis deklareeritakse koos PLC mälupiirkonna aadressidega ja andmetüüpidega. PLC mälus on muutujad justkui kohahoidjad rakenduse spetsiifiliste andmete väärtuste salvestamiseks. Et paremini mõista konkreetset programmi ja selle muutujaid, kasutatakse sümboolset adresseerimist. See võimaldab määrata absoluutsele aadressile (PLC mälupiirkonnale) sümboolse nime. Globaalsete muutujate sümbolid deklareeritakse STEP 7 sümbolitabelis ja neid saab kasutada programmi kõikides plokkides. Sellise muutuja nimi (sümbol) peab olema ainulaadne ning see võib esineda selles sümbolitabelis ainult üks kord. Plokkide (OB, FC ja FB) kohalikud muutujad ja nende sümbolid deklareeritakse vastava ploki deklaratsiooniosas. Neid muutujaid saab kasutada ainult selles plokis, kus need deklareeriti. Ploki siseseid muutujate nimesid võib vabalt uuesti kasutada mingis teises plokis, kui see seal uuesti deklareeritakse. Samas võib kasutada programmis muutujate absoluutseid aadresse, mis viitavad PLC kindlale mälupiirkonnale.

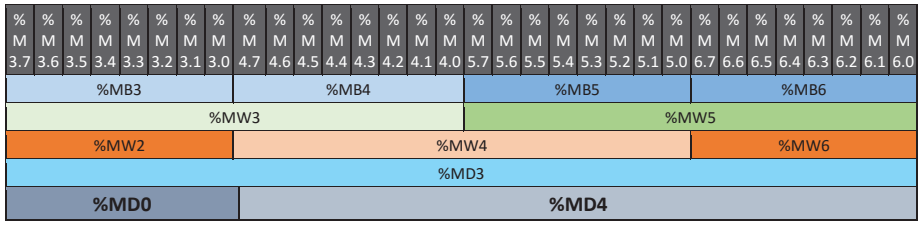
Enamus PLC'de mälus on piirkonnad, mille poole saab kasutaja programmist pöörduda programmi täitmiseks vajalike andmete võtmiseks ja/või talletamiseks. S7-1200 PLC's on need mälupiirkonnad: sisendite protsessikuva (I), väljundite protsessikuva (Q) ja mälubitt (M). Samas vanematel PLC'del (nt S7-300) lisandub nendele veel perifeeria sisend (PI), perifeeria väljund (PQ), kohalik (lokaalne) muutuja (L), taimer (T) ja loendur (C). Igast POU plokist saab ligi kõikidele mälupiirkondades talletatud väärtustele väljaarvatud kohalikus muutujate mälupiirkonnas hoitavatele väärtustele.

Iga PLC mälupiirkond on jagatud baitideks ja bittideks. Programmis kasutatava muutuja poolt enda alla võetav mälupiirkonna suurus võib olla bitt, bait (8 bitti), sõna (16 bitti) ja topeltsõna (32 bitti). Mälupiirkonna suurus sõltub programmis kasutatavatest muutujate andmetüüpidest (vt peatükk 2.5). Nt DINT, DWORD ja REAL tüüpi muutujad võtavad enda alla ühe topeltsõna e siis 4 baiti (n, n+1, n+2 ja n+3 bait).

%	Mälupiirkonna tunnus	+	Suuruse tähis	+	Baidi number	+ . +	Biti number
%	M				1	.	3
%	M		B		2		
%	M		W		3		
%	M		D		5		

Joonis 2.10. Mälupiirkonna absoluutne adresseerimine

Biti suurusega muutuja aadressile viidatakse alati unikaalse sümboliga, mis koosneb protsendi märgist (%), mälupiirkonna tunnusest, millele järgnevad baidi number ja punktiga eraldatud biti number (nt sisend %I28.3, väljund %Q20.1) (vt 2.10). Mõnikord tuleb lisada biti suurusega muutuja mälupiirkonna tunnuse järgi ka täht X. Kui adresseerimisel viidatakse mälupiirkonna suurustele nagu bait, sõna ja topeltsõna, siis lisatakse mälupiirkonna tunnuse järgi täht B, W või D (nt %IB7, %IW7, %ID7). Baidi numbriks kirjutatakse alati esimese baidi number, millest alates on antud mälupiirkond hõivatud teatud ulatuses (nt %MW3 puhul on hõivatud bait 3 ja 4 mälupiirkonnast) (vt 2.10 ja 2.11).



Joonis 2.11. Mälupiirkonna jagunemine ja andmestruktuuride paiknemine

2.11 kujutab digitaalsete andmete jagunemist tüüposadeks ja nende paiknemist mälupiirkondades. Nagu näha, tuleb mälupiirkondade adresseerimisega ja kasutamisega olla väga ettevaatlik, et mitte kogemata üle kirjutada teiste andmete baite, kasutades nt programmis mälubitti %MW3 ja %MW4. Kui programm muudab %MW3 väärtust, siis muutub ka MW%4 väärtus, kuigi programmis seda ei soovitud teha. Selle vältimiseks tuleks kasutada %MW4 asemel %MW5.

PLC loeb programmi iga tsükli alguses sisendite olekud ja salvestab need sisendite protsessikuvasse (PII). Edasi määratakse programmi täitmisel väljundi olekud ja salvestatakse väljundite protsessikuvasse (PIQ). Programmi iga tsükli lõpus edastatakse saadud tulemused (väljundite väärtused) signaalimoodulitele, et teostada programmi käigus saadud tulemused reaalselt. Nende poole pöördutakse kas I või Q tähtede abil.

Perifeeria mälupiirkond võimaldab lugeda ja kirjutada andmeid otse PLC signaalimoodulitest(sse). Selle võttega kõrvaldatakse töötsüklis I/O olekute uuendusega seotud viivitused. S7-300 PLC's tähistatakse perifeeria mälupiirkondasid PI/PQ (nt PIB2 ja PQB2) ja S7-1200 PLC's puhul I_:P/Q_:P („_" asemel kirjutatakse mälupiirkonna suuruse tähis ja aadress, nt IB2:P ja QB2:P).

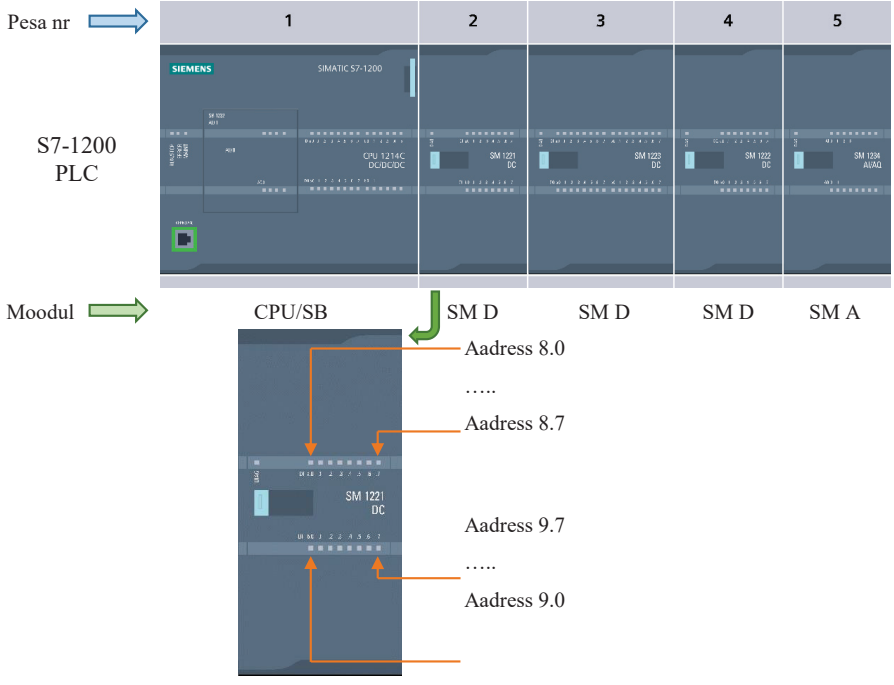
S7-1200 PLC's puudub mälupiirkond taimeritele ja loenduritele. Selle asemel kasutatakse eraldi seisvaid DB plokke. See tähendab, et iga taimeri ja loenduri jaoks luuakse eraldi DB plokk, mis kasutab mingit PLC mälupiirkonda nende funktsioonide täitmiseks. Konkreetset DB'd, mis on seotud nt taimeriga, on soovitatav kasutada ainult ühe taimeri juures. Kui kasutada ühte DB'd mitme taimeri juures, siis võib juhtuda et need taimerid ei tööta või nad käituvad ettearvamatult. Sama asi kehtib ka loendurite kohta.

Mälubitti ehk globaalset mälupiirkonda (M) kasutatakse muutujate väärtuste haldamiseks, mille andmeid kasutatakse erinevates programmi osades ehk siis mitte ainult ühes POU's vaid mitmes erinevas POU's. Seda kutsutakse ka markeriks. Mälubittide poole võivad pöörduda ka teised seadmed (nt operaatori paneel, tööstusarvuti SCADA rakendusega, sagedusmuundur jne) kui neil on vaja edastada ja/või võtta mingit infot PLC'st.

Kohaliku e lokaalset mälupiirkonda (L) kasutatakse ajutiste muutujate väärtuste haldamiseks. Kui ploki töö on lõpetatud, siis saab seda mälupiirkonda uuendada ja kasutada teise ploki juures. S7-1200 PLC puhul ei kasutata lokaalsete muutujate adresseerimiseks absoluutaadressi vaid ainult sümboolset adresseerimist koos selle ette kuuluva # märgiga (nt #L_Vahe_Arv).

S7-1200 PLC mooduli füüsilisele pesale omistatakse numbrid (ühendus)siinil lihtsustavad signaalimoodulites olevate I/O'de adresseerimist. Pesas number 1 paikneb CPU, millel

on omad I/O'd olemas. CPU digitaal I/O'de baidi aadress algab 0'st baidist ja võtab enda alla vähemalt 2 baiti. Analoog I/O'de baidi aadress algab 64'st baidist ja võtab enda alla vähemalt 4 baiti. Järgmises pesas (pesa 2) oleva digitaal I/O mooduli baidi aadress algab 8'st baidist ja võtab enda alla 4 baiti. Meeles tuleb pidada, et 8 sisendiga DI mooduli kasutamisel antud pesas jäävad aadressivälja viimased kolm baiti kasutamata. Seetõttu algab järgmise digitaal I/O mooduli (pesa 3) baidi aadress numbrist 12. Siit järeldub, et iga pesa võrra suureneb digitaal I/O mooduli baidi aadress 4 baidi võrra. 2.12 näitab Siemens S7-1200 PLC digitaalmoodulite adresseerimist.
Sama asi kehtib ka analoog I/O moodulite kohta ainult aadressi vahemikud on suuremad. Kontrolleri teises pesas oleva analoog I/O mooduli baidi aadress algab 96'st baidist ja võtab enda alla 16 baiti. Kui analoog I/O moodulil on ainult 4 AI, siis jääb aadressivälja viimased kaheksa baiti kasutamata. Järgmise analoog I/O mooduli (pesa 3) baidi aadress algab numbriga 112. Igas pesas suureneb analoog I/O baidi aadressi 16 baidi võrra. Seega 5 pesas oleva analoog I/O mooduli baidi aadress algab 144 baidist.



Joonis 2.12. Siemensi S7-1200 PLC moodulite I/O'de adresseerimine

2.5 PLC's kasutatavad andmetüübid

Andmetüübid on andmete klassifikatsioonid, kus on ära määratud nende formaat(vorm, mis näitab kuidas mingit reaalset sisu kirjeldavate andmete väärtusi hoitakse), andmete

reaalne pikkus bittides ja eelnevast tulenev vahemik. Õigesti valitud andetüübid tagavad andmete optimaalse töötlemise võimalikkuse ja selle, et erinevate muutujate jaoks reserveeritakse sobiv hulk mälu nende deklareerimisel.

2.5.1 Elementaarsed andmetüübid

Tabel 2.2 esitab STEP 7's kasutatavate andmetüüpide grupp üldnimega elementaarsed andmetüübid. Enamus elementaarsetest andmetüüpidest on defineeritud ka standardis IEC 61131-3. Lisaks nendele saab kasutaja tuletada (luua) uusi andmetüüpe ja kasutada neid nagu elementaarseid andmetüüpe.

Tabel 2.2. Elementaarsed andmetüübid STEP 7's [5]]

Tüüp ja kirjeldus	Bittide arv	Formaat	Vahemik ja arvu tähistus (väiksemast suurema väärtuseni)	Näide
Bool (bitt)	1	Tõeväärtus	TRUE (signaal „1“) või FALSE (signaal „0“)	TRUE
		Kahendarv	0 või 1	0, 2#0
		Kaheksandarv	8#0 või 8#1	8#1
		Kuueteist-kümnendarv	16#0 või 16#1	16#1
Byte (bait)	8	Kahendarv	2#0 – 2#1111_1111	2#1001_0110
		Märgita kümnendarv	0 – 255	123
		Kaheksandarv	8#0 – 8#377	8#123
		Kuueteist-kümnendarv	B#16#0 – B#16#FF, 16#0 – 16#FF	B#16#10, 16#10
Word (sõna)	16	Kahendarv	2#0 – 2#1111_1111_1111_1111	2#0001_0000_0000_0000
		Märgita kümnendarv	0 – 65535	61241
		Kaheksandarv	8#0 – 8#177777	8#150301
		Kuueteist-kümnendarv	W#16#0 – W#16#FFFF, 16#0 – 16#FFFF	W#16#1000, 16#1000
		2x8 bit märgita kümnendarvud	B#(0,0) – B#(255,255)	B#(10,20)
		BCD	C#0 – C#±999	C#998
DWord (topeltsõan)	32	Kahendarv	2#0 – 2#1111_1111_1111_1111_1111_1111_1111_1111	2#1000_0001_0001_1000_1011_1011_0111_1111
		Märgita kümnendarv	0 – 4294967295	34522342
		Kaheksandarv	8#0 – 8#37777777777	8#7753477

Tüüp ja kirjeldus	Bittide arv	Formaat	Vahemik ja arvu tähistus (väiksemast suurema väärtuseni)	Näide
		Kuueteist-kümnendarv	DW#16#0000_0000 – DW#16#FFFF_FFFF, 16#0000_0000 - 16#FFFF_FFFF	DW#16#00A2_1234, 16#00A2_1234
		4x8 bit märgita kümnendarvud	B#(0,0,0,0) – B#(255,255,255,255)	B#(1,14,100,120)
		BCD	C#0 – C#±9 999 999	C#64998
SInt (integer, 8 bitti)	8	Märgiga väike täisarv	-128 – 127	63
USInt (integer, 8 bitti)	8	Märgita väike täisarv	0 – 255	63
Int (integer)	16	Märgiga täisarv	-32768 – 32767	63
UInt (integer)		Märgita täisarv	0 – 65535	4532
DInt (Int, 32 bitti)	32	Märgiga topelt täisarv	-2147483648 – 2147483647	-2546854
UDInt (Int, 32 bitti)	32	Märgita topelt täisarv	0 – 4294967295	265746
Real (komakohaga arv)	32	IEEE koma-kohaga arv	Ülemine piir: +/-3.402823e+38 Alumine piir: +/-1.175495e-38	1.234567e+13
LReal (komakohaga arv)	64	IEEE koma-kohaga arv	Ülemine piir: +/-1.7976931348623158e+308 Alumine piir: +/-2.2250738585072014e-308	1.0e-5
Time (IEC-Time)	32	IEC-aeg 1 ms sammudega, märgiga täisarv	T#-24D_20H_31M_23S_648MS – T#24D_20H_31M_23S_647MS	T#0D_1H_1M_0S_0MS TIME#0D_1H_1M_0S_0MS 0D_1H_1M_0S_0MS
Date (IEC-kuupäev)	16	IEC-kuupäev 1 päeva sammudega, aasta-kuu-päev	D#1990-1-1 – D#2168-12-31	D#1994-3-15 DATE#1994-3-15 1994-3-15
TOD (Time_ of_Day)	32	Antud päeva kellaaeg, 1 ms sammuuga, h:min:sek.ms	TOD#0:0:0.0 – TOD#23:59:59.999	TOD#13:30:15.250 TIME_OF_DAY#13:30:15.250 13:30:15.250
Char (tähemärk)	8	ASC II - kirjamärk	16#00 – 16#FF	„O“, „@“, „Ω“, jne
WChar (topelt tähemärk)	16	ASC II – kirjamärk, mis võtab enda alla 2 baiti	16#0000 – 16#FFFF	„O“, „@“, „Ω“, aasia tähemärke, kirillitsa tähemärke, jne

Peale selle on STEP 7’s olemas parameeter andmetüübid, mis võimaldavad kasutada taimereid, loendureid ning POU’si (FC ja FB) kui ametlike parameetritena.

S7-1500 PLC juures on kasutatavad veel järgmised andmetüübid LWord, LInt, ULInt, LTime ja LTOD.

2.5.2 Kompleksandmetüübid

Kompleksandmetüübid või ka komposiitandmetüübid on andmetüübid (2.3), mis koosnevad elementaarsetest andmetüüpidest. PLC tags nimelisse globaalsesse sümbolite nimekirja neid andmetüüpe lisada ei saa. Aga neid saab kasutada programmide, funktsioonide ja funktsiooniplokkide kohalikus sümbolite tabelis ja andmeplokkides.

Tabel 2.3. Kompleksandmetüübid STEP7's [5]

Tüüp ja kirjeldus	Suurus	Formaat	Vahemik ja arvu tähistus (väiksemast suurema väärtuseni)	Näide
DTL (aeg)	12 baiti	aasta-kuu-päev-tund:minut:sekund. nanosekund	DTL#1970-01-01-00:00:00.0 – DTL#2554-12-31-23:59:59.999999999	DTL#2012-12-18-20:30:20.250
TON_TIME (IEC taimerist tuletatud muutujad)	128 bitti	ST (Time);PT (Time); ET (Time);RU (Bool); IN (Bool); Q (Bool)		
String (sõne)	n+2 baiti	ASCII tähemärgid (CHAR)	n = 0 – 254 baiti	'see on string'
WString (sõne)	n+2 sõna	ASCII tähemärgid (WCHAR)	n = 0 – 65534 sõna (word)	'see on wstring'
ARRAY (massiiv)	n* andmetüübi pikkus	ARRAY [alumine piir .. ülemine piir] of andmetüüp	[-32768 .. 32767]	ARRAY[0..4] of REAL
Struct (struktuur)				

DTL on 12 baidine andmetüüp, mis hoiab endas kuupäeva ja kellaaega. See koosneb mitmest komponendist (2.4), mille poole on võimalik ka eraldi pöörduda. Näiteks kui on muutuja nimi *#aeg*, siis sellest on võimalik nädalapäeva välja lugeda kasutades operandina aadressi: *#aeg.Weekday*.
String ehk sõne on ASCII tähemärkide jada. 2.2 esitab andmetüübid Char) jada, mis võimaldab endas hoida lühikesi tekstijuppe. **WString** vastab andmetüüp WChar.

Stringil saab määrata andmetüübi väljal selle maksimaalse pikkuse kirjutades maksimaalse tähemärkide arvu kantsulgudesse. Näiteks kui andmetüübiks märkida String, siis on stringi maksimaalne kasutatav pikkus 6 tähemärki. Kui pikkus märkimata jätta ehk kirjutada andmetüübiks ainult String, siis võetakse maksimaalseks pikkuseks absoluutne maksimumpikkus ehk 254 tähemärki. WString'i puhul on selleks 65534 tähemärki.

WString võimaldab salvestada ka aasia ja kirillitsa tähemärkidest koosnevaid sõnu või lauseid.

Tabel 2.4. DTL komponendid

Bait	Komponent	Andmetüüp	Vahemik	Kirjeldus
0	Year	UINT	1970 – 2554	Aasta
1				
2	Month	USINT	1 – 12	Kuu
3	Day	USINT	1 – 31	Päeva number ühes kuus
4	Weekday	USINT	1 (Pühapäev) – 7 (Laupäev)	Nädalapäeva number
5	Hour	USINT	0 – 23	Kellaaja tunniosa
6	Minute	USINT	0 – 59	Kellaaja minutiosa
7	Second	USINT	0 – 59	Kellaaja sekundiosa
8	Nanoseconds	UDINT	0 - 999999999	Kellaaja nanosekundi-osa
9				
10				
11				

ARRAY ehk massiiv on kogum sama tüüpi andmetest. Näiteks sisaldab *ARRAY [0..4] of Real* andmetüübiga määratud muutuja endas sisuliselt 5 Real tüüpi muutujat, millele vastavad indeksi numbrid 0, 1, 2, 3, 4 (2.13). Massiivi liikmete poole saab pöörduda kirjutades liikme indeksi numbri massiivi muutuja nime taha kantsulgudesse. Näiteks kui operandiks kirjutada *#temperatuur[2]* pöördutakse massiivi nimega temperatuur liikme poole, mille indeksi number on 2.

Nimi	Andmetüüp	Näidisväärtus
temperatuur	ARRAY[0..44] of Real	
temperatuur[0]	Real	250,55
temperatuur[1]	Real	24,2
temperatuur[2]	Real	-10,59
temperatuur[3]	Real	862,0
temperatuur[4]	Real	19,999

Joonis 2.13. Massiivi näide

Massiivi liikmete poole saab ka dünaamiliselt pöörduda kasutades pöördumisel staatilise indeksinumbri asemel mõnda täisarvtüüpi muutujat. Näiteks: *#temperatuur[#indeksi-number]*, eeldades, et kohalik muutuja *#indeksinumber* on deklareeritud kui täisarv (Int, SInt, UInt, USInt). Seda meetodit kasutades tuleb ettevatlik olla ja kontrollida, et indeksinumbrit sisaldava muutuja väärtus ei läheks massiivi piiridest välja.

Nimi	Andmetüüp	Kommentaar
parameetrid	Struct	Seadme parameetrid
pinge	USInt	Pinge voltides
vool	USInt	Vool amprites
olek	Bool	Kas seade on aktiivne
temperatuur	SInt	Temperatuur kraadides
taitunud	Real	Mahutis oleva vedeliku kogus liitrites

Joonis 2.14. Struktuuri näide

Struct (struktuur) on andmetüüp, mis võib koosneda kindlatest eelnevalt deklareeritud elementaarsetest andmetüüpidest. 2.14 on esitab struktuuri deklareerimise näite. Antud näites toodud struktuuri ühe liikme (nt *pinge*) poole saaks pöörduda eeldusel, et tegu on kohaliku muutujaga, kui operandina (muutuja nimena) kasutada aadressi: *#parameetrid.pinge*.

Nimi	Andmetüüp	Kommentaar
mootor	Array[0..1] of Struct	Mootorid
mootor[0]	Struct	Mootor 0
kiirus	USInt	Pööret minutis
suund	Bool	Mootori pöörlemissuund
olek	Bool	Olek. 0: väljas, 1: sees
pinge	Array[1..3] of USInt	Faasipinge
pinge[1]	USInt	L1
pinge[2]	USInt	L2
pinge[3]	USint	L3
mootor[1]	Struct	Mootor 1
kiirus	USInt	Pööret minutis
suund	Bool	Mootori pöörlemissuund
olek	Bool	Olek. 0: väljas, 1: sees
pinge	Array[1..3] of USInt	Faasipinge
pinge[1]	USInt	L1
pinge[2]	USInt	L2
pinge[3]	USint	L3

Joonis 2.15. Näide andmeploki (Andmed [DB6]) sisust kus on kasutatud struktuure ja massiive

Massiive ja struktuure saab omavahel koondada kokku suurematekss struktuurideks. Struktuure saab teha sügavaks kuni 8 taset. 2.15 esitab 2 tasandilise struktuuri massiivi, mis on tehtud andmeplokis *Andmed [DB6]*. Antud näites saab mootori nr 0 kiiruse poole pöörduda kasutades operandina aadressi: *"Andmed".mootor[0].kiirus* ning sama mootori kolmanda faasipinge poole saab pöörduda kasutades operandina aadressi: *"Andmed".mootor[0].pinge[3]*. Struktuuri massiivi saab rakendada ainult DB's.

2.6 Programmeerimine standardi IEC 61499 abil

Protsessi teostamise loogilist jada ja andmevoogu selles saab programmeerida ning dokumenteerida standardi IEC 61131-3 graafiliste keeltega (LD, FBD, SFC). Lisaks sellele

peab olema võimalik näidata graafiliselt ka juhtimisprogrammide (juhtimisüksuste) topoloogilist jagunemist, nende üldist konfiguratsiooni ja seoseid automatiseerimisprojekti teiste hajutatud osadega. Seda tehakse palju kõrgemal loogilisel tasemel kui POU'de programmeerimine.
Keeruliste hajutatud rakenduste seadistamise tööriistu kutsutakse konfiguratsiooni redaktoriteks. Programmiosa moodustatakse suurematest üksustest funktsiooniplokkide sidumise teel. Hajutatud automatiseerimisülesannete teostamisel kasutatakse laialdast andmesidet ja keerulist juhtimisstruktuuri. Kontrolleri programmide sisendeid ning väljundeid seotakse ka võrgusõlmedes teostatvate ülesannetega. Rakenduse programmide teostuse ajal toimub tihe andmevahetus geograafiliselt erinevates kohtades paiknevate juhtimisseadmete vahel.
Standard IEC 61499 käsitleb hajutatud automatiseerimisrakenduste loomist, näiteks funktsiooniplokkide seadistamist füüsiliselt erineva ja geograafiliselt eraldatud juhtimisriistvara jaoks ning nende teostuse sünkroniseerimist [8].
Hajutatud automatiseeritud süsteemi programmi osade ja juhtimise riistvara elementide vastastikuse toime kirjeldamiseks kasutab IEC 61499 mitme hierarhilise tasemega mudelit (taksonoomiat):

- Süsteem,
- Seade,
- Ressurss/allikas,
- Rakendus,
- Funktsiooniplokk.

Reaalses automaatikakeskkonnas toimivad erinevatest juhtimisseadmetest moodustatud rakendused ühtse **süsteemina**. Mingi konkreetne **seade** sisaldab tema funktsioone kirjeldavaid rakenduse programme, rakendusprogrammide liidesest andmesidevõrguga, liidesest tarkvaraliste ressurssidega mis toimivad juhtimisseadmetes ning automatiseeritavates protsessiseadmetes.

Ressurss on iseseisev täidetav tarkvaraline üksus koos parameetritega. Igas seadmes saab toimida mitu ressurssi. Ressurss koosneb (kõrgetasemelistest) funktsiooniplokkidest (rakenduses vahetavad omavahel eriliste liideste abil sündmuste ja muutujate andmeid). Teenuse liidese funktsiooniplokk moodustatakse andmesideliidesest ja automatiseeritud protsessi kasutajaliidesest. Ülejäänud funktsiooniploki tüübid (ka kasutaja poolt loodud funktsiooniplokid) on aluseks tegelikule juhtimisalgoritmile.

Rakenduse tase on kokku lepitud (reaalne) programmeerimistase. Sellel tasemel seotakse funktsiooniplokid omavahel kokku (süsteemiks) sõltumata ressurssidest, milles need funktsiooniblokid töötavad. Seetõttu kirjeldab see tase konkreetse rakenduse, mis võib iseenesest olla hajutatud mitmete ressursside vahel. Rakendusse kuuluvad ja samaaegselt koostoimivad (teostumise loogika järgi veelgi madalama tasemega) osad on protsessid. Rakenduse pidevaks toimimiseks (energia ja info pideva liikumise võimaldamiseks) on tavaliselt vaja mitme erineva protsessi ühtekokku sidumine.

Funktsiooniplokid on siin väikseimad rakenduse (programmi moodustavad) üksused, mis standardi IEC 61499 järgi koosnevad enamasti kahest osast:

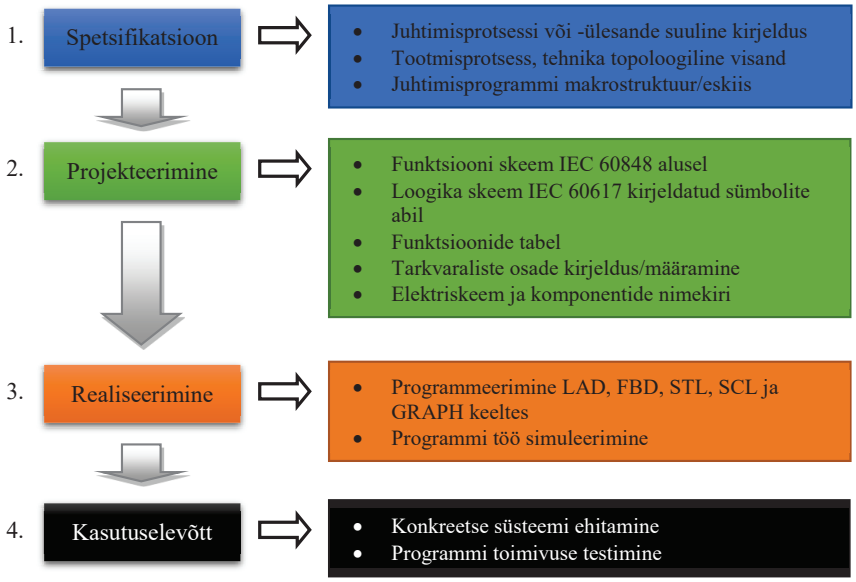
1. täitmise juhtimine: sündmuste loomine ja töötlemine koos juhtimise sisendite ja väljunditega;
2. algoritm (kasutaja programm) koos andmete sisenditega ja väljunditega ning sisemiste andmetega.

Konkreetses PLC teostatav protsessi algoritm a selle täitmiseks vajalike ülesanete algoritmid programmeeritakse standardis IEC 61131-3 kirjeldatud keeltega. Rakenduseks seotavate protsesside juhtimist käsitlev osa luuakse soovitavalt SFC keele abil. Täitmise juhtimise diagramm (ECC) juhib algoritmi või selle osade täitmist sõltuvalt ajalise protsessi tegelikust olekust ja samuti rakendusse sissetulevatest sündmustest.

2.7 PLC juhtimisprogrammi loomine

PLC juhtimisprogrammi loomine koosneb järgmistest etappidest (2.16):

- spetsifikatsioon: protsessi või ülesande kirjeldus;
- projekteerimine: rakenduse (e lahenduse) kirjeldus;
- realiseerimine: lahenduse elluviimine;
- integreerimine/kasutuselevõtt: lahenduse sidumine keskkonnaga ja katsetamine.



Joonis 2.16. Juhtimisprogrammi loomise etapid

Etapp 1: Spetsifikatsioon (probleemi sõnastamine)
Siin koostatakse PLC abil realiseeritava tootmisseadme rakenduse protsessi või ülesande detailne kirjeldus. See tegevus toob välja konfliktid, eksitused ja puudused tehnilistes nõuetes või spetsifikatsioonides. Antud etapi lõpuks on olemas:

- juhtimisprotsessi või ülesande suuline kirjeldus;
- tehnika struktuur/paigutus;
- rakenduse (lahenduse) umbkaudne struktuur.

Etapp 2: Projekteerimine (põhimõttelise lahenduse konkreetne vorm)
Protsessi või ülesande põhimõtteline lahendus töötatakse välja 1. etapi tulemuste alusel. See peab kirjeldama juhtimissüsteemi käitumist ning olema sõltumatu tehnilisest realiseerimisest. Antud nõudeid täidab funktsionaalne skeem (GRAFCET). Funktsionaalset rakendust (lahendust) saab samm-sammult täiustada, kuni see sisaldab kõiki osasid. Keerulise juhtimisülesande korral tuleks rakendus (lahendus) jagada üksikuteks osadeks. Need võivad olla erifunktsioonid, mida kasutatakse nt visuaalse liidese teostamisel või andmeside korraldamisel.

Etapp 3: Realiseerimine (põhimõttelise lahenduse programmeerimine)
Rakendusprotsessi või selle ülesande põhimõtteline lahendus tõlgitakse juhtimisprogrammiks kasutades standardiga IEC 61131-3 määratud programmeerimiskeeli (SFC/GRAPH, FBD, LD/LAD, IL/STL ja ST/SCL). Juhtimissüsteeme, mis töötavad ajas vastavalt loogilisele protsessile, saab kergesti programmeerida GRAPH keeles. LAD, FBD ja STL keeled sobivad põhioperatsioonide formuleerimiseks ja juhtimissüsteemide jaoks, mida saab kirjeldada lihtsate loogikaoperatsioonide või Boole'i signaalidega. Kõrgtasemelist SCL keelt kasutatakse peamiselt matemaatilise sisuga programmiosade loomiseks, nagu nt juhtimisalgoritmide kirjeldamiseks.
Nii palju, kui PLC või selle programmeerimistarkvara seda etappi toetab, tuleb loodud juhtimisprogramme või programmiosi enne kasutuselevõttu testida (simuleerida). See võimaldab avastada vead ja kõrvaldada need juba algstaadiumis, hiljem võib vigade kõrvaldamine olla palju keerulisem ja kulukam.

Etapp 4: Kasutuselevõtt (juhtimisprotsessi või ülesande koostamine ja katsetused)
Siin katsetatakse kolmes eelmises etapis loodud automatiseeritud süsteemi ja tegelike tootmisseadmete koostööd. Kui juhtimisülesanded on keerukad, tuleb seda teha süstemaatiliselt samm-sammu haaval. Korrektselt toimides leitakse vead kergesti ja kõrvaldatakse need nii juhtimisprogrammist kui ka mujalt süsteemist.
Dokumentatsioon on süsteemi loomisel üks oluline ja kriitilise tähtsusega komponent, mida läheb hiljem vaja süsteemi hooldusel ja laiendamisel. Dokumentatsioon, sealhulgas juhtimisprogrammi kohta, peab olema saadaval nii paberil kui ka andmekandjal. See on vajalik kasutuse käepärasuse ja varukoopiate omamise huvides. Dokumentatsioon koosneb üksikute etappide aruannetest, juhtimisprogrammide väljatrükkidest ja juhtimisprogramme käsitlevatest mistahes võimalikest kirjeldustest, nagu:

- probleemi kirjeldus;
- tehniliste seadmete positsiooninumbritega visand või seadmete paigutus;
- elektriskeemid, pneumaatika/hüdraulika skeemid;
- masina koostejoonis;

- klemmide ühendusskeem;
- juhtimisprogrammide väljatrükid;
- sisendite-väljundite (I/O) nimekiri;
- täiendav dokumentatsioon.

2.8 Teadmiste kontroll

a) Millised allpool loetletud plokid on standardis IEC 61131 kirjeldatud programmi ülesehituse üksused (mitu õiget vastust)?
b) Andmeplokk
c) Funktsioon
d) Funktsiooniplokk
e) Juhtimisplokk
f) Programm

2) Siemens S7-1200 PLC programmis peab olema kirjutatud vähemalt … , et PLC hakkaks seda täitma.

a) OB 1
b) FB 1
c) OB 101
d) FC 1
e) DB 1
f) OB 200

3) Ühenda omavahel allpool esitatud analoogsed programmeerimiskeeled standardis IEC 61131 ja tarkvaras STEP 7.

IEC61131	STEP 7
a) Struktureeritud tekst (ST)	1. STL
b) Järjestatud funktsioonide kaart (SFC)	2. SCL
c) Käsulist (IL)	3. GRAPH

4) Alumisel joonisel kujutatud programm on kirjutatud …

a) LAD keeles
b) FBD keeles
c) SCL keeles
d) STL keeles

```
IF "reset"() AND NOT "empty" THEN
   "swiv_dow":=1;
   "blink_Q1":=0;
ELSIF "reset"() AND "empty" AND NOT "key_man" THEN
   "blink_Q1":=1;
END_IF;
```

5) Funktsiooniplokkskeem on …

a) graafiline PLC programmeerimiskeel, mis põhineb elektriskeemil.
b) on masinorienteeritud PLC programmeerimiskeel.
c) graafiline PLC programmeerimiskeel, mis põhineb loogika funktsioonplokkidel.

6) Mis on digitaal sisendmooduli esimese sisendi aadress, kui see on asetatud S7-1200 siinil kolmandasse pessa ja kasutatakse ainult 16 kanaliga mooduleid?

a) %I7.1
b) %I7.0
c) %Q3.0
d) %I12.0
e) %I3.0
f) %Q7.1

7) PLC programmis on defineeritud kaks mälu muutujat - %MW10 ja %MW11, andmetüübiks on sõna. Kui programm muudab muutuja %MW10 väärtust, siis muutuja %MW11 väärtus …
   a) muutub ka, kuna mõlemad muutujad on sama tüüpi.
   b) ei muutu, kuna antud muutujad ei oma ühist mälupiirkonda.
   c) muutub ka, kuna mõlemad muutujad kasutavad ühist mälupiirkonda.
   d) ei muutu, kuna antud muutujad omavad ühist mälupiirkonda.

8) Kui palju mäluruumi võtab enda alla topeltsõna?
   a) 1 bitt
   b) 4 bitti
   c) 8 bitti
   d) 16 bitti
   e) 32 bitti

9) Millises juhtimisprogrammi loomise etapis tuleks teha esimene juhtimisprogrammi testimine?
   a) Projekteerimine
   b) Realiseerimine
   c) Kasutuselevõtt
   d) Spetsifikatsioon

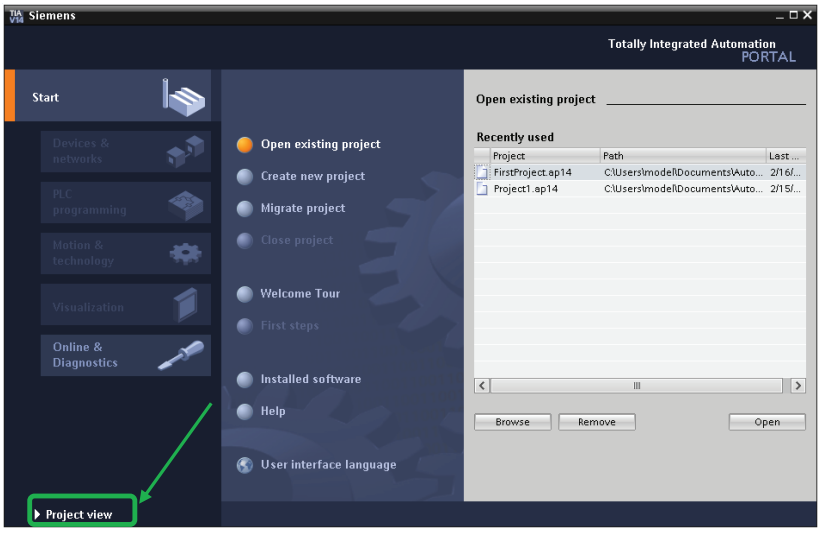
3 ESIMENE PROJEKT SIEMENSI S7-1200 SEERIA PLC'GA

Selles peatükis käsitletakse projekti algatamist ja selles programmi loomist Siemensi S7-1200 seeria PLC'le, programmi katsetamist arvutis ja laadimisest PLC'sse. Selleks peab olema reaalne S7-1200 PLC ja arvuti, kuhu on juba paigaldatud PLC programmeerimistarkvara STEP 7 versioon 14 (üldnimi TIA Portal). Siin kohal tuleb vaadata, et konkreetne PLC toetab antud programmeerimistarkvara ja vastupidi.

3.1 Uue projekti loomine

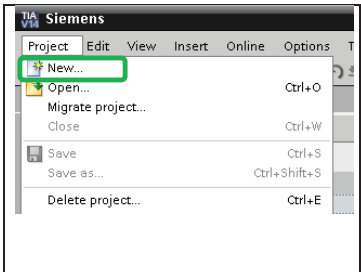
Käivitada STEP 7 Windowsi START menüü (START → All Programs (või All Applications) → Siemens Automation → TIA Portal V14) või siis töölaual oleva ikooni kaudu. [9]

Avanenud aknas (vt 3.1) valida *Project view*, et minna projektivaatesse. TIA Portal kasutajaliidesel on kaks vaadet. Üks on portaalivaade ja teine on projektivaade. Portaalivaade on lihtsustatud (ja seega piiratum) vaade, mis juhatab samm-sammult läbi projekti loomise algusest kuni valmis PLC juhtimisprogrammi laadimiseni reaalsesse PLC'sse. See on mõeldud inimestele kes puutuvad kokku esimest korda Siemensi PLC'dega ja selle tarkvaraga. Programmi tundmaõppimise ja edasise optimaalsema töö huvides on soovitav valida projektivaade.

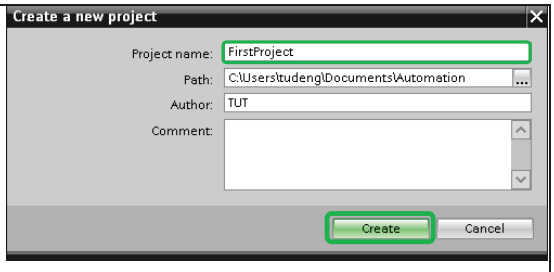


Joonis 3.1. TIA Portal aken

Luua uus projekt valides *Project* → *New…* (vt 3.2). *Project* all on veel *Open…* ja *Migrate Project…*. *Open…* võimaldab avad juba varem loodud projekti, mis antud arvutis on olemas. *Migrate Project…* võimaldab tuua sisse vanema programmeerimistarkvaraga loodud projekte. Näiteks, kui projekt on loodud SIMATIC STEP 7 V5.5 SP3 versiooniga, siis saab selle avada STEP 7 V14 SP1.



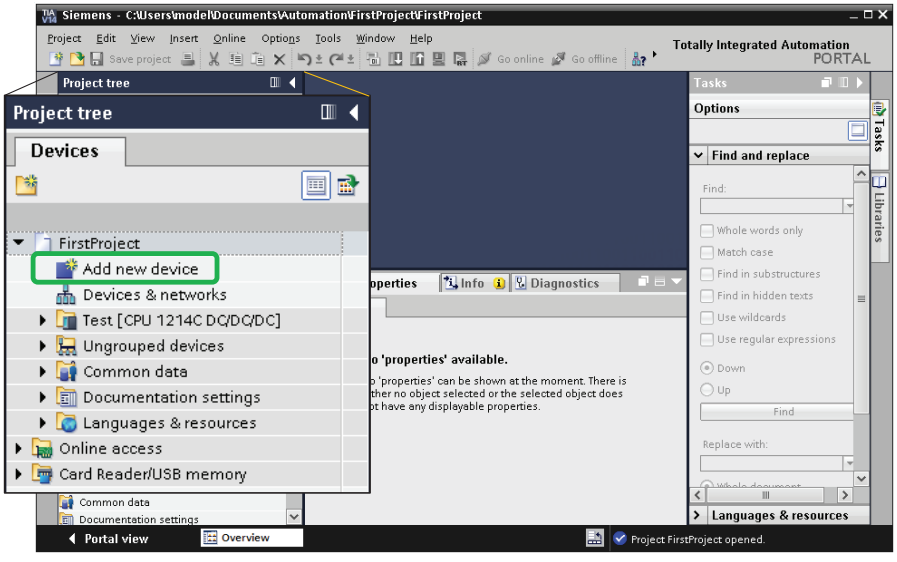
Joonis 3.2. Uue projekti loomise alustus



Joonis 3.3. Uue projekti nime ja asukoha määramine

Avanenud aknas (vt 3.3) tuleb määrata loodavale projektile nimi (*Project name:*), projekti asukoht arvuti kõvakettal (*Path:*), autor (*Author:*) ja kommentaar (*Comment:*) loodava projekti kohta. Kui vastavad valikud ja seadistused on tehtud, siis vajutada nupule *Create*. Seejärel avaneb uus loodud projekt nii nagu seda on kujutatud joonisel 3.4.

Peatüki järgmistes punktides kirjeldatakse PLC riistvara seadistamist (konfigureerimist), muutujate deklareerimist, programmi koostatamist, dokumenteerimist ja testimist. Seejärel saab projektis valminud programmi laadida reaalsesse tööstuskontrollerisse.

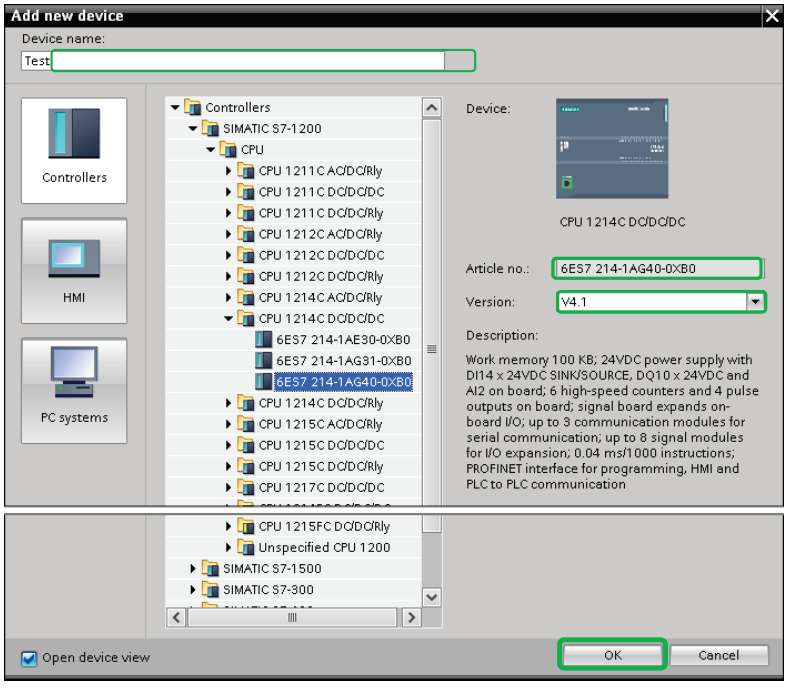


Joonis 3.4. Uus loodud projekt TIA Portal'is

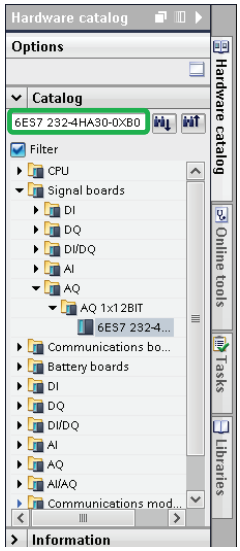
3.2 PLC riistvara seadistamine projektis

Järgmine samm on PLC riistvara seadistamine ehk deklareerimine konkreetses projektis. Selleks tuleb valida projekti puus *Projektinimi* (antud näites on selleks *FirstProject*) → *Add new device* (vt 3.4). Projektis võib olla mitu kontrollerit või ka muid seonduvaid seadmeid, näiteks kasutajaliides (HMI).

Uue PLC nimeks (*Device name:*) on mõttekas panna seadme või tehnilise protsessi nimetus, mida PLC hakkab juhtima. Antud näites on nimeks pandud *Test*. Järgmisena tuleb valida PLC's kasutatav protsessor (CPU), milleks on antud näites CPU 1214C DC/DC/DC (vt 3.5). Akna paremal pool on ära toodud CPU tootekood (*Article no.:*) ja riistvara versioon (*Version:*). Tootekood ja versioon on leitav ka reaalse kontrolleri pealt. All pool on esitatud veel CPU lühi kirjeldus (*Description:*). Valiku kinnitamiseks vajutada *OK* nupule.



Joonis 3.5. CPU'ks on valitud CPU 1214C DC/DC/DC



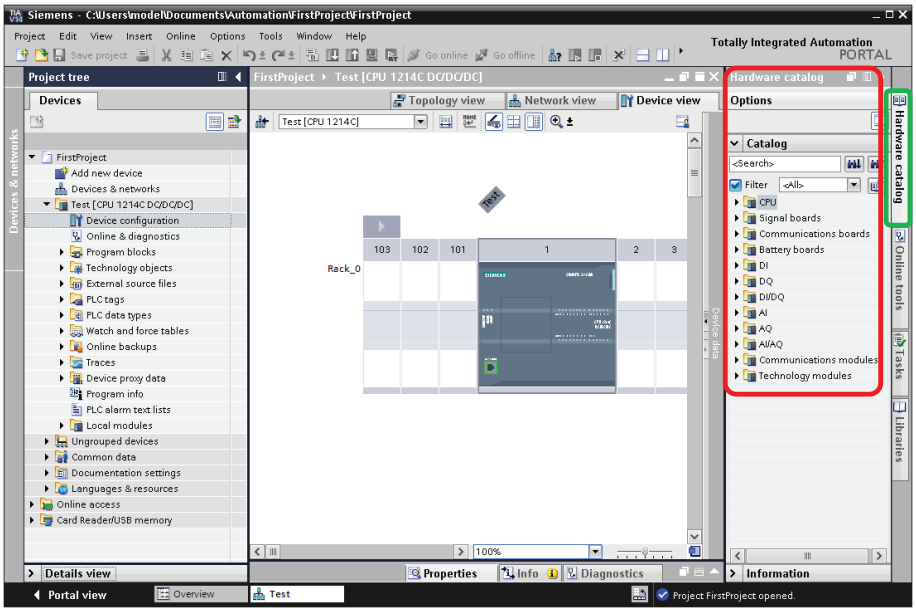
Joonis 3.6. SB 1232 AQ kaardi otsing

Kui CPU tootekoodi ei tea, siis seda tuleks valida *Unspecified CPU 1200*. See tähendab, et PLC koostis antud hetkel ei teata ja see määratakse hiljem, kui reaalne PLC on valitud ja/või ühendatud arvutiga.

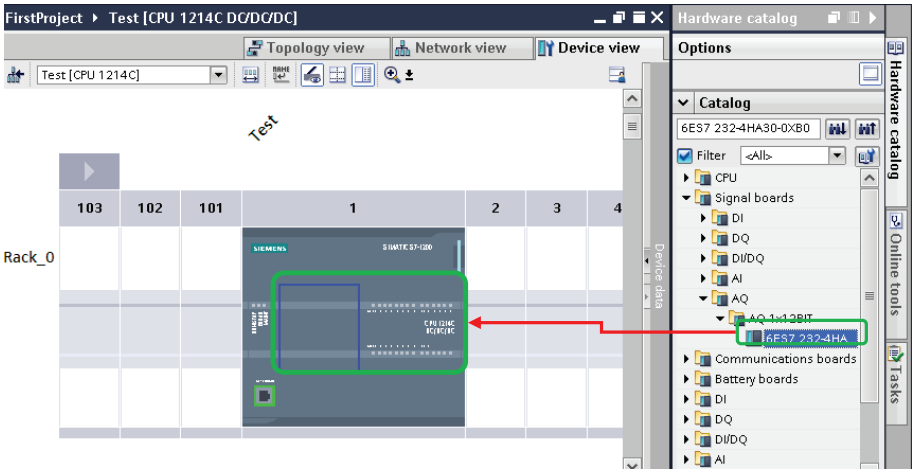
Avanenud aknas (3.7) saab täiendada PLC riistavara lisades juurde vajalike mooduleid. Moodulitest ja nende paiknemisest PLC kooseisus on räägitud täpsemalt peatükis 1.3. Kõik PLC vajalikud moodulid leiab paremal pool olevas *Hardware catalog*'ist. Kui seda näha pole, siis tuleb teha topelt klõps paremal pool oleva *Hardware catalog* peal (see on paremalpool kaldu).

Järgmisena tuleb lisada PLC kooseisu analoog SB kaart SB 1232 AQ tootekoodiga 6ES7 232-4HA30-0XB0. Selle leidmiseks võib sisestada otsingusse kaardi tootekoodi ja siis vajutada Enter klahvi. Joonisel 3.6 ongi leitud analoog SB kaart. Nüüd tuleb sellest kinni võtta, lohistada sinise kastiga tähistatud kohale (CPU peal) ning lasta selle kohal lahti (vt joonis 3.8).

Sedasi saab deklareerida ka ülejäänud PLC moodulid, mis on PLC's kasutusel. Antud näites piirdutakse ainult moodulitega CPU 1214C DC/DC/DC ja SB 1232 AQ.

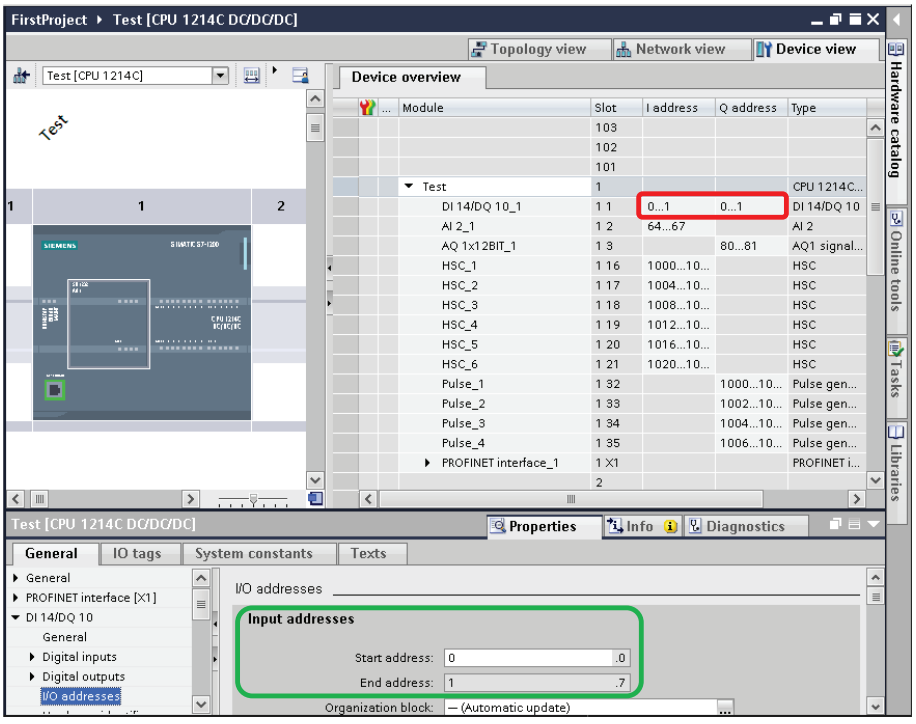


Joonis 3.7. PLC riistvara seadistamine TIA Portal's



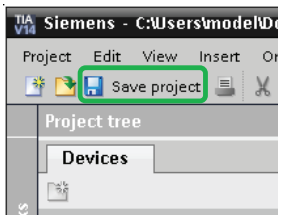
Joonis 3.8. Laiendus kaardi SB 1232 AQ valimine ja lisamine PLC riistvara seadistusse

Joonisel 3.9 ongi seadistatud PLC riistvara. Nagu näha on CPU'le (nimeks on *Test*) integreeritud 14 DI ja 10 DO, mis tõttu pole vaja PLC'le lisada juurde SM mooduleid. Lahtrites *I* ja *Q address* on märgitud I/O'de baidi aadressid. Neid aadresse kasutatakse programmis I/O'dele ligi pääsemiseks. Selles näites on DI aadresside vahemik baidist 0 - 1 ja DO aadressi vahemik on ka 0 - 1.



Joonis 3.9. Ülevaade seadistatud PLC'st

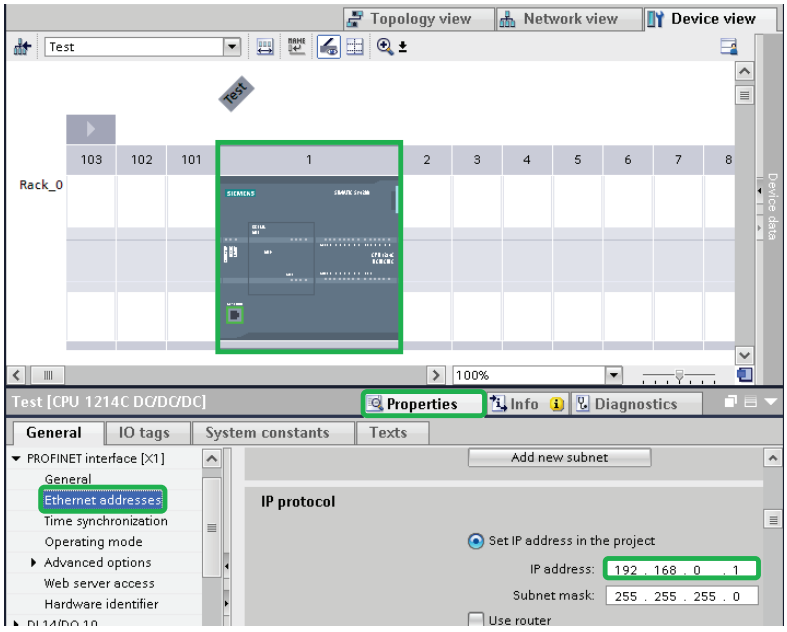
Veel tuleb seadistada/kontrollida PLC IP aadress. Seda IP aadressi proovitakse esimesena PLC'ga ühenduse saamiseks ja ühtlasi on see aadress, mis määratakse PLC'le pärast riistvaraseadistuse sisse laadimist.
Kui PLC ei ühendata mingisse võrku vaid ühendus luuakse otse PLC ja arvuti vahel, siis võib kasutusse jääda vaikimisi IP aadress 192.168.0.1. Sellisel juhul peaks arvuti IP aadress jääma samasse vahemikku. Näiteks võiks see olla 192.168.0.100.



Joonis 3.10. Projekti salvestamine

Kui aga PLC ühendatakse mingisse võrku, siis tuleks küsida võrku haldava võrguadministraatori käest staatiline IP aadress, mida on lubatud võrgus kasutada. Suvaliste aadresside kasutamine võib toimida, kuid võib tekitada IP aadressi konflikti, mille tõttu ei pruugi teised seadmed võrgus enam omavahel ühendust saada.
IP aadressi muutmiseks valida CPU, siis *Properties* sektsioonis valida *General → PROFINET intereface [X1] → Ethernet aadresses*. Väljal *IP address:* saab sisestada uue IP aadressi (joonis 3.11). Antud näites ei muudeta seda ja see jääb vaikimisi etteantud IP aadressi peale.

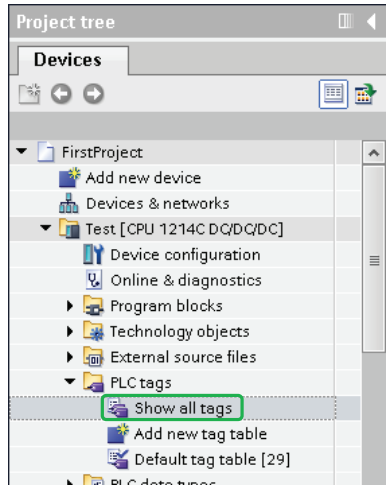
PLC riistavara salvestamiseks valida *Save project* (vt 3.10). Sellega salvestab kogu PLC projekti (PLC riistvara seadistus, muutujate tabel, programm jne). Iga kord, kui midagi on muudetud PLC projektis tuleb kasutada *Save project*, et salvestada tehtud muudatused. Siin kohal tohi unustada, et kui tehtud muudatusi ei laeta reaalsesse PLC'sse, siis ei pruugi PLC tööle hakata nagu see peaks.



Joonis 3.11. PLC IP aadressi leidmise ja seadistamise koht

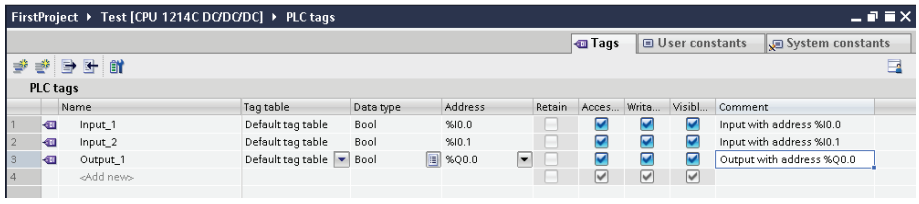
3.3 Muutujate deklareerimine

Enamasti on teada PLC külge ühendatavad seadmed nagu andurid, täiturid, operaator-paneelid jne. Nendele on antud elektri- ja/või mehaanikaskeemis tähised, mis tuleks kasutada PLC programmis muutujate nimena. Kui mingi PLC sisend reageerib valesti, siis saab selle nime kaudu leida üles reaalse seadme masinas ja kontrollida milles võib viga olla (nt anduri vale väljund on ühendatud PLC sisendiga, andur paikneb vales kohas, jne). Muutujate deklareerimise kohta lugeda ka peatükke 2.4 ja 2.5.



Joonis 3.12. Muutujate deklareerimise tabeli avamine

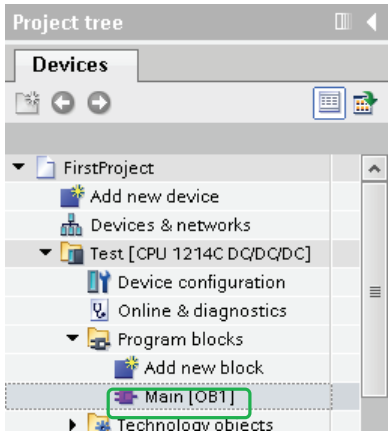
Muutujate deklareerimiseks tuleb *Projektinimi* (*FirstProject*) → *Kontrollerinimi* (*Test*) alt avada kaust *PLC tags* ning seejärel teha topelt hiireklikk *Show all tags* peal (3.12).
Avanenud tabelis (3.13) määratakse muutuja nimi (*Name*), tema absoluutne aadress e siis mälupiirkonna aadress (*Address*) ja andmetüüp (*Data type*). Alati on mõttekas lisada ka muutuja kohta käiv kommentaari (seletus - *Comment*). I/O'de absoluutse aadressi leiab PLC riistvara seadistuse osa veerust *I* ja *Q address* (3.9).
3.13 esitab (deklareeri) kolm muutujat *Input_1*, *Input_2* ja *Output_1*, mida kasutatakse hiljem programmi kirjutamiseks. Nende aadressid on %I0.0, %I0.1 ja %Q0.0 ning andmetüübiks on *Bool*.



Joonis 3.13. Muutujate deklareerimise tabel TIA Portal'is

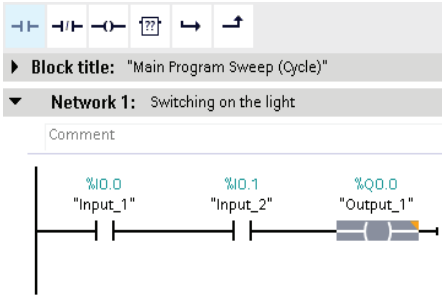
3.4 Programmi kirjutamine

Programmi plokid (OB, FB, FC ja DB) asuvad kõik projektimenüüs *Projektinimi* (*FirstProject*) → *Kontrollerinimi* (*Test*) → *Program Blocks* (3.14). Antud juhul on peaprogramm OB1 (nimega *Main*) juba lisatud. Vajadusel saab lisada juurde teisi POU'si *Add new block* abil. Uute POU tegemisel tuleb valida sobiv tüüp ja programmeerimiskeel. Siin kohal on soovitav lugeda ka peatükke 2.2 ja 2.3.



Joonis 3.14. Juhtplokki OB1 avamine

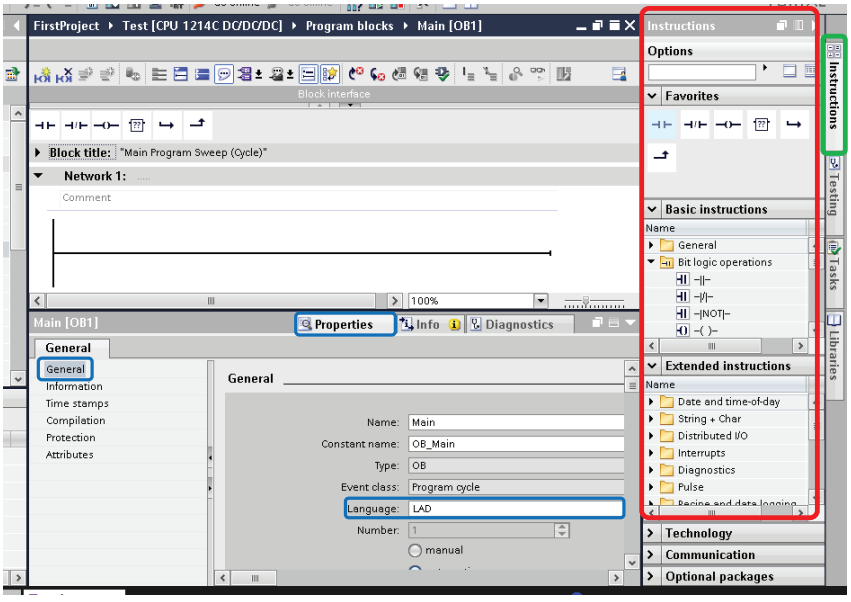
Kõigepealt tuleb teha topelt hiireklikk failile Main (OB1) (vt 3.14). Joonisel 3.16 kujutatud aknas kirjutatakse Siemensi PLC'de programmid LAD keeles. Programmeerimis-keelt saab vahetada FBD vastu *Properties* → *General* → *Language:* all. Kõik programmi kirjutamiseks vajalikud funktsioonid paiknevad TIA Portal'is paremal pool olevas *Instructions* osas. Kui seda pole näha, siis tuleb see muuta aktiivseks tehes paremal pool ääres oleva *Instructions* peal topelt hiireklikk.



Joonis 3.15. Valmis PLC programm

Joonisel 3.15 kujutatud programm aktiveerib väljundi %Q0.0, kui mõlemad sisendid on aktiivsed. Selle kirjutamiseks vajalikud elemendid leiab *Favorites* ja *Bit logic operations* kaustadest. Avatud kontaktide ja mähise (lugeda ka pt 4) sisestamiseks peab olema *Network 1* e segment 1 aktiivne. Avatud kontakt sisestatakse kas siis selle lohistamisega ja lahtilaskmisega segmendi kohal või tehes tema peal topelt hiireklikk. Sisestatud elementide kohale lisada muutujate nimed nii nagu seda on tehtud joonisel 3.15.

Alati on mõttekas kirjutatud programmi kirjeldada *Comment* osades, et siis hiljem teaks mida antud programmi osa teeb. Samuti tuleks segmentidele anda nimed, et programmis paremini orienteeruda.



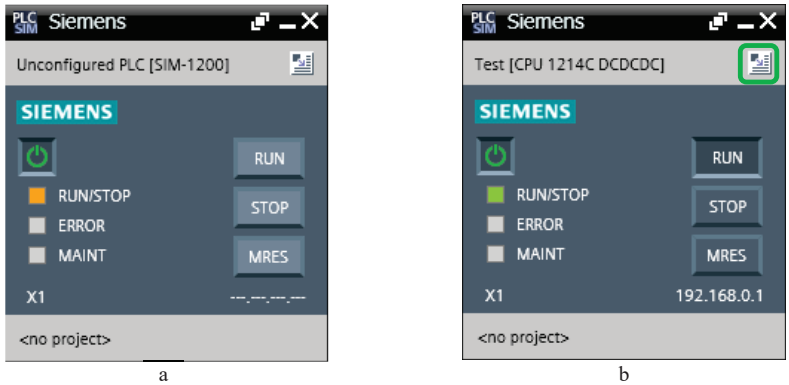
Joonis 3.16. TIA Portal'i aken PLC programmi kirjutamiseks

Kui programm näeb välja nagu joonisel 3.15 kujutatud, siis tuleb see salvestada kasutades selleks ikooni *Save project* (joonis 3.10).

3.5 Programmi testimine

PLC programmi testimiseks on programm S7-PLCSIM (3.17 a). Tegemist on virtuaalse PLC'ga, mille peal saab testida kasutaja poolt kirjutatud PLC programme. See on olemas STEP 7 täisversioonis ja samas saab seda eraldi juurde osta lisa paketina. Kui S7-PLCSIM'i

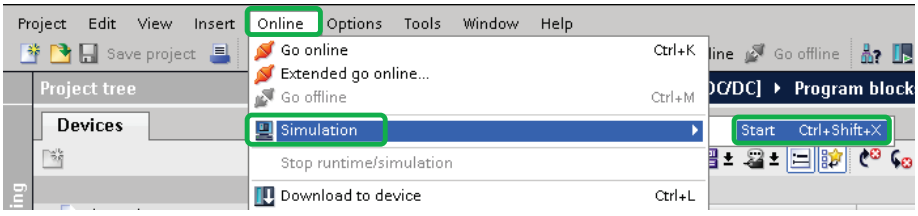
ei ole, tuleb kasutada reaalset PLC'd programmi testimiseks, mille külge pole ühendatud täitureid.



a b

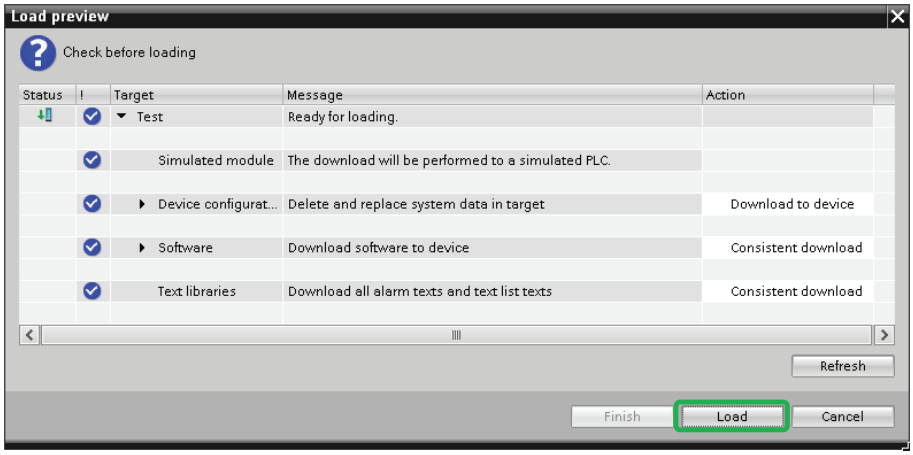
Joonis 3.17. S7-PLCSIM enne(a) ning pärast (b) PLC riistvara ja programmi laadimist

S7-PLCSIM käivitamiseks tuleb valida aknas TIA Portal'is menüüst *Online* → *Simulation* → *Start* (joonis 3.18). Kui Start osa on hall, siis vaadata, et projektimenüüs on valitud CPU kaust (*Test [CPU 1214C DC/DC/DC]*) või *Program blocks* kaust. Kui öeldakse, et simulatsiooni aktiveerimine keelab kõik muud Online ühendused, siis vastata sellele jaatavalt.



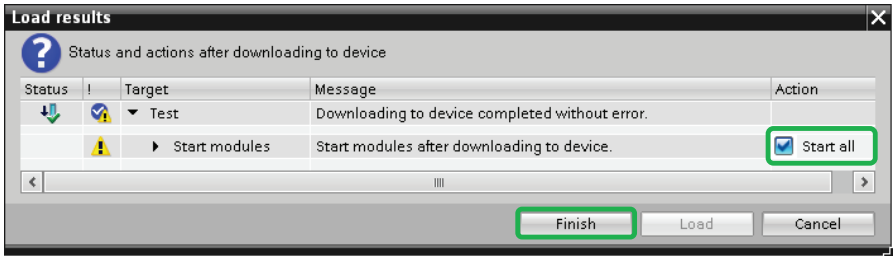
Joonis 3.18. Programmi S7-PLCSIM käivitamine TIA Portal'is

Selle peale peaks avanema joonisel 3.17 a ja Joonis 3.19 kujutatud aknad. Avanenud *Load preview* aknas vajutada *Load* nupule (joonis 3.19), et jätkata kirjutatud programmi laadimist S7-PLCSIM'i. Mõnikord tuleb siin teha mingid valikud, nagu nt viia CPU stopp režiimi, kustutada CPU mälu, jne.



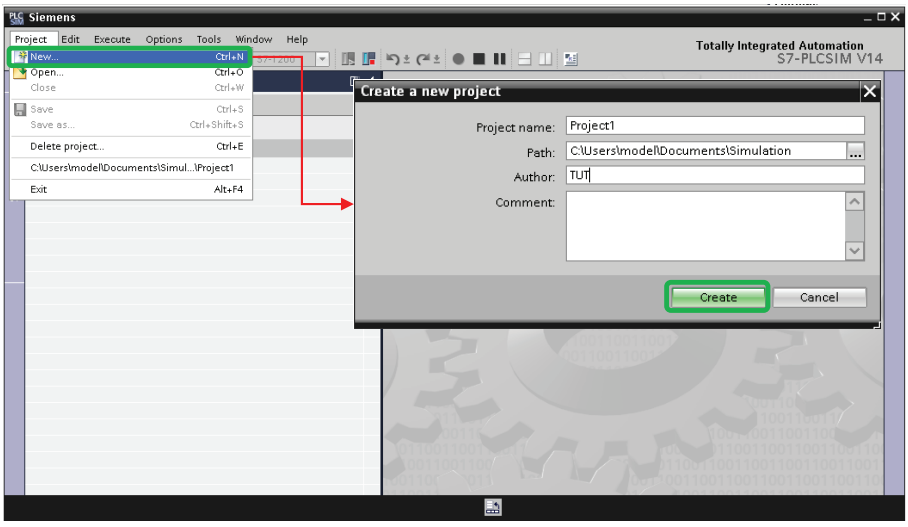
Joonis 3.19. *Load preview* aken programmi laadimisel S7-PLCSIM'i

Load results aknas (joonis 3.20) tuleb valida *Start all*, et viia CPU töö režiimi, ja vajutada siis *Finish* nuppu.



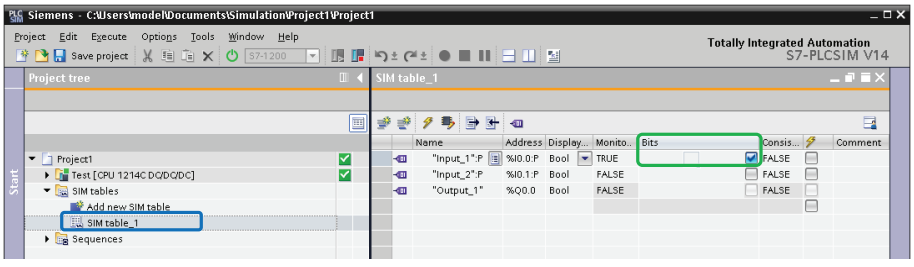
Joonis 3.20. *Load results* aken programmi laadimisel S7-PLCSIM'i

Mingi aja möödudes peaks S7-PLCSIM nägema välja selline nagu kujutatud joonisel 3.17 b. Seal valida *Swicth to Project view*, mille peale avaneb S7-PLCSIM aken projekti vaates. PLCSIM aknas tuleb luua uus projekt (teha klikk *Project* → *New…* peal), mille järel avanevas aknas (joonis Joonis 3.21) tuleb määrata loodavale projektile nimi (*Project name:*), projekti asukoht arvuti kõvakettal (*Path:*), autor (*Author:*) ja kommentaar (*Comment:*) loodava projekti kohta. Kui vastavad valikud ja seadistused on tehtud, siis vajutada nupule *Create*.



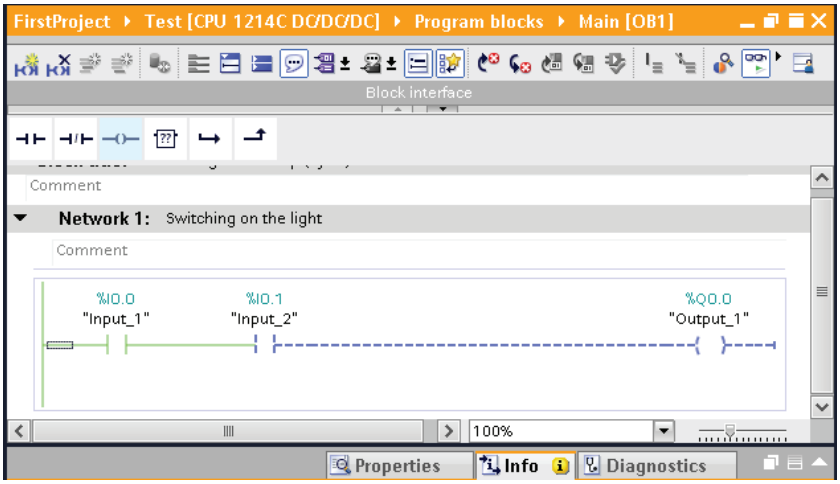
Joonis 3.21. S7-PLCSIM'i ning uue projekti loomise aken

Järgmisena tuleb avad *SIM table_1* (teha topelt klikk *Project1 → Test [CPU 1214C DC/DC/DC] → SIM tables → SIM table_1* peal) ning sisestada *Name* lahtrisse peatükis 3.3 defineeritud muutujate nimed.

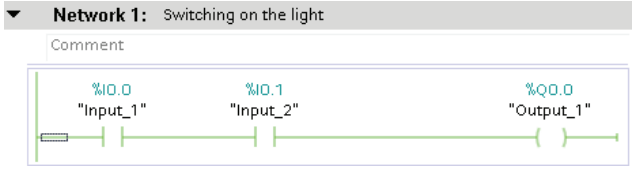


Joonis 3.22. S7-PLCSIM koos PLC programmis kasutatud muutujatega

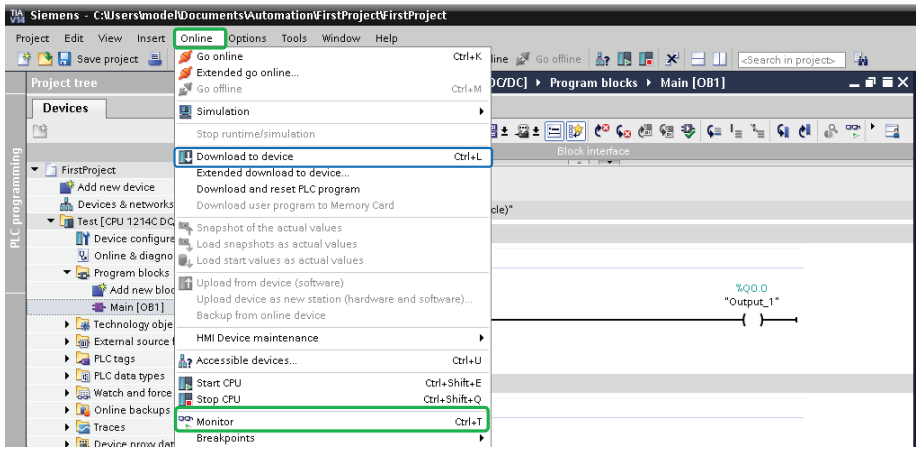
Kui sisestada linnuke *Input_1* muutuja *Bits* lahtris olevasse kasti, siis muutub selle väärtus TÕESEKS (joonis 3.22). Seda näeb ka joonisel 3.23 kujutatud programmilõigus. Rohelised pidevad jooned näitavad et vastav programmi osa on aktiivne ja seal kandub energia edasi (edasi kanduv signaal on 1) sinna maani kus tuleb vastu sinine katkendlik joon. Sinised katkendlikud jooned näitavad et vastavad programmi osad on aktiivsed, kuid nendes ei kandu energia edasi (edasi kanduv signaal on 0). Tänu sellele on ka *Output_1* muutuja väärtus VÄÄR. Kui panna linnuke ka *Input_2* muutuja *Bits* lahtris olevasse kasti, siis muutub ka *Output_1* muutuja väärtus TÕESEKS. See tähendab, et kogu programmilõik on roheline (joonis 3.24).



Joonis 3.23. Programmi täitmise jälgimine TIA Portal'is



Joonis 3.24. Programm, kui kõik PLC sisendid on aktiivsed (TÕESED)

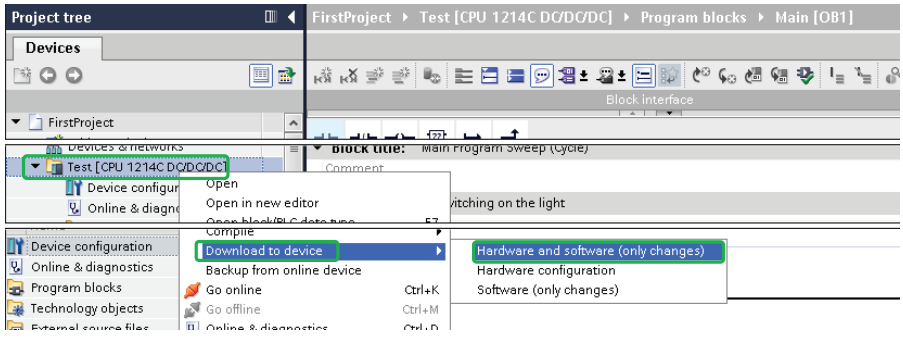


Joonis 3.25. *Online* menüü TIA Portal's

Programmi täitmise jälgimiseks valida programmi kirjutamise aknas menüüst *Online → Monitor* (joonis 3.25). Kui valida see uuesti, siis lülitatakse programmi täitmise jälgimine välja. Selle valiku tegemiseks peab programmi kirjutamise aken olema aktiivne TIA Portal'is. Sellele vastav ikoon on ka programmi kirjutamise aknas ülemises osas olemas. Sama asja teevad ka *Go online* (luua ühendus kas S7-PLCSIM'ga või reaalse PLC'ga) ja *Go offline* (katkestada ühendus kas S7-PLCSIM'ga või reaalse PLC'ga) ikoonid.
Programmi muutmiseks ning paranduste laadimiseks S7-PLCSIM'i on võimalik kasutada *Online* menüüst *Download to device* nuppu (joonis 3.25).

3.6 Seadistuste ja programmi kontrollerisse laadimine

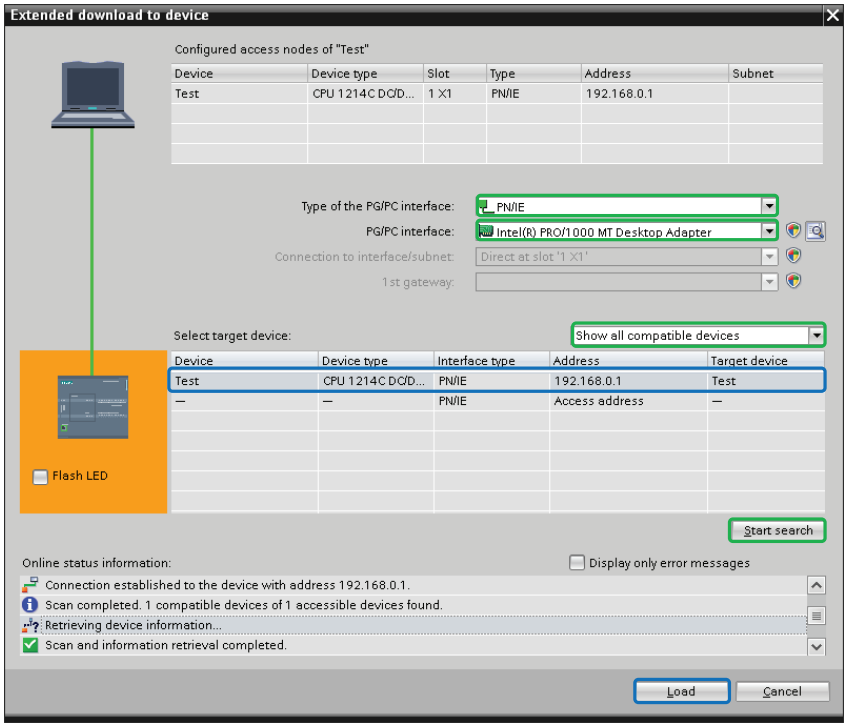
Kõigepealt tuleb veenduda, et S7-PLCSIM ei töötaks (sulgeda see programm). Seejärel ühendada PLC Etherneti kaabli kaudu arvutiga ja lülitada PLC toide sisse.
Kui kontrolleri IP aadress on teada, siis oleks mõttekas viia arvuti samasse IP aadressi vahemikku. Nt kui kontrolleri aadress on 192.168.0.1, siis arvuti aadress võiks olla nt 192.168.0.100.
Kui samas võrgus on veel seadmeid (nt kontroller ja arvuti on ühendatud läbi Ethernet switchi), siis tuleb jälgida, et aadressi ei katuks teiste seadmete omadega (samas võrgus mitu seadet sama aadressiga). Kui võrgus kasutatakse DHCP-d, siis ei tohiks selles võrgus samasse vahemikku jäävaid aadresse üldse käsitsi määrata. Antud näites ongi kasutatud eelpool olevaid IP aadresse ja PLC on ühendatud otse arvuti külge.
Peale ettevalmistuste tegemist tuleb valida TIA Portal projektimenüüs *FirstPorject – Test [CPU 1214C DC/DC/DC]* parema hiire klikkiga. Avanenud rippmenüüst valida *Download to device → Hardware and software (only changes)* et laadida PLC riistvara seadistus ja programm reaalsesse PLC'sse (vt joonis 3.26). Riistavara ja programmi saab laadida ka eraldi. Nt *Hardware configuration* laeb ainult PLC riistvara seadistuse PLC'sse. Seda tuleks teha ainult esmakordsel ühendusel kontrolleriga või pärast riistvaraliste seadete muutmist. *Software (only changes)* laeb ainult juhtimisprogrammi PLC'sse.



Joonis 3.26. Programmi ja riistvara seadistuse laadimine PLC'sse

See peale avaneb *Extended download to device* aken (joonis 3.27). Seal valida *Type of the PG/PC interface:* lahtris *PN/IE* ja *PG/PC interface:* lahtris kohalik arvuti Etherneti võrgukaart, mille külge on ühendatud PLC. Jälgida, et *Show all compatible devices* on

valitud. Siis vajutada *Start search* nupule. Selle peale peaks ilmuma võrgus (arvuti küljes või samas võrgus) olevate PLC'de nimekiri.

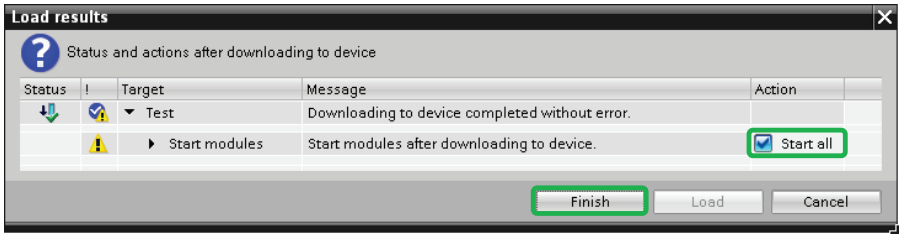


Joonis 3.27. *Extended download to device* aken ühenduse loomiseks reaalse PLC'ga

Valida *Select target device:* tabelis PLC, millesse soovitakse laadida andmed, ja vajutada *Load* nupule *Extended download to device* aknas. Kui tabelis on mitu PLC'd ja ei ole teada milline on milline, siis vasakul pool on nupp *Flash LED*. See paneb valitud PLC'l indikaatortuled vilkuma.
Joonisel 3.28 kujutatud *Load preview* aken avaneb. Selles tuleb valida *Stop all*, et viia PLC stopp režiimi. Vastasel juhul ei saa vajalike asju laadida kontrollerisse. Seejärel vajutada *Load* nupule.

Joonis 3.28. *Load preview* aken programmi laadimisel reaalsesse PLC'sse

Peale laadimist avaneb *Load results* aken (joonis 3.29), kus tuleb panna linnuke *Start all* kasti, et viia PLC töö režiimi. Lõpetuseks vajutada *Finish* nuppu.



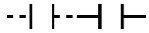
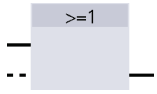
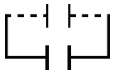
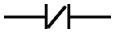
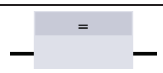
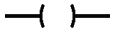
Joonis 3.29. *Load results* aken programmi reaalsesse PLC'sse

Kui vigu ei ilmnenud, on programm koos PLC riistvara seadistusega laetud reaalsesse PLC'sse ja see töötab. Programmi täitmise jälgimiseks valida menüüst *Online* → *Monitor* (joonis 3.25) (programmi kirjutamise osa peab olema valitud). Kui muuta programmis kasutatud sisendite olekuid PLC juures, siis muutub programmis joonte värvus nagu kujutatud joonistel 3.23 ja 3.24. Lugeda pt 3.5 lõpu osa, et saada teada, mida tähendab kontrolleri programmi kirjelduses roheline pidev joon ja sinine katkendlik joon.

4 BINAARLOOGIKA FUNKTSIOONID

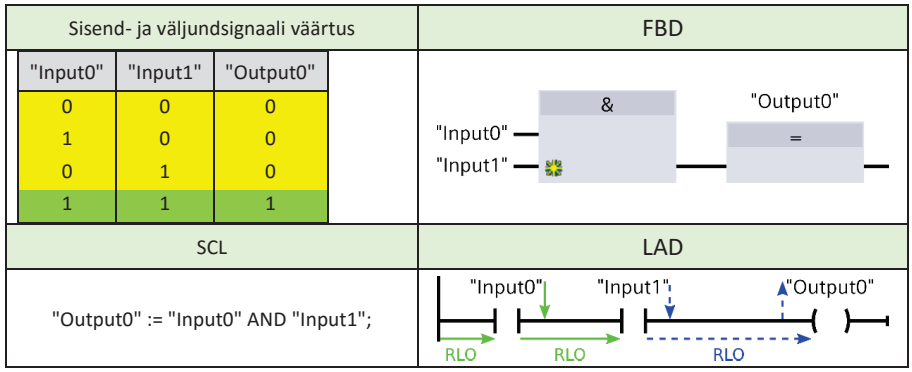
Funktsionaalset üksust, milles teostatakse binaarloogika põhioperatsioone (nt. Boole loogikatehteid), nimetatakse loogikablokiks või ka lüliks. Graafiliselt kujutatakse lüli ristkülikuna, millel on sisendid ja väljundid. Binaarloogika põhioperatsioonide teostust saab kirjeldada ka erinevat tüüpi kontaktide abil.
Tabelis 4.1 on esitatud põhilised binaarloogika elemendid FBD, LAD ja SCL keeles, millest saab koostada binaarloogika funktsioone.

Tabel 4.1. Binaarloogika põhielemendid

FBD	LAD	SCL	Nimetus
		AND	NING
		OR	VÕI
		NOT	EI
		:=	Väljund

4.1 NING- ja VÕI-lülid

Binaarloogika NING-lüli (tehte) väljundis on signaal väärtusega 1, kui selle kõikides sisendites on signaal väärtusega 1. Väljundsignaal on 0, isegi kui ainult ühes sisendis on signaal 0. 4.1 kujutab binaarloogika NING-lülid FBD, LAD ja SCL keeles. NING lüli võib omada rohkem kui kaht sisendit.



Joonis 4.1. Binaarloogika NING-lüli signaalide olekutabel ning selle kujutamine FBD, SCL ja LAD keeltes

Binaarloogika VÕI-lüli (tehte) väljundis on signaal väärtusega 1, kui vähemalt ühes VÕI-lüli sisendis on signaal 1. Väljundsignaal on 0, kui kõikides sisendites on signaal 0. 4.2 kujutab binaarloogika VÕI-lüli LAD, FBD ja SCL keeles. VÕI-lüli võib omada rohkem kui kaht sisendit.

Tarkvara STEP 7 abil salvestatakse NING- ja VÕI-tehte tulemused PLC loogikatehte tulemuse RLO bitti (RLO – inglise keeles *result of logic operation*). RLO biti väärtus ehk olek võib olla 1 või 0. NING- või VÕI-tehte algfaasis küsitakse esimese operandi signaali väärtust ja see salvestatakse kohe RLO bitti. NING- või VÕI-tehte teostamise järgmises faasis küsitakse ka teise operandi signaali väärtust, mis seejärel seotakse RLO bitti salvestatud väärtusega järgides binaaralgebra reegleid. Vahetulemus salvestatakse RLO bitti jne. Tehte teostamise lõpus salvestatakse RLO biti väärtus väljundlüli operandi(desse) või siis see edastatakse järgmise elemendi sisendisse ühendusjoonte kaudu.

Sisend- ja väljundsignaali väärtus

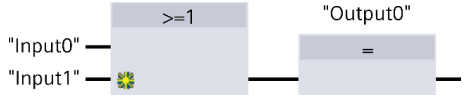
"Input0"	"Input1"	"Output0"
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

LAD

SCL

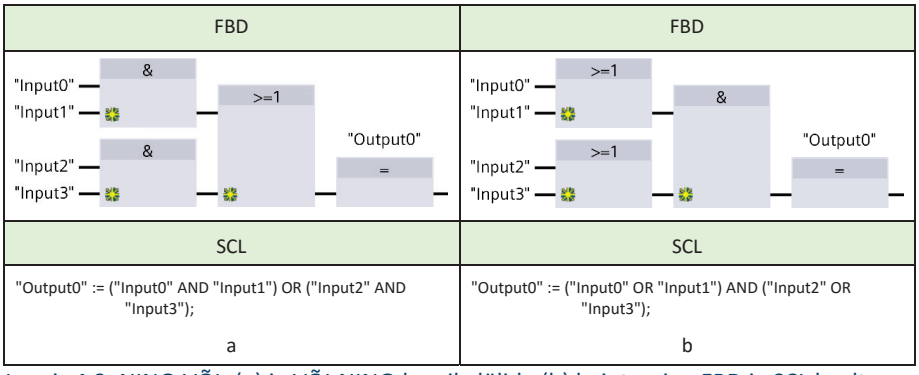
```
"Output0" := "Input0" OR "Input1";
```

FBD



Joonis 4.2. Binaarloogika VÕI-lüli signaalide olekutabel ning selle kujutamine LAD, SCL ja FBD keeltes

NING- ja VÕI-lülidest saab koostada keerukamaid loogikatehteid nagu NING-VÕI- ja VÕI-NING-loogikaühendused [10]. NING-VÕI-loogikaühenduses on NING-tehte väljund ühendatud VÕI-tehte sisendiga. VÕI-NING-loogikaühenduse puhul on vastupidi. Joonisel 4.3 on kujutatud antud loogikaühendused FBD ja SCL keeles.



Joonis 4.3. NING-VÕI- (a) ja VÕI-NING-loogikalülide (b) kujutamine FBD ja SCL keeltes

```
IF "Input0" AND "Input1" THEN
    "Output0" := TRUE;
ELSE
    "Output0" := FALSE;
END_IF;
```

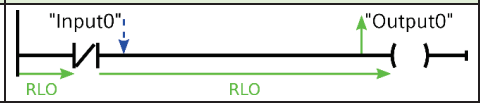
Joonis 4.4. SCL keeles NING-lüli IF tingimuslauses

NING-VÕI-tehte tulemuseks on signaal väärtusega 1, kui vähemalt üks NING-lüli väljundsignaali väärtus on 1. VÕI-NING tehte tulemuseks on signaal väärtusega 1, kui mõlema VÕI-lüli tulemuseks on signaal väärtusega 1.

IF tingimuslause kasutamine võimaldab NING- ja VÕI-lüli kirjutada SCL keeles teistmoodi (joonis 4.4). *IF* tingimuslauset kasutatakse siis, kui soovitakse, et kood käivitub ainult siis kui tingimus on täidetud. Kui tingimus *IF* juures on TÕENE, siis täidetakse *THEN* järel olevat programmi lõiku. *ELSE* järel olevat programmi lõiku täidetakse kui tingimus *IF* juures on VÄÄR. *ELSE* asemel või selle ees võib kasutada *ELSIF*'i koos täiendava tingimusega, kui programmi osasid on mitu ning vähemalt ühe programmi osa täitmiseks on vaja kasutada täiendavat tingimust. Samas võib *ELSE* osa ära jätta, kui seda vaja ei ole.

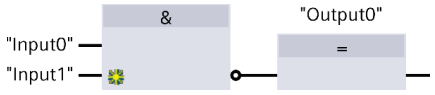
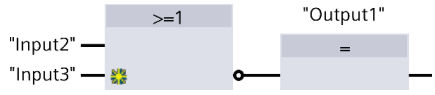
4.2 Eitus

Binaarloogikas kasutatakse eitustehet sisendsignaali (operandi või muutuja) väärtuse inverteerimiseks ja edastamiseks lüli väljundisse. Eitustehte väljundsignaal on 1, kui sisendsignaal on 0 ja vastupidi. 4.5 kujutab binaarloogika eitust FBD, LAD ja SCL keeles.

Sisend- ja väljundsignaali väärtus	FBD
"Input0" "Output0" 0 1 1 0	
SCL	**LAD**
"Output0" := NOT "Input0";	

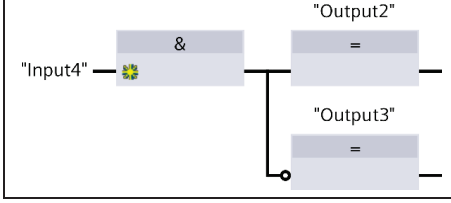
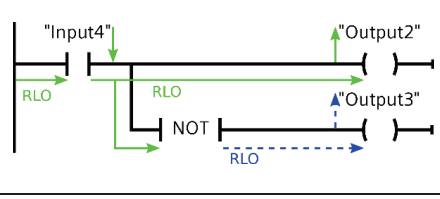
Joonis 4.5. Binaarloogika eituse signaalide olekutabel ning selle kujutamine FBD, SCL ja LAD keeltes

Eitust saab kasutada ka NING- ja VÕI-lüliga seotud väljundlüli juures (4.6).

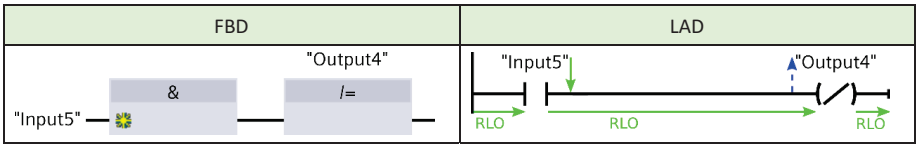
FBD	FBD
	
SCL	**SCL**
"Output0" := NOT ("Input0" AND "Input1"); a	"Output0" := NOT ("Input0" OR "Input1"); b

Joonis 4.6. EI-NING- (a) ja EI-VÕI-lülid (b) FBD ja SCL keeltes

Eitusega NING-lüli kutsutakse EI-NING-lüliks (NAND) ja VÕI-lüli EI-VÕI-lüliks (NOR). LAD keeles tuleb kasutada NOT funktsioon NING- ja VÕI-lüli lõpus, et teha neist NAND ja NOR elemendid (4.7). Loogikalüli operatsiooni (tehte) tulemuseks saadud väljundi (signaali) väärtust võib binaarloogika EI tehte abil ka inverteerida. 4.7 kohaselt inverteeritakse NING-lüli väljundi signaal ja saadud tulemus antakse lisaväljundisse "Output3". Väljundisse "Output2" jõudvat NING-lüli signaali ei inverteerita.

FBD	LAD
	

Joonis 4.7. Loogikalüli väljundi inverteerimine FBD ja LAD keeltes



Joonis 4.8. Inverteeriv väljund FBD ja LAD keeltes

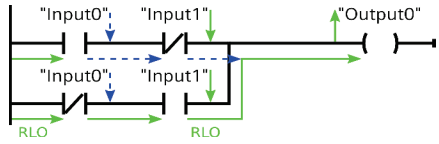
STEP 7 on FBD ja LAD keeles olemas inverteeritud väljund operand **(/)**, mis võtab sissetuleva RLO biti väärtuse, inverteerib selle ja annab saadud tulemuse otse operandile (joonis 4.8). RLO biti enda väärtust see ei mõjuta. See tähendab, et väljundi lülist väljub RLO bitt muutumatul kujul. Kui RLO bitt oli 1 enne väljund lüli, siis pealse seda on see ikka 1. Ainult operandi "Output4" väärtus muutub nulliks.

4.3 VÄLISTAV-VÕI-lüli

Binaarloogika VÄLISTAV-VÕI-lüli (VVÕI - XOR) väljundsignaaliks on 1, kui selle lüli kahe sisendi signaalid on erineva väärtusega. Kui ühe sisendi signaal on 1 ja teise oma on 0 siis VVÕI-tehte tulemuseks on signaal 1. 4.9 kujutab binaarloogika VVÕI-lüli FBD, LAD ja SCL keeles.

Sisend- ja väljundsignaali väärtus

"Input0"	"Input1"	"Output0"
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0



SCL

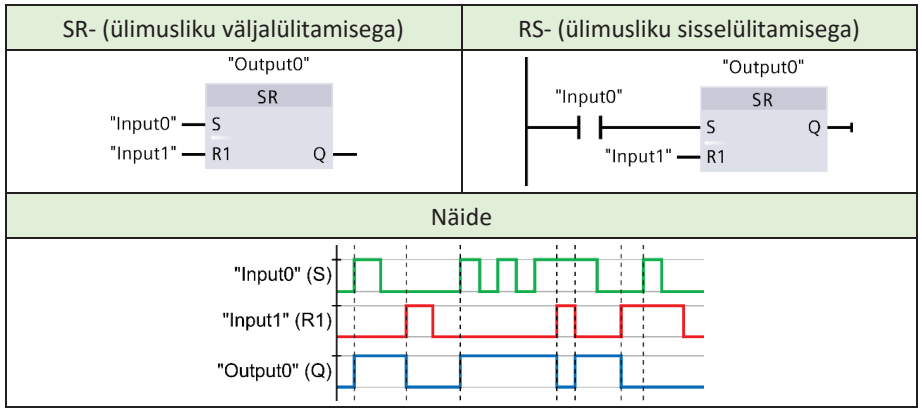
```
"Output0" := "Input0" XOR "Input1";
```

Joonis 4.9. Binaarloogika VVÕI-lüli signaalide olekutabel ja funktsioon LAD, SCL ja FBD keeltes

VVÕI-lüli võib omada rohkem kui kaht sisendit, sel juhul on VVÕI-lüli tulemuseks signaal 1, kui signaali 1 omavate sisendite arv on paaritu. LAD keeles puudub spetsiaalne VVÕI element. See tuleb ise kokku panna siin toodud reeglite järgi.
VVÕI-lüli saab kasutada koos NING- ja VÕI-lüliga.

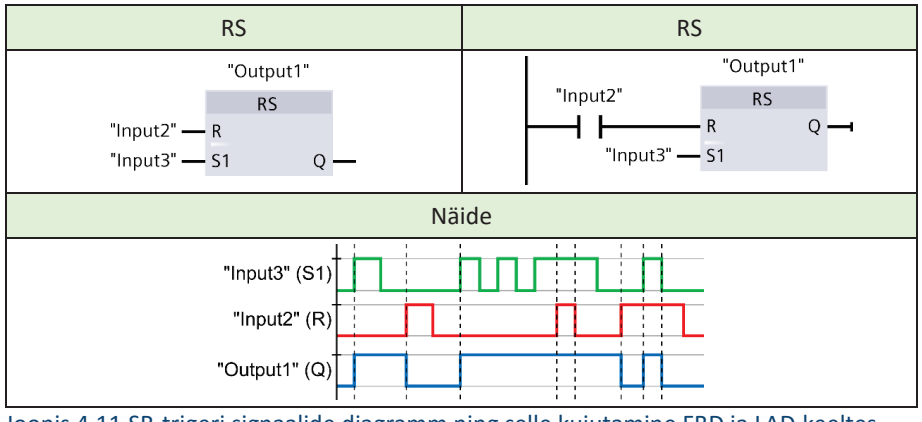
4.4 SR- ja RS-trigerid

SR- ja RS-trigereid kasutatakse lüli sisendisse saabuva lühiajalise signaali oleku (eluea) pikendamiseks. Sisendsignaali väärtus salvestatakse lülis. Trigerid teostavad mälufunktsioone.
4.10 ja 4.11 näitab visuaalselt SR- (ülimusliku väljalülitamisega) ja RS- (ülimusliku sisselülitamisega) trigerid.



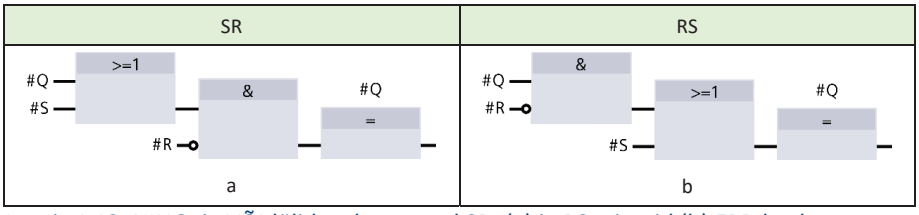
Joonis 4.10. SR-trigeri signaalide diagramm ning selle kujutamine FBD ja LAD keeltes

SR-trigeri (joonis 4.10) väljundisse Q antakse signaal 1 kui trigeri sisendisse S (set) saabub signaal 1 ja sisendis R1 (reset) on signaal 0. See olek jääb kestma kuni trigeri väljalülitamiseni (R1). Sisendi S signaali väärtuse muutus ei mõjuta väljundit Q, kui selle signaal on 1. Signaali 1 saabumisel sisendisse R1 muutub trigeri väljundi Q signaal 0 sõltumata sellest, milline on signaali väärtus sisendis S. Sisend R1 on ülimuslik. Seetõttu kutsutakse SR-trigerit ülimusliku väljalülitamisega trigeriks.



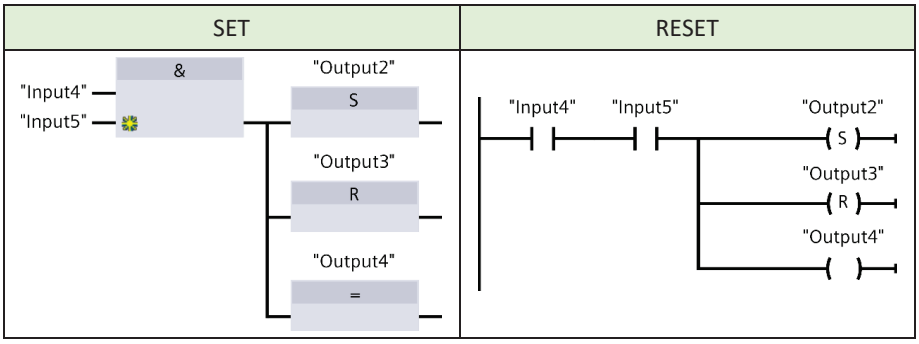
Joonis 4.11.SR-trigeri signaalide diagramm ning selle kujutamine FBD ja LAD keeltes

RS-trigeri (4.11) väljundile Q antakse signaal 0, kui sisendis R on signaal 1 ja sisendis S1 on signaal 0. Trigeri olek jääb kestma kuni selle toite sisselülitamiseni (S1). Väljundi Q signaal muutub 1 kui sisendisse S1 saabub signaal 1 sõltumata sellest, milline on sisendi R signaal. Seetõttu kutsutakse seda ülimusliku sisselülitamisega trigeriks. Signaali väärtuse muutus sisendis S1 ei mõjuta väljundit Q, kui selle signaal on juba 1 ning sisendis R on signaal 0. NING- ja VÕI-lülidest saab koostada SR- ja RS-trigereid (joonis 4.12).



Joonis 4.12. NING- ja VÕI-lülidest koostatud SR- (a) ja RS-trigerid (b) FBD keeles

Operandi/muutuja väärtuse muutusi (ümberlülitusi) saab teha kasutajaprogrammi erinevates osades kasutades SET (S) ja RESET (R) funktsioone. Nende funktsioonide kasutamine RS- ja SR-trigeris võimaldab teha eraldi sisse- ja välja-lülitamise operatsioone. Puuduseks on ülevaate kaotamine programmis selle üle, mis tingimustel toimus mingi väljundi väärtuse muutus (trigeri lülitus). Samas saab üht sisendtingimust (signaali üht väärtust) kasutada rohkem kui ühe trigeri väljundi juhtimiseks (joonis 4.13).



Joonis 4.13. SET ja RESET funktsioonide rakendamine FBD ja LAD keeltes

SCL keeles puuduvad trigeri käsud, kuid neid saab teostada kas siis NING- ja VÕI-lülide abil või IF tingimuslause abil. Joonisel 4.14 on teostatud SR-triger. *Input_S* on SR-trigeri sisend mis muudab väljundi väärtuse üheks. *Input_R* on SR-trigeri sisend mis muudab väljundi väärtuse nulliks. *Output_Q* on SR-trigeri väljund mis väljastab trigeri tulemuse. IF tingimuslausete ümbertõstmisega (viimane tingimuslause tõstetakse esimeseks) saab RS-trigeri.

SCL (a)	SCL (b)

#Output_Q := (#Input_S OR #Output_Q) AND NOT (#Input_R);	IF #Input_S THEN
	  #Output_Q := TRUE;
	END_IF;
	
	IF #Input_R THEN
	  #Output_Q := FALSE;
	END_IF;

Joonis 4.14. SR-triger SCL keeles

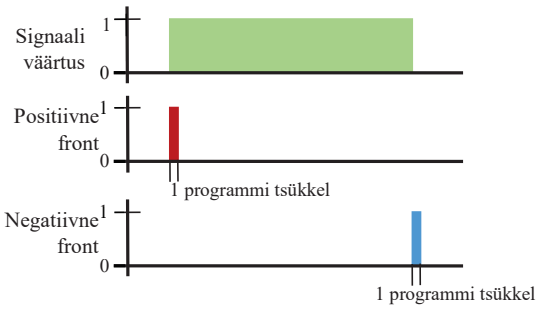
4.2 esitab operandid koos andmetüüpide ja kirjeldusega.

Tabel 4.2. Trigerites kasutatavad operandid ja tähistused

Operand	Andmetüüp	Kirjeldus
Input0, Input3, Input_S, S, S1	Bool	SET sisend
Input1, Input2, Input_R, R1, R	Bool	RESET sisend
Output0, Output1, Output_Q, Q	Bool	Väljund, kuhu väljastatakse trigeri tulemus

4.5 Signaali väärtuse muutuse avastamine

Füüsikalise signaali väärtuse muutumist mõõdetakse ja kasutatakse signaali oleku tuvastamiseks. Signaali väärtuse kasvamist (muutus 0 → 1) nimetatakse positiivseks frondiks ja signaali väärtuse vähenemist (muutus 1 → 0) negatiivseks frondiks. Signaali väärtuse muutust kirjeldab lühike impulss väärtusega 1. Selle impulsi kestus on võrdne programmi 1 tsükli kestusega (4.15).

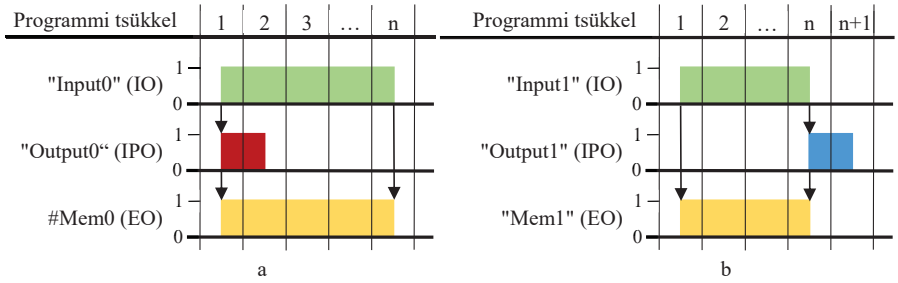


Joonis 4.15. Signaali väärtuse muutuse avastamise. Impulsi pikkus.

Signaali väärtuse muutuse (frondi) avastamiseks on PLC's jaoks olemas standardfunktsioonid, millega koos tuleb kasutada eraldi operandi (muutujat), kuhu salvestatakse uuritava signaali olek programmi eelmises tsüklis.

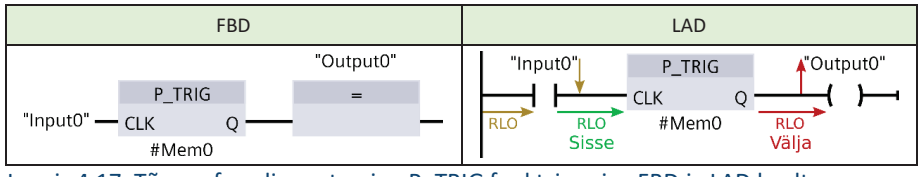
Nii positiivse (tõusva) kui ka negatiivse (langeva) frondi avastamiseks pakub STEP 7 neli eri tüüpi funktsiooni. Järgnevalt kirjeldatakse lahti positiivse frondi funktsioonid. Negatiivse frondi funktsioonid töötavad sama moodi.

Tõusva (ehk positiivse) frondi funktsioonid avastavad sisendoperandi muutuse 0 → 1. Sisendoperandi ("Input0", IO) väärtust võrreldakse sisendoperandi eelmise tsükli ajal olnud väärtust hoidva mälubiti (#Mem0, EO) väärtusega. Kui mälubiti väärtus on 0 ja sisendoperandi väärtus on 1, siis järelikult on sisendsignaal just madalast kõrgeks muutunud (on tekkinud on positiivne front). Sellisel juhul on funktsiooni väljund 1 ("Output0", IPO). Järgmise tsükli ajal, kui sisendoperandi väärtus on veel 1, siis on ka mälubiti väärtus 1, kuna see hoiab endas eelmise tsükli ajal olnud sisendoperandi väärtust. Järelikult on signaal samaks jäänud ja funktsiooni väljund saab endale väärtuseks 0 (joonised 4.16 a ja 4.24 a).



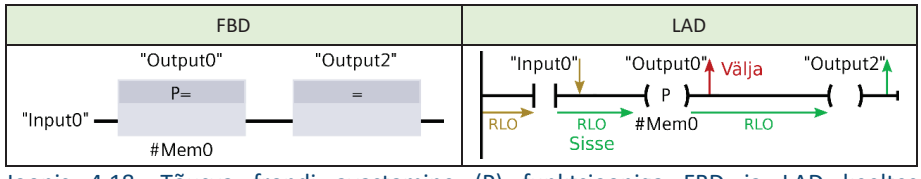
Joonis 4.16. Tõusva (a) ja langeva (b) frondi avastamise muutujate signaalide olekud

P_TRIG funktsioon kasutab nii sisendi kui väljundina RLO bitti, mis tähendab et see ei vaja täiendavaid operande lisaks mälubitile, kuhu eelmise tsükli sisendoperandi väärtus salvestati. Joonisel 4.17 kujutatud näites kontrollitakse operandi "Input0" positiivset fronti. Selle avastamisel (hetkel, mil "Input0" väärtus muutus kõrgeks) muutub operand "Output0" väärtus kõrgeks üheks programmi tsükliks ning järgmises programmi tsüklis uuesti madalaks. See on liiga lühike aeg, et see kontrolleri väljundis jõuaks kajastuda, kuid piisav programmisiseseks kasutamiseks.



Joonis 4.17. Tõusva frondi avastamine P_TRIG funktsiooniga FBD ja LAD keeltes

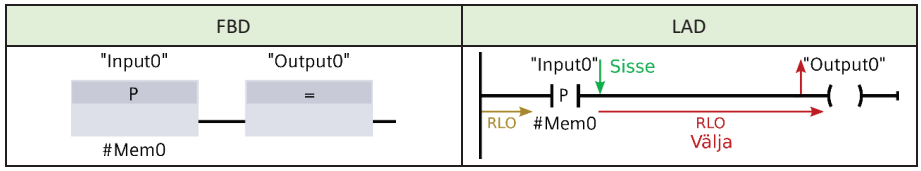
(P) funktsioon kasutab sisendiks RLO bitti, kuid ei mõjuta seda mingil moel (nö väljuv RLO bitt jääb samaks). Selle asemel mõjutab see ainult operandi "Output0" väärtust otse. Joonisel 4.18 kujutatud näites kontrollitakse operandi "Input0" positiivset fronti. Selle avastamisel (hetkel, mil "Input0" väärtus muutus kõrgeks) muutub operand "Output0" üheks programmi tsükliks kõrgeks ning järgmises programmi tsüklis uuesti madalaks. Samas funktsioon (P) ei mõjuta operandi "Output2" ja see on aktiivne senikaua, kuni operand "Input0" on aktiivne.



Joonis 4.18. Tõusva frondi avastamine (P) funktsiooniga FBD ja LAD keeltes

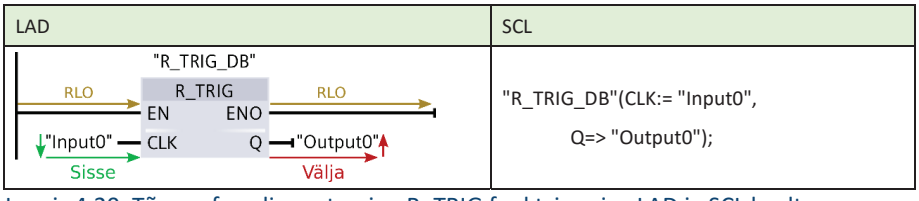
|P| funktsioon kasutab sisendoperandiks "Input0" ning väljundoperandina RLO bitti. RLO bitt kannab |P| funktsiooni tulemust edasi teistessee elementidesse. 4.19 kujutab sisendoperandi "Input0" positiivset frondi olemasolu kontrollimist. Kui "Input0“ muutus

loogiliseks üheks (kõrgeks) selle tsükli jooksul, siis väljund "Ouput0“ väärtus muudetakse ka üheks. Järgmise tsükli ajal muudetakse see tagasi madalaks.



Joonis 4.19. Tõusva frondi avastamine |P| funktsiooniga FBD ja LAD keeltes

R_TRIG funktsioon kasutab sisendoperandiks "Input0" ning väljundoperandina "Output0". Eelmisel tsüklil olnud sisendoperandi väärtus salvestatakse DB’sse ("R_TRIG_DB"), mis on antud funktsiooniga seotud. 4.20 kujutab sisendoperandi "Input0" positiivse frondi kontrolli. Kui "Input0" muutus loogiliseks üheks (kõrgeks) selle tsükli algul, siis väljundoperandi "Ouput0" väärtus muudetakse ka üheks. Järgmise tsükli ajal muudetakse see tagasi madalaks. Funktsiooni tulemust ei salvestata RLO bitti.



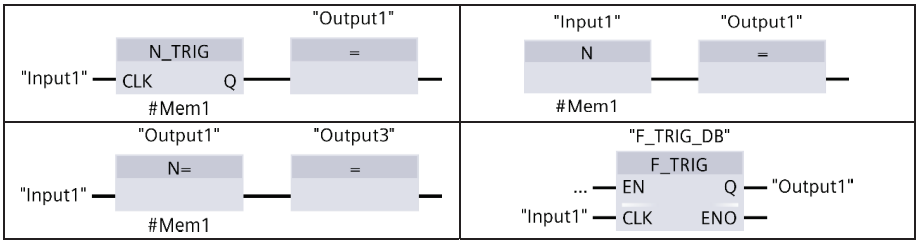
Joonis 4.20. Tõusva frondi avastamine R_TRIG funktsiooniga LAD ja SCL keeltes

SCL keeles on frondi avastamisfunktsioon R_TRIG (4.20). Frondi avastamist saab teostada ka IF tingimuslausega (4.21). Viimane programmirida peab olema kindlasti allpool IF tingimuslausest. See ei tohi olla tingimuslause sees või sellest eespool.

SCL

```
IF "Input0" AND NOT #Mem0 THEN
  "Output0" := TRUE;
ELSE
  "Output0" := FALSE;
END_IF;
.....    #Mem0 := "Input0"; //Sisendi "Input0“ olek jäetakse meelde järgmiseks PLC tsükliks
```

Joonis 4.21. Tõusva frondi avastamine SCL keeles



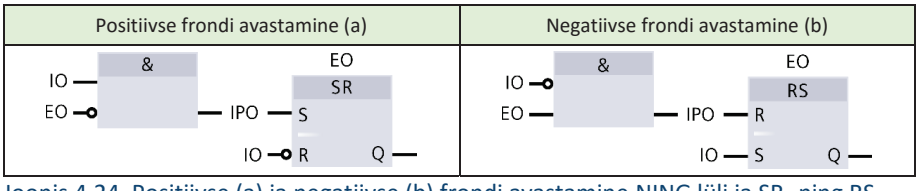
Joonis 4.22. Langeva frondi avastamise funktsioonid FBD keeles.

Langeva (ehk negatiivse) frondi funktsioonid avastavad sisendoperandi muutuse 1 → 0. Sisendoperandi ("Input1", IO) väärtust võrreldakse sisendoperandi eelmise tsükli ajal olnud väärtust hoidva mälubiti (#Mem1, EO) väärtusega. Kui mälubiti väärtus on 1 ja sisendoperandi väärtus on 0, siis järelikult on sisendsignaal just kõrgest madalaks muutunud (on tekkinud on negatiivne front). Sellisel juhul on funktsiooni väljund ("Output1", IPO) 1. Järgmise tsükli ajal, kui sisendoperandi väärtus on veel 0, siis on ka mälubiti väärtus 0, kuna see hoiab endas eelmise tsükli ajal olnud sisendoperandi väärtust. Järelikult on signaal samaks jäänud ja funktsiooni väljund saab endale väärtuseks 0 (joonised 4.16 b ja 4.24 b).
FBD keeles kasutatavad langeva frondi funktsioonid on esitatud joonisel 4.22.
Joonisel 4.23 on esitatud langeva frondi avastamise programmi lõik SCL keeles.

```
IF NOT "Input1" AND #Mem1 THEN
  "Output1" := TRUE;
ELSE
  "Output1" := FALSE;
END_IF;
……
#Mem1 := "Input1"; //Sisendi "Input1“ olek jäetakse meelde järgmiseks PLC tsükliks
```

Joonis 4.23. Langeva frondi avastamine SCL keeles

Signaali muutust saab avastada ka NING-lüli, SR- ja RS-trigeritega (joonis 4.24). IO on sisendoperand e siis muutuja, mille signaali väärtuse olekumuutust tahetakse avastada. IPO on impulsioperand e siis muutuja, kuhu salvestatakse signaali muutuse tulemus. EO on frondi operand e siis mälubitt, kuhu salvestatakse sisendoperandi eelmise programmi tsükli olek.



Joonis 4.24. Positiivse (a) ja negatiivse (b) frondi avastamine NING lüli ja SR- ning RS-trigeritega

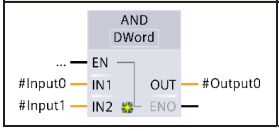
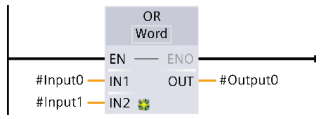
4.3 esitab operandid, mida kasutati eespool signaali muutuste avastamisel, koos andmetüüpidega ja kirjeldusega.

Tabel 4.3. Trigerites kasutatavad operandid ja tähistused

Operand	Andmetüüp	Kirjeldus
Input0, Input1	Bool	Sisendoperand, mille signaali muutust kontrollitakse
Mem0, Mem1,	Bool	Mälubitt, kuhu salvestatakse eelmisel tsüklil olnud sisendoperandi väärtus
Output0, Output1, Q	Bool	Väljundoperand, mis näitab kas sisendoperandi väärtus muutus või ei muutunud
CLK	Bool	Sisend, mille signaaliväärtuse muutust kontrollitakse
R_TRIG_DB, F_TRIG_DB	DB	DB, kuhu salvestatakse eelmisel tsüklil olnud sisendoperandi väärtus

4.6 Loogikatehted mitmebitiliste operandidega

Kaks muutuva väärtusega operandi (muutujat) või üks operand (muutuja) ja konstant ühendatakse omavahel loogikatehte abil. Standard IEC 61131 kasutab loogikatehete jaoks lihtsaid binaarloogika funktsioone. Need on AND, OR, XOR (joonis 4.25) ja NOT. Viimase asemel kasutab STEP 7 funktsiooni INV (joonis 4.29).

FBD	LAD	SCL
		#Output0 := #Input0 XOR #Input1;

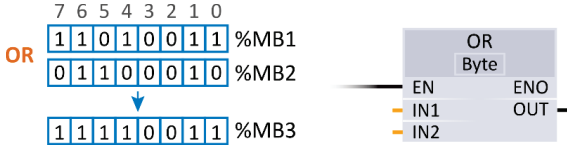
Joonis 4.25. Mitmebitilised loogikatehted FBD, LAD ja SCl keeles

Binaarloogika NING-tehte tulemuseks saadud baidi (või ka sõna/topeltsõna) mingi bitt on 1, kui kõigi sisendoperandide vastaval kohal oleva biti väärtus on 1 (sisendoperande saab olla rohkem kui 2) (4.26).
Binaarloogika NING-tehtega saab varjata/peita mittevajalikke või mitteolulisi bitte (nende väärtusi) operandis/muutujas. Selleks kasutatakse maski, mille abil vajalikud või olulises kohas olevad bitid saavad signaali 1 ja teised (varjatavad) signaali 0. Maskiks võib olla muutuja või konstant. Maskeeritav operand ja mask liidetakse binaarloogika NING-tehte abil kokku, kus mittevajalike bittide väärtused varjatakse (signaal muutub 0) ja oluliste bittide väärtused ei muutu.

Joonis 4.26. Mitmebitiline NING-tehe LAD keeles.

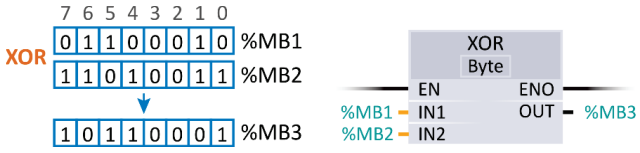
4.26 kirjeldab kuidas maskeeritakse sisendoperandi %MB1 (IN1) bitid 1, 5 ja 6 ning sisendoperandi %MB2 (IN2) kasutatakse maskina. Tulemus kirjutatakse operandi %MB3 (OUT).

Binaarloogika VÕI-tehte baidi (või ka sõna/topeltsõna) tulemuse mingi bitt on 1 kui vähemalt ühe sisendoperandi vastaval kohal oleva biti väärtus on 1 (joonis 4.27). Antud loogikatehet kasutatakse bitimustri täiendamiseks. Binaarloogika VÕI-tehte abil lisatakse tulemuseks saadava kahendarvu ühte või mitmesse bitti loogiline 1.
4.27 esitatud operandi %MB1 bittide 1, 5 ja 6 signaalide väärtused peaksid olema ühed. Selleks täiendatakse VÕI loogikatehtes bitimustrit lisades operandi %MB2 bittidesse 1, 5 ja 6 loogiline 1. Bitid, mille operandis %MB1 olid juba 1, jäävad selleks.



Joonis 4.27. Mitmebitiline VÕI-tehe LAD keeles

Binaarloogika VVÕI-tehte tulemuseks saadud baidi (või ka sõna/topeltsõna) bitt on 1 kui kõikide sisendoperandide vastaval kohal olevatest bittidest on ainult ühel väärtus 1 (joonis 4.28). Antud loogikatehe võimaldab operandi bitimustris tuvastada signaali muutust ühes või mitmes biti kohas. Selleks liidetakse VVÕI-tehte abil kokku operandi vana ja uus bitimuster. Igas kohas, kus toimub signaali muutus 0 → 1 või 1 → 0, väljastab VVÕI-tehe signaali 1.
4.28 kohaselt on näha, et signaali muutus on toimunud bittides 5 (1 → 0) ja 0 (0 → 1). Sisendoperand %MB1 omab vana bitimustrit ja sisendoperand %MB2 uut bitimustrit.



Joonis 4.28. Mitmebitiline VVÕI-tehe LAD keeles

Kui on vaja tuvastada signaali muutust 0 → 1, siis tuleb VVÕI-tehte tulemusega ja uue bitimustriga teha NING-tehe. Signaali muutuse 1 → 0 avastamiseks tuleb VVÕI-tehte tulemusega ja vana bitimustriga teha NING-tehe.

4.4 esitab operandid, mida kasutati eespool mitmebitiliste tehete tegemisel, koos andmetüüpide ja kirjeldusega.

Tabel 4.4. Mitmebitilise NING, VÕI ja VVÕI-tehtes kasutatavad operandid ja tähistused

Operand	Andmetüüp	Kirjeldus
Input0, Input1, IN1, IN2	Byte, Word, Dword	Sisendoperand, millega teostatakse vastav mitmebitline tehe
%MB1, %MB2	Byte	Sisendoperand, millega teostatakse vastav mitmebitline tehe
Output0, OUT	Byte, Word, Dword	Väljundoperand, millesse salvestatakse (antakse välja) mitmebitilise tehte tulemus
%MB3	Byte	Väljundoperand, millesse salvestatakse (antakse välja) mitmebitilise tehte tulemus

Binaarloogika EI-tehte tulemuseks on sisendoperandi inverteeritud väärtus. Kõik bitid, mille väärtus on loogiline 1 saavad oma väärtuseks loogilise nulli ja vastupidi (joonis 4.29). Igat muutuja biti väärtust inverteeritakse eraldi.

Joonis 4.29. Mitmebitiline EI-tehe LAD keeles

Nagu näha joonistelt 4.25 kuni 4.29 omavad loogikatehete funktsioonid FBD ja LAD keeltes sisendit EN (inglise keeles Enable) ja väljundit ENO (inglise keeles Enable Output). Sisend EN on aktiveerimissisend, mis võimaldab mõjutada funktsiooni täitmist. Kui aktiveerimissisendi EN signaal on 1, siis täidetakse antud funktsiooni ja 0 puhul ei täideta seda. Mitmebitilisi loogikatehte funktsioone täidetakse alati, kui aktiveerimissisendi EN ette pole midagi kirjutatud (sisendi EN väärtus on alati 1). Väljund ENO on aktiveerimisväljund, mis annab infot loogikatehte funktsiooni täitmise kohta. Kui

aktiveerimisväljundi ENO signaal on 1, siis täidetakse loogikatehte funktsiooni ja ilma vigadeta. Kui aga aktiveerimisväljundi ENO signaal on 0 ja samas aktiveerimissisendi EN signaal on 1, siis on toimunud mingi tõrge loogikatehte funktsiooni täitmisel (nt operandi IN1 ja IN2 andmetüübid ei lange kokku). Aktiveerimissisend EN ja –väljund ENO esineb ka teistel funktsioonidel, nagu nt arvfunktsioonid, nihke-, jne.

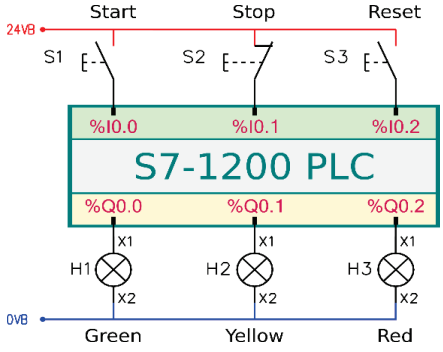
4.7 Ülesanded

Siin esitatud ülesanded on koostatud nuppude ja lampide peale, mis on ühendatud otse S7-1200 PLC külge (joonis 4.30). Nuppudeks on:

- S1 – avatud kontaktiga
- S2 – suletud kontaktiga
- S3 – avatud kontaktiga

Lambid on

- H1 – roheline lamp
- H2 – kollane lamp
- H3 – punane lamp



Joonis 4.30. Ülesande elektriskeem

4.7.1 Ühe nupuga ühe lambi välja lülitamine

Koostada programm, mis lülitab lambi H1 välja, kui S1 nuppu all hoitakse. Kui S1 nupp ei ole alla vajutatud, siis on lamp H1 sisse lülitatud.

4.7.2 Ühe lambi sisse lülitamine ühe või teise nupuga

Koostada programm, mis lülitab lambi H3 sisse, kui S1 või S3 nupp on alla vajutatud. Kui see tingimus ei ole täidetud ei tohi lamp H3 põleda.

4.7.3 Ühe lambi sisse lülitamine kolme nupuga

Koostada programm, mis lülitab lambi H2 sisse, kui hoida ainult S1 ja S2 nuppu või ainult S3 ja S2 nuppu all. Kui tingimused ei ole täidetud ei tohi lamp H2 põleda.

4.7.4 Kahe nupuga ühe lambi lülitamine

Koostada programm, mis lülitab lamp H1 sisse, kui vajutada S1 nuppu. Pärast S1 nupu vajutust peab lamp H1 sisse jääma. Lamp H1 lülitatakse välja pärast S2 nupu vajutust. Lülitamine peab olema korratav.

4.7.5 Kolme nupuga mitme lambi lülitamine

Koostada programm, mis lülitab sisse lambid H1, H2 ja H3 kui vajutada samaaegselt S1 ja S2 nupud. Neist ainult ühe vajutamine ei tohi protsessi mõjutada. Kõik lambid peavad pärast S1 nupu vajutust olema välja lülitatud.

Lülitamine peab olema korratav.

4.7.6 Ühe nupuga ühe lambi lülitamine

Koostada programm, mis lülitaks esimesel S2 nupu vajutusel lambi H3 sisse ja teisel vajutusel välja.
Lülitamine peab olema korratav ja nupu all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist lambi töös.

4.7.7 Ühe nupuga kahe lambi lülitamine

Koostada programm, mis juhib lampe H1 ja H2. Esimesel S1 nupu vajutusel lülitatakse lamp H1 sisse ja lamp H2 välja (see peab põlema alguses). Järgmisel vajutusel lülitaks lamp H1 välja ja lamp H2 sisse.
Lülitamine peab olema korratav ja nupu all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist lampide töös.

4.8 Teadmiste kontroll

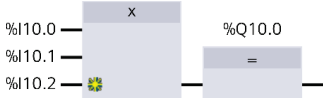
1) Milline väidetest on kehtiv allpool esitatud Boole NING-lüli kohta (mitu vastust)?

a) Väljundis on 1, kui ühes sisendis on 1.
b) Väljundis on 1, kui kõikides sisendites on 1.
c) Väljundis on 1, kui ainult esimeses sisendis on 1.
d) Väljundis on 0, kui kõikides sisendites on 0.
e) Väljundis on 0, kui vähemalt üks sisenditest on 0.

2) Milline järgnevatest väidetest kehtib allpool esitatud Boole VÕI-lüli kohta (mitu vastust)?

a) Väljundis on 1, kui ühes sisendis on 1.
b) Väljundis on 1, kui kõikides sisendites on 1.
c) Väljundis on 1, kui ainult ühes sisendis on 1.
d) Väljundis on 0, kui kõikides sisendites on 0.
e) Väljundis on 0, kui vähemalt üks sisenditest on 0.

3) Milline järgnevatest väidetest kehtib allpool esitatud binaarloogika VVÕI-lüli kohta (mitu vastust)?

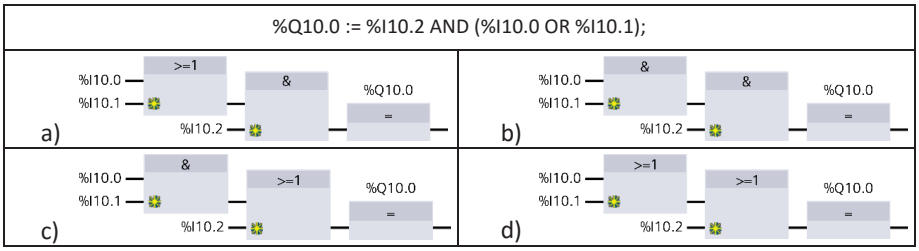


a) Väljundis on 1, kui vähemalt ühes sisendis on 1.
b) Väljundis on 1, kui kõikides sisendites on 1.
c) Väljundis on 1, kui ainult ühes sisendis on 1.
d) Väljundis on 0, kui kõikides sisendites on 0.
e) Väljundis on 0, kui vähemalt üks sisenditest on 0.

4) Millises vastuse variandis (kirjeldus on SCL keeles) on esitatud EI-NING-lüli?

a) %Q10.0 := %I10.0 AND NOT %I10.1;
b) %Q10.0 := NOT (%I10.0 AND NOT %I10.1);
c) %Q10.0 := NOT %I10.0 AND %I10.1;
d) %Q10.0 := NOT (%I10.0 AND %I10.1);

5) Millises vastuse variandis paikneb allpool esitatud SCL keeles kirjutatud programminäitele vastav FBD keeles kirjutatud programminäide?



6) Milleks kutsutakse RS-trigerit (mitu vastust)?

a) Ülimuslik väljalülitamise teostamiseks
b) Ülimuslik sisselülitamise teostamiseks
c) Mälufunktsiooni teostamiseks
d) NING lüliks teostamiseks
e) VÕI lüliks teostamiseks

7) Langev front esineb kui ...

a) signaal on loogiline 0.
b) signaal on loogiline 1.
c) signaal muutub loogilisest 1 → 0.
d) signaal muutub loogilisest 0 → 1.
e) signaali madal väärtus muutub kõrgeks väärtuseks.

8) Mitmebitiliste binaarloogika NING tehet saab kasutada …

a) muutuja mittevajalike väärtuste varjamiseks.
b) digitaalarvu bitimustris mittevajalike bittide väärtuste varjamiseks.
c) signaali muutuse 1 → 0 avastamiseks.
d) signaali muutuse 0 → 1 avastamiseks.
e) olemas oleva bitimustri täiendamiseks.

5 ARENENUD BINAARLOOGIKA FUNKTSIOONID

5.1 PLC programmis kasutatavad numbrisüsteemid

STEP 7 keskkonnas saab kasutada erinevaid arvusüsteeme nagu kümnend-, kahend-, BCD-, kaheksand-, kuueteistkümnend-, märgiga kahend- ja reaalarve. Dokumentides kasutatakse arvusüsteemi määramiseks alaindeksit (nt 1354_{10}, $1111\ 0011_2$, 0011_{BCD}).

5.1.1 Kümnendsüsteem

Kümnendsüsteemi aluseks on 10 erinevat numbrit 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ja 0, mis tähistavad arve alates 0 kuni 9. Kui objektide loendamise tulemusena saadakse arv üle 9, siis võetakse kümnendarvus kasutusele järgmine numbrikoht. Nimetatud asukoha tähtsus on 10 ning järgmise numbriasukoha kasutuselevõtt leiab aset arvu 99 järel [11]. Näiteks arvu 1354 on võimalik esitada nii:

$$1354_{10} = 1 \times 1000 + 3 \times 100 + 5 \times 10 + 4 \times 1$$

See arvude kirjutamise (koostamise) meetod on väga lihtne ning sobib ka teiste kümnendsüsteemist erinevate numbrisüsteemide võrdlemiseks.

5.1.2 Kahendsüsteem

Elektronarvutid võimaldavad arvutada (teostada tehteid) ainult kahe numbriga. Number 1 esitab (tähistab) liikuva sisu arvväärtust nt “vool on sees” ja number 0 esitab liikumatu sisu arvväärtust nt “vool on väljas”.
Kuna arvude esitamiseks kasutatakse kahte numbrit, siis ei arvutata numbri asukohta 10x alusel, vaid 2x alusel. Kahendarvu kõige parempoolsemas numbrikohas esitatakse kõige väiksema väärtusega sisu $2^0 = 1$. Kahendarvu järgmine numbrikoht esitab sisu, mille numbriline väärus on $2^1 = 2$ jne. Kuna antud arvusüsteemis kasutatakse ainult kahte numbrit, siis kustutakse seda binaarseks e kahendsüsteemiks [11]. Tabelis 5.1 on esitatud kahendarv $1001\ 1101_2$ ja selle numbrikohtadele vastavad kümnendarvud.

Tabel 5.1. Kümnendarvu esitamine kahendarvuna

2^7=128	2^6=64	2^5=32	2^4=16	2^3=8	2^2=4	2^1=2	2^0=1
1	0	0	1	1	1	0	1

Vastav kümnendarv on: $1x2^7 + 0x2^6 + 0x2^5 + 1x2^4 + 1x2^3 + 1x2^2 + 0x2^1 + 1x2^0 = 157_{10}$
Mingi suuruse sisulist väärtust saab näiteks esitada 8-bitise kahendarvuga ($1111\ 1111_2$). Sellele kahendarvule vastav (suurim) kümnendarv on 255.
PLC programmis kirjutatakse kahendarv $1001\ 1101_2$ järgmiselt 2#10011101, kus 2# näitab, et arv on esitatud kahendarvu süsteemis.

5.1.3 Kaheksandsüsteem

Kaheksandsüsteem OCT võtab enda alla korraga kolm bitti, kus esitatakse numbreid 0 kuni 7, st loendada kuni kaheksani. Kaheksandarvude (oktaanarv) esitamiseks kasutatakse numbreid 0 kuni 7. Kaheksandsüsteemis arvutatakse üksikute numbrikohtade väärtus numbri 8^X baasil. X on kaheksandarvus oleva numbri koha number ja -1 sellest. Tabelis 5.2 on esitatud kaheksandarv 7375_{OCT}. Selle väärtus kümnendarvu süsteemis on

$$7 \times 8^3 + 3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 5 \times 8^0 = 3837^{10}$$

Tabel 5.2. Kaheksandarvu näide

$8^3 = 512$	$8^2 = 64$	$8^1 = 8$	$8^0 = 1$
7	3	5	7

PLC programmis kirjutatakse kaheksandarv 712_{OCT} järgmiselt 8#712, kus 8# näitab, et arv on esitatud kaheksandarvu süsteemis.

5.1.4 BCD arvusüsteem

Enamus inimesi, kes on harjunud tegelema kümnendarvudega, ei oska lugeda kahendarve. Sel põhjusel loodi binaarselt kodeeritud kümnend arvusüsteem BCD. Iga number alates 0 kuni 9 esitatakse neljakohalise kahendarvuna (tabel 5.3). Seda arvusüsteemi on lihtsam lugeda, kuid samas võtab see enda alla rohkem ruumi – kahendarvu süsteemis kasutatakse nelja numbrikohta arvude 0 kuni 9 kirjutamiseks. Kahendarve alates 1010_2 kuni 1111_2 ei kasutata BCD-arvusüsteemis (koodis). Kui aga need esinevad BCD arvus, siis annab PLC selle kohta veateate.

Tabel 5.3. Kümnendarvude esitaine BCD arvudena

0_{10}	0000_{BCD}
1_{10}	0001_{BCD}
2_{10}	0010_{BCD}
3_{10}	0011_{BCD}
4_{10}	0100_{BCD}
5_{10}	0101_{BCD}
6_{10}	0110_{BCD}
7_{10}	0111_{BCD}
8_{10}	1000_{BCD}
9_{10}	1001_{BCD}

Kümnendarv 1847 kirjutatakse BCD koodis järgmiselt:

1 8 4 7_{10}
0001 1000 0100 0111_{BCD}

Seetõttu kasutatakse nelja numbrikohaga kümnendarvu esitamiseks BCD koodis 16 bitti. PLC's kasutatakse BCD koodi esitamiseks (kasutuses ainult arvud 0 kuni 9) kuueteistkümnendarvu süsteemi. Seega kümnendarv 1847 kirjutatakse PLC programmis järgmiselt 16#1847.

BCD koodiga saab esitada ka arvu negatiivseid väärtusi. Arvu märgi väärtus kirjutatakse alati BCD koodi vasakpoolseimasse bitti. Viimasel (vasakpoolseimal) kohal oleva numbri esitamiseks on ainult 3 bitti [viide]. Kui viimase biti väärtus on 1, siis arv on negatiivne (-), ja 0 puhul on see positiivne (+). Kümnendarv -1847 esitatakse BCD koodis järgmiselt:

-1 8 4 7_{10}
1001 1000 0100 0111_{BCD}

5.1.5 Kuueteistkümnendsüsteem

Kuna kahendarve on raske lugeda ja BCD koodi kasutamine võtab palju ruumi, siis töötati välja kuueteistkümnendsüsteem HEX. HEX-süsteemi number võtab enda alla korraga neli bitti, kus saab esitada numbreid 0 kuni 15, st loendada kuni kuueteistkümneni. Kuueteistkümnendarvude esitamiseks kasutatakse numbreid 0 kuni 9, millele järgnevad tähed A, B, C, D, E ja F, kus A = 10, B = 11, C = 12, D = 13, E = 14 ning F = 15. HEX-süsteemis arvutatakse üksikute numbrikohtade väärtus numbri 16^X baasil [11]. X on Hex-arvus oleva numbri koha number ja -1 sellest.
Tabelis 5.4 on esitatud kuueteistkümnendarv $C53B_{HEX}$. Selle väärtus kümnendarvu süsteemis on:

$$12 \times 16^3 + 5 \times 16^2 + 3 \times 16^1 + 11 \times 16^0 = 14491_{10}$$

Tabel 5.4. Kuueteistkümnendarvu näide

$16^3 = 1096$	$16^2 = 256$	$16^1 = 16$	$16^0 = 1$
C = 12	5	3	B = 11

PLC programmis kirjutatakse arv $C53B_{HEX}$ kui W#16#C35B, kus W#16# lisatakse enne HEX arvu. Täht W näitab kui suurt osa CPU mälust kasutav arv (16 bitti). D kasutab 32 bitti ja B 8 bitti. 16# näitab et tegu on HEX arvuga. Tähe võib eest ära jätta ja kirjutada lihtsalt 16#C35B.

5.1.6 Märgiga kahendarvud

Töötamiseks negatiivsete arvudega otsustati kahendarvu vasakpoolsemat bitti kasutada vastava märgi esitamiseks: 0 vastab siis + ja 1 vastab – (miinus). Seega ei kasutata vasakult kõige esimest bitti arvude esitamiseks vaid pluss või miinus märgi esitamiseks. Negatiivne kahendarv saadakse pärast tema positiivse väärtuse inverteerimist, millele liidetakse juurde 1. Arvu inverteerimise all mõeldakse seda, kus 1 asendatakse 0 ja 0 asendatakse 1. Seega kümnendarv -3 näeb välja kahendarvus nii $1111\ 1101_2$.

-3	negatiivne kümnendarv
$0000\ 0011_2$	-3 kujutatud positiivse kahendarvuna
$1111\ 1100_2$	inverteeritud positiivne kahendarv
$1111\ 1101_2$	negatiivne kahendarv (ülemisele arvule on liidetud juurde 1)

Negatiivsed kahendarvud arvutatakse vajadusel ümber kümnendarvudeks, kasutades baasiks numbrit 0. Seega leitakse kümnendarv bittide järgi, mille väärtuseks on 0. Saadud positiivsele väärtusele liidetakse juurde 1. Negatiivne kahendarv 1111_2 esitatakse kümnendarvus kui:

$((-1) \times 1) \times (0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1) = -1_{10}$

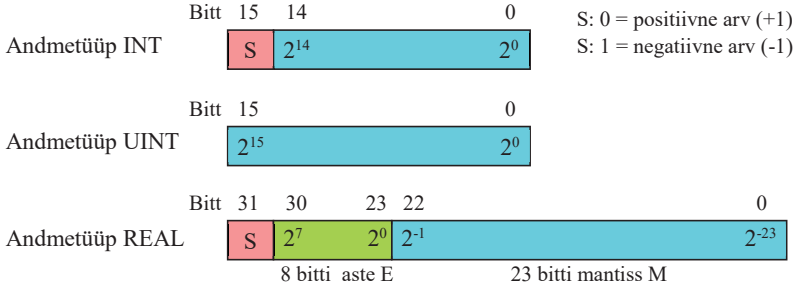
Järelikult: $1000\ 0001_2 = -127_{10}$ ja $0111\ 1111_2 = +127_{10}$

5.1.7 Reaalarvud

Vaatamata sellele, et märgiga kahendarvude (numbrite) abil saab esitada positiivseid ja negatiivseid arve kasutades vaid numbreid 0 ja 1, eksisteerib ka vajadus reaalarvude järele. Selleks, et reaalarvu esitada kahendarvu abil, jaotatakse reaalarv algul kahte ossa, millest üks on korrutustegur ja teine on kümne aste. Need osad seotakse korrutustehtega. Seda meetodit nimetatakse numbrikohtade teaduslikuks esituseks [11].
Arv 3,14 teisendatakse kujule 314 x 10^{-2}, seetõttu kasutatakse reaalarvu esitamiseks kahte märgiga täisarvu.
PLC programmis kirjutatakse näiteks reaalarv 31,4 kujul 31.4 või 3.14e+001, kus e+001 on kümne aste (10^{+1}).

5.1.8 Arvude esitus PLC mälus

Enamus arve, mis on täisarvulised kümnendarvud, salvestatakse PLC-mällu märgiga või märgita kahendarvu kujul. Joonisel 5.1 on andmete esitamiseks kasutatavate täisarvutüüpide INT ja UINT poolt PLC mälus hõivatav ala, kuhu salvestatakse muutuja arvväärtus kui märgita ja märgiga kahendarv. Andmetüübid UINT ja INT kasutavad PLC mälus 16 bitti. UNIT andmetüübiga muutuja puhul kasutatakse kõiki bitte arvu esitamiseks (sama ka USINT ja UDINT puhul). Andmetüübiga INT muutujal kasutatakse kõige suurema väärtusega (vasakult esimene) bitti (bitt 15) arvu märgi S salvestamiseks. Kui selle biti väärtus on 1, siis PLC mällu salvestatud arv on negatiivne. Ülejäänud bitte alates 0 kuni 14 kasutatakse mälus oleva täisarvu leidmiseks (arvutamiseks). SINT puhul on arvu märk salvestatud bitti 7 ja arv ise bittidesse 0 kuni 7. DINT puhul on arvu märk salvestatud bitti 31 ja arv bittidesse 0 kuni 30.



Joonis 5.1. Arvude esitamine PLC mälus

Komaga kümnendarvu (reaalarvu) muutuja määramiseks kasutatakse andmetüüpi REAL või LREAL. Andmetüüp REAL kasutab PLC mälust 32 bitti (joonis 5.1) ja LREAL 64 bitti. Need koosnevad kolmest osast: arvu märk (mantissi märk) S on kõige suurem bitt (bitt 31, LREAL on bitt 63); bitid 23 kuni 30 (järgmised 8 bitti) (LREAL on selleks 11 bitti alates 62 kuni 52) moodustavad astme E väärtuse arvutuse 2^{E-127} jaoks (LREAL on selleks 2^{E-1023}); bitte 0 kuni 22 kasutatakse mantissi (komaga arv) M arvutamiseks (LREAL on bitid 0 kuni 51). Nendest PLC mälus olevatest kolmest koostisosast saab arvutada reaalarvu.

Järgnevalt on esitatud valem, mis arvuta reaalarvu andmetüübi REAL olevate väärtuste abil:

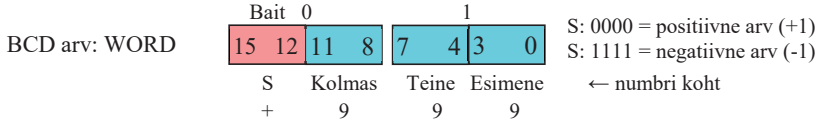
$$Reaalarv\ (REAL) = (S) \times (1 + M) \times (2^{E-127}).$$

Kui PLC mälus (REAL) on reaalarv kujul $0100000001100000\ 00000000000000000_2$, siis suurim bitt selles 0_2 näitab reaalarvuga esitatava sisu positiivsust (+1). Astme E väärtus esitatakse kahendarvuga 10000000_2, millele vastav kümnendarv on 128. Sisu väärtus mantiss M on esitatud kahendarvuna $11000000000000000000000_2$, millele vastav kümnendarv on 0,75. Mantissi M väärtus arvutatakse bittide 22 ja 21 järgi, kuna nende bittide sisu on 1. Biti 22 väärtus on 0,5 (see arvutatakse 2^{-1} abil) ja biti 21 väärtus on 0,25 (see arvutatakse 2^{-2} abil).

$Reaalarv = (+1) \times (1 + 0,5 + 0,25) \times (2^{128-127}) = (1 + 0,75) \times 2^1 = 1,75 \times 2 = 3,5$

Seega PLC mällu salvestatud reaalarvu väärtuseks on 3,5.

Siemensi PLC'del ei ole eraldi andmetüüpi BCD arvude esitamiseks (joonis 5.2). Need kirjutatakse muutujasse, mille andmetüübiks on WORD või DWORD. WORD puhul saab kirjutada muutujasse arve alates 0 kuni ±999 ja DWORD on see 0 kuni ±9999999 [12]. Siemensi PLC kasutab mõlema andmetüübi juures viimast nelja bitti arvu märgi S salvestamiseks. Negatiivse arvu puhul on kõigi nelja bitti väärtuseks 1 ja positiivse arvu puhul on nende väärtuseks 0.



Joonis 5.2. BCD arvu esitus WORD andmetüübis

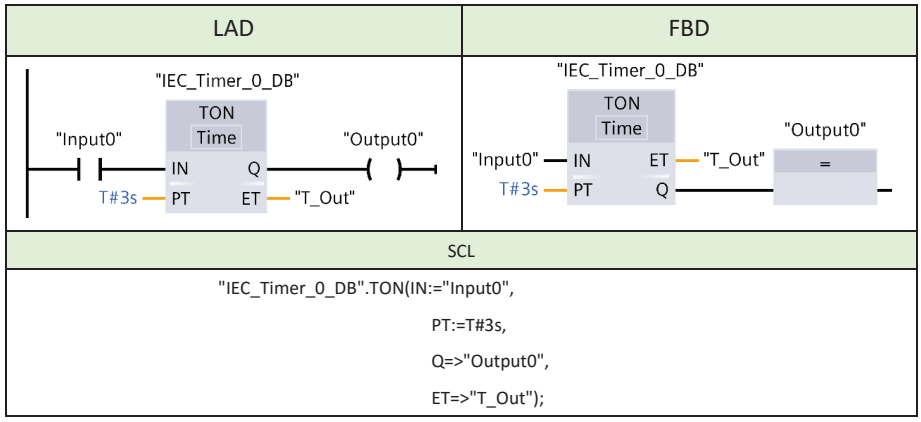
5.2 *Taimerid ehk viivituse teostajad*

Juhtimisülesannetes kasutatakse tihti erinevaid taimeri funktsioone nt signaalide eluea pikendamiseks, väljundi hilisem aktiveerimine, jne. Programmis määrab taimeri sätted, nt viivitusaja ja taimeri aktiveerimise tingimuse, programmeerija. Standard IEC 61131 määratleb taimeritele ainult 3 erinevat ajafunktsiooni: impulss (TP), viivitusega sisselülitamine (TON) ja viivitusega väljalülitamine (TOF). Tabelis 5.5 on loetletud STEP 7's kasutatavad taimerid.

Tabel 5.5. STEP 7 taimerid koos programmeerimiskeeltes kasutavate lühenditega

Nimi	Käsutüüp
Sisselülitusviivitusega taimer	TON
Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer	TONR
Väljalülitusviivitusega taimer	TOF
Impulsstaimer	TP

Iga programmis kasutatud taimeri jaoks on vaja üht DB, mis hoiab mälus taimeriga seotud väärtusi ja mille kaudu saab vastavatele väärtustele ka ligi. Ühte DB'd ei tohi kasutada mitme paralleelse viivituse teostamiseks, kuid sama andmeplokiga võib erinevatel aegadel kasutada erinevaid viivitusfunktsioone (TON, TOF, jne). Probleemide vältimiseks on soovitav kasutada iga taimeri jaoks eraldi DB'd.



Joonis 5.3. Sisselülitusviivitusega taimer LAD, FBD ja SCL keeltes

Joonisel 5.3 on kujutatud sisselülitusviivitusega taimer LAD, FBD ja SCL keeltes. Teised taimerid näevad samasugused välja, ainus erinevus seisneb taimeri käsutüübi tähises (tabel 5.5). Näiteks väljalülitusviivitusega taimeri kasutamiseks SCL keeles tuleb joonisel 5.3 esitatud täimeri käsk TON asendada käsuga TOF ja kasutada teist DB'd.
Tabelis 5.6 on esitatud taimerite juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid.

Tabel 5.6. Taimeri sisendid ja väljundid.

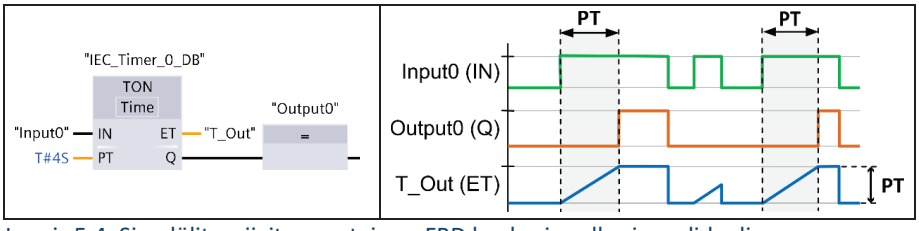
Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
Input0	IN	Bool	Binaarsisend taimeri aktiveerimiseks (ühebitine binaarsignaal taimeri aktiveerimiseks)
	PT	Time	Sisend taimerile ajaintervalli määramiseks (viivituseaja väärtus)
Input1	R	Bool	Binaarsisend taimeri ajalise väärtuse nullimiseks. Esineb ainult TONR taimeri juures
Output0	Q	Bool	Binaarväljund, mis näitab taimeri tulemust (olekut)
T_Out	ET	Time	Väljund, mis väljastab taimeris loendatud aja väärtuse (loendatud aja väärtus)
IEC_Timer_0_DB			Andmeplokk, kuhu salvestatakse taimeriga seotud väärtused

Taimerid töötavad määratud aja jooksul. Lihtsam viis ajaintervalli (viivitusaja) määramiseks on kirjutada see konstandina taimeri sisendisse PT. Ajaintervall kirjutatakse STEP 7 järgmiselt:

T#aD_bH_cM_dS_eMS,

kus: a – päevad, b - tunnid, c - minutid, d - sekundid ja eee - millisekundid, nt T#2D3H10M3S10MS. Suurim lubatud taimeritele etteantav ajaintervall PT on T#24D20H31M23S647MS. Taimerile võib ette anda ajaintervalli ka muutujaga, mille deklareeritud andmetüüp on *Time*.

Muutujate "Output0" ja "T_Out" asemel võib kasutada taimeri DB otse lisades selle nime lõppu punktiga eraldatud väljundi tähis, nt "IEC_Timer_0_DB".Q ja "IEC_Timer_0_DB".ET .



Joonis 5.4. Sisselülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm

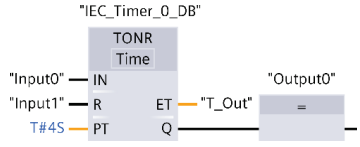
5.2.1 Sisselülitusviivitusega taimer

Kui taimeri (joonis 5.4) sisendis IN tuvastatakse loogiline 1, siis hakkab taimer aega loendama kuni ET (inglise keeles - elapsed time) väärtus saavutab ettemääratud PT aja (inglise keeles - preset time). Selle saavutamisel aktiveeritakse (seatakse kõrgeks) väljund Q. Väljund Q jääb aktiivseks kuni sisendist IN kaob loogiline 1. Kui IN signaal kaob enne kui ET saavutab PT väärtuse (enne kui taimeri aeg saab täis), siis peatatakse aja lugemine ja taimer ajaline väärtus nullitakse. Sel puhul ei aktiveerita väljundit Q.
Joonisel 5.4 on kujutatud sisselülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide oleku diagramm. PT on taimerile ette antud ajaintervall (sisselülituse viivituseaeg) ning ET on loetud aeg.

5.2.2 Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer

Kui taimeri (joonis 5.5) sisendis IN tuvastatakse loogiline 1 ning sisendis R on loogiline 0, siis hakkab taimer aega loendama kuni ET väärtus saavutab ettemääratud PT aja. Selle saavutamisel aktiveeritakse väljund Q ja see jääb ka aktiivseks kui sisendis IN kaob signaal. Kui IN signaal kaob enne kui ET saavutab PT väärtuse (enne kui taimeri aeg saab täis), siis peatatakse aja lugemine. Sisendsignaali taastumisel IN's jätkatakse lugemist samast aja (ET) väärtusest kus aja loendamine pooleli jäi. Seega võib öelda, et antud taimer akumuleerib aja väärtusi, mis sellele IN kaudu antakse.

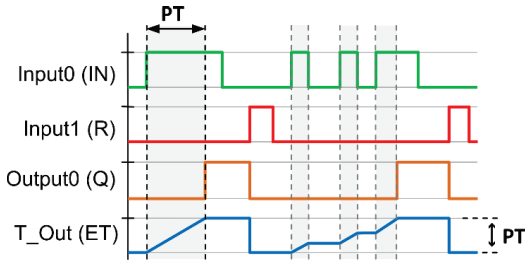
FBD



SCL

```
"IEC_Timer_0_DB".TONR (IN := "Input0",
                       R := "Input1",
                       PT := T#4s,
                       Q => "Output0",
                       ET => "T_Out");
```

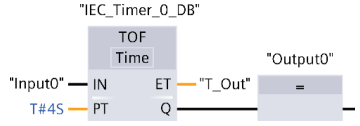
Signaalide diagramm



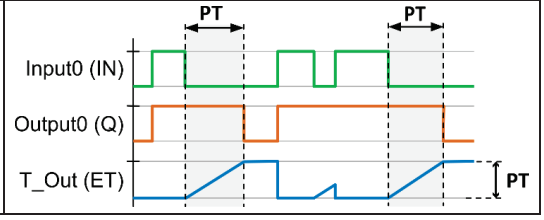
Joonis 5.5. Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer FBD ja SCL keeltes ning selle signaalide diagramm

Väljund Q jääb kõrgeks kuni saabub taimeri nullimise käsk sisendi R kaudu. Sisendisse R tulnud positiivsest frondist nullitakse taimer täielikult (ET ja Q väärtused).
Joonisel 5.5 on kujutatud aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide olekudiagramm. PT on taimerile ette antud ajaintervall (sisselülituse viivituseaeg) ning ET on loetud aeg.

FBD



Signaalide diagramm



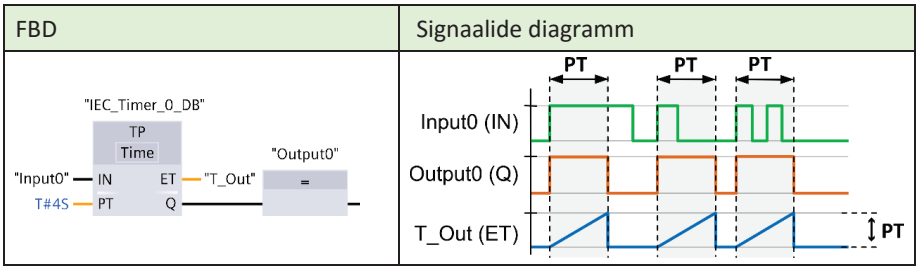
Joonis 5.6. Väljalülitusviivitusega taimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm

5.2.3 Väljalülitusviivitusega taimer

Kui taimeri (joonis 5.6) sisendis IN tuvastatakse loogiline 1, siis aktiveeritakse kohe taimeri väljund Q. Taimer hakkab loendama ajaintervalliga (PT) määratud aega, kui sisendi IN signaal muutub nulliks. Loendamine kestab taimeris kuni etteantud viivitusaja (PT) lõpuni (kuni ET saavutab PT väärtuse). Väljund Q desaktiveeritakse (loogiline 0), kui taimeri viivitusaeg on läbi saanud ja sisend IN on 0. Kui loendamise kestel tuleb IN sisendisse positiivse frontiga signaal (0 muutub 1), siis peatakse loendamine. Loendamine algab otsast peale, kui sisendi IN väärtus muudetakse nulliks.
5.6 kujutab väljalülitusviivitusega taimerit FBD keeles ja selle signaalide olekudiagrammi. PT on taimerile ette antud ajaintervall (väljalülituse viivituseaeg) ning ET on loetud aeg.

5.2.4 Impulsstaimer

Kui taimeri (joonis 5.7) sisendis IN tuvastatakse signaali tõusev front, siis hakkab taimer aega loendama kuni ET väärtus saavutab ettemääratud PT aja. Väljund Q on aktiivne kuni taimer töötab ja impulsi etteantud aeg pole möödas. Sisendi IN signaal muutus (nulliks ja tagasi üheks) ei mõjuta taimeri tööd enne kui impulsi etteantud aeg pole möödas.

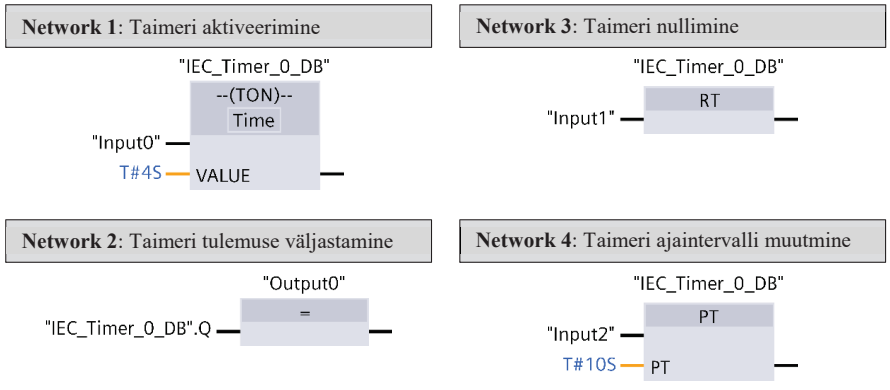


Joonis 5.7. Impulsstaimer FBD keeles ja selle signaalide diagramm

Joonisel 5.7 on kujutatud impulsstaimer FBD keeles ja selle signaalide olekudiagramm. PT on taimerile ette antud ajaintervall (impulsiaeg) ning ET on loetud aeg.

5.2.5 Lisa funktsioonid taimerite kasutamiseks

Taimerid saab FBD ja LAD keeles jupitada (joonis 5.8). Ühes programmi osas aktiveeritakse taimer **(TON)** ning teises osas kasutatakse taimeri väljundi Q väärtust mingi funktsiooni täitmiseks (nt PLC väljundi juhtimine). Taimeri aktiveerimiskohas tuleb anda ette ka ajaintervall, milleks on antud näites 4 s (joonis 5.8, Network 1, T#4S).



Joonis 5.8. Taimer jagatud erinevate programmi osade vahel FBD keeles

Eraldi seisva **(RT)** funktsiooniga (taimeri nullimine) (5.8, Network 3) saab nullida taimeriga (määratud DB nime järgi) seotud väärtuste olekud (ET ja PT aja väärtused viiakse nulli ning Q'le antakse loogiline 0). See mõjub ka siis kui taimeri ise töötab (loendab aega) peatades selle töö.

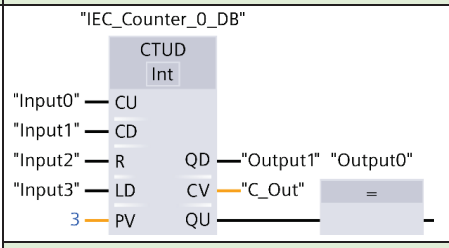
(PT) funktsioon (ajaintervalli väärtuse muutmine) (joonis 5.8, Network 4) võimaldab muuta taimeri (määratud DB nime järgi) ajaintervali PT väärtust (joonis 5.8, T#4S asemel võetakse T#10S). Muutus toimub ainult siis kui taimer töötab (loendab aega). See funktsioon annab ajaintervalli ette ka taimeri mitte töötamise ajal. Kuid taimeri aktiveerimisel loetakse uus ajaintervalli väärtus tema aktiveerimiskohast (joonisel 5.8 Network 1, T#4S) ja see kehtib kui (PT) funktsioon pole aktiivne.
Joonisel 5.9 on kujutatud joonisel 5.8 esitatud programmi SCL keeles. Reset_Timer vastab (RT) funktsioonile ja Preset_Timer vastab (PT) funktsioonile

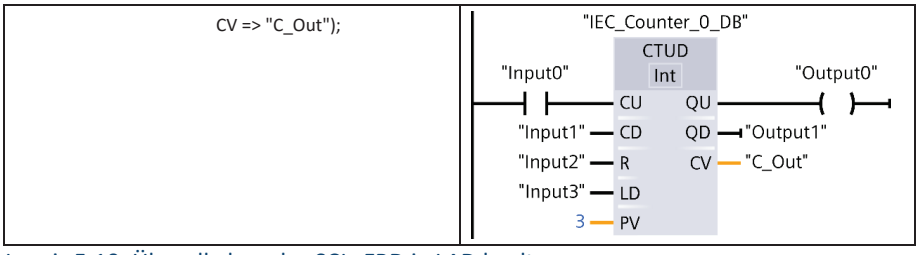
```
//Taimeri aktiveerimine
"IEC_Timer_0_DB".TON (IN := "Input0", PT := T#4s);
//Taimeri tulemuse väljastamine PLC väljundile
"Output0" := "IEC_Timer_0_DB".Q;
//Taimeri nullimine
IF "Input1" THEN
   RESET_TIMER("IEC_Timer_0_DB");
END_ IF;
//Uue ajaintervalli etteandmine taimerile
IF "Input2" THEN
   PRESET_TIMER(PT := T#10S, TIMER := "IEC_Timer_0_DB");
END_ IF;
```

Joonis 5.9. Taimer jagatud erinevate programmi osade vahel SCL keeles

5.3 Loendur

Impulsside loendamiseks (nt esemete loendamiseks tootmisliinis) ja asendi või kauguse hindamiseks kasutatakse tihti loendusfunktsioone. Standardis IEC 61131 on määratud 3 loendusfunktsiooni: üles (CTU), alla (CTD) ja üles-alla loendur (CTUD). Need on ka STEP 7's olemas. Nagu taimeridki vajavad loendurid oma tööks andmeplokki (DB), mis genereeritakse loenduri sisestamisel automaatselt. Iga loenduri jaoks on soovitav kasutada eraldi DB'd.

SCL	FBD
"IEC_Counter_0_DB".CTUD (CU := "Input0", CD := "Input1", R := "Input2", LD := "Input3", PV := 3, QU => "Output0", QD => "Output1",	 LAD



Joonis 5.10. Üles-alla loendur SCL, FBD ja LAD keeltes

Joonisel 5.10 on kujutatud üles-alla loendur LAD, FBD ja STL keeltes. Kõik teised loendurid omavad samu komponente. Ainus erinevus seisneb selles, et osadel loenduritel puuduvad osaliselt järgmised sisendid CU, CD, R või LD. Nt üles loenduris puuduvad sisendid CD ja LD ning väljundist on puudu QD. Väljund QU esitatakse üles ja alla loenduris ainult Q tähisena. Ülejäänud osa on nii nagu kujutatud joonisel 5.10 (loenduri DB võib olla teine). 5.7 esitab loenduri juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid.

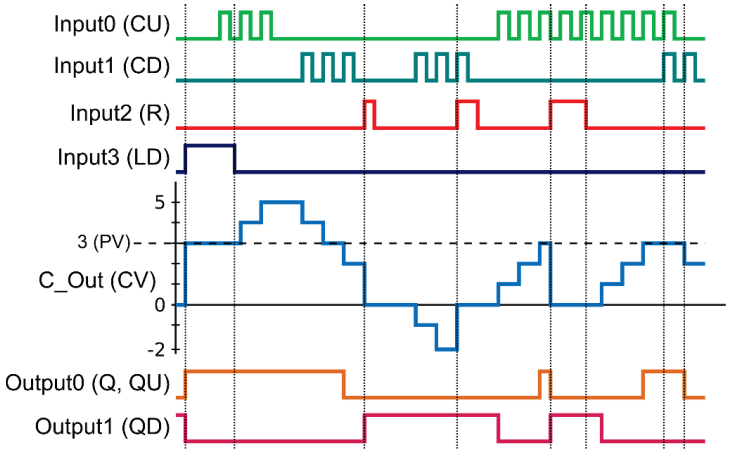
Tabel 5.7. Loenduri sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
Input0	CU	Bool	Binaarsisend suurendab loenduri väärtust 1 võrra, kui selles tuvastatakse tõusev front
Input1	CD	Bool	Binaarsisend vähendab loenduri väärtust 1 võrra, kui selles tuvastatakse tõusev front
Input2	R	Bool	Binaarsisend nullib loenduri (loenduri väärtus muutub 0)
Input3	LD	Bool	Binaarsisend, mille peale laetakse loenduri väärtuseks PV sisendis olev algväärtus
	PV	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt	Loendurile etteantud algväärtus (ainult täisarv). Võib kasutada ka operandi, millesse on salvestatud sobiv väärtus
Output0	Q, QU	Bool	Binaarväljund, mis on aktiivne kui loenduri väärtus CV on saavutanud algväärtusega PV sama või suurema väärtuse
Output1	QD	Bool	Binaarväljund, mis on aktiivne kui CV loenduri väärtus on nulliga sama või väiksem sellest
C_Out	CV	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt	Väljund, mis väljastab loendustulemi täisarvuna
IEC_Timer_0_DB			Andmeplokk, kuhu salvestatakse loenduriga seotud väärtused

5.10 kujutab loenduri väärtust CV (loendustulem) mille väärtus on null. Loenduri väärtus suureneb ühe võrra (+1), kui loenduri sisendi CU signaalis tuvastatakse tõusev front (joonis 5.11). Tõusev frontiga signaal sisendis CD vähendab loenduri väärtust ühe võrra

(-1). Kui mõlemas sisendis CU ja CD tuvastatakse positiivne signaalifront, siis täidetakse mõlemat käsku korraga ja loenduri väärtus ei muutu. Loogiline 1 sisendisse R viib loenduri väärtuse nulli. Sisendis LD olev loogiline 1 laeb loenduri väärtuseks sisendis PV olev väärtuse, kui sisendis R ei ole loogilist 1. Loenduri. Üles-alla loenduri signaalide olekud on kujutatud joonisel 5.11.

LAD ja FBD keeltes tuleb määrata ka loenduri andmetüüp (5.10). See võib olla Int, SInt, DInt, UInt, USInt ja UDInt. Andmetüübiga antakse ette loenduri lugemisvahemik (Int puhul on alumine piirväärtus -32768 ja ülemine piirväärtus 32767) ning millist andmetüüpi muutujad saab kasutada PV ja CV juures. Loendur ei välju andmetüübi poolt määratud lugemisvahemikust. See tähendab, et kui Int tüüpi loendur on saavutanud väärtuseks 32767 (ülemine piir), siis järgmise tõusva frondiga signaali puhul sisendis CU ei suurene loenduri väärtus 32768 peale vaid see jääb ikka 32767 peale. Sama asi on ka alumise piiri puhul. Teatud andmetüüpide puhul võib loendur hakata lugema ka negatiivseid väärtusi, st nullist allapoole (joonis 5.11).

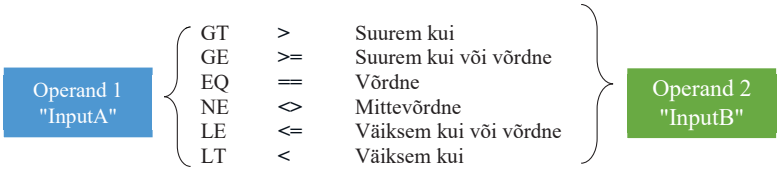


Joonis 5.11. Üles-alla loenduri signaalide diagramm

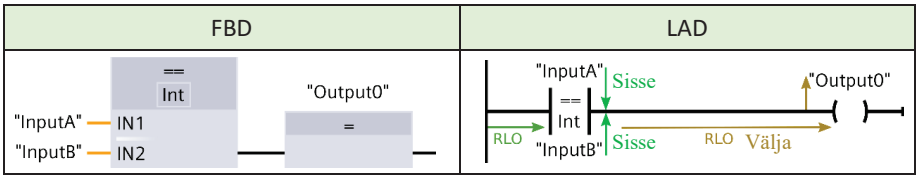
Eraldi seisvad üles ja alla loendurid töötavad peaaegu samamoodi kui üles-alla loendur. Erinevus seisneb selles, et üles loenduril puudub alla loendamise osa ja alla loenduril üles loendamise osa. Alla loenduril tuleb anda ette väärtus (sisend PV), millest alustatakse allapoole loendamist.

5.4 Komparaator

Komparaatoritega (e võrdlusplokkidega) võrreldakse kahes sisendis olevate samatüübiliste andmete (operandide) väärtusi. Võrdlustulemus väljastatakse binaarväljundi kaudu. Selle väljundi signaal on loogiline 1, kui võrdlus on tõene, või 0, kui see on väär. Joonisel 5.12 on esitatud standardi IEC 61131 kohased võrdlused, mis on ka STEP 7's olemas.



Joonis 5.12. IEC 61131 kohased võrdlused



Joonis 5.13. Võrdne komparaator FBD ja LAD keeltes

5.13 esitab võrdlemise komparaatori FBD ja LAD keeltes. Muutuja "InputA" väärust võrreldakse muutuja "InputB" väärtusega. Kui need on sisult võrdsed, siis väljastab komparaator loogilise 1 ja RLO bitt kannab selle edasi teistele funktsioonidele. Selle tulemusel muutub väljund "Output0" aktiivseks. Kui mõlema muutuja väärtused ei ole võrdsed, siis väljastab komparaator loogilise 0. Seega ei aktiveeru väljund "Output0".
5.8 esitab komparaatorite juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. LAD ja FBD keeltes tuleb määrata komperaatori andmetüüp (joonis 5.13), et määrata millise andmetüübiga muutujaid võrreldakse oma vahel. Oluline on teada, et võrdluses saab kasutada ainult sama tüüpi muutujaid.

Tabel 5.8. Komparaatori sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputA	IN1	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDint, Real, LReal, String, WString, Char, WChar, Date, Time, DTL, TOD	Sisend A, mille väärtust tahetakse võrrelda sisendiga B
InputB	IN2		Sisend B, mille väärtust tahetakse võrrelda sisendiga A
Output0		Bool	Binaarväljund, millega väljastatakse komparaatori tulemus

Andmetüüpe Byte, Word ja DWord saab võrrelda ainult funktsioonidega võrdne ja mittevõrdne. Nende puhul ei tööta teised võrdlused.
Komparaatoris võib kasutada muutujate asemel ka konstante e siis arve, mis sobivad valitud andmetüübiga kokku. 5.14 esitab kaks komparaatorit SCL keeles.

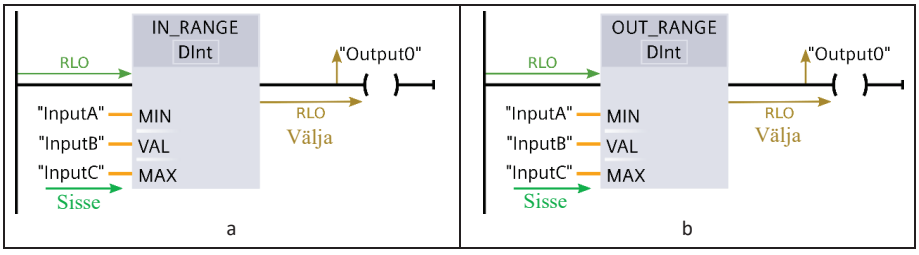
```
"Output0" := "InputA" = "InputB";
```

```
IF "InputA" = "InputB" THEN
   "Output0" := 1;
ELSE
   "Output0" := 0;
END_IF;
```

Joonis 5.14. SCL keeles on esitatud kaks varianti komparaatorist võrdne

Peale võrdluse võimaldavad S7-1200 ja S7-1500 PLC'd kontrollida mingi muutuja väärtuse jäämist teatud piiridesse. Selleks on funktsioonid IN_RANGE ja OUT_RANGE.

IN_RANGE funktsiooni kasutatakse kui kontrollitakse kas sisendi VAL väärtus jääb etteantud piiridesse (joonis 5.15 a). Piirid määratakse MIN (alumine piir) ja MAX (ülemine piir) sisendite kaudu. Kui kehtib tingimus MIN ≤ VAL ≤ MAX, siis väljastab see funktsioon loogilise 1, vastasel juhul loogilise 0. Funktsiooni tulemus kantakse RLO biti kaudu edasi teiste elementide juurde.



Joonis 5.15. Muutuja väärtuse piiridesse jäämise kontrollimise funktsioonid LAD keeles

OUT_RANGE funktsiooni kasutatakse kui kontrollitakse kas sisendile VAL antud väärtus jääb väljapoole etteantud piire (joonis 5.15 b). Funktsioon väljastab loogilise 1 kui kehtib VAL < MIN või VAL > MAX. Vastasel juhul väljastab funktsioon loogilise 0. Funktsiooni tulemus kantakse RLO biti kaudu edasi teiste elementide juurde.
Tabelis 5.9 esitatakse IN_RANGE ja OUT_RANGE funktsioonide juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. LAD ja FBD keeltes tuleb määrata ka mõlema funktsiooni juures andmetüüp nagu seda tehakse komparaatori juures. Muutujate asemel võib kasutada ka konstante, mis peavad sobima kokku valitud andmetüübiga.

Tabel 5.9. IN_RANGE ja OUT_RANGE funktsioonide sisendid ning väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputA	MIN	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDint, Real, LReal	Sisend MIN, mis määrab piiri (vahemiku) alumise väärtuse
InputB	VAL		Sisend VAL, mille väärtuse jäämist piiridesse tahetakse kontrollida
InputC	MAX		Sisend MAX, mis määrab piiri (vahemiku) ülemise väärtuse
Output0, Output1		Bool	Binaarväljund, millega väljastatakse IN_RANGE või OUT_RANGE funktsiooni tulemus

5.16 esitab muutuja väärtuse piiridesse jäämise kontrolli SCL keeles. Eespool kontrollitakse kas muutuja "InputB" väärtus on piirides ja siis kas see jääb väljapoole piire.

```
//Kontrollitakse kas muutuja InputB jääb lubatud piiridesse
"Output0" := ("InputA" <= "InputB") AND ("InputB" <= "InputC");
// Kontrollitakse kas muutuja InputB jääb lubatud piiridest väljapoole
"Output1" := ("InputB" < "InputA") OR ("InputB" > "InputC");
```

Joonis 5.16. Muutuja väärtuse piiridesse jäämise kontrollimine SCL keeles

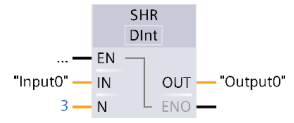
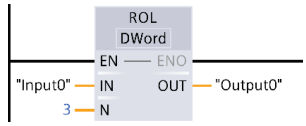
5.5 Nihkefunktsioonid

Nihke- ja ringnihkefunktsioone kasutatakse mingi muutuja (operandi) bitimustri nihutamiseks vasakule või paremale kindla arvu positsioonide võrra. Nihutamise käigus muutuja bitimustris vabanevad positsioonid täidetakse 0-ga. Ringnihkel muutuja bitimustris vabanevad positsioonid täidetakse mälupiirkonnast väljanihutatud bittide väärtustega.

Tabel 5.10. Nihkefunktsioonid

Nimi	Kommentaar
SHL	Bitimuster nihutatakse vasakule, kus vabanevad kohad täidetakse loogilise 0'ga
SHR	Bitimuster nihutatakse paremale, kus märgiga arvude puhul täidetakse vabanevad kohad algses bitimustris kõige vasakul pool olnud biti väärtusega. Ülejäänute puhul täidetakse vabanevad kohad loogilise 0'ga
ROL	Bitimuster ringnihutatakse vasakule ning vabanenud kohad täidetakse bitimustrist välja nihutatud bittide väärtustega
ROR	Bitimuster ringnihutatakse paremale ning vabanenud kohad täidetakse bitimustrist välja nihutatud bittide väärtustega

Standard IEC 61131 ja STEP 7 pakuvad nelja nihkefunktsiooni, mis on esitatud tabelis 5.10. Peale nihkefunktsiooni valikut tuleb STEP 7's FBD ja LAD keeltes määrata andmetüüp (joonis 5.17). See ütleb millist tüüpi muutujad saab kasutada antud funktsiooni juures ning mis on suurim lubatud bittide nihutamise arv (operand/sisend N). Andmetüüpide Byte, SInt ja USInt puhul on selleks 8; Word, Int ja UInt on 16; DWord, DInt ja UDInt on 32.

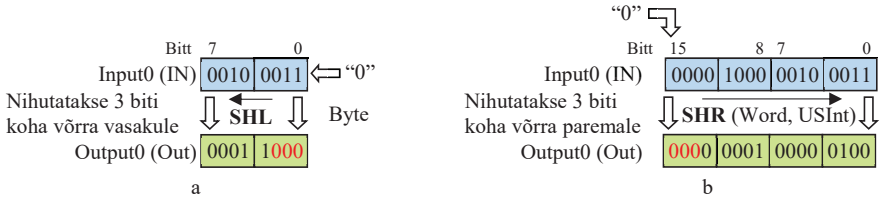
SCL	FBD	LAD
"Output0" := SHL (IN := "Input0", N := 3);		

Joonis 5.17. Näited nihkefunktsioonide kohta SCL, FBD ja LAD keeltes

5.17 esitab mõned STEP 7 nihkefunktsioonid. SCL keeles on esitatud nihkefunktsioon vasakule SHL, FBD keeles topelttäisarvu (DInt) muutuja nihkefunktsioon paremale SHR ning LAD keeles topeltsõna (DWord) muutuja ringnihutamise funktsioon vasakule ROL. Kõik nihkefunktsioonid näevad välja nagu joonisel 5.17 esitatud. Ainus erinevus on vastava funktsiooni käsu nimes ja valitud andmetüübis.
5.11 esitab nihkefunktsioonide juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. Muutujate asemel võib kasutada ka konstante e siis arve, mis sobivad valitud andmetüübiga kokku. Funktsioonide ROL ja ROR puhul saab kasutada ainult Byte, Word ja DWord andmetüüpe.

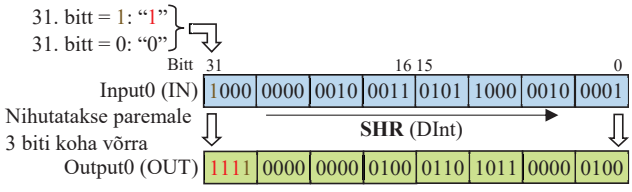
Tabel 5.11. Nihkefunktsioonide sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
Input0	IN	Byte, Word, DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDint	Sisend IN, mille väärtuse bitimustrit tahetakse nihutada
	N	USINT, UINT, UDINT	Sisendile N omistatakse nihutavate bittide (kohtade) arv bitimustris
Output0	OUT	Byte, Word, DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDint	Väljund OUT, mille kaudu väljastatakse nihutamise tulemus



Joonis 5.18. STEP 7 nihke funktsioonid SHL (a) ja SHR (b)

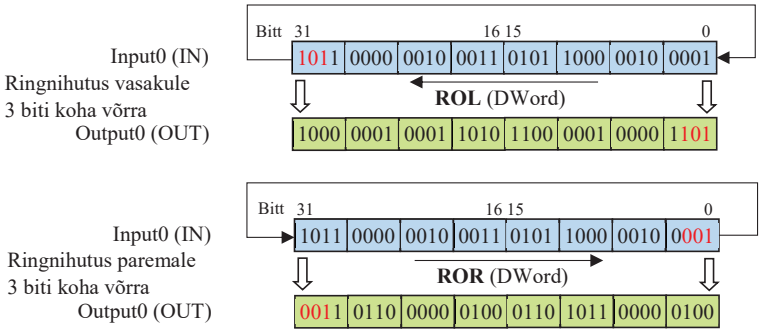
Funktsioonid **SHL** ja **SHR** nihutavad sisendi IN sisu bitthaaval vaskalule või paremale sisendi N poolt etteantud biti kohtade võrra. Tulemus väljastatakse väljundi OUT abil. SHL puhul täidetakse vabaks jäänud kohad 0'ga kõikide andmetüüpide juures(joonis 5.18 a). SHR puhul täidetakse vabaks jäänud biti kohad 0'ga, kui nihkefunktsiooni andmetüübiks on valitud Byte, Word, DWord, USInt, UInt ja UDint (joonis 5.18 b). Andmetüüpide SInt, Int ja DInt puhul täidetakse SHR puhul tühjaks jäänud biti kohad bitimustris kõige vasakul pool oleva biti väärtusega e arvu märgi biti väärtusega (joonis 5.19). Andmetüübi SInt bitimustri viimane biti on 7. bitt, Int puhul on 15. bitt ja DInt puhul on 31. bitt. Kui viimase biti väärtus on 1 (arv on negatiivne) siis täidetakse vabaks jäänud biti kohad ühega ja 0 (arv on positiivne) puhul täidetakse need nulliga.
Joonisel 5.19 esitatud operandi "Input0", mille andmetüüp on DInt, väärtus on negatiivne. Seetõttu on operandi "Input0" viimase biti (31) väärtuseks 1. Seega nihutamisel vabanenud bittide kohad täidetakse loogilise 1'ga.



Joonis 5.19. SHR funktsioon negatiivse bitimustri puhul (DInt)

Kui sisendi N väärtus on 0, siis väljastatakse sisendis IN olev väärtus muutumatul kujul väljundisse OUT. Kui sisendi N väärtus ületab bitimustris olevate bittide arvu, siis

väljastatakse SHL puhul väärtus 0 (bitimustris on kõik kohad täidetud 0'ga). SHR puhul võib olla väljastatavaks väärtuseks 0 või -1 (bitimustris on kõik kohad täidetud 1'ga).
Funktsioonid **ROL** ja **ROR** nihutavad (ringnihutavad) kogu operandi sisu bitthaaval paremale või vasakule ning tühjaks jäänud kohad täidetakse nihutamisel üle bitimustri nihutatud bittide väärtustega (joonis 5.20). Ringnihutamist saab kasutada ainult Byte, Word ja DWord andmetüüpidega operande.



Joonis 5.20. STEP 7 nihke funktsioonid ROL (ülevalpool) ja ROR (allpool)

5.6 Ülesanded

Peatükkis 4.7 on kirjeldatud nuppude ja lampide süsteemi, mille kohta on järgnevad ülesanded koostatud.

5.6.1 Ühe lülitiga ühe lambi viitega väljalülitus

Koostada programm, mis peale S2 nupu vajutamist lülitab lambi H3 sisse. Pärast S2 nupu vabastamist peab lamp H3 3 sekundit hiljem välja lülituma.
Lülitamine peab olema korratav.

5.6.2 Ühe nupuga kahe lambi sisse lülitamine ajalise viitega

Koostada programm, mis lülitab S1 nupu all hoidmise ajaks lambi H1 sisse. Kui S1 nuppu on hoitud 3 sekundit all, siis tuleb lülitada ka lamp H2 sisse.
S1 nupu vabastamisel peavad nii H1 kui H2 välja lülituma.
Lülitamine peab olema korratav.

5.6.3 Ühe nupuga ühe lambi sisse lülitamine määratud ajaks

Koostada programm, mis pärast S1 nupu vajutust lülitab lambi H1 sisse 5 sekundiks olenemata sellest, kas S1 nupp jääb vajutatuks või ei.
Lülitamine peab olema korratav.

5.6.4 Ühe lambi vilgutamine

Koostada programm, mis vilgutab lampi H2 sagedusega 1 Hz kui nupp S3 hoitakse all. Lamp H2 on väljas kui S3 nuppu ei hoita all.

5.6.5 Lambi lülitamine kümnendal vajutusel

Koostada programm, mis lülitab lambi H1 sisse pärast seda, kui S1 nuppu on vajutatud 10 korda. Pärast S2 nupu vajutust peab indikaatorlamp H1 välja lülituma.
Lülitamine peab olema korratav.

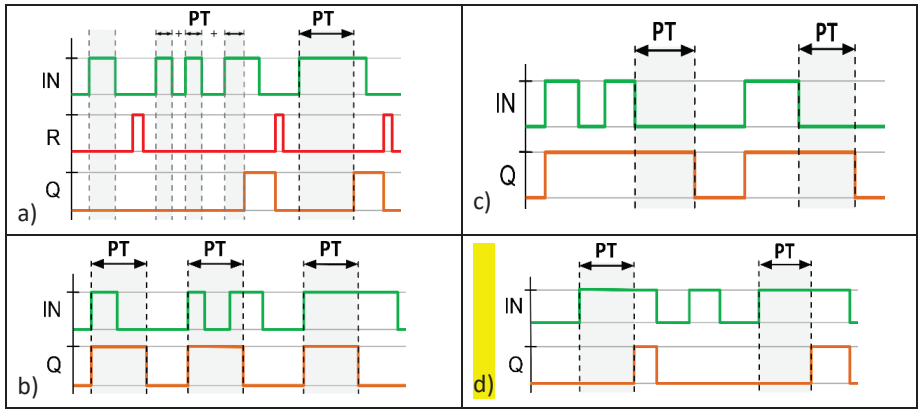
5.6.6 Kolme lambi lülitamine kahe nupuga

Koostada programm, mis lülitab esimesel S1 nupu vajutusel lambi H1 sisse, teisel vajutusel lambi H2 sisse ja kolmandal vajutusel lambi H3.
Kõik indikaatorlambid peavad välja lülituma S2 nupu vajutamisel.
Lülitamine peab olema korratav. S1 nupu all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist.

5.7 Teadmiste kontroll

1) Milline on kahendarvu äratundmiseks mõeldud märgis?
   a) Alaindeksi märk numbri lõpus
   b) Alaindeks 10 arvu lõpus
   c) Alaindeks 2 arvu lõpus
   d) Alaindeks BCD arvu lõpus
   e) Number 1 kahendarvu vasakpoolseimas positsioonis
2) Kui palju bitte tuleb mälus kasutada, et esitada 3-kohalist kümnendarvu BCD koodis?
   a) 3
   b) 9
   c) 12
   d) 16
   e) 32
3) Milline on suurim kümnendarv, mida saab esitada kahendkoodis 8 bitiga?
   a) 9
   b) 15
   c) 255
   d) 256
4) Millist kümnendarvu esindab täht F kuueteistkümnendarvus?
   a) 1
   b) 15
   c) 16
   d) 0
5) Milline on STEP 7 taimer on sisaldab aja akumulaatorit?
   a) TOF
   b) TP
   c) TON
   d) RT
   e) TONR

6) Milline diagramm kirjeldab sisselülitusviivitusega taimerit?



7) Millist taimerit on allpool kirjeldatud?
Kui sisend IN aktiveeritakse alustab taimer aja loendamist ja väljund Q aktiveeritakse. Pärast etteantud ajaintervalli loendamise lõppemist desaktiveeritakse väljund Q. Taimer jätkab aja loendamist ka siis, kui sisend IN desaktiveeritakse enne kui taimeri aeg on jõudnud nulli.
   a) Sisselülitusviivitusega taimer
   b) Väljalülitusviivitusega taimer
   c) Aja akumulaatoriga sisselülitusviivitusega taimer
   d) Impulsstaimer

8) Mis on STEP 7 loenduri suurim väärtus, kui andmetüübiks on SInt?
   a) -128
   b) 0
   c) 127
   d) 255
   e) 999

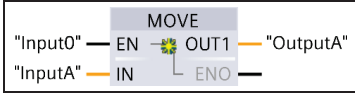
9) Millist käsku kasutatakse, et näha kas teise operandi väärtus on suurem kui või võrdne esimese operandi väärtusega?
   a) GT
   b) GE
   c) EQ
   d) LE
   e) LT

10) Milliseid funktsioone saab kasutada andmetüübiga täisarv (Int)? (mitu vastust)
   a) Nihutada vasakule (SHL);
   b) Nihutada paremale (SHR)
   c) Ringnihutada vasakule (ROL)
   d) Ringnihutada paremale (ROR)

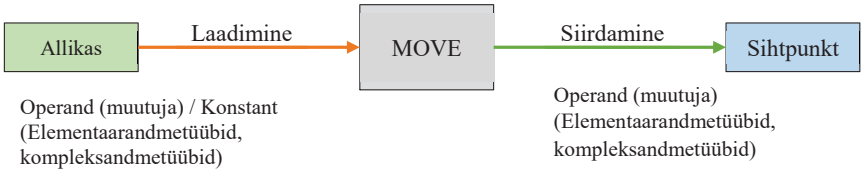
6 Ülekande- ja programmi juhtimisfunktsioonid

6.1 Ülekandefunktsioonid

Ülekandefunktsioonide kasutamine võimaldab laadida ühest operandist (muutujast) andmed ja siirata need teise operandi (muutujasse). Standardis IEC 61131 kohaselt tähistavad LD- ja ST-käsud laadimise ja siirdamise funktsioone IL keeles. STEP 7 kasutatakse selleks MOVE funktsiooni, kus siirdamis- ja laadimiskäsud on kombineeritud üheks terveks süsteemiks (joonised 5.21 ja 5.22). STEP 7 ei võimalda kasutada ülekandefunktsioone bitt tüüpi operandide juures.

FBD	SCL
	IF "Input0" THEN "OutputA" := "InputA"; END_IF;

Joonis 5.21. Funktsioon MOVE FBD ja SCL keeltes



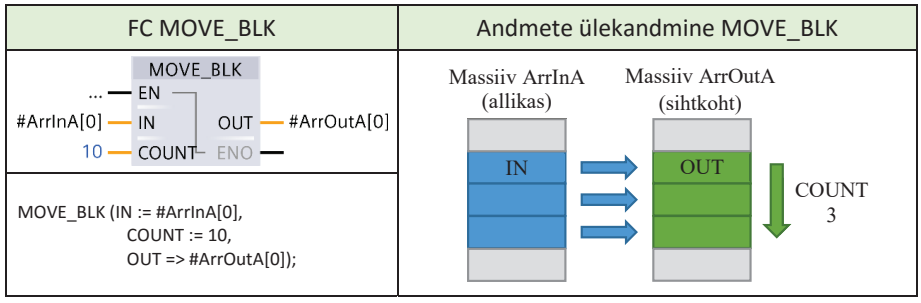
Joonis 5.22. Ülekandefunktsiooni kirjeldus

Joonisel 5.21 on esitatud FBD ja SCL keeles MOVE ülekandefunktsioon. Näites kantakse muutuja "InputA" väärtus edasi muutujale "OutputA" juhul, kui ülekandefunktsiooni aktiveerimissisendis EN muutuja "Input0" signaal on 1 (pt 4.6 lõpp). MOVE funktsiooni(ploki) aktiveerimissisend EN võib olla ka tühi (SCL ilma IF tingimuseta). See tähendab, et MOVE funktsiooni täidetakse PLC's iga tsükli ajal ning selleks ei pea ootama funktsiooni täitmise luba (aktiveerimissisendis EN on signaal 1).
Tabelis 5.12 on esitatud MOVE funktsiooni juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. Mõlemad muutujad peaksid olema sama tüüpi ning sisend IN muutuja mälumaht ei toiks ületada väljund OUT1 muutuja mälumahtu (vastupidi võib olla). Sisendis IN võib kasutada ka konstant väärtust. MOVE funktsioon ei tööta andmetüübi Bool muutujatega.

Tabel 5.12. MOVE funktsiooni sisendid ja väljundid

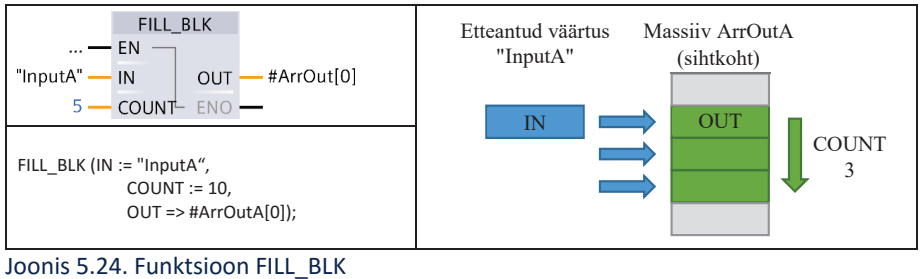
Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
Input0	EN	Bool	Funktsiooni aktiveerimissisend. Võib olla ka tühi
InputA	IN	Elementaarsed ja kompleksed andmetüübid	Sisend, milles olev väärtus kantakse väljundisse
OutputA	OUT1		Väljund, millesse salvestatakse sisendist saadud väärtus

Funktsioonid **MOVE_BLK** ja **UMOVE_BLK** võimaldavad kanda ühe massiivi väärtused (andmekogu) teise massiivi (joonis 5.23). Sisendis IN antakse ette massiiv ja massiivi elemendi number (ArrInA[0], koht, pesa) kus kohast alustatakse väärtuste ülekandmist teise massiivi. Väljundis OUT antakse teine massiiv ja massiivi elemendi number (ArrOutA[0]) kus kohast alustatakse väärtuste salvestamist. Sisend COUNT määrab ülekantavate väärtuste mahu (arvu). Mõlemad massiivid peaksid olema ühesuguse andmetüübiga/ülesehitusega.
Funktsioonid MOVE_BLK ja UMOVE_BLK erinevad sellepoolest, et ühe funktsiooni täitmine katkestatakse kui PLC's aktiveerub katkestusprogramm. Teise puhul (UMOVE_BLK) täidetakse teostatavat funktsiooni lõppuni enne kui alustatakse katkestusprogrammi täitmist.
Väärtusi ei kanta ühest massiivist teise üle, kui sisendi COUNT väärtus ületab väljundi OUT juures määratud massiivis olevate elementide arvu (kantsulgudes määratud kohast alates allapoole).



Joonis 5.23. Funktsioon MOVE_BLK

Funktsioonid **FILL_BLK** ja **UFILL_BLK** võimaldavad salvestada massiivi mingi väärtuse (joonis 5.24). Sisendis IN antakse ette väärtus ("InputA" - muutuja, konstant) mida tahetakse salvestada massiivi elementidesse. Väljundis OUT antakse ette massiiv ja massiivi elemendi number (ArrOutA[0]) kus kohast alustatakse väärtuste salvestamist. Sisend COUNT määrab ette antud väärtuse salvestamise kordade arvu massiivi elementidesse (mitmesse massiivi elementi kantakse uus väärtus). Nii massiiv kui ka etteantud väärtus peaksid olema sama andmetüüpi (üks massiivi üks element peaks võtma sama palju mälumahtu kui ette antud väärtus).



Joonis 5.24. Funktsioon FILL_BLK

Funktsioonid FILL_BLK ja UFILL_BLK erinevad sama moodi kui MOVE_BLK ja UMOVE_BLK.
Ette antud väärtust ei kanta massiivi, kui sisendi COUNT väärtus ületab väljundi OUT juures määratud massiivis olevate elementide arvu (kantsulgudes määratud kohast alates allapoole).

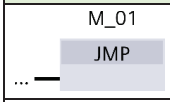
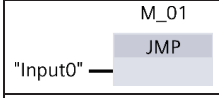
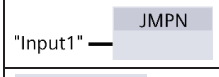
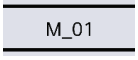
6.2 Programmi juhtimisfunktsioonid

PLC programmide teostamisel tuleb sageli loobuda programmi samm-sammulisest täitmisest ja täita ka alternatiivseid programmiosasid. See saavutatakse hüpete ja tsüklite kasutamisega mingis plokis või opereerides erinevate plokkidega. Funktsioonide ja plokkide tingimuslik käivitamine või programmi alternatiivne hargnemine viib samuti programmi mittelineaarsele täitmisele.

6.2.1 Hüppefunktsioonid

Hüppefunktsioonidega saab programmi täitmist suunata ühest programmiosast teise. Standardi IEC 61131 kohaselt kirjeldatakse hüpe programmis käsuga JMP ja sellega seotud sihtkoha märgisega. Hüppeid programmis saab teostada tingimusteta või tingimuslikult.
5.13 esitab STEP 7 hüppekäsud FBD ja SCL keeles. LAD keeles asendatakse 5.13 kujutab kastid kontaktide ja mähiste tingmärkidega.

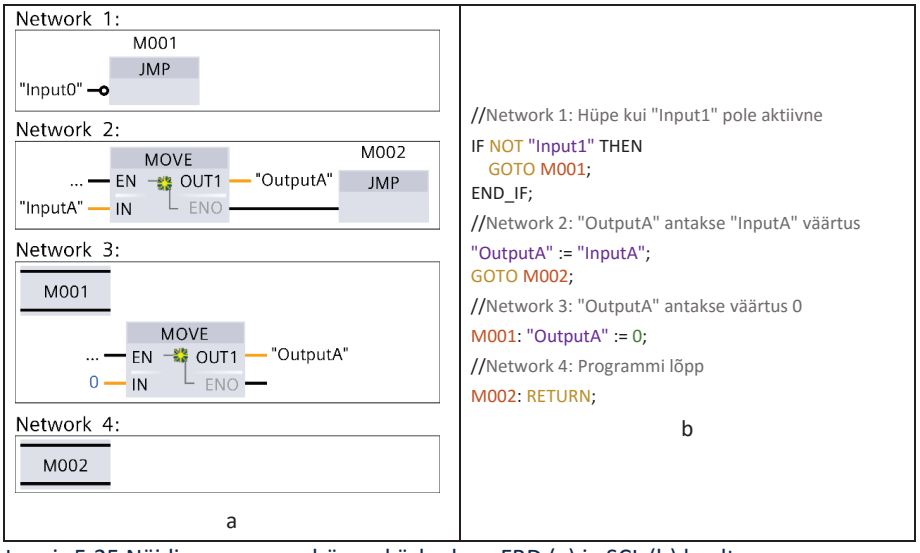
Tabel 5.13. Hüppekäsud FBD ja SCL keeltes [7]

FBD käsk (operatsioon)	Operand	SCL	Kommentaar
	Sihtkoha märgis	GOTO M_01;	Tingimuseta hüpe, siit hüpatakse alti mingisse kohta
	Sihtkoha märgis	IF "Input0" THEN GOTO M_01; END_IF;	Hüpe, kui RLO = 1. Hüpe kui "Input0" omab loogilist 1
	Sihtkoha märgis	IF NOT "Input1" THEN GOTO M_01; END_IF;	Hüpe, kui RLO = 0. Hüpe kui "Input1" omab loogilist 0
		M_01: "Output0" := 1;	Hüppe sihtkoha plokk, sihtkoha märgis kirjutatakse selle sisse. SCL keeles kirjutatakse sihtkoha märgis mingi käsu algusesse

Programmi koostamisel tähistatakse hüppe sihti sihtkoha märgisega. Märgis võib koosneda erinevatest sümbolitest. Esimene sümbol peab olema täht, teised võivad olla kas siis tähed, numbrid või allkriips (nt M_01). Märgise juures tuleb arvestada suurte ja väikeste tähtedega. Hüppe sihtkoha märgis kirjutatakse SCL keeles hüppekäsu järele ja FBD keeles hüppekäsu ploki kohale. SCL keeles sisestatakse hüppe sihtkoha märgise

programmirea algusse, millele järgneb koolon, nt M_01: "Output0" := 1;. FBD keeles paigutatakse Networki algusse eriline plokk, millesse kirjutatakse hüppe sihtkoha märgis. Sihtkoha märgis saab programmis olla ainult ühes kohas, kuid sinna saab hüpata ühe ploki erinevatest kohtadest. Antud plokis saab hüpata nii edasi kui ka tagasi.

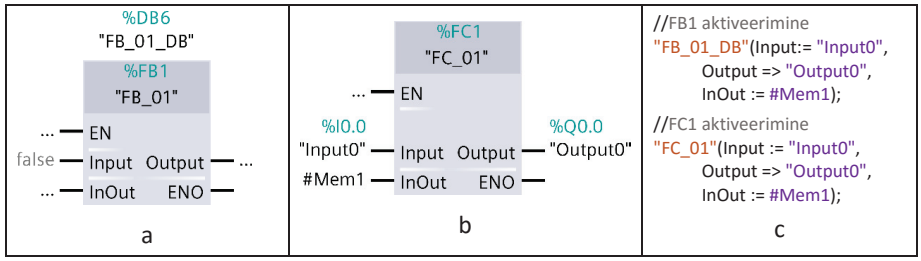
FBD ja LAD keeltes saab kasutada ühes plokis kuni 32 sihtkoha plokki. Sihtkoha märgised võivad erinevates plokkides kattuda, kuna hüpped toimuvad ainult samas plokis kus hüpekäsku kasutati.
5.25 esitab FBD ja SCL keeltes programmi, kus on kasutatud hüppe käske. Operandile "OutputA" omistatakse operandi "InputA" väärtus kui operandi "Input0" signaal on 1. Kui aga operandi "Input0" signaal on 0, siis omistatakse operandile "OutputA" väärtus 0. Oluline on teada, et programmi osades jäävad muutujate väärtused sellisteks, nagu need määrati viimasel täitmisel, kui programmi antud osast hüpatakse üle. See kehtib ka siis kui muutuja väärtuse määramise tingimus on muutunud.



Joonis 5.25 Näidis programm hüppe käskudega FBD (a) ja SCL (b) keeltes

6.2.2 Ploki aktiveerimine

Standardis IEC 61131 kasutatakse käsku CALL funktsiooniplokkide FB tingimusteta ja tingimuslikuks aktiveerimiseks. Selle käsuga ei saa programmis aktiveerida funktsioone FC.
STEP 7 kasutatakse FBD ja LAD keeltes plokkide kujutamiseks ristkülikut (5.26 a ja b). Ristküliku sees on esitatud ploki nimi ja tema siirdeparameetrid (sisendid, väljundid). PLC's programmis olevad plokid (FB ja FC) leiab projekti puust *Program block* kaustast. FB ja FC lisamiseks programmi tuleb võtta ploki nimest kinni (projekti puus), siis lohistata ja vabastada see programmi koostamise aknas. Lohistamise ja vabastamise tulemuseks on joonisel 5.26 a ja b kujutatud FB ja FC aktiveerimiskäsud FBD keeles.



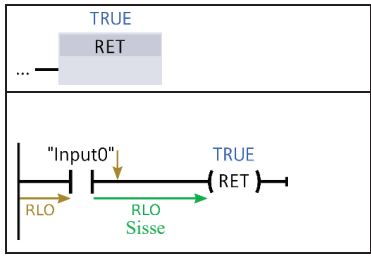
Joonis 5.26. FB ja FC plokkide aktiveerimine FBD ja SCL keeltes

Siemensi PLC programmis aktiveeritakse FB koos temale vastavate DB'ga. Erinevalt FC'st ei ole vaja FB siirdeparameetreid siduda operandidega (muutujatega), need võib jätta tühjaks. FB avamisel säilitavad tema siirdeparameetrid oma esialgsed väärtused (pt 2.2). SCL keeles tuleb käituda sama moodi nagu FBD ja LAD keelte puhul, kui plokke soovitakse lisada programmi (kasutada projekti puud selleks). Ploki nimega (FB ja FC) või FB'ga seotud DB nimega (joonis 5.26 c) aktiveeritakse konkreetsed FB'd ja FC'd. FB puhul asendatakse ploki nimi DB nimega programmis. Nende aktiveerimiskohas (allpool) tuuakse välja ka siirdeparameetrid, mis tuleb SCL keeles siduda mingite operandidega (muutujatega). Kui FB puhul on mingid siirde-parameetrid millega ei soovita operande siduda, siis tuleb need kustuda SCL programmist või välja kommenteerida // abil. FC puhul siirdeparameetrite kustutamine ei toimi.
FB'd (joonis 5.26 a), FC'd (joonis 5.26 b) ja paljud standardfunktsioonid (joonised 5.21, 5.23 ja 5.24) omavad FBD ja LAD keeltes aktiveerimissisendit EN (inglise keeles *Enable*) ja aktiveerimisväljundit ENO (inglise keeles *Enable Output*). Need mõjutavad plokkide ja funktsioonide täitmise käiku. Plokk aktiveeritakse või standardfunktsioon teostatakse, kui aktiveerimissisendi EN signaal on 1 või sellega ei ole midagi seotud. Aktiveerimisväljundi ENO signaal muudetakse nulliks vea ilmnemisel ploki või standardfunktsiooni täitmisel isegi siis, kui aktiveerimisisendi EN signaal on 1. Kui aktiveerimissisendi EN signaal on 0, siis plokki ei aktiveerita või standardfunktsiooni ei täideta ning aktiveerimisväljundi ENO signaal jääb 0 [12].
Oluline on teada, et PLC töötamise ajal (CPU on TÖÖ režiimis) peavad kõik programmi aktiveeritavad ja töötavad plokid olema laetud PLC'sse, vastasel korral programmi täitmine katkestatakse ja CPU läheb STOPP režiimi.

6.2.3 Ploki töö lõpetamine

Standard IEC 61131 ja STEP 7 kasutab FC'des või FB'des oleva programmi täitmise tingimuseta või tingimuslikuks katkestamiseks käsku RET. See lõpetab plokis oleva programmi täitmise ja naaseb programmi täitmisel tagasi plokki, millest aktiveeriti nüüd töötamise lõpetanud ploki, ning programmi täitmist jätkatakse vana plokis pooleli jäänud kohast.
Joonisel 5.27 on esitatud plokkide töö lõpetamise funktsioon FBD, LAD ja SCL keeltes. See võimaldab katkestab plokis oleva programmi täitmist enneaegselt. RET funktsiooni puhul katkestatakse programmi täitmine kui sisse tulev RLO biti signaal on loogiline 1. Kui RET funktsioonile ei panda mingit tingimust ette, siis katkestab see koguaeg programmi täimist antud kohas plokis. RET funktsiooni kohale tuleks kirjutada kas

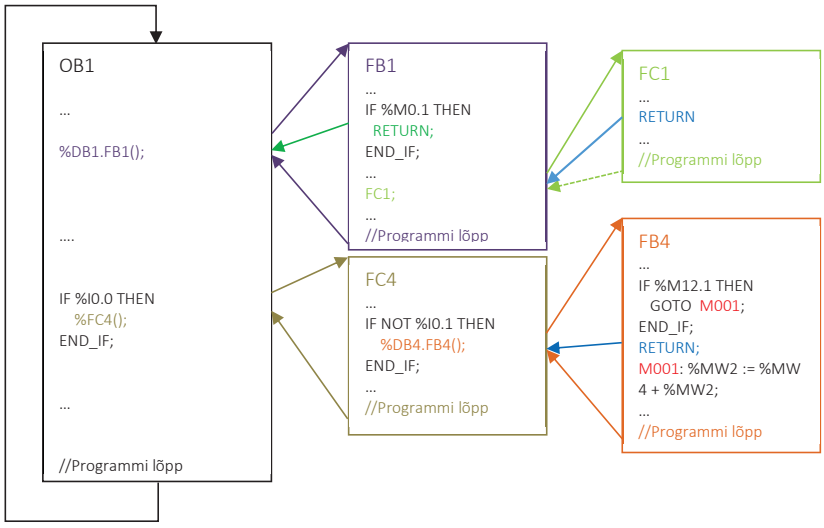
TÕENE (inglise keeles TRUE), VÄÄR (inglise keeles FALSE) või operandi nimi. Need ei mõjuta RET funktsiooni täitmist, kuid tuleb kirjutada.




```
//Ploki programmi täitmise lõpetamine tingimuse alusel
IF "Input0" THEN
   RETURN;
END_IF;
...
//Ploki programmi lõplik lõpetamine
RETURN;
```

Joonis 5.27. Programmi katkestamise funktsioon FBD, LAD ja SCL keeltes

5.28 esitab PLC näidisprogrammi SCL keeles, kus operandide tähistamiseks on kasutatud absoluutaadresse. Reaalsuses ei kasuta STEP 7 SCL vaid hoopis nende sümboleid (nimesid). Tegelikkuses ei sa SCL's kasutada FB1 absoluutaadressi, vaid selleks kasutatakse plokiga seotud DB1 nime koos sulgudega (5.26 c).
Joonisel 5.28 olev programm on jagatud erinevate plokkide vahel ära. Selles programmis on kasutatud hüppe-, plokkide aktiveerimis- ja nende töö lõpetamisfunktsioone. Algul aktiveeritakse OB1 kaudu plokk FB1 ja selle sees olevat programmi täidetakse iga töötsükkel. Plokis FB1 oleva programmi täitmine katkestatakse käsu RETURN poolt enneaegselt kui mälubitt M0.1 signaal on loogiline 1. Kui RETURN käsk ei katkesta FB1 ploki sees olevat programmi täitmist, siis täidetakse (aktiveeritakse) ka ploki FC1 sees olevat programmi sinna maani kuni jõutakse käsuni RETURN käsk. See katkestab alati (tingimusteta) plokis FC1 oleva programmi täitmise enne kui jõutakse programmi lõppu antud plokis.
Plokid FC4 ja FB4 aktiveeritakse, kui nende aktiveerimistingimused on täidetud (joonis 5.28). See tähendab, et FC4's oleva programmi täitmise alustamiseks (ploki aktiveerimiseks) peab sisendi I0.0 signaal olema loogiline 1 (OB1 kontrollitakse) ja FB5 puhul peab sisendi I0.1 signaal olema loogiline 0 (FC4 kontrollitakse). FB4's oleva programmi täitmine katkestatakse käsu RETURN poolt, kui ees pool ei teostata hüpet (GOTO M001). See tähendab, et IF tingimus ei ole täidetud (mälubiti M12.1 signaal on loogiline 0) ja plokis FB4 oleva programmi täitmine lõpeb enne ploki lõppu jõudmist.



Joonis 5.28. SCL keeles koostatud PLC programm, mis on jaotatud erinevateks plokkideks

6.3 Lisa funktsioonid SCL keeles programmi juhtimiseks

Järgmised käsud (laused) võimaldavad muuta programmi täitmise struktuuri.
CASE lause (joonis 5.29) on tingimuslause mida kasutatakse kui operandi (muutuja) eri väärtuste puhul soovitakse teha erinevaid tegevusi või täita erinevaid programmilõike. Väärtused saab anda ette üksikute väärtustega või vahemikega. Iga väärtuse juures olev programmilõik võib koosneda rohkem kui ühest tegevusest (programmi reast).
Joonisel 5.29 parempoolses koodis kontrollitakse muutuja #Mem1 väärtust. Vastavalt tulemusel omistatakse muutujatele "Output0" ja "Output1" mingid loogilised väärtused. Kui #Mem1 väärtus on 1, siis omistatakse mõlemale muutujale loogiline 0. Kui #Mem1 väärtus on 2 või 3, siis aktiveeritakse ainult muutuja "Output0". Kui #Mem1 väärtus jääb vahemikku 4 kuni 9 (mõlemad piirväärtused kaasaarvatud) vahele, siis aktiveeritakse ainult muutuja "Output1". Kui muutuja #Mem1 väärtus ei lange kokku eespool toodud väärtustele, siis aktiveeritakse mõlemad väljundid ning muutujale #Mem1 antakse väärtuseks 0. Ehk siis täidetakse ELSE järel olevat programmilõiku.

CASE operand OF
  Väärtus1:
  Programmilõik1;
  Väärtus2 .. Väärtus 3:
  Programmilõik2;
ELSE
  Programmilõik3;
END_CASE;
	CASE #Mem1 OF
	  1: "Output0" := 0;
	  "Output1" := 0;
	  2, 3: "Output0" := 1;
	  "Output1" := 0;
	  4..9: "Output0" := 0;
	  "Output1" := 1;
	ELSE
	  "Output0" := 1;
	  "Output1" := 1;
	  #Mem1 := 0;
	END_CASE;

Joonis 5.29. CASE lause näide

CASE lause kasutamisel on soovitatav vaadata, et väärtused (või nende vahemikud) ei kattuks. Alati tuleks kasutada ELSE osa kui operandi väärtus väljub eelpool määratletud tingimustest (väärtustest, nende vahemikest).
FOR tsükkel on kindla korduste arvuga tsükkel, kus soovitakse mingit programmilõiku korrata teatud arv kordi. Korduse loendamine toimub tsüklikäsu enda sees (selleks kasutatakse operandi). Siin peab teadma mitu korda soovitakse programmilõiku korrata. Tsükli kordamine toimub nii kaua kuni ületatakse tsükli lõppväärtus.

FOR tsüklioperand := algväärtus TO lõppväärtus [BY samm] DO
  Korratav programmilõik;
END_FOR;
	FOR #Mem1 := 0 TO 10 BY 1 DO
	  "ArrOutA"[#Mem1] := 0;
	END_FOR;

Joonis 5.30. FOR tsükli näide

Joonisel 5.30 esitatud programmi lõigu abil nullitakse massiivi ArrOutA väärtused. Seda tehakse nii kaua kuni tsüklioperandi väärtus on suurem kui 10 (tsükli lõppväärtus). Tsükli loendamist alustatakse nullist (algväärtust) ja suurendatakse ühe (sammu väärtuse) võrra. Sammu osa (nurksulgude sees ole osa) võib jätta välja, kui tsüklioperandi väärtust suurendatakse 1 võrra. Antud näites kasutatakse tsüklioperandi #Mem1 väärtust massiivi elemendi koha viitamiseks.
FOR tsükli kõrval on olemas **WHILE** ja **REPEAT** kordustsüklid (5.31), mis töötavad mingi tingimuse kontrollimisel. WHILE kordustsükkel töötab niikaua kuni kordamise tingimus saab valeks (VÄÄR). REPEAT kordus töötab kuni kordamise tingimus saab tõeseks (TÕENE). Tingimuseks kasutatakse loogikatehteid mille lõplikus tulemuseks saab olla kas ainult TÕENE (loogiline 1) või VÄÄR (loogiline 0).

WHILE „korduse alustamise tingimus“ DO
  Korratav programmilõik;
END_WHILE;
	REPEAT
	  Korratav programmilõik;
	UNTIL „korduse lõpetamise tingimus“
	END_REPEAT;

Joonis 5.31. WHILE-DO ja REPEAT-UNTIL funktsioonide ülesehitus

WHILE tsüklit, kus enne esimese (ja enne iga järgmise) korduse algust kontrollitakse tsükli kordamise alustamise tingimust, nimetatakse alustamistingimuse kontrolliga e eelkontrolliga tsükliks. Käskude DO ja END_WHILE vahele jäävat programmilõiku ei täideta kui tingimus on juba esimesel kordusel VÄÄR.
REPEAT tsüklit kutsutakse järelkontrolliga tsükliks, kuna alles korduse lõpus kontrollitakse tsükli kordamise lõpetamise tingimust. See tähendab et kui korduse lõpetamise tingimus on juba alguses TÕENE, siis täidetakse käskude REPEAT ja UNTIL vahele jäävat programmilõiku ikkagi üks kord. Kuid teist korda ei korrata.

```
WHILE #Mem1 <= 10 DO
   "ArrOutA"[#Mem1] := 0;
   #Mem1 := #Mem1 + 1;
END_WHILE;
```

```
PEPEAT
   "ArrOutA"[#Mem1] := 0;
   #Mem1 := #Mem1 + 1;
UNTIL #Mem1 > 10
END_REPEAT;
```

Joonis 5.32. Näited WHILE-DO ja REPEAT-UNTIL funktsioonide kasutamisest

Joonisel 5.32 on tehtud sama programmi, mis joonisel 5.30. Ehk massiivi väärtusi nullitakse. Mõlemad kordused töötavad niikaua kuni muutuja #Mem1 väärtus saab 11. Esimese puhul muutub korduse tingimus valeks ja teise puhul tõeseks.

```
FOR #Mem1 := 0 TO 10 BY 1 DO
   IF "ArrOutA"[#Mem1] = 0 THEN
      CONTINUE;
   END_IF;
   "ArrOutA"[#Mem1] := 0;
END_FOR;
```

Kontrolleri programmi koostamisel ei ole soovita kasutada WHILE ja REPEAT kordus-tsüklid, kuna nendega koostatud kordusest ei pruugi PLC välja tulla ja võib jääda sinna lõpmatuseni mingit programmilõiku täitma. Selle vältimiseks tuleks nende sisse ehitada mingisugune korduse katkestamine võimalus mis kasutab käsku **CONTINUE**. See käsk lõpetab mis tahes kordustsükli jätkates korduse järel tuleva programmi täitmist. CONTINUE käsku saab kasutada ainult kordustsüklite sees.

Joonis 5.33. Näide CONTINUE käsu kasutamise kohta

5.33 esitab teostatud FOR tsükli koos CONTINUE käsuga. Siin nullitaks FOR tsükli abil massiivi "ArrOutA" väärtusi kuni kõik 10 elementi on saanud väärtuseks nulli. Samas on korduse sees tingimus, mis võimaldab käsu CONTINUE abil katkestada massiivi nullimist. See katkestatakse kui mingi massiivi elemendi väärtus on juba null.
Kordustsükleid on võimalik panna üksteise sisse nagu CASE ja IF tingimuslauseid. CONTINUE käsk töötab ainult selle korduse juures mille sees seda kasutatakse. See tähendab, et iga erineva korduse jaoks on vaja kasutada eraldi CONTINUE käsk, mis asub ainult selle korduse sees. Kui ühe korduse sisse koondada mitu CONTINUE käsku, siis need töötavad ainult selle kordusega.

6.4 Ülesanded

Peatükkis 4.7 on kirjeldatud nuppude ja lampide süsteemi, mille kohta on järgnevad ülesanded koostatud.

6.4.1 Ühe nupuga ühe lambi lülitamine

Koostada programm, mis lülitaks esimesel S3 nupu vajutusel lambi H3 sisse ja teisel vajutusel välja.
Lülitamine peab olema korratav ja nupu all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist lambi töös.

6.4.2 Ühe nupuga kahe lambi lülitamine

Koostada programm, mis juhib lampe H1 ja H2. Esimesele S1 nupu vajutusel lülitatakse lambi H1 sisse. Teisel vajutusel lülitatakse lamp H1 välja ja lamp H2 lülitatakse sisse. Kolmandal vajutusel lülitatakse lambid H1 ja H2 välja.
Lülitamine peab olema korratav ja nupu all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist lampide töös.

6.4.3 Ühe lambi vilgutamine

Koostada programm, mis vilgutab lampi H3 sagedusega 1 Hz kui nuppu S2 ei hoita all. S2 nupu all hoidmisel peab lamp H3 olema kustus. Kasutada selleks ühte taimerit.

6.4.4 Kahe nupuga ühe lambi lülitamine

Koostada programm, mis lülitab lambi H1 sisse, kui hoida S1 nuppu all. S1 nupu vabastamisel lülitatakse lamp H1 välja. Kui S1 nuppu on vajutatud rohkem kui 5 korda, siis ei tohi lamp H1 sisse lülituda.
Pärast S2 nupu vajutamist peab lamp H1 jälle töötama nii nagu kirjeldatud eespool.
Lülitamine peab olema korratav.

6.4.5 Kahe nupuga kolme lambi juhtimine

Koostada programm, mis lülitab esimesel S1 nupu vajutusel lambi H1 sisse, teisel vajutusel lambi H2 sisse, kolmandal vajutusel lambi H3 sisse ja neljandal vajutusel kõik lambid välja.
Kui S3 nuppu hoitakse all, siis S1 nupu vajutus ei tohi mõjutada lampide tööd.
Korraga tohib põleda vaid üks indikaatorlamp. Lülitamine peab olema korratav. Nuppude all hoidmisel ei tohi esineda vilkumist.

6.5 Teadmiste kontroll

1) Akumulaator on ….

   a) keskprotsessori register, millist kasutatakse andmete töötlemisel puhvrina.

   b) PLC register, milles programmi töö lõpptulemus salvestatakse.

   c) mälupiirkond milles salvestatakse kontrolleri programm.

   d) signaali muutus väärtuselt „0“ väärtusele „1“.

   e) vedeliku kogumise seade.

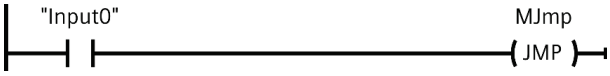
2) Milliste andmetüüpide puhul ei saa kasutada funktsiooni MOVE?

   a) BYTE
   b) BOOL
   c) WORD
   d) INT
   e) REAL

3) Millist funktsiooni tuleks kasutada LAD keeles, kui mingit väärtust soovitakse kopeerida rohkem kui ühte massiivi elementi?

   a) MOVE
   b) RET
   c) MOVE_BLK
   d) FOR
   e) FILL_BLK

4) Allpool esitatud hüppe funktsiooni täidetakse …



   a) alati, kui enne seda on kuskil täidetud mingi tingimus.
   b) ainult siis, kui selle ees olev tingimus on väär.
   c) alati, kui mingeid tingimusi ei ole enne seda.
   d) ainult siis, kui selle ees olev tingimus on tõene.
   e) mitte kunagi.

5) Kuidas mõjutab aktiveerimissisend EN plokkide ja funktsioonide täitmist?

   a) Kui mingi tingimus on sisendi külge ühendutud, siis aktiveeritakse ja täidetakse plokke ja funktsioone, kui tingimuse tulemus on tõene.

   b) Kui EN sisendi külge ei ole ühendatud ühtegi tingimust, siis ei täideta antud plokke ja funktsioone.
   c) Ei mõjuta üldse.
   d) Kui mingi tingimus on sisendi külge ühendutud, siis aktiveeritakse ja täidetakse plokke ja funktsioone, kui tingimuse tulemus on väär.

e) Kui mingi tingimus on EN sisendi külge ühendutud, siis aktiveeritakse ja täidetakse plokke ja funktsioone kogu aeg.

6) Millise LAD keele funktsiooniga lõpetatakse plokis oleva programmi täitmine enneaegselt?
   a) CONTINUE
   b) GOTO
   c) RET
   d) RETURNE
   e) JMP

7) Kuidas kutsutakse REPEAT tsüklit veel?
   a) Eelkontrolliga kordustsükkel
   b) Kordusega kordustsükkel
   c) Kordustsükkel
   d) Järelkontrolliga kordustsükkel

8) Mis puhul lõpetatakse WHILE kordustsüklis oleva programmilõigu täitmine?
   a) Kui selle juures kasutatava tingimuse tulemus on väär.
   b) Kui alguses on tingimuse tulemus tõene ja see muutub programmi täitmisel valeks.
   c) Kui selle juures kasutatava tingimuse tulemus on tõene.
   d) Kui alguses on tingimuse tulemus väär ja see muutub programmi täitmisel tõeseks.

7 MATEMAATILISED JA TEISENDUSFUNKTSIOONID

Matemaatiliste funktsioonide teostamisel kasutatakse ainult numbrilisi muutujaid ja/või arve (konstant). Arvu tüübiks võib olla kas täis- või reaalarv. Kahendarvu kujul esitatud täisarvu ees võib olla märk (- või +) või mitte. Täisarvulised muutujaid deklareeritakse andmetüübiga SInt, USInt, Iint, UInt, DINT või UDInt. Reaalarvud on komakohaga arvud, millel on ees arvu märk. Reaalarvud deklareeritakse andmetüübiga Real ja LReal. Tabelis 7.1 on toodud numbrilised andmetüübid, nende määramispiirkond, bittide arv (kui suurt ala vajavad mälus) ja konstandi näide (nii nagu neid tuleb kirjutata kasutaja programmis). Täpsemalt võib lugeda andmetüüpide kohta pt 2.5.

Tabel 7.1. STEP 7 matemaatiliste funktsioonidega kasutatavad andmetüübid

Andmetüüp	**SInt**	**USInt**	**Int**	**UInt**
Piirkond	-128 .. 127	0 .. 255	-32768 .. 32767	0 .. 65535
Mäluala	8 bitti = 1 bait	8 bitti = 1 bait	16 bitti = 1 sõna	16 bitti = 1 sõna
Konstandi kirjutamise näide	-30	150	-4 567	45 000
Selgitus	Märgiga väike täisarv (Signed Small Integer)	Märgita väike täisarv (Unsigned Small Integer)	Märgiga täisarv (Signed Integer)	Märgita täisarv (Unsigned Integer)
Andmetüüp	**DInt**	**UDInt**	**Real**	**LReal**
Piirkond	32 bitti = 2 sõna	32 bitti = 2 sõna	32 bitti = 2 sõna	64 bitti = 4 sõna
Mäluala	-2147483648 .. 2147483647	0 .. 4294967295	±3.402823e+38 .. ±1.175495e-38	±1.7976931348623158e+308 .. ±2.2250738585072014e-308
Konstandis kirjutamise näide	-2 546 854	2 500 000 000	1.346e+13	1.452e-50
Selgitus	Märgiga topelt täisarv (Signed Double Integer)	Märgita topelt täisarv (Unsigned Double Integer)	IEEE koma-kohaga arv	IEEE koma-kohaga arv

7.1 Aritmeetilised tehted

Standard IEC 61131 pakub aritmeetikatehete teostamiseks järgmisi aritmeetilisi funktsioone: liitmine (ADD), lahutamine (SUB), korrutamine (MUL), jagamine (DIV), jäägiga jagamine (MOD) ja astendamine (EXPT).

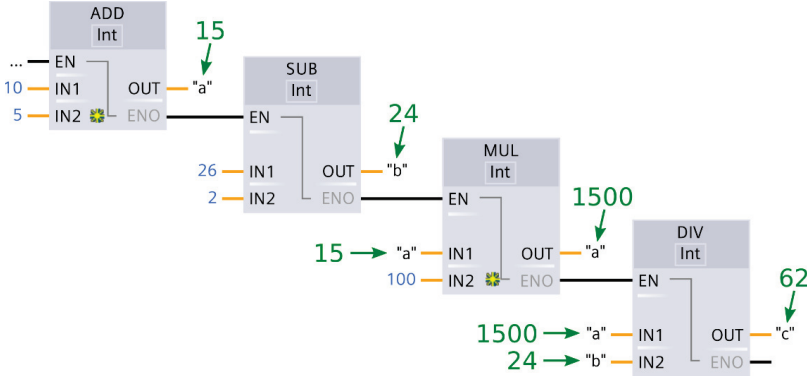
STEP 7 võimaldab teostada nelja tavalist aritmeetikatehet. Peale tavalise jagamise funktsiooni pakutakse ka jäägiga jagamist (MOD), kus tulemuseks on jagamise jääk (murdosa). Jäägiga jagamist ei saa teha Real ja LReal andmetüüpidega. Aritmeetikatehteid saab teha ainult sama andmetüübiga operandidega, seega tehte sisend- ja

väljundoperandid peavad olema sama tüüpi. Tabelis 7.2 on esitatud STEP 7 kasutatavad aritmeetikafunktsioonid.

Tabel 7.2. STEP 7 aritmeetikafunktsioonid

Funktsiooni nimi FBD ja LAD keeltes	Märk SCL keeles	Märk matemaatika tehtes	Tehe
ADD	+	+	Liitmine
SUB	-	–	Lahutamine
MUL	*	×	Korrutamine
DIV	/	÷	Jagamine
MOD	MOD		Jäägiga jagamine

Joonisel 7.1 on näide STEP 7 aritmeetikafunktsioonide kasutamisest FBD keeles. Antud näide vastab järgnevale tehtele: c = (10 + 5) × 100 / (26 - 2). Kuigi tehte vastus peaks olema 62,5, siis täisarvude kasutamise korral on vastuseks kuna tehe toimub täisarvudega, jäävad ka vastused täisarvudeks ja vastuseks on 62. Kui see on ebasoovitav tuleks kasutada andmetüüpi Real.



Joonis 7.1. Näide aritmeetikafunktsioonide kohta FBD keeles

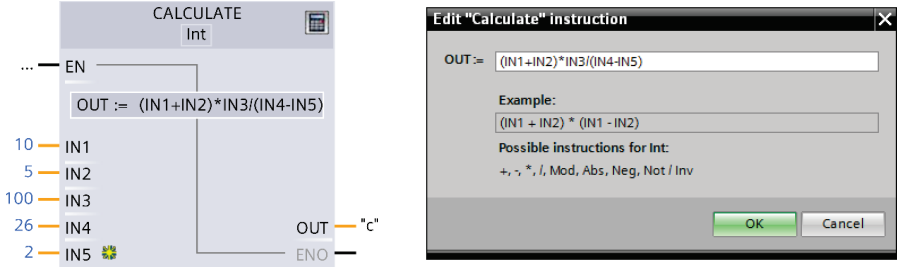
Kuigi matemaatiliste arvutuste tegemine LAD ja FBD keeles on võimalik, siis oluliselt lihtsam ja ülevaatlikum on kasutada selleks SCL keelt. Üleval pool joonisel 7.1 teostatud tehe on tehtud ka joonisel 7.2 SCL keeles (tehe on SCL keeles välja kirjutatud).

```
//Aritmeetika tehe konstantidega
"c" := (10 + 5) * 100 / (26 - 2);
```

Joonis 7.2. Näide aritmeetikatehte kohta SCL keeles

FBD ja LAD keeltes on funktsioon nimega CALCULATE (joonis 7.3). Sinna saab sisestada mingisuguse aritmeetilise tehte, mis arvutatakse selle abil välja. Valemi koostamisel tohib kasutada funktsiooni sisendi tähistusi (joonis 7.3 b). Muutujaid (operande) ja

konstante ei tohi kasutada valemis sisestuses. Allpool (joonis 7.3 b) on toodud välja funktsioonid mida saab kasutada antud tehte koostamisel. Need kehtivad andmetüübi Int kohta. Funktsiooniga saab teha tehteid ka Byte, Word ja DWord andmetüüpide jaoks.



a b

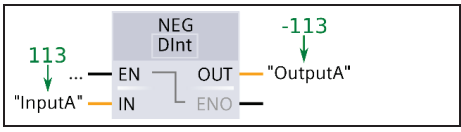
Joonis 7.3. CALCULATE funktsioon FBD keeles

7.2 Arvfunktsioonid

Arvfunktsioonide teostamiseks kasutatakse ainult üht sisendoperandi. Tulemuseks on arvfunktsiooni väärtus. Standard IEC 61131 deklareerib järgmisi arvfunktsioone: absoluutväärtus (ABS), ruut (SQRT), naturaallogaritm (LN), logaritm (LOG), eksponentsiial (EXP), siinus (SIN), koosinus (COS), tangens (TAN), argussiinus (ASIN), arguskoosinus (ARCOS) ning argustangens (ARTAN). IEC 61131 näeb ette, et arvfunktsiooni sisend- ja väljundoperandid peavad olema sama tüüpi. Enamuse arvfunktsioonide juures saab kasutada ainult Real-tüüpi muutujaid. STEP 7 sisaldab enamuse standardis IEC 61131 defineeritud arvfunktsioone – puudub ainult logaritm funktsioon.

7.2.1 Väärtuse märgi muutmine (NEG)

NEG võtab sisendi IN poolt antud väärtuse ja muudab selle märki (– muutub + ja + muutub –) (joonis 7.4). Tulemus väljastatakse väljundi OUT kaudu. Seda saab kasutada kõikide märgiga täisarvulisi ja reaalarvulisi andmetüüpe (SInt, Int, DInt, Real ja LReal). SCL keeles tuleb kasutada – märki.

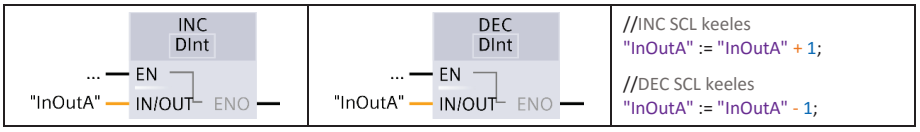



```
"OutputA" := - ("InputA");
```

Joonis 7.4. NEG funktsioon FBD ja SCL keeltes

7.2.2 Väärtuse suurendamine ja vähendamine (INC, DEC)

INC suurendab IN/OUT parameetriga seotud muutuja väärtust ühe võrra (joonis 7.5). Üks ja sama parameeter toimib sellel nii sisendina kui väljundina. Arvestada tuleb sellega, et antud funktsioonil ei ole positiivse ega negatiivse frondi tuvastust, seega see suurendab antud muutujat iga PLC töötsükli ajal, millal selle EN sisend on kõrge. Seda saab kasutada kõikide täisarvutüüpidega.

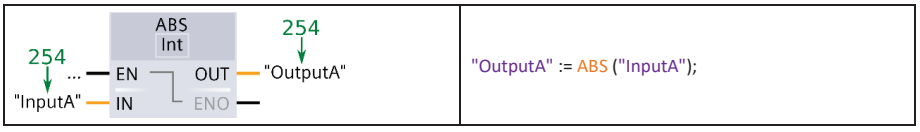


Joonis 7.5. INC ja DEC funktsioonid FBD ja SCL keeltes

DEC vähendab IN/OUT parameetriga seotud muutuja väärtust ühe võrra. SCL keeles tuleb joonisel 7.5 kujutatud tehtes kasutada + asemel – märki.

7.2.3 Absoluutväärtuse leidmine (ABS)

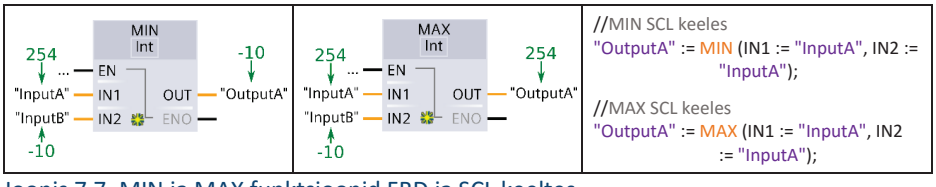
ABS funktsiooni teostamise tulemusena muudetakse sisendisse IN saadud märgiga (üks kõik kas + või -) täis- või reaalarv positiivseks täis- või reaalarvuks (joonis 7.6). See tähendab, et kasutada saab andmetüüpe SInt, Int, DInt, Real ja LReal.



Joonis 7.6. ABS funktsioon FBD ja SCL keeltes

7.2.4 Suurima ja väikseima tagastamine (MIN, MAX)

MIN funktsioon valib kahest sisendist (IN1 ja IN2) väikseima väärtuse ning väljastab selle väljundi OUT kaudu (joonis 7.7). Kasutada saab kõiki täisarvulisi ja reaalarvulisi andmetüüpe. Sisendis ja väljundis olevad andmetüübid peavad kattuma. Vea korral ei kandu signaal EN sisendist ENO väljundisse edasi.

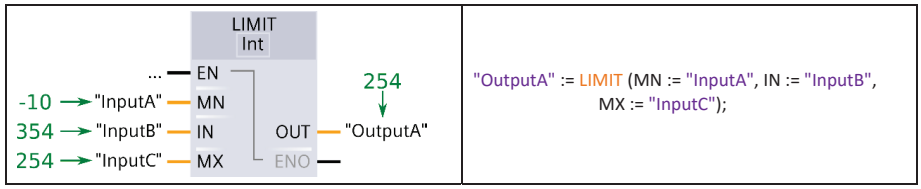


Joonis 7.7. MIN ja MAX funktsioonid FBD ja SCL keeltes

MAX funktsioon valib kahest sisendist (IN1 ja IN2) suurima väärtuse ning väljastab selle väljundi OUT kaudu.

7.2.5 Väärtuse piiramine (LIMIT)

LIMIT funktsioon võimaldab sisendi IN väärtust piirata sisendite MN (alumine piir) ja MX (ülemine piir) kaudu määratud piiridega. Kui MN < IN < MX, siis kantakse sisendi IN väärtus üle väljundisse OUT. Kui sisend IN nendele tingimustele ei vasta, siis kantakse väljundisse kas MN või MX väärtus olenevalt sellest, kumba piirväärtust ületab sisendi IN kaudu antud väärtus (7.8).

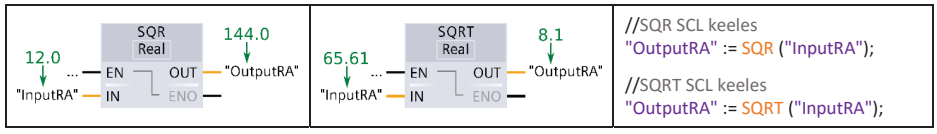


Joonis 7.8. LIMIT funktsiooni FBD ja SCL keeltes

Kasutada saab kõiki täisarvulisi ja reaalarvulisi andmetüüpe. Sisendis ja väljundis olevad andmetüübid peavad kattuma. Vea korral EN sisendist ENO väljundisse signaali edasi ei kandu.

7.2.6 Ruut ja ruutjuur (SQR, SQRT)

SQR arvutab reaalarvu ruutväärtuse (7.9).
SQRT arvutab reaalarvust ruutjuure (7.9). Funktsiooni SQRT väljundväärtus on positiivne (vastav tehe teostatakse), kui sisendoperandi väärtus on suurem või võrdne nulliga.



Joonis 7.9. SQR ja SQRT funktsioonid FBD ja SCL keeltes

Mõlemaid saab kasutada ainult Real ja LReal tüüpi muutujatega. Ülejäänud allpool tutvustatavad matemaatika funktsioonid kasutavad ka ainult REAL-tüüpi muutujaid.

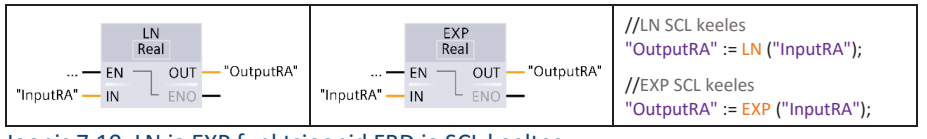
7.2.7 Naturaallogaritm ja eksponentfunktsioon (LN, EXP, EXPT)

LN funktsiooni teostamisel arvutatakse naturaallogaritm (logaritm alusel e = 2,718282) sisendis IN ette antud reaalarvust (joonis 7.10). Logaritmi väärtuse saab mingil teisel alusel (Log_b a) arvutada, kasutades seejuures naturaallogaritme, järgmise valemi abil:

$$Log_b a = \frac{Ln\ a}{Ln\ b}.$$

Logaritmi alusel 10 saab arvutada järgmise valemi abil:

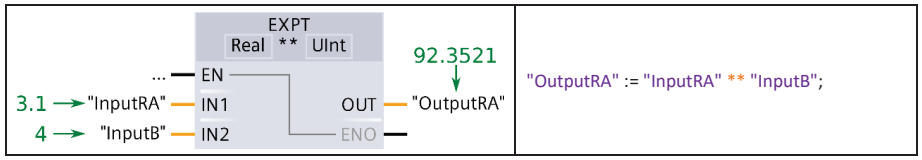
$$Log\ a = \frac{Ln\ a}{Ln\ 10}.$$



Joonis 7.10. LN ja EXP funktsioonid FBD ja SCL keeltes

EXP funktsioon võimaldab arvutada reaalarvu eksponentsiaalväärtuse alusel e^{IN} (joonis 7.10).
EXP on vastandiks naturaallogaritmile LN.

EXPT funktsioon võimaldab leida eksponentsiaalväärtuse mingil teisel alusel $IN1^{IN2}$ (joonis 7.11). Sisendiga IN1 antakse ette väärtus mida kasutatakse eksponendi alusena ja sisendi IN2 määrab astmeväärtuse e siis eksponendi. Sisendi IN2 andmetüübiks võivad olla kõik täisarvulised ja reaalarvulised andmetüübid.



Joonis 7.11. EXPT funktsioon FBD ja SCL keeltes

7.2.8 Trigonomeetrilised funktsioonid

Tabelis 7.3 on esitatud STEP 7 trigonomeetrilised funktsioonid. Antud funktsioonid töötavad ainult reaalarvudega (sisendisse IN antakse ja väljundist OUT saadakse REAL-tüüpi väärtused) (joonis 7.13). Arvfunktsioonide SIN, COS või TAN abil arvutatakse mingi nurga siinus, koosinus või tangens. Arvutamisel antakse nurk ette radiaanides. Nurga väärtus saab olla 0 kuni 2π (π = 3.14). Kui nurga väärtus (radiaanides) on suurem kui 2π (360º), siis tuleb sellest lahutada 2π seni, kuni nurga väärtus saab võrdseks või väiksemaks kui 2π.

Funktsioonide ASIN (arkussiinuse), ACOS (arkuskoosinuse) või ATAN (arkustangensi) sisendisse IN antud reaalarvust saab arvutuse tulemusena nurga väärtuse radiaanides (joonis 7.13). Funktsioonide ASIN ja ACOS puhul peab sisendoperandi IN väärtus olema suurem või võrdne -1 ja väiksem või võrdne +1. Joonisel 7.12 on esitatud funktsioonide ASIN, ACOS ja ATAN väljundväärtuste piirkond radiaanides.

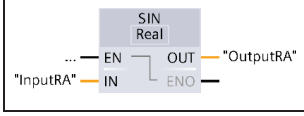
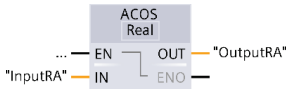
Tabel 7.3. STEP 7 trigonomeetrilised funktsioonid

Lühend FBD, LAD ja SCL keeltes	Nimi
SIN	Siinus
COS	Koosinus
TAN	Tangens
ASIN	Arkussiinus
ACOS	Arkuskoosinus
ATAN	Arkustandgens

Funktsiooni kirjeldus	Väärtuste vahemik
Funktsiooni ASIN väljundväärtuse vahemik:	$-\frac{\pi}{2} < \arcsin(IN) < +\frac{\pi}{2}$
Funktsiooni ACOS väljundväärtuse vahemik:	$0 < \arccos(IN) < \pi$
Funktsiooni ATAN väljundväärtuse vahemik:	$-\frac{\pi}{2} < \arctan(IN) < +\frac{\pi}{2}$

Joonis 7.12. Funktsioonide ASIN, ACOS ja ATAN väljundväärtused radiaanides

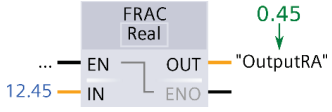
SIN, FBD keeles	ACOS, FBD keeles	SCL keeles

		//SIN SCL keeles
		"OutputRA" := SIN ("InputRA");
		
		//ACOS SCL keeles
		"OutputRA" := ACOS ("InputRA");

Joonis 7.13. SIN ja ACOS funktsioonid FBD ja SCL keeltes

7.2.9 Murdosa tagastamine (FRAC)

FRAC funktsioon väljastab väljundi OUT kaudu arvu murdosa ehk komakoha, mis on antud ette sisendisse IN kaudu. Joonisel 7.14 on siestatud arv 12,45 ja väljundi tulemuseks on 0,45. Arvu täisosa lõigatakse ära.

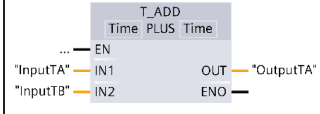
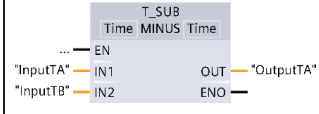
FRAC, FBD keeles	FRAC SCL keeles
	"OutputA" := FRAC ("InputA");

Joonis 7.14. FRAC funktsioon FBD ja SCL keeltes

7.3 Matemaatilised tehted aja muutujatega

Aja väärtusi saab liita (suurendada) ja lahutada (vähendada).
T_ADD funktsioon liidab sisendites IN1 ja IN2 esitatud väärtused ning väljastab saadud tulemuse väljundile OUT (joonis 7.15). Sisendi IN1 ja väljundi OUT andmetüübid on samad (tabel 7.4). Sisendi IN2 andmetüüp on ainult Time.

T_ADD, FBD	T_SUB, FBD	T_ADD ja T_SUB, SCL

		//T_ADD SCL keeles
		"OutputTA" := T_ADD (IN1 :=
		"InputTA", IN2 := "InputTB");
		
		//T_SUB SCL keeles
		"OutputTA" := T_SUB (IN1 :=
		"InputTA", IN2 := "InputTB");

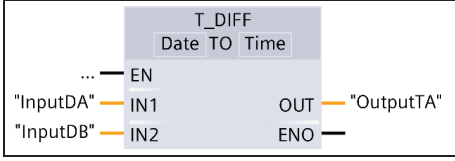
Joonis 7.15. T_ADD ja T_SUB funktsioonid FBD ja SCL keeltes

T_SUB funktsioon lahutab sisendi IN1 väärtustest sisendis IN2 olva väärtuse. Tulemus väljastatakse väljundi OUT kaudu (joonis 7.15). Sisendi IN1 väärtus peaks olema suurem kui sisendi IN2 oma. Muidu on tehte tulemuseks negatiivne väärtus, mida ei saa igal pool kasutada (nt taimerid). Siin kehtivad samad andmetüübid nagu funktsiooni T_ADD puhul (tabel 7.4).

Tabel 7.4. Funktsioonide T_ADD ja T_SUB kasutatavad sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputTA	IN1	DTL, Time, TOD	Sisend, mille aega suurendatakse või vähendatakse
InputTB	IN2	Time	Sisend, mille ajalise väärtusega suurendatakse või vähendatakse sisendi IN1 väärtust
OutputTA	OUT	DTL, Time, TOD	Väljund, mis väljastab funktsiooni tulemuse

T_DIFF funktsioon lahutab sisendi IN1 väärtustest sisendis IN2 olva väärtuse. Tulemus väljastatakse väljundi OUT kaudu (joonis 7.16). Sisendi IN1 väärtus peaks olema suurem kui sisendi IN2 oma. Muidu on tehte tulemuseks negatiivne väärtus, mida ei saa igal pool kasutada (nt taimerid). See funktsioon erineb T_SUB selles poolest, et sisendid IN1 ja IN2 omavad sama andmetüübi ning sisendite juures ei saa kasutada andmetüüpi Time (tabel 7.5). Väljundi OUT andmetüüp on piirtaud kas siis Time või Int'ga

T_DIFF, FBD keeles	T_DIFF, SCL keeles
	`"OutputTA" := T_DIFF (IN1 := "InputDA", IN2 := "InputDB");`

Joonis 7.16. T_DIFF funktsioon FBD ja SCL keeltes

Tabel 7.5. T_DIFF funktsiooni sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputDA	IN1	DTL, Date, TOD	Sisend, mille aega vähendatakse
InputDB	IN2		Sisend, mille ajalise väärtusega vähendatakse sisendi IN1 väärtust
OutputTA	OUT	Time, Int	Väljund, mis väljastab funktsiooni tulemuse

7.4 Teisendusfunktsioonid

Teisendusfunktsioone kasutatakse üht tüüpi andmete teisenduseks teist tüüpi andmeteks. Näiteks on mingis aritmeetikatehtes vaja kasutada BCD-koodis esitatud operandi. Selleks tuleb operandi väärtus BCD-koodis teisendada täis- või reaalarvu kujule. Seejärel saab täis- või reaalarvu kujul operandi kasutada aritmeetikatehtes. Kui täis- või reaalarvulist aritmeetikatehte tulemust on vaja esitada BCD koodis, siis tuleb kasutada vastupidist teisendamist.

Teisendusfunktsioone tuleks kasutada ka siis kui väärtusi tahetakse kanda üle väiksemast andmetüübist suuremasse andmetüüpi nt Int'st DInt'i. See tagab et väärtus

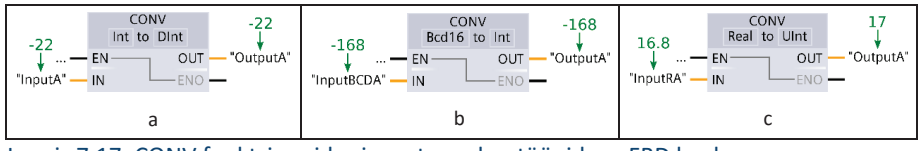
kantakse õigesti edasi ja seda ei moonutata (negatiivne väärtus jääb ikka negatiivseks väärtuseks).
Tabelis 7.6 on esitatud mõned IEC 61131 defineeritud teisendusfunktsioonid. STEP 7 on lisaks neile veel teisigi funktsioone, mis võimaldavad teisendada väärtusi ühest liigist teise.

Tabel 7.6. IEC 61131 teisendusfunktsioonide nimed ja kirjeldus

Nimi	Kommentaar
BCD_TO_INT	Teisendusfunktsiooni sisendisse antud BCD-koodis väärtus teisendatakse teostamise käigus ja väljundisse antakse juba täisarvu tüüpi väärtus.
INT_TO_BCD	Funktsiooni sisendi täisarvuline väärtus teisendatakse BCD-koodi.
INT_TO_REAL	Funktsiooni sisendi täisarvuline väärtus teisendatakse reaalarvuliseks.
REAL_TO_INT	Funktsiooni sisendi reaalarvuline väärtus teisendatakse täisarvu väärtuseks. Teisendamisel ümardatakse arv lähimaks täisarvuks.
TRUNC	Funktsiooni sisendisse antud reaalarvuline väärtus teisendatakse täisarvuliseks. Tulemuseks on reaalarvu täisosa. Komakoht kustutatakse.

7.4.1 Teisendusfunktsioon CONV

Kõige otsesema andmetüüpide teisendamisega tegeleb funktsioon **CONV**, mis võimaldab enamus andmetüüpe teisendada mistahes muuks andmetüübiks. See ei pruugi toimuda ilma kadudeta. Vigade korral ei lülitata väljundit ENO kõrgeks (loogiline 1). FBD ja LAD keeltes saab valida andmetüüpe CONV funktsiooni andmetüüpide rippmenüüst (joonis 7.17).



Joonis 7.17. CONV funktsioonid erinevate andmetüüpidega FBD keeles

Tabelis 7.7 on esitatud CONV funktsiooni juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. Tabelis 7.8 on esitatud CONV funktsioonis kasutatavad võimalikud andmetüübi kombinatsioonid FBD ja LAD keeltes.

Tabel 7.7. CONV funktsiooni sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputA, InputBCDA, InputRA	IN	DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar, BCD16, BCD32	Sisend, mille väärtust tahetakse teisendada teisele kujule
OutputA	OUT	DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar, BCD16, BCD32	Väljund, mille kaudu väljastatakse teisenduse tulemus

Kui märgiga arve kanda üle suurematele muutujatele, siis täidetake viimased tühjad bitid märgiga arvus oleva märgi biti väärtusega. Arvestada tuleb et märgiga täisarvu negatiivsete väärtusete (-20) teisendamisel märgita täisarvuks väljastatakse suvalised väärtused (65516), mida ei saa kasutada PLC programmis.

BCD arve saab teisendada ainult Int (BCD16) ja DInt (BCD32) kujule. Märgiga täisarve saab teisendada tagasi BCD arvudeks kui nende andmetüübiks on Int või DInt ning nende väärtused ei ületa BCD arvude piire (pt 2.5).

Tabel 7.8. CONV funktsioonis valitavad andmetüübi kombinatsioonid

Teisendatav	**Sisendi andmetüüp**	**Väljundi juures kasutatavad andmetüübid**
Bitimuster	DWord	Real
Märgiga täisarv	SInt, Int, DInt	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar, BCD16, BCD32
Märgita täisarv	USInt, UInt, UDInt	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar,
BCD arv	BCD16, BCD32	Int, DInt
Komakohaga arv (reaalarv)	Real, LReal	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal

SCL keeles on võimalik kasutada palju rohkem teisendusfunktsioone erinevate andmetüüpide korral. Tabelis 7.9 on esitatud SCL keele teisendusfunktsioonis kasutatavad andmetüübid.

Tabel 7.9. SCL keele teisendusfunktsioonis kasutatavad andmetüübid

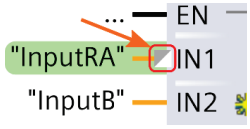
Operand	**Andmetüüp**	**Kommentaar**
InputA,	Bool, Byte, Word, DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar, BCD16, BCD32	Sisend, mille väärtust tahetakse teisendada teisele kujule
OutputA	Bool, Byte, Word, DWord, SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Real, LReal, Char, WChar, BCD16, BCD32	Väljund, millele väljastatakse teisenduse tulemus

Joonisel 7.18 on esitatud mõned teisendusfunktsiooni näited SCL keeles. Teisendusfunktsioonis kirjutatakse algusesse ja lõppu andmetüübid. Eespool on andmetüüp millest tulevat väärtus tahetakse esitada teisel kujul ja lõpus on andmetüüp milles tahetakse esitada sisse tulevat väärtust.

```
//Bitt väärtus teisendatakse ümber bait väärtuseks
"OutputA" := BOOL_TO_BYTE ("InputA");

//Topelt täisarv teisendatakse ümber BCD väärtuseks
"OutputA" := DINT_TO_BCD32 ("InputA");

//Int täisarv teisendatakse Real komakohaga arvuks
"OutputA" := INT_TO_REAL ("InputA");
```

Joonis 7.18. Teisendusfunktsiooni näited SCL keeles

Väärtuste teisendamisel tuleb jälgida et sisendis ei anta ette väärtusi mis ületavad väljundi mälumahtu (ületavad väljundi poolt vastuvõetavate väärtuste piire). Nt ei ole mõttekas DInt andmetüübiga esitatud väärtust 100000 teisendada IN andmetüüpi, kuna see ületab väljundi andmetüübi poolt määratud võimalike väärtuste vahemiku. See kantakse väljundisse edasi kui väärtusena -31072. Edasisel kasutamisel võib see tekitada konflikti PLC programmis kuna täpselt ei tea mis väärtus on salvestatud Int andmetüübiga muutujasse. Selle tulemuseks võivad olla rikkeid masinas või praaktooted.
Selle parandamiseks tuleks kasutada ENO väljundit, mis näitab kas teisendus õnnestus või ei.



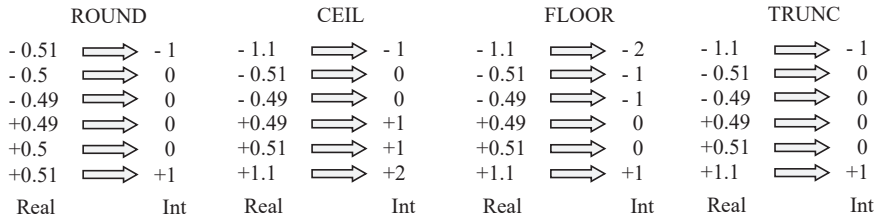
Joonis 7.19. Automaatne teisendusfunktsioon

STEP 7 FBD ja LAD keeltesse on sisse ehitatud automaatne teisendusfunktsioon, mis aktiveerub kui sisendiga või väljundiga seotud muutuja andmetüüp ei vasta funktsioonis valitud andmetüübile. See töötab ainult elementaarsete andetüüpidega ja ka mitte alati. Joonisel 7.19 on Int (märgiga täisarv) tüüpi sisendiga IN1 seotud Real (komakohaga arv) tüüpi muutuja "InputRA". Selle ette on tekkinud automaatne teisendusfunktsiooni märk, mis näitab et Real tüüpi muutuja väärtus teisendatakse Int tüüpi väärtuseks enne kui väärtus antakse edasi funktsiooni sisendile.

7.4.2 Komakohaga arvu ümardamine täisarvuks

Komakohaga arvude (reaalarvud) teisendamiseks teistesse tüüpidesse (täisarvudeks) saab kasutada peale CONV funktsiooni ka ROUND, CEIL, FLOOR ja TRUNC funktsioone.

ROUND funktsioon võimaldab ümardada komakohaga arvu lähima täisarvuni. Kui teisendatava arvu murdosa väärtus asub täpselt paaris ja paaritu arvu väärtuste vahel, siis on selle funktsiooni tulemuseks paarisarvu väärtuse (7.20). Ka CONV funktsioon töötab niimoodi.



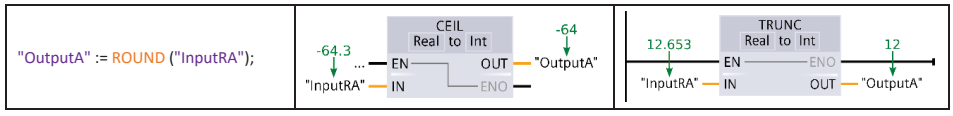
Joonis 7.20. Komakohaga väärtuse teisendamine täisarvu kujule kasutades erinevaid STEP 7 teisendusfunktsioone

CEIL funktsioon ümardab komakohaga arvu lähima suurima täisarvuni. Täisarvu väärtus võib-olla suurem või võrdne teisendamiseks kasutatava reaalarvu väärtusest (7.20).

FLOOR funktsioon ümardab komakohaga arvu lähima väiksema täisarvuni. Täisarvu väärtus on võib-olla väiksem või võrdne teisendamisel kasutatava reaalarvu väärtusest (7.20).

TRUNC funktsioon väljastab komakohaga arvu täisarvu. See ei võta murdosa arvesse (7.20).

Komakohaga arvu ei teisendata täisarvuks, kui teisendatava väärtus ületab funktsioonis määratud väljundi väärtuse piirid.

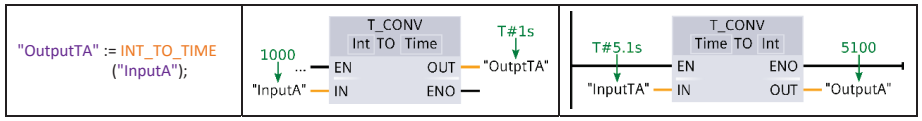


Joonis 7.21. Näiteid komakohaga arvu teisendusfunktsioonide kohta SCL, FBD ja LAD keeltes

Joonisel 7.21 on esitatud STEP 7 mõned komakohaga arvu väärtuse teisendus-funktsioonid. SCL keeles on esitatud funktsioon ROUND, FBD keeles on esitatud funktsioon CEIL ning LAD keeles funktsioon TRUNC. Teisendatav väärtus antakse ette sisendi IN kaudu ja tulemus väljastatakse väljundi OUT kaudu. Kõik komakohaga arvu väärtuste teisendamise funktsioonid näevad välja nagu kujutatud joonisel 7.21. Ainus erinevus on funktsiooni käsu nimes ja valitud andmetüüpides (rippmenüüst valitav).

7.4.3 Aja andmetüüpide teisendamisfunktsioonid

T_CONV funktsioon võimaldab teisendada ajalisi andmetüüpe (Time, Date, DTL, TOD) teisteks andmetüüpideks ja vastupidi (joonis 7.22). Ajaliste andmetüüpide enda vahel saab ka väärtusi teisendada ühest liigist teise. Sisendi IN kaud antakse ette väärtus mis teisendatakse teisele kujule ja väljastatakse väljundi OUT kaudu. Nii sisendile ja väljundile tuleb määratleda andmetüübid (valida käsitsi rippmenüüst) millest millesse väärtus teisendatakse.



Joonis 7.22. T_CONV funktsiooni näited SCL, FBD ja LAD keeltes

Tabelis 7.10 on esitatud T_CONV funktsiooni juures kasutatud muutujad, sisendid ja väljundid. Märgiga ja märgita täisarve saa teisendada ainult Time, Date ja Time_Of_Day (TOD) andmetüüpideks. Time andmetüüpi ei saa teisendad Date ja DTL andmetüüpideks. Date ei saa teisendada Time ja TOD andmetüüpideks ning TOD ei saa teisendada Date andmetüübiks. DTL andmetüüpi saab teisendada ainult Date ja TOD andmetüüpideks. SCL keeles on neid andmetüüpe rohkem (lisanduvad Byte, Word ja DWord), mida saab kasutada T_CONV funktsiooniga.

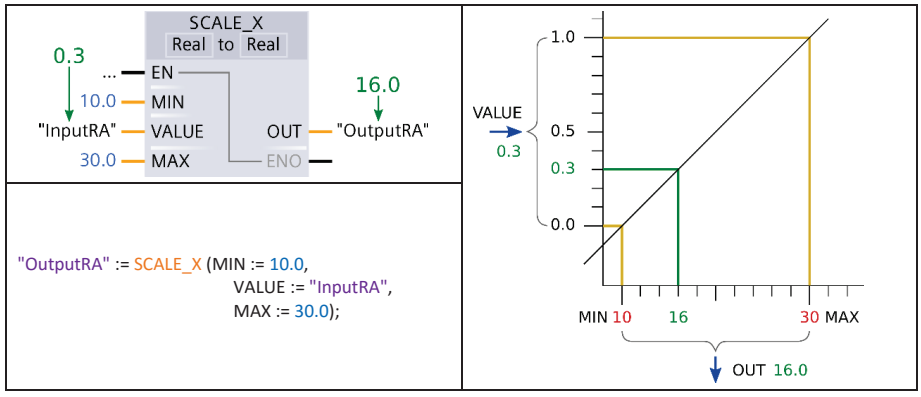
Tabel 7.10. T_CONV funktsiooni sisendid ja väljundid

Operand	Sisend/Väljund	Andmetüüp	Kommentaar
InputA, InputTA	IN	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Time, Date, TOD, DTL	Sisend, mille väärtust tahetakse teisendada teisele kujule. Kas aja väärtuseks või täisarvuks
OutputA, OutputTA	OUT	SInt, Int, DInt, USInt, UInt, UDInt, Time, Date, TOD, DTL	Väljund, mille kaudu väljastatakse teisenduse tulemus

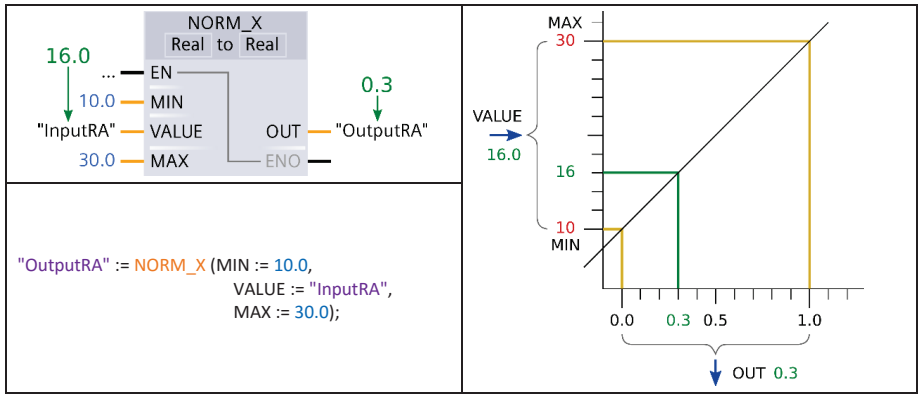
7.4.4 Skaleerimine ja normeerimine (SCALE_X, NORM_X)

Skaleerimisfunktsiooni **SCALE_X** võimaldab skaleerida sisendis VALUE antud väärtuse teatud vahemikku, mida annab määrata sisendiete MIN ja MAX olevate väärtuste abil (joonis 7.23). Sisend MIN vastab sisendväärtusele 0.0 ja sisend MAX vastab sisendväärtusele 1.0. See ei tähenda, et sisendi VALUE väärtus peaks olema kindlasti vahemikus 0..1. See võib ületada määratud piirid. Oluline on et see ei ületa väljundi OUT poolt vastuvõetava väärtuse piire. Sisendi VALUE muutuja peab olema Real või LReal andmetüüpi. Väljundi OUT muutuja võib olla nii komakohaga arv kui täisarv tüüpi. Sisendid MIN ja MAX on väljundiga OUT sama tüüpi.

Normeerimisfunktsioon **NORM_X** normeerib sisendi VALUE kaudu esitatud väärtuse vahemikku 0..1, mis on seotud lineaarselt sisendite MIN (alumine piir) ja MAX (ülemine piir) poolt defineeritud vahemikuga (7.24). Normeerimisfunktsioon NORM_X on vastand skaleerimisfunktsioonile SCALE_X. Väärtusele 0.0 vastab sisend MIN ja väärtusele 1.0 sisend MAX. Siin tuleks jälgida, et sisendi VALUE kaudu esitatud väärtus ei ületaks sisendite MIN ja MAX poolt määratud piirväärtusi. Sisendite VALUE muutuja võib olla täisarv või komakohaga arvu tüüpi. Väljundi OUT muutuja peab olema Real või LReal andmetüüpi. Sisendid MIN ja MAX on sisendiga VALUE sama tüüpi.

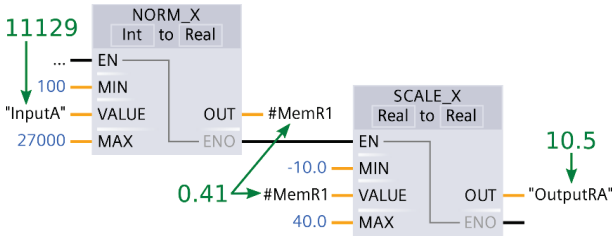


Joonis 7.23. SCALE_X skaleerimisfunktsioon FBD ja SCL keeltes



Joonis 7.24. NORM_X normeerimisfunktsioon FBD ja SCL keeltes

Kui mingit väärtust on vaja teisendada ühest vahemikus teise, siis tuleks kasutada skaleerimis- ja normeerimisfunktsiooni koos (joonis 7.25). Normeerimisfunktsioon peab olema skaleerimisfunktsioonist eespool. Joonisel 7.25 kujutatud näites teisendatakse temperatuuri andurilt saadud analoogsignaal (11129) kraadideks (10,5 ºC). Temperatuuri andur võimaldab mõõta temperatuuri -10.0 ºC kuni 40.0 ºC.



Joonis 7.25. Normaliseerimis- ja skaleerimisfunktsioonid koos

7.5 Ülesanded

Peatükkis 4.7 on kirjeldatud nuppude ja lampide süsteemi, mille kohta on järgnevad ülesanded koostatud.

7.5.1 Kolme lambi lülitamine kahe nupuga

Koostada programm, mis lülitab vaheldumisi lampisid järjekorras: lamp H1, lamp H2, lamp H3, lamp H1, jne.
S1 nupu vajutusel lülitatakse järjekorras järgmine lamp sisse. S3 nupu vajutusel lülitatakse järjekorras eelmine lamp sisse.
Algselt ei tohi olla sees ükski lamp. Korraga tohib sees olla vaid üks lamp. Lülitamine peab olema korratav. Nuppude allhoidmisel ei tohi esineda vilkumist.

7.5.2 Seadistatav ühe lambi vilkumine 1

Koostada programm, mis S1 nupu vajutusel vilgutab lampi H1 ettemääratud arv kordi. Seda ainult siis, kui rakendus ei ole seadistusrežiimis.
Kui S2 nupp on hoitud 3 s all, siis lülitub rakendus seadistusrežiimi. Lamp H1 peab hiljem (tööreżiimis S1 nupu vajutusel) nii mitu korda vilkuma kui mitu korda vajutatakse seadistusrežiimis S1 nuppu. Seadistusrežiimist annab märku vilkuv lamp H2 (sagedusega 0,5 Hz). Rakenduse seadistusrežiimist lahkutakse, kui vajutada korraks S2 nuppu.
Algselt ei tohi ükski lamp sees olla. Korraga tohib töötada ainult üks lampidest. Lülitamine peab olema korratav. Nuppude allhoidmisel ei tohi esineda vilkumist ega mitmekordset loendamist.

7.5.3 Muutuva ajaga ühe lambi töötamine

Koostada programm, mis pärast S1 nupu vajutust lülitab lambi H1 sisse 2 sekundiks. Igal järgmisel S1 nupu vajutamisel pikeneb lambi H1 töötamise aeg 0,5 sekundi võrra. Seda ainult siis kui lamp H1 ei tööta.
Pärast S3 nupu vajutamist peab indikaatorlamp H1 töötama järgmisel S1 nupu vajutamisel 2 sekundit. Ülejäänud toimub nii nagu kirjeldatud eespool.
Lülitamine peab olema korratav. Nuppude allhoidmisel ei tohi esineda vilkumist ega mitmekordset aja loendamist.

7.5.4 Seadistatav ühe lambi vilkumine 2

Koostada programm, mis S1 nupu vajutusel vilgutab lampi H1 ettemääratud arv kordi ja määratud sagedusega. Seda ainult siis, kui rakendus ei ole seadistusrežiimis.
Kui S2 nupp on hoitud 3 s all, siis lülitub rakendus seadistusrežiimi. Seadistusrežiimist annab märku vilkuv lamp H2 (sagedusega 0,5 Hz). Lamp H1 peab hiljem (töörežiimis S1 nupu vajutusel) nii mitu korda vilkuma kui mitu korda vajutatakse seadistusrežiimis S1 nuppu.
Samuti saab seadistusrežiimis muuta vilkumissagedust S3 nupu abil. Iga S3 nupu vajutus suurendab vilkumissagedust 0,5 Hz võrra. Kui seadistusrežiimis ei vajutata S3 nuppu, siis peab lamp H1 vilkuma sagedusega 1 Hz.
Rakenduse seadistusrežiimist lahkutakse, kui vajutada korraks S2 nuppu.
Algselt ei tohi ükski lamp sees olla. Korraga tohib töötada ainult üks lampidest. Lülitamine peab olema korratav. Nuppude allhoidmisel ei tohi esineda vilkumist ega mitmekordset loendamist.

7.5.5 Seadistatav kolme lambi vilgutamine

Koostada programm, mis S1 nupu vajutusel vilgutab lampisid (järjekord: H1, H2, H3) ettemääratud arv kordi. Seda ainult siis, kui rakendus on töörežiimis.
Kui S2 nupp on hoitud all 3 s, siis lülitub rakendus seadistusrežiimi. Lambid peavad hiljem (töörežiimis S1 nupu vajutusel) nii mitu korda vilkuma kui mitu korda vajutatakse seadistusrežiimis S1 nuppu vastava lambi juures. Lampisid saab seadistusrežiimis valida R3 nupu vajutusega. Seadistusrežiimi sisenedes peab juba lamp H1 valitud olema. Hetkel seadistatav indikaatorlamp peab seadistusrežiimis olema sisse lülitatud.
Rakenduse seadistusrežiimist lahkutakse, kui vajutada korraks S2 nuppu. Seadistusrežiimis viimati seadistamata jäänud lambid peavad jääma kustunuks (need ei tohi vilkuda).
Algselt ei tohi ükski lamp sees olla. Korraga tohib töötada ainult üks lampidest. Lülitamine peab olema korratav. Nuppude allhoidmisel ei tohi esineda vilkumist ega mitmekordset loendamist.

7.6 Teadmiste kontroll

1) Milline arvu väärtuste vahemik vastab andmetüübile DInt (topelttäisarv)?
   a) -32 768 kuni 32 767
   b) -214 783 648 kuni +214 783 647
   c) 0 kuni 65 535
   d) ±1.75495e-38 kuni ±3.402823e+38
   e) 0 kuni 4294967295

2) Milliseid järgmisi matemaatilisi funktsioone ei saa kasutada täisarvude juures (mitu vastust)?
   a) Liitmine
   b) Korrutamine
   c) Jäägiga jagamine
   d) Siinus
   e) Ruut
   f) Absoluutväärtus

3) Milliseid arvfunktsioone ei saa kasutada STEP 7 (mitu vastust)?
   a) Tangens
   b) Kootangens
   c) Argustangens
   d) Arguskootangens
   e) Logaritm

4) Milline mõõtühik kirjeldab funktsiooni ACOS väljundist saadavat arvu?
   a) Kraad
   b) Radiaan
   c) Täisarv
   d) Reaalarv
   e) π väärtus

5) Millise SCL keeles esitatud funktsiooniga saab teisendada topelttäisarvu väärtuse täisarvu väärtuseks?
   a) DINT_TO_INT
   b) INT_TO_DINT
   c) BCD16_TO_INT
   d) MOVE
   e) DINT_TO_BCD32

6) TRUNC funktsiooni tulemuseks on …
   a) reaalarvu täisosa.
   b) suurim täisarv, mis on väiksem kui või võrdne teisendatava reaalarvuga.
   c) lähim täisarv.
   d) väikseim täisarv, mis on suurem kui või võrdne teisendatava reaalarvuga.
   e) reaalarv.

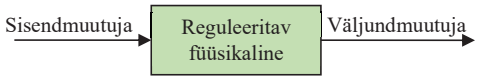
7) SCALE_X funktsioon võimaldab …
   a) teisendada reaalarvud BCD-koodi.
   b) skaleerida sisendi väärtus mingisse vahemikku.
   c) leida täisarvu vastandväärtust.
   d) muuta reaalarve märki.
   e) muundada reaalarvu täisarvuks.

8 PID-REGULAATOR

Kolmetoimelise (proportsionaalne-integraalne-diferentsiaalne) PID-regulaatori kasutamine seadmete automaatjuhtimisel algas juba möödunud sajandi alguses. Tänu oma toime (funktsiooni) suhtelisele lihtsusele ja selle intuitiivsele arusaadavusele praktikas on PID-regulaator muutunud standardseks funktsiooniplokiks paljudes tööstuskontrollerites. Koos tehnilise progressiga on ka PID-regulaator edasi arenenud. Nüüdisaegsetes tehnilistes rakendustes kasutatakse seda põhiliselt digitaalsel kujul, harvemini koos pneumaatiliste ja elektriliste komponentidega. PID-regulaatorit kasutatakse tegelikult igat liiki reguleerimisseadmetes, kas siis eraldiseisva kontrollerina või funktsiooniblokina PLC's ja samuti hajutatud juhtimissüsteemi (DCS) koosseisus. PID-regulaatorite edu suurendab ka fakt, et neid saab põhikomponendina kasutada ka keerulistes juhtimisskeemides, kus tavaline juhtimisalgoritm ei taga nõutud sooritust või kui on vaja lahendada keerukam juhtimisülesanne [13].

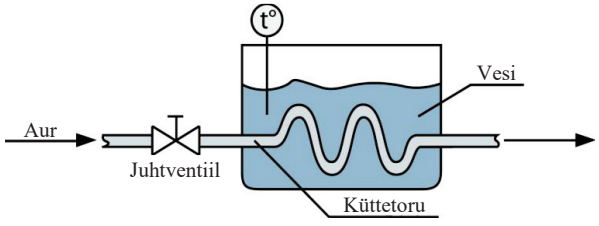
8.1 Reguleeritav süsteem

Reguleeritava füüsikalise süsteemi toimimist kirjeldatakse sisend- ja väljundsuurustega. Sisemiselt keerukat toimet kirjeldatakse väljundsuuruse sõltuvusena sisendsuurusest. Sellist füüsikalist sõltuvust võib määrata ka eksperimentaalsel teel. Ühe või mitme suuruse omavahelist sõltuvust kirjeldatakse tavaliselt füüsika seadustel põhinevate matemaatiliste võrrandite abil. Reguleeritavat süsteemi kujutatakse ka plokina koos sellega seotud nimeliste sisend- ja väljundsuurustega ja nende suuruste arvuliste väärtustega (joonis 8.1).



Joonis 8.1. Reguleeritava süsteemi plokkdiagramm

Näiteks võiks olla konstantset temperatuuri (tº) hoidev veevann. Veevanni köetakse voolavat auru sisaldava küttetoruga (joonis 8.2). Auru vooluhulka saab käsitsi seadistada reguleerimisventiili abil. Siin koosneb reguleerimissüsteem reguleerimisventiili käepidemest, mille positsioon (asend) mõjutab veevanni temperatuuri. Antud näitliku reguleerimis-süsteemi sisendsuuruseks on „reguleerimisventiili asend" ja väljundsuuruseks „veevanni temperatuur".



Joonis 8.2. Veevanni reguleerimise süsteem

Veevanni juhitavas süsteemis toimuvad järgmised tegevused:

- reguleerimisventiili tegelik asend mõjutab auru vooluhulka küttetorus;
- auruvoog (täpsemini auru hulk) määrab ära vannivette sattuva soojuse hulga;

- vannivee temperatuur tõuseb, kui veele lisanduv soojuse hulk ületab soojuse kao vanniveest ja langeb, kui lisanduv soojus on väiksem soojuse kaost.

Need järjestikused toimed annavad hea ülevaate sisend- ja väljundsuuruste vahelisest seosest.
Selleks, et reguleeritavale süsteemile valida sobiv automaatne regulaator, tuleb enne teada selle süsteemi sisemist käitumist.

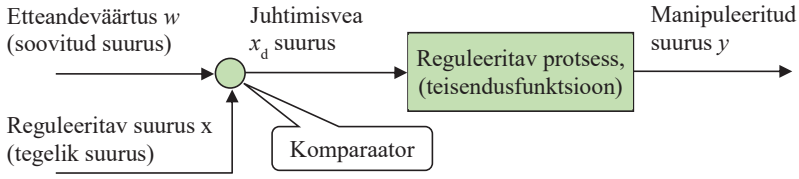
8.2 Suletud kontuuriga reguleerimismeetod

Paljudes seadmetes ja süsteemides tuleb seadistada või määrata füüsikalise protsessi suurusi nagu surve, temperatuur või voolu hulk. Need suuruste väärtused võivad muutuda. Väliste mõjurite toimel või vigade tekkides ei tohi suuruste etteantud väärtused muutuda. Sellist stabiliseerimist teostab **suletud kontuuriga regulaator**.

Suurust, mida reguleeritakse, nimetatakse **reguleeritavaks suuruseks *x***. Reguleeritavateks suurusteks võib olla näideteks [13]:

- surve pneumaatilises akumulaatoris;
- surve hüdraulilises pressis;
- temperatuur galvaniseerimise vannis;
- jahutusvedeliku voolukiirus soojusvahetis;
- kemikaali kontsentratsioon segamisanumas;
- elektrilise ajamiga tööriista etteandekiirus.

Kõigepealt mõõdetakse reguleeritavat füüsikalist suurust ja väljastatakse vastav elektriline signaal, mis lubab moodustada sõltumatu suletud kontuuriga regulaatori, millega on võimalik reguleerida väljundsuurust *y*. Mõõdetud suurust *x* tuleb seejärel võrrelda soovitud väärtusega *w* või soovitud väärtuse muutumise graafikuga (joonis 8.3). Soovitud väärtust nimetatakse **etteandeväärtuseks *w***. Etteandeväärtuse ja reguleeritava väärtuse võrdluse tulemust nimetatakse **juhtimisveaks x_d**. Selle võrdluse tulemus määrab vajaliku reguleerimistegevuse.



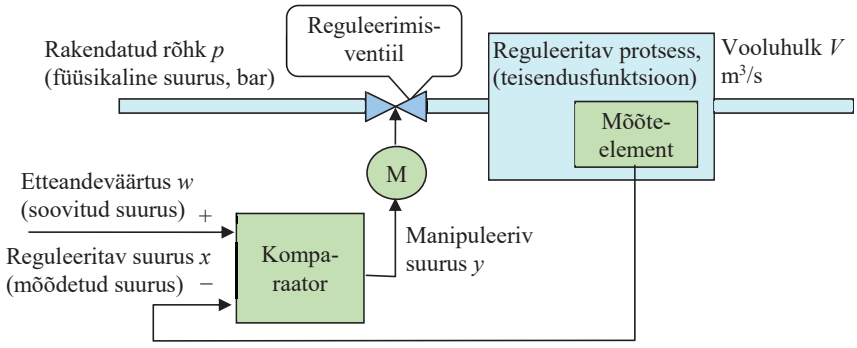
Joonis 8.3. Suletud kontuuriga regulaatori funktsioneerimise põhimõte (regulaator on osa süsteemist)

Suletud kontuuriga regulaatori ülesanne on hoida reguleeritavat suurust (protsessi) soovitud väärtusel või järgida reguleeritava suuruse soovitud väärtusi.
Igas juhitavas süsteemis võib reguleeritava suuruse väärtust mõjutada kas reguleerimissüsteem või inimene. Selline mõju lubab muuta reguleeritava suuruse väärtust vastamaks etteantud suurusele (soovitud suurus). Suurust, mis on võimeline süsteemi

mõjutama sellisel moel, nimetatakse **manipuleerivaks suuruseks *y***. Manipuleeriva suuruste näited:

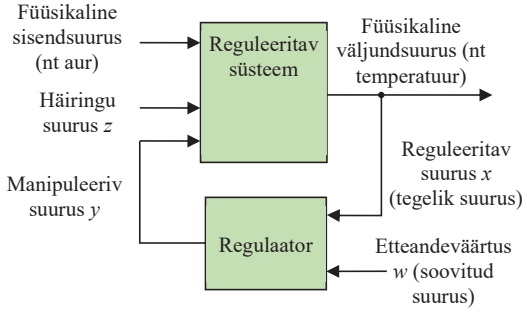
- õhutuse reguleerimisventiili asend õhumahutis;
- pneumaatilise rõhu reguleerimisventiili asend;
- elektriliste küttekehade pinge galvaniseerimise vannis;
- jahutusvedeliku reguleerimisventiili asend;
- kemikaali etteandetoru ventiili asend.

Manipuleeriva ja reguleeritava suuruse vahel võivad olla lihtsad või keerulised seosed. Need seosed tulenevad nende kahe suuruse vastastikusest füüsikalisest sõltuvusest. Reguleeritava süsteemi osa, mis mõõdab füüsikalist protsessi (vastava suuruse väärtust), nimetatakse **mõõteelemendiks** (joonis 8.4).



Joonis 8.4. Vooluhulga juhtimine suletud kontuuriga regulaatori abil

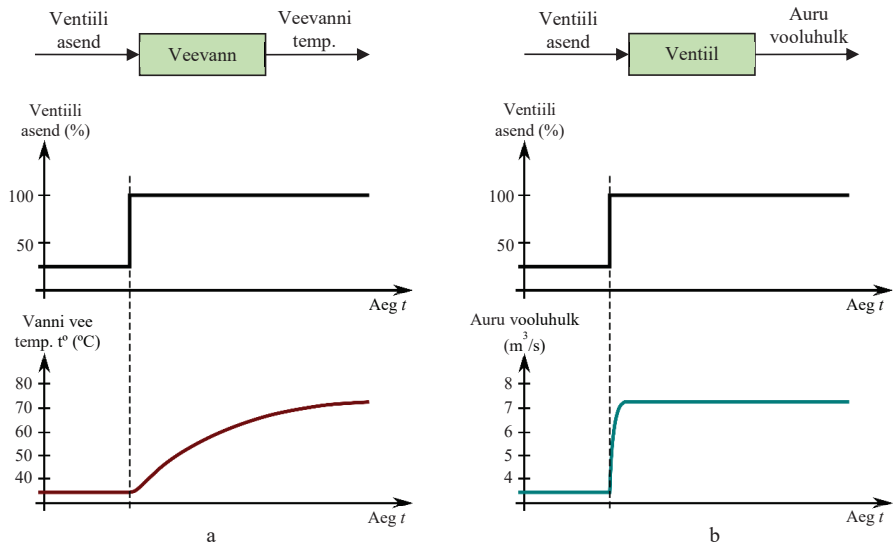
Igas reguleerimissüsteemis tekivad häiringud. Soovimatud häiringud on sageli põhjuseks, miks on vaja kasutada suletud kontuuriga reguleerimissüsteemi. Näidisrakenduses (veevann) mõjutab auru surve muutus auru vooluhulka (kiirust). Tekib vajadus muuta reguleerimisventiili asendit. Protsessiväliseid mõjutusi nimetatakse **häiringu suurusteks *z***. Suletud kontuur sisaldab kõiki vajalikke komponente (regulaator, täitur ja nendevahelised seosed) füüsikalise väljundsuuruse automaatseks reguleerimiseks (joonis 8.5).



Joonis 8.5. Suletud juhtimisahel koos regulaatoriga

Regulaatori ülesanne on hoida reguleeritav suuruse väärtus nii lähedal etteandesuurusele kui võimalik. Regulaator võrdleb pidevalt reguleeritavat suurust etteandesuurusega. Lähtuvalt võrdluse tulemusest ja sõltuvalt reguleerimise toimest, määrab ja muudab regulaator manipuleeriva suuruse väärtust.

Süsteemi kirjelduse koostamisel on tähtis kirjeldada aspekti nimega **dünaamiline toime** (nimetatakse ka **ajaliseks toimeks**). See vaade iseloomustab väljundsuuruse (reguleeritava suuruse) ja sisendsuuruse (etteandeväärtuse) vahelist ajalist seost. Eriti tähtis on teada reguleeritava süsteemi väljundsuuruse käitumist manipuleeriva suuruse muutumise korral. Igal süsteemil on oma kindel dünaamiline toime [13].
Veevanni näites (8.2) ei kutsu auruventiili asendi muutus esile väljundsuuruse (vee temperatuuri) kohest muutumist. Pigem põhjustab veevanni salvestuv soojushulk temperatuuri aeglase „roomamise“ uue tasakaaluasendini (joonis 8.6 a).
Auruhulga (auru voolukiirus korrutatud toru läbimõõduga) reguleerimise toime on dünaamiline (kiire). Reguleerimisventiili asendi muutus kutsub esile auru vooluhulga kiire muutumise, seega auru reguleerimisventiili vooluhulga väljundsignaal järgib peaaegu otsekohe ventiili ajami asendi muutust (joonis 8.6 b).

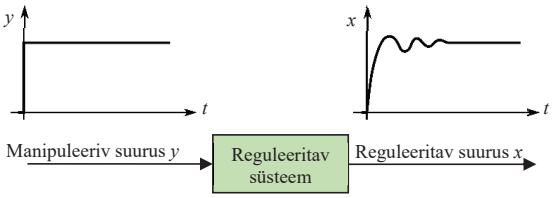


Joonis 8.6. Veevanni vee temp (a) ja ventiili (b) reguleerimissüsteemi ajalised toimed

8.3 Reguleerimissüsteemi dünaamilise toime kirjeldus

Joonisel 8.6 toodud ajaline toime eeldab sisendsuuruse väärtuse ootamatut muutumist. Sellist hüppe tekitamise meetodit kasutatakse sageli süsteemi ajalise toime määramisel. Süsteemi toimet sisendsuuruse väärtuse ootamatule muutumisele nimetatakse **hüppekajaks**. Iga süsteemi saab kirjeldada tema hüppekajaga. Hüppekaja lubab süsteemi kirjeldada ka matemaatiliste valemite abil.

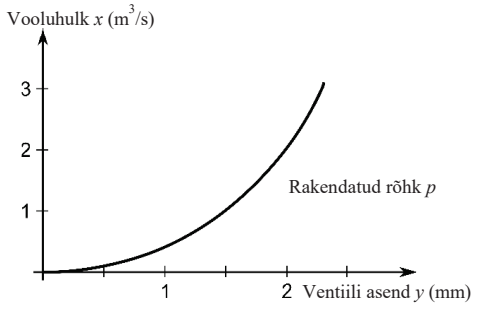
Sellist süsteemi toimet tuntakse ka dünaamilise toimena. Seda kujutab joonis 8.7. Siin manipuleeriva suuruse *y* väärtus suureneb ootamatult (vaata vasakpoolset diagrammi). Reguleeritava suuruse *x* hüppekaja näitab põgusa ülereguleerimisega seadeprotsessi [13].



Joonis 8.7. Hüppekaja

Teine käitumise karakteristik, mis iseloomustab süsteemi selle tasakaaluasendis, on **staatiline käitumine**. Süsteemi staatiline käitumine saavutatakse siis, kui suuruste väärtused ei muutu ajaliselt. Süsteem saavutab tasakaalu, kui reguleeritava suuruse (väljundsuuruse) väärtus on stabiliseerunud. Sellist süsteemi seisundit võib säilitada pikaajaliselt. Väljundsuurus on endiselt sõltuv sisendsuurusest - sõltuvust näitab süsteemi staatiline karakteristik.
Ventiili süsteemi karakteristik veeanuma näites (joonis 8.2) näitab staatilist seost vooluhulga ja ventiili asendi vahel (joonis 8.8).

Karakteristik näitab, kas süsteem on lineaarne või mittelineaarne. Kui karakteristik on sirgjooneline, siis süsteem on lineaarne. Meie ventiili süsteemi karakteristik on mittelineaarne. Paljud praktikas esinevad reguleerimissüsteemid on mittelineaarsed, kuid siiski võib süsteemis neid tihti pidada (mööndustega) lineaarseteks piirkonnas, kus nad töötavad.



Joonis 8.8. Ventiili süsteemi staatiline karakteristik

8.4 Regulaatori tüübid

Eelmistes peatükkides vaadeldi reguleeritava süsteemi seda osa, mida reguleeritakse. Selles peatükis vaadeldakse regulaatorit, mida saab teostada PLC programmiga.
Regulaator on seade suletud juhtimiskontuuris, mis võrdleb protsessis mõõdetud suurust (tegelikku suurust) etteandesuurusega (soovitud suurusega) ja seejärel arvutab ning väljastab manipuleeriva suuruse *y* väärtuse. Peatükis 8.2 oli näha, et reguleeritavatel süsteemidel on erinevad dünaamilised toimed. On süsteeme, mis reageerivad kiiresti ja on selliseid, mis reageerivad väga aeglaselt, samuti välismõju salvestavaid süsteeme [13].
Kõikides süsteemides toimub manipuleeriva väärtuse *y* muutus erinevalt, seepärast on turul erinevat tüüpi ja erineva reguleerimistoimega regulaatoreid. Programmeerija (projekteerija) ülesanne on valida reguleerimissüsteemile kõige sobivama toimega

regulaator. Regulaatori toimet iseloomustab viis, kuidas ta juhib manipuleeriva suuruse väärtust lähtuvalt määratud juhtimisveast.

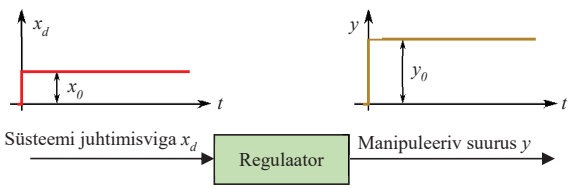
8.4.1 PID regulaatori ajaline toime

Iga reguleeritav süsteem, näiteks töömasin, omab oma ajalist toimet. Ajaline toime sõltub süsteemi või seadme ehitusest ja seda ei saa mõjutada reguleerimissüsteemi programmeerija. Reguleerimissüsteemi ajaline toime määratakse kas eksperimentaalselt, simulatsiooniga või teoreetilise analüüsi abil. Regulaator ise on samuti süsteem, mis omab oma ajalist toimet. Prorammeerija valib regulaatori ajalise toime eesmärgiga saavutada hea reguleerimistoime.
Tüüpilise pidevatoimelise regulaatori (tähis PID) ajalise toime määravad kolm tema koosseisus olevat komponenti:

- proportsionaalne komponent (P tähisega komponent);
- integraalne komponent (I tähisega komponent);
- diferentsiaalne komponent (D tähisega komponent).

8.4.2 Proportsionaalne regulaator

Proportsionaalse (P) regulaatoriga on täidesaatva suuruse signaal proportsionaalne süsteemi juhtimisveaga. Kui juhtimisvea x_0 väärtus on suur, siis on suur ka manipuleeriva suuruse y väärtus. Kui süsteemi juhtimisvea väärtus on väike, siis on väike ka manipuleeriv suurus. P regulaatori ajalise toime karakteristiku kuju on ideaalsel juhul täpselt samasugune nagu sisendsuurusel (joonis 8.9).



Joonis 8.9. P regulaatori ajaline toime

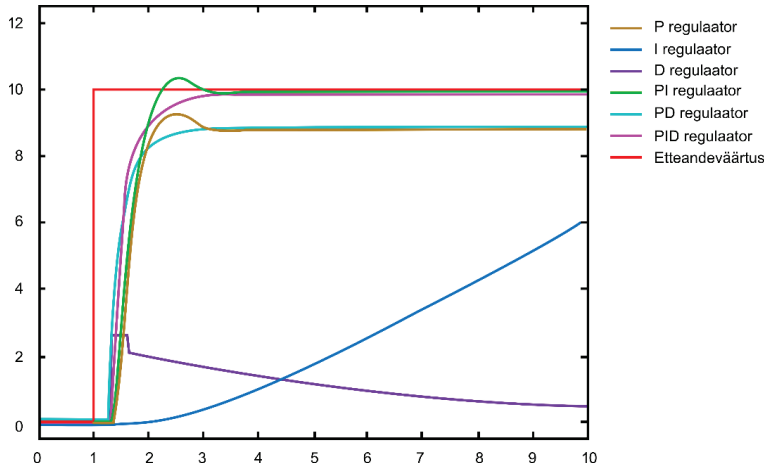
Manipuleeriva suuruse ja süsteemi juhtimisvea suhet nimetatakse **proportsionaalsuse koefitsiendiks** või **võimendusteguriks *Kp***. Neid P-regulaatori teguri väärtusi saab häälestaja seada. Koefitsient või võimendustegur määrab kindlaks, kuidas süsteemi juhtimisvea väärtusest kalkuleeritakse manipuleeriva suuruse väärtus. Proportsionaalne võimendustegur arvutatakse järgmiselt:

$$K_p = {}^{y_0}/_{x_0},$$

kus y_0 on manipuleeriv suurus ja x_0 on süsteemi juhtimisviga.

Kui proportsionaalne võimendustegur on liiga suur, siis regulaator tekitab väikese reguleerimisvea juures suuri muutusi manipuleerivas elemendis. Kui proportsionaalse võimendusteguri väärtus on liiga väike, siis regulaatori toime on liiga nõrk ning reguleerimine tavaliselt ebarahuldav.
Süsteemi juhtimisvea hüpe kutsub esile väljundsuuruse hüppe. Selle hüppe suurus sõltub proportsionaalsest võimendustegurist.

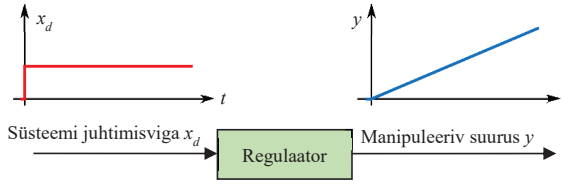
P-regulaatori tähtsaks iseloomulikuks omaduseks on see, et tingituna jäigast seosest süsteemi reguleerimisvea (st kõrvalekalde) ja manipuleeriva suuruse vahel, jääb süsteemi alati alles teatud staatiline viga (joonisel 8.10 näidatud erinevus P regulaatori ja etteandesuuruse graafiku vahel stabiilses olukorras). P-regulaator ei suuda seda staatilist viga kompenseerida.



Joonis 8.10. Erinevate regulaatorite toimet iseloomustavad siirdeköverad

8.4.3 Integraalne regulaator

Integraalne (I) regulaator liidab ajaliselt kõrvalekalde väärtusi. Ta integreerib süsteemi kõrvalekallet, mille tulemusena on manipuleeriva suuruse muutumise aste ehk muutumise kiirus (aga mitte absoluutne väärtus) proportsionaalne süsteemi kõrvalekaldega. Seda iseloomustab I-regulaatori hüppekaja. Kui süsteemi kõrvalekalle suureneb ootamatult 0'st teatud suuruseni, siis manipuleeritud suurus kasvab pidevalt (joonised 8.10 ja 8.11). Mida suurem on süsteemi kõrvalekalle ettenähtust, seda järsem on manipuleeriva suuruse kasv.



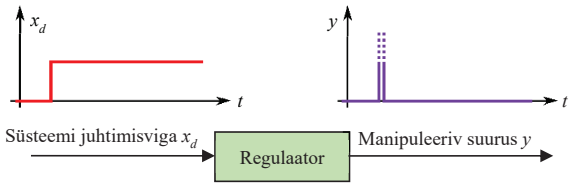
Joonis 8.11. I regulaatori ajaline toime

Sel põhjusel on I-regulaator suuteline täielikult kompen-seerima järelejäävat staatilist viga (süsteemi kõrvalekallet). Kui süsteemi kõrvalekalle on suur, muutub manipuleeriv suurus kiiresti. Selle tulemusel väheneb süsteemi kõrvalekalle ja manipuleeriv suurus hakkab muutuma aeglasemalt kuni lõpuks tasakaalu saavutamiseni.

Sellest hoolimata ei sobi puhas I-regulaator enamikule reguleeritavatele süsteemidele, kuna ta kas põhjustab suletud juhtimiskontuuris võnkumist või on reageerimine süsteemi kõrvalekaldele liiga aeglane ja see toimub liiga pika aja jooksul.

8.4.4 Diferentseeriv regulaator

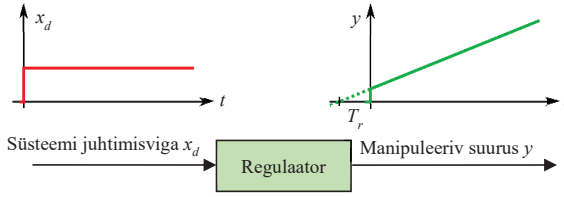
Diferentseeriv (D) regulaator hindab süsteemi juhtimisvea muutumise kiirust. Seda tegevust nimetatakse ka süsteemi kõrvalekalde tuletiseks. Kui süsteemi juhtimisviga muutub kiiresti, siis manipuleeriva suuruse väärtus on suur. Kui süsteemi juhtimisviga muutub aeglaselt, siis on manipuleeriva suuruse väärtus väike. Ainult D-komponendiga regulaator ei oma mõtet, kuna manipuleeriva suuruse väärtus esineks ainult süsteemi kõrvalekalde muutumise ajal (joonised 8.10 ja 8.12).



Joonis 8.12. D regulaatori ajaline toime

8.4.5 Mitme tüüpregulaatori kombinatsioon

PI-regulaator ühendab P- ja I-regulaatorite käitumise. See lubab ühendada mõlema regulaatori tüübi eelised: kiire reageerimise ja staatilise vea kompenseerimise. Seepärast kasutatakse PI-regulaatorit väga paljudes reguleerimissüsteemides. Lisaks proportsionaalsele võimendustegurile K_p omab PI-regulaator teist iseloomulikku väärtust T_r, mis iseloomustab I komponendi käitumist: See on lähtestamise aeg (integraalse toime aeg).



Joonis 8.13. PI regulaatori ajaline toime

Lähtestamise aeg T_r on mõõt, mis näitab kui kiiresti regulaator tekitab manipulee-riva suuruse väärtuse (lisaks manipuleeriva suuruse väärtusele, mis on tekitatud P-komponendi poolt) kompen-seerimaks reguleeritavasse süsteemi jäänud staatilist viga. Teiste sõnadega: lähtestamise aeg on ajavahemik, mille võrra PI-regulaator on kiirem kui puhas I-regulaator. PI-regulaatori käitumine on näidatud joonistel 8.10 ja 8.13.

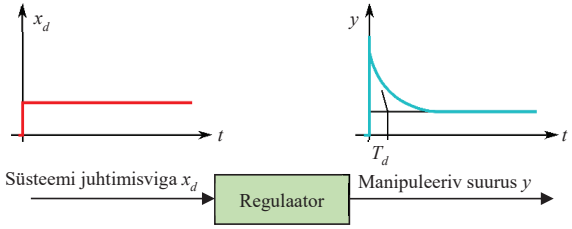
PI-regulaatori lähtestamise aeg on seotud ka proportsionaalse võimendusteguri K_p funktsiooniga, kuna manipuleeriva suuruse muutumise määr on kiirem suurema proportsionaalse võimendusteguri korral. Pika lähtestamise aja korral on integraalse komponendi mõju väike, kuna süsteemi kõrvalekalde summeerimine on aeglane. Integraalse komponendi mõju on suur kui lähtestamise aeg on lühike.

PI-regulaatori efektiivsus tõuseb proportsionaalse võimendusteguri K_p väärtuse suurendamisel ja I-komponendi suurendamisel (st lähtestamise aja väärtuse vähendamisel). Kui need kaks väärtust on valitud äärmuslikud, siis on regulaatori sekkumine liiga „järsk“ ja kogu reguleerimisahel hakkab võnkuma. Toime ei ole siis enam stabiilne. Punkt, kust

algab võnkumine, on igal reguleerimissüsteemil erinev ning see tuleb määrata seadmete kasutuselevõtu ajal.

PD-regulaator koosneb P- ja D-regulaatori kombinatsioonist. PD-regulaatori D-komponent kirjeldab süsteemi kõrvalekalde muutumise määra. Mida suurem on muutumise määr (so süsteemi kõrvalekalde mõõt teatud perioodi jooksul) seda suurem on D-komponent. Lisaks puhtale P-regulaatori toimele kutsuvad suured kõrvalekalde muutused esile lühikese, kuid suure väärtusega manipuleeriva toime. Seda väljendatakse diferentsiaaltoime ajaga T_d.

Diferentsiaaltoime (programmeerija määratud) aeg T_d on ajaline mõõt, mis näitab, kui palju kiiremini PD-regulaator kompenseerib reguleeritava suuruse muutuse süsteemis võrreldes ainult P-regulaato-riga. Manipuleeriva suuruse hüpe kompenseerib suure osa süsteemi kõrvalekaldest kiiremini, kui seda suudaks teha ainult P-regulaator. Seega D-komponent avaldub nähtavalt (tugevalt) ajavahe-mikus, mille pikkus on võrdne diferentsiaaltoime ajaga T_d (joonis 8.14).



Joonis 8.14. PD regulaatori ajaline toime

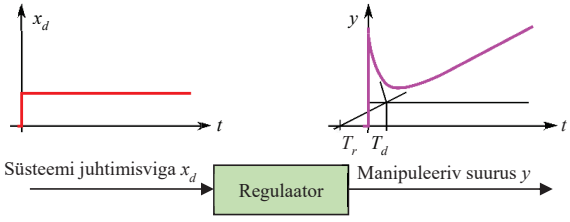
PD-regulaatorit kasutatakse harva kahe puuduse tõttu: esiteks - ta ei suuda täielikult kõrvaldada staatilist viga (joonis 8.10), teiseks - veidi ülemäärane D-komponent põhjustab kiiresti reguleerimisahela ebastabiilsuse ja sellisel juhul süsteem kipub võnkuma (ei saavuta stabiilset olekut).

Lisaks PI-regulaatori omadustele on **PID-regulaator** täiendatud D-regulaatoriga ja võtab arvesse süsteemi kõrvalekalde muutuse määra. Kui süsteemi kõrvalekalle on suur, siis D-komponent tagab momentaalse manipuleeriva suuruse muutumise. Kui D-komponendi mõju kaob kiiresti, siis I-komponendi mõju tõstab manipuleeriva suuruse väärtust aeglaset. Kui süsteemi kõrvalekalde muutus on minimaalne, siis D-komponendi käitumine ei avalda mõju.

Eelisena omab selline käitumine kiiret toimet ja kiiret kõrvalekalde kompenseerimist, kui etteandesuurus või häiresuuruste väärtused muutuvad (esinevad). Seda reguleerimisahelat on palju keerulisem häälestada, kuna ta on tundlik võnkumistele.

Joonisel 8.15 on kujutatud PID-regulaatori ajaline toime.

Tänu D-komponendile on see regulaatori tüüp kiirem kui P-või PI-regulaator (joonis 8.10). See avaldub diferentsiaaltoime ajas T_d. Diferentsiaaltoime aeg on ajavahemik, mille võrra PID-regulaator on kiirem kui PI regulaator.



Joonis 8.15. PID regulaatori ajaline toime

8.5 Häälestamise kriteeriumid ehk "Kuidas me teame, millal see on hääles?"

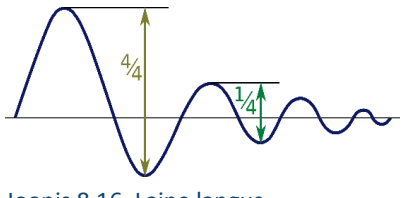
Üks kõige tähtsamaid asju suletud reguleerimisahela häälestamisel on häälestusparameetrite määramine, mida sageli ignoreeritakse.
Regulaatori häälestamine tähendab häälestamist temaga seotud tehnilisele protsessile. Regulaatori parameetrite väärtused tuleb valida nii, et saavutatakse suletud juhtimisahelas kõige soodsam (parim) reguleerimistoime, mis antud tingimustes on võimalik.

8.5.1 Ekstreemsused: ebastabiilsus või mittereageerimine

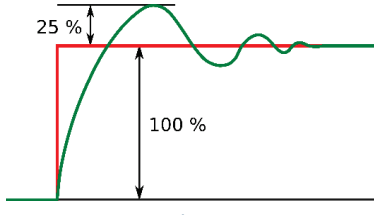
Suletud ahela toime peab jääma kahe ekstreemsuse vahele. Esiteks peab suletud juhtimisahel reageerima seadesuuruse väärtuse muutustele ja häiretele, seega peab tegelik viga või erinevus protsessi ja seadesuuruse vahel muutma regulaatori väljundis manipuleeriva signaali väärtust nii, et viga elimineeritakse. Kui P-, I- ja D-komponentide parameetri väärtused on reguleeritud nulli, siis puudub vastaval regulaatoril toime. Teine ekstreemsus on ebastabiilsus. Ebastabiilne suletud ahelaga süsteem võngub tõkestamatult. Seadeväärtuse muutmine võib põhjustada suletud reguleerimisahelaga süsteemis võnkumise, mis jääb kestma ja halvimal juhul võib võnkumise amplituud kasvada.
Suletud reguleerimisahelaga süsteemi õige häälestuse korral ei põhjusta seadesuuruse muutmine või süsteemi häired süsteemis ebastabiilsust.

8.5.2 Mitteformaalsed meetodid

On olemas mitmeid rusikareegleid suletud kontuuriga süsteemide häälestuskvaliteedi määramiseks [14].



Joonis 8.16. Laine langus veerandväärtuseni



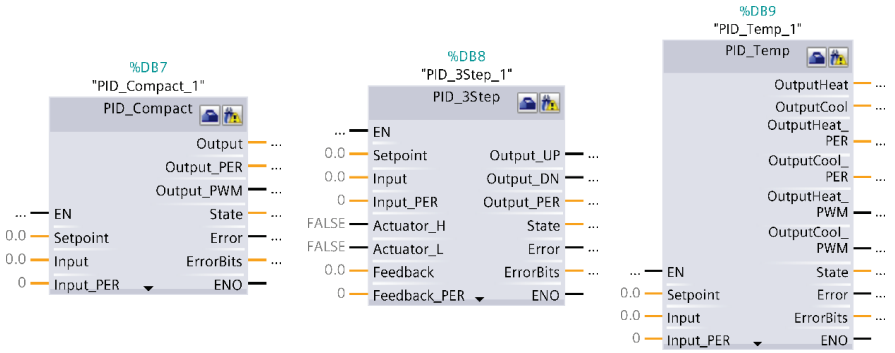
Joonis 8.17. Seadesuuruse muutusest tingitud ülereguleerimine

Traditsiooniliselt peetakse laine amplituudi langust veerandväärtuseni (Joonis 8.16) optimaalseks languse määraks. Teise laine amplitut moodustab esimese laine amplitudist veerandi. Teiste häälestusmeetodite seas tuntakse seda Ziegler Nichols`i häälestusmeetodi kriteeriumina. Ei ole olemas ühtainsat häälestusparameetrite kombinatsiooni, mis tekitavad lainet languse veerandväärtuseni. Kui proportsionaalsuse võimendustegurit suurendada ja lähtestamise määra langetada sobivas vahekorras, siis jääb languse määr samaks. Laine langus veerandväärtuseni ei ole ilmtingimata kõige parem häälestus häirete tõrjumisel või reageerimiseks muutunud etteandesuurusele, siiski on see hea kompromiss ebastabiilsuse ja süsteemi mittereageerimise vahel.

Mõnedel juhtudel on suletud ahelaga süsteemide häälestuse eesmärgiks minimeerida reguleeritava süsteemi väljundsuuruse ülereguleerimist seadesuuruse muutumise korral (joonis 8.17). Mõnikord loetakse ka 25 %'st ülereguleerimist heaks tulemuseks, kui seda ei suudeta rohkem vähendada.
Häälestusmeetodi valik sõltub suletud juhtimisahela asukohast protsessis ja tema seostest teiste ahelatega.

8.6 PID-reguleerimine S7-1200 PLC's

S7-1200 PLC'le pakutakse praeguse seisuga (Juuni 2016) kolm funktsiooni PID reguleerimise teostamiseks (joonis 8.18). Selleks on PID_Compact, PID_3Step ja PID_Temp [7]. Need paiknevad tehnoloogia funktsioonide all TIA-Portal'is.



Joonis 8.18. S7-1200 PLC PID regulaatori funktsioonid FBD keeles

Need on tarkvaralised regulaatorid, mis pakuvad PID regulaatori funktsionaalsust PLC'dele. Andmed (nt. tsükliline kalkuleerimine), mida kasutatakse PID-reguleerimisel, on säilitatud DB'des, mis on seotud vastava PID regulaatori funktsiooniga (joonis 8.18). See võimaldab kasutada sama PID regulaatorit erinevates masina/tootmisliini juhtimisprogrammi osades. DB'd peavad olema teised, need ei tohi kattuda. PID regulaatori suutlikkus ja tema kiirus sõltuvad ainult valitud CPU suutlikkusest ja juhitavate seadmete reaktsiooni kiirusest.

PID_Compact funktsiooni (universaalne PID regulaator) kasutatakse pidevatoimeliste sisend- ja väljundsuurustega tehniliste protsesside reguleerimiseks. Üldjuhul on regulaatori sisend ja väljundsuuruseks analoogväärtused. PID_Compact funktsiooni parameetrite seadistamise käigus saab valida väljundiks ka digitaalsignaali. Selle puhul väljastatakse PWM (pulsilaiusmodulatsioon) signaal, mis juhib täiturit. PID_Compact funktsioon võimaldab valida süsteemi juhtimiseks PID või PI regulaatorit.
Järgmise valemi alusel leitakse PID_Compcat funktsiooni väljund väärtus S7-1200 PLC's jaoks [7]:

$$y = K_p\left[(b*w-x)+\frac{1}{T_r*s}(w-x)+\frac{T_d*s}{a*T_d*s+1}(c*w-x)\right],$$

kus *y* on manipuleeritud suurus (PID-regulaatori väljund), *w* – etteantud väärtus, K_p – proportsionaalne võimendustegur (P komponent), T_r – integraalse toime aeg (I komponent), T_d – diferentsiaaltoime aeg, *x* – protsessi väärtus (reguleeritav suurus, tagasiside), *s* – Laplace'i operaator, *d* – diferentsiaalse osa viivituse koefitsient, *b* – proportsionaalse toime osakaal, *c* – diferentsiaalse toime osakaal. Seda kasutatakse ka PID_Temp funktsiooni juures.

PID_3Step funktsiooni kasutatakse mootoriga juhitavate täiturite reguleerimiseks, mis kasutavad töötamiseks diskreetseid signaale. Nt gaasi trassi ventiilide sulgemine ja avamine. Sisenditeks ja väljunditeks võivad olla analoog- või binaarsignaalid. Ühe analoogväljundi asemel pakutakse kahte binaarsignaali, mida saab kasutada mootori juhtimiseks. PID_3Step funktsioon omab sisendeid, mis võimaldavad piirata mootoriga täituri liikumise ulatust (millest üle ei lasta liikuda).
Järgmise valemi alusel leitakse PID_3Step funktsiooni väljund väärtus S7-1200 PLC's jaoks [7]:

$$\Delta y = K_p * s\left[(b * w - x) + \frac{1}{T_r * s}(w - x) + \frac{T_d * s}{a * T_d * s + 1}(c * w - x)\right],$$

kus Δy on manipuleeritud suurus (PID-regulaatori väljund). Ülejäänud parameetrid on kirjeldatud lahti eelmisel lehel. Järgmised juhitavad füüsikalised suurused on võimalik valida PID_Compact ja PID_3Step funktsioonide joaks:

- Üldine (general)
- Temperatuur (temperature)
- Rõhk (pressure)
- Pikkus (length)
- Voolavus (flow)
- Heledus (brightness)
- Valgustatus (illuminance)
- Jõud (force)
- Moment (torque)
- Kaal (mass)
- Vool (current)
- Pinge (voltage)
- Võimsus (power)
- Pindala (area)
- Maht (volume)
- Nurk (angle)
- Viskoossus (viscosity)
- Pöörlemiskiirus (speed)
- Kiirus (velocity)
- Tihedus (density)
- Sagedus (frequency)
- Nurkkiirus (angular velocity)

PID_Temp funktsiooni kasutatakse spetsiaalselt temperatuuriga seotud protsesside reguleerimiseks. PID_Temp funktsioon võimaldab juhtida erinevate täiturite abil soojenemis- ja jahutamisprotsesse. Viimane tuleb aktiveerida, kuna algsuses ei ole see aktiivne. Samuti tuleb valida kas soovitakse kasutada mõlema protsessi jaoks ainult ühte või kahte PID-regulaatorit. Kaks PID-regulaatorit võimaldavad reguleerida paremini temperatuuri, kuid teevad kontrolleri ka aeglasemaks.

PID_Temp funktsioonile on võimalik määrata keelatudala (DeadZone) ja juhtimisala (ControlZone). Esimese puhul ei mõjuta PID regulaator täiturite tööd. Keelatudalas väljastab PID-regulaator ainult temale etteantud väärtust *w*. Juhtimisalas töötab PID regulaator nagu vaja. Juhtimisalast üle minnes väljastab PID regulaator kas suurima soojendus- või jahutusväärtuse. Kui jahutus ei ole aktiivne, siis väljastatakse väikseim soojendusväärtus et saavutada soovitud temperatuur.

Ühe temperatuuri täituri juhtimiseks saab kasutada rohkem kui üht PID_Temp funktsiooni [7]. Nt võib määrata ja mõõta külmkambri temperatuuri, mis edastatakse esimesele PID_Temp funktsioonile. Sealt saadud tulemus edastatakse koos jahutus-vedeliku temperatuuri väärtusega järgmisele PID_Temp funktsioonile. See mõjutab otse jahutusagregaadi tööd. Esimest PID_Temp funktsiooni kustutakse ülemfunktsiooniks ja teisi alamfunktsioonideks. Ülemfunktsioon tuleb täita enne kui teised funktsioonid. Siin kohal tuleb jälgida et PID_Temp funktsioone täidetakse õiges järjekorras ja need ei ole läinud vahetusse.

Kõik kolm PID regulaatori funktsiooni omavad automaatset häälestust, mis võimaldab leida automaatselt vajalikud PID regulaatori väärtused. Automaatsel häälestusel leitud väärtusi on võimalik programmeerijal muuta et viia läbi viimane täppis häälestus. Seda tehakse siis kui automaatse häälestuse tulemusega ei olda rahul.

Kõiki kolme PID regulaatori funktsiooni tuleks täita (käivitada) iga teatud aja tagant. Kuna PID kontuur vajab reguleeritava suuruse muutuse reageerimiseks aega, siis ei ole mõtet leida PID regulaatori väljundi väärtust iga PLC töötsükli juures. See tähendab et neid ei ole mõtet kasutada OB1 seotud plokkides. Seega tuleks neid kasutada tsüklilise katketusega OB'des, mille ajaintervallid ei ole liiga lühikesed ja pikad (optimaalne aeg leitakse enamasti testimise käigus). Ülejäänud PID regulaatori funktsioonid (välja arvatud väljundi arvutamine) täidetakse iga PLC töötsükli tagant.

Rohkem infot Siemens S7-1200 PLC juures kasutatavate PID-regulaatorite kohta leiab selle ettevõtte kodulehel leitavast kasutusjuhenditest.

8.7 Teadmiste kontroll

1) Milline järgmistest tegevustest on seotud protsessi reguleerimisega (mitu vastust)?
   a) Mõõtmine
   b) Võrdlemine
   c) Kvaliteedi analüüs
   d) Reguleerimine
   e) Arvutamine

2) Kõrvalekallet etteandesuurusest, põhjustatud välistest häiringutest, kutsutakse …
   a) veaks.
   b) staatiliseks veaks.
   c) muutuse määraks.
   d) häiringuks.
   e) manipuleeritud suuruseks.

3) Mis on reguleerimissüsteemi võimetusest tulenev pidev viga, kui süsteem ei suuda hoida väljundsuurust etteandesuurusega määratud väärtusel?
   a) Häiring
   b) Staatiline viga
   c) Surve
   d) Manipuleeritud suurus
   e) Reguleeritud suurus

4) Milline järgnevatest väidetest on tõene?
   a) Häiring on soovimatu muutus, mis võib mõjutada etteandesuurust.
   b) Häiring on soovimatu muutus, mis võib mõjutada manipuleerivat suurust.
   c) Häiring on soovimatu muutus, mis võib mõjutada regulaatorit.
   d) Häiring on soovimatu muutus, mis võib mõjutada reguleeritavat süsteemi (protsessi).
   e) Häiring on soovimatu muutus, mis võib mõjutada juhtimissüsteemi.

5) Milline regulaator elimineerib staatilise vea?
   a) P
   b) PI
   c) PD
   d) D
   e) I

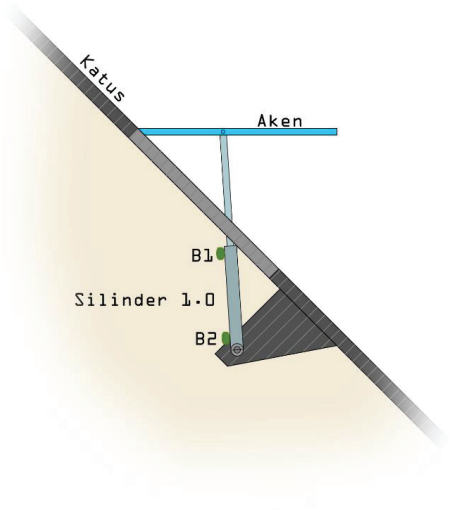
6) Millist regulaatorit nimetatakse süsteemi kõrvalekalde tuletiseks?
   a) P
   b) I
   c) PI
   d) D
   e) PD

7) Milliseid järgnevaid suurusi mõõdetakse tavaliselt protsessi reguleerimise rakendustes (mitu vastust)?
   a) Surve
   b) Viskoossus
   c) Lämmastiku koostis
   d) Vooluhulk
   e) Temperatuur

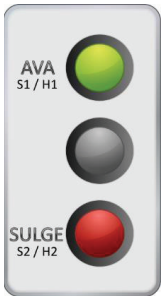
8) Millised järgmised PID regulaatorid on S7-1200 PLC's kasutatavad (mitu vastust)?
   a) PI_Compact
   b) PID_Temp
   c) PI_Temp
   d) PI_Motor
   e) PID_3Step
   f) PID_Compact

9 ÜHE PNEUMOSILINDRIGA RAKENDUSE JUHTIMINE

Ettevõtte hoone katusel on aken (joonis 9.1). See on liiga kõrgel, et seda käsitsi avada ja sulgeda. Hoonesse on juba paigaldatud suruõhuvõrk, seega saab kasutada akna avamiseks ja sulgemiseks pneumosilindrit. Ühtlasi on ettevõttel üle ka üks S7-1200 kontroller, mida antud rakenduse juhtimiseks saab kasutada.



Joonis 9.1. Rakenduse paigutus hoones katusel



Joonis 9.2. Juhtpaneel akna juhtimiseks

Juhtpaneelil (joonis 9.2) on kaks nuppu:

1. S1 – Avab akna
2. S2 – Sulgeb akna

Iga nupu all on LED indikaator, mis näitab akna olekut. Kui aken on kinni, siis põleb H2. Kui aken on täielikult avatud, siis põleb H1
Kuna aknal on kaks olekut (avatud ja suletud), siis on vaja paigutada pneumosilindri külge kaks andurit (B1 ja B2). Need näitavad akna lõpliku piirasendeid.

9.1 Pneumoskeem

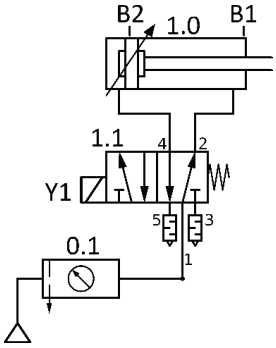
Süsteemi pneumaatilise osa (joonis 9.3) jaoks kasutatakse akna täielikuks avamiseks piisavalt pika varrega kahepoolse toimega silindrit (1.0), solenoidiga 5/2 pneumojaotit (1.1) ja õhu-allikat (0.1).

9.2 Elektriskeem

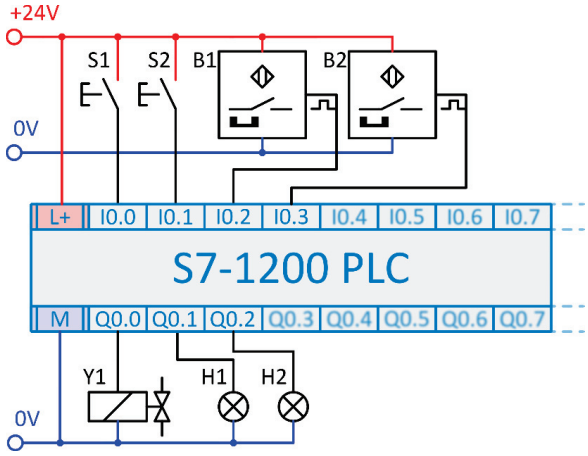
Süsteemi elektriline osa (joonis 9.4) koosneb kahest nupplülitist (S1, S2), kahest herkon-andurist (B1, B2), kahest indikaator-LEDist (H1, H2), ühest solenoidist (Y1) ja ühest Siemens S7-1200 kontrollerist (digitaal sisend-/väljundmooduli(te)ga).

9.3 PLC Programm

Kui nupp S1 on vajutatud, siis lülitatakse sisse solenoid Y1. S1 nuppu all hoides ei üritata solenoidi korduvalt sisse lülitada tulenevalt positiivse frondi (P_TRIG funktsioon) tuvastusest. P_TRIG funktsioon seab Mem1 biti kõrgeks, et mäletada eelnevalt tuvastatud positiivset fronti ja seda bitti ei nullita enne nupu S1 lahti laskmist.



Joonis 9.3. Pneumoskeem



Joonis 9.4. Elektriskeem

Kui vajutatakse nuppu S2, siis lülitatakse solenoid Y1 välja. Jällegi kasutatakse positiivse frondi tuvastust, et vältida mitmekordset väljalülitusoperatsiooni. Andurite B1 ja B2 väärtused kantakse otse üle LED'idele H1 ja H2, peaaegu nii, nagu need oleksid elektriliselt ühendatud. Muutujad, mida PLC programmis kasutatakse, on ära toodud tabelis 9.1.

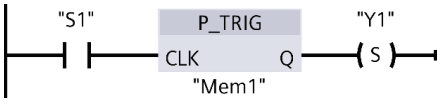
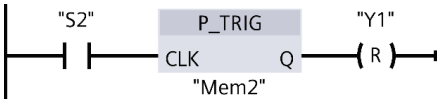
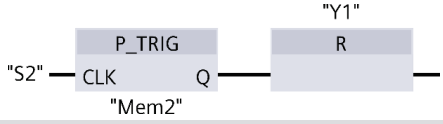
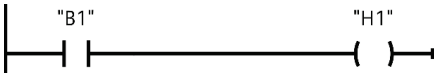
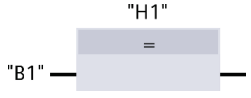
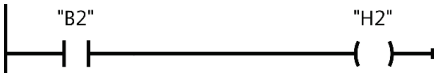
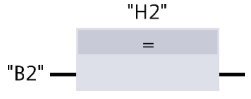
Tabel 9.1. PLC programmi muutujad

Sümbol	Aadress	Andmetüüp	Kommentaar
S1	%I0.0	Bool	Nupp – Ava aken
S2	%I0.1	Bool	Nupp – Sulge aken
B1	%I0.2	Bool	Andur B1 – Aken avatud
B2	%I0.3	Bool	Andur B2 – Aken suletud
Y1	%Q0.0	Bool	Ava aken (Solenoid)
H1	%Q0.1	Bool	Roheline LED – Aken avatud
H2	%Q0.2	Bool	Punane LED – Aken suletud
Mem1	%M0.0	Bool	Mälubitt positiivse frondi tuvastamiseks
Mem2	%M0.1	Bool	Mälubitt positiivse frondi tuvastamiseks

PLC programmid on kirjutatud SCL, LAD ja FBD keeltes. Allpool on esitatud erinevates keeltes koos kommentaaridega programmi väljatrükk.

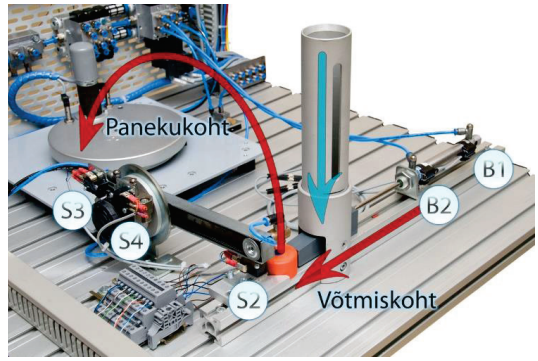
SCL (struktureeritud juhtimiskeel)

```
//Silindri väljalükkamine, kui nupp S1 on vajutatud (positiivse frondi tuvastuse kasutamine)
IF "S1" AND NOT "Mem1" THEN
   "Y1" := True;
END_IF;
"Mem1" := "S1";    //Nupu S1 olek jäetakse meelde järgmiseks PLC töötsükliks

//Silindri tagasitõmbamine, kui nupp S2 on vajutatud (positiivse frondi tuvastuse kasutamine)
IF "S2" AND NOT "Mem2" THEN
   "Y1" := False;
END_IF;
"Mem2" := "S2";    //Nupu S2 olek jäetakse meelde järgmiseks PLC töötsükliks

"H1" := "B1";      //Rohelise LED'i aktiveerimine B1 abil

"H2" := "B2";      //Punase LED'i aktiveerimine B2 abil
```

LAD (kontaktskeem)	FBD (loogikaskeem)
Network 1: *Silindri väljalükkamine*	
	
Network 2: *Silindri tagasitõmbamine*	
	
Network 3: *Roheline LED*	
	
Network 4: *Punane LED*	
	

10 KAHE PNEUMOSILINDRIGA RAKENDUSE JUHTIMINE

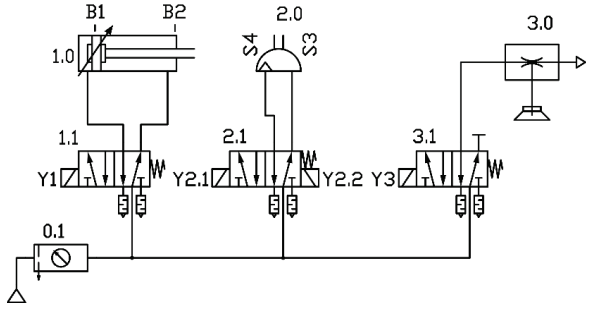
Rakenduse näites (10.1) lükkab kahepoolse toimega silinder toorikud ükshaaval välja ning pöördsilinder liigutab toorikuid iminapa abil tõstvat hooba. Pärast tooriku üles tõstmist pannakse see teisele poole maha. Programm töötab ainult ühe tsükli, kuna teisel pool pole toorikute eest äravõtmist. Väikese muudatuse abil saab selle panna tööle ka automaat režiimis (mitu tsüklit tehakse järjest).



Joonis 10.1. Rakenduse seadmete paigutus

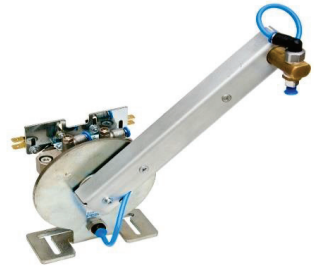
10.1 Pneumoskeem

Rakenduse pneumaatikaosa (10.2) koosneb kahe-poolse toimega lineaar-silindrist (1.0) (10.3), kahepoolse toimega pöörd-silindrist (2.0) (10.4), vaakumgeneraatorist (3.0), iminapast, kahest 5/2 ühe solenoidiga jaotist (1.1 ja 3.1), ühest 5/2 kahe solenoidiga jaotist (2.1) ning õhuallikast (0.1).
Kahe solenoidiga jaoti (2.1) asemel võiks kasutada ka ühe solenoidiga monostabiilset jaotit. Siis tuleb rakendusse teha mõned muudatused.



Joonis 10.2. Pneumoskeem

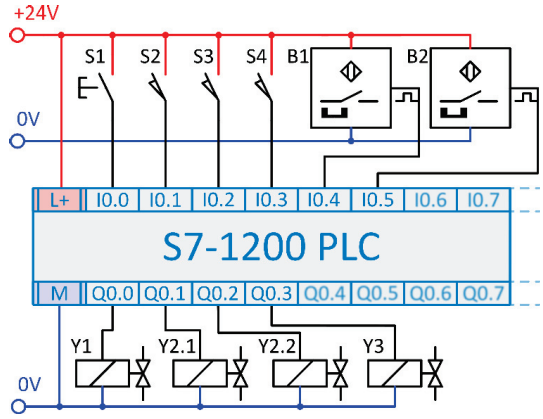
Joonis 10.3. Kahepoolse toimega lineaarne pneumosilinder (1.0)



Joonis 10.4. Kahepoolse toimega pöördsilinder (2.0)

10.2 Elektriskeem

Süsteemi elektriosa (10.5) koosneb ühest nupplülitist (S1), kolmest lõpulülitist (S2, S3, S4), kahest herkonandurist (B1, B2), neljast solenoidist (Y1, Y2.1, Y2.2, Y3) ja ühest Siemens S7-1200 kontrollerist.



Joonis 10.5. Elektriskeem

10.3 PLC Programm

Näiteprogrammi on üritatud hoida nii lihtsana, kui võimalik. Seal kasutatakse ilma taimerite ja mäluta lihtloogikat (kui väljundregistrid välja arvata).

Selle näidisrakenduse (PLC programmi) kirjeldamiseks on kasutusel rahvusvahelise standardi IEC 60848 “GRAFCET sammuliste funktsioonidiagrammide kirjeldus-keel”.

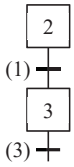
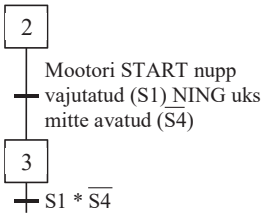
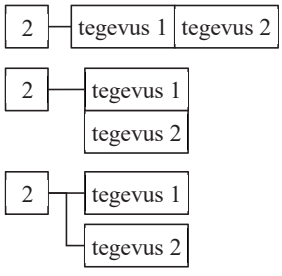
GARFCETi põhireeglid [15], [16]:

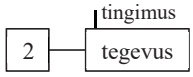
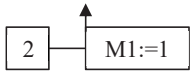
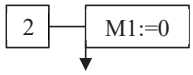
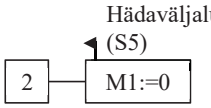
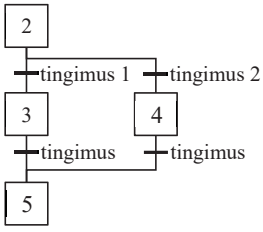
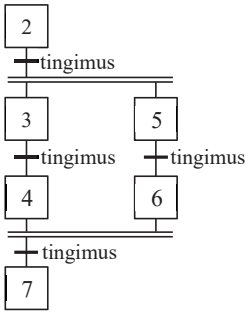
- PLC programmijada muudetakse sammudeks ja siireteks.
- Sammud ja siirded peavad alati vahelduma.
- Kaks sammu ei tohi olla üksteise järel. Nende vahel peab olema siire. Sama asi kehtib ka kahe siirde puhul
- Esimene ehk algsamm muutub aktiivseks niipea, kui kontroller käivitub.
- Samm muutub aktiivseks niipea kui eelnev samm on olnud aktiivne ja siirdetingimus on täidetud.
- Korraga saab aktiivne olla vaid üks samm (välja arvatud paralleelne hargnemine).
- Sammuga saab siduda mistahes hulga tegevusi (alates nullist lõpetades lõpmatusega).
- Sammud võivad olla tegevusteta.
- Tegevused jaotuvad
    - pidevateks tegevusteks ja
    - salvestatud tegevusteks
- Muutujat, operandi või väljundit saab kasutada kas ainult pidevate tegevustega või ainult salvestatud tegevustega, kuid mitte mõlemaga korraga.
- Programmijada saab lahti hargneda ja uuesti kokku ühendada
    - valikuline hargnemine või
    - paralleelne hargnemine.

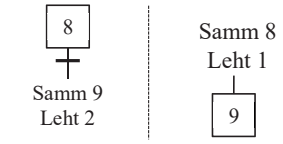
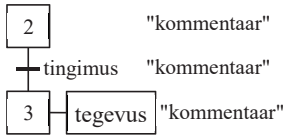
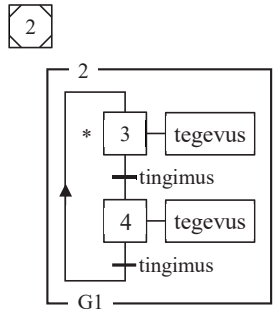
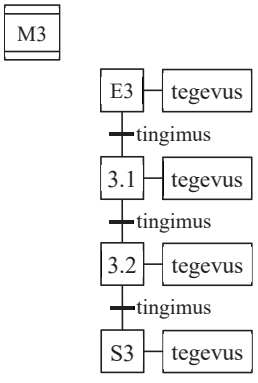
Seega GRAFCET on PLC programmi kirjelduskeel, mida ei tohiks segi ajada sarnase PLC programmeerimiskeele SFC’ga.

Tabelis 10.1 on esitatud GRAFCET’i sümbolid ja nende kirjeldused.

Tabel 10.1. GRAFCET sümbolid

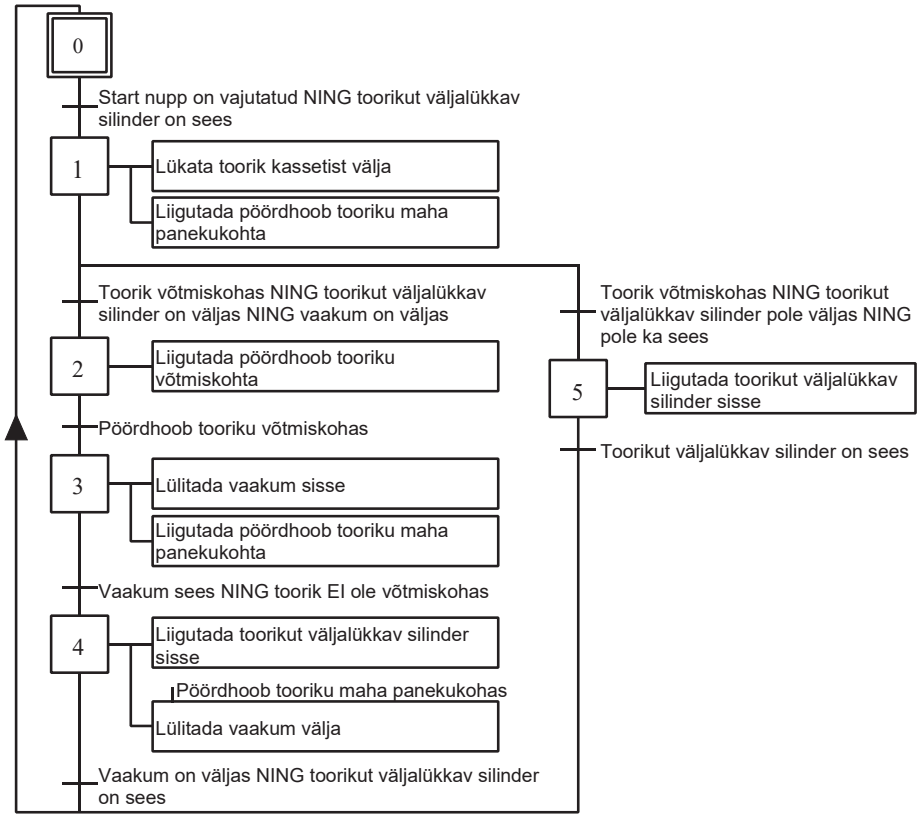
Sümboli nimi	Sümbol	Kirjeldus (tähendus)
Samm		Igat sammu kujutatakse kastiga (ruut). Sammu tähistatakse kasti sisse kirjutatud arvu ja/või tähega.
Sammu muutuja	X2 X99 XA	Boolea muutuja näitab sammu aktiivsust või mitteaktiivsust. Tähe "X" järel olev number või märgis näitab sammu mille juurde muutuja kuulub.
Algsamm		Iga PLC alustab programmi täitmist algsammust. PLC'le toite sisse lülitamisel aktiveeritakse algsamm. Algsammu tähistatakse topeltraami kastiga.
Siire		Siire on ühendus kahe sammu vahel. Siiret kujutatakse joonega, mis on risti kahte sammu ühendava joonega. Siirdest vasakul võib olla sulgude sees siirde tähis. Selle tähis või number võib erineda sammu omast.
Siirde tingimus		Iga siire omab siirdest paremal paiknevat tingimust. Siirde tingimus on loogiline väide, mille tulemuseks on 1 (tõene) või 0 (väär). Kui siirde tingimusi on rohkem kui üks, siis kasutatakse nende sidumiseks NING (tähistatakse tärniga) ja/või VÕI operatsioone (tähistatakse plussmärgiga). Eitust tähistatakse siirde tingimuse kohale tõmmatud ülakriipsuga. Signaalifrondi muutuse märkimiseks kasutatakse nooli (↑ signaal muutub 0'st 1'ks; ↓ signaal muutub 1'st 0'ks). Ajalise viivituse jaoks lisatakse ajaline väärtus koos kaldkriipsuga muutuja juurde (3s/a – 3 s peale muutuja a väärtuse muutust 0'st 1'ks loetakse tingimust tõeseks).
Tegevus (pidev tegevus)		Ristkülikuga tähistatakse tegevust. Kasti sisse kirjutatakse vastav tegevus (käsk). Ühel sammul võib olla mitut tegevust ja neid kujutatakse erinevate ristkülikutega. Siin kujutatud tegevust kutsutakse ka pidevaks tegevuseks. St, et selle tegevuse sees omistatakse muutujale (signaal) väärtus 1 nii kauaks kuni sellega seotud samm on aktiivne. Muutuja saab väärtuseks 0, kui samm ei ole enam aktiivne.

Sümboli nimi	Sümbol	Kirjeldus (tähendus)
Tingimusega (pidev tegevus)		Sellega kirjeldatud tegevus on aktiivne (täidetakse) kuni sellega seotud samm on aktiivne ja tegevusega seotud tingimus on täidetud. Kui tingimus ei ole täidetud, siis on antud tegevus mitteaktiivne. Ka siis kui samm on aktiivne
Sammu aktiveerumisel täidetav salvestav tegevus		Sammu aktiveerumise hetkel omistatakse tegevuses kirjeldatud sisu väärtus muutujale. Muutujal omistatud väärtus püsib niikaua mälus kuni see kirjutatakse üle mingis teises salvestavas tegevuses.
Sammu desaktiveerumisel täidetav salvestav tegevus		Sammu desaktiveerimise hetkel omistatakse tegevuses kirjeldatud väärtus muutujale. Muutujal omistatud väärtus püsib niikaua mälus kuni see kirjutatakse üle mingis teises salvestavas tegevuses.
Salvestav tegevus toimub tingimusliku sündmuse ilmnemisel		Kui samm on aktiivne ja selle tegevusega seotud tingimuse avaldises esineb tõusva frondi vormis sündmus või sündmusi siis omistatakse muutujale määratud sisuga väärtus. Muutujale omistatud väärtus püsib mälus niikaua kuni see kirjutatakse üle mingi teise salvestava tegevuse tulemusena.
Valikuline hargnemine		Valikulisel hargnemisel järgneb ühele sammule kaks või rohkem siiret. Esimesena täidetud tingimusega haru muutub aktiivseks ja täitma hakatakse seal olevaid samme. Korraga saab olla aktiivne ainult üks haru. Seega iga haru siirde tingimus peab olema ainulaadne (ei tohi kattuda teistega). Valikulist hargnemist võib jätta lahku või ühendada kokku teises kohas
Paralleelne hargnemine		Paralleelsel hargnemisel järgneb ühele siirdele kaks või rohkem üheaegset sammu. Paralleelse hargnemise eel oleva tingimuse täitumisel aktiveeritakse kõik harud korraga. Kõigi harude esimesed sammud (3 ja 5) aktiveeritakse üheaegselt, kuid igas harus olevaid samme täietakse üksteisest sõltumatult. Kõik paralleelharud tuleb omavahel uuesti kokku ühendada. Kui paralleelse hargnemise järel olev tingimus on täidetud ja iga paralleelharu viimane samm on teostatud (aktiivne), siis aktiveeritakse järgmine, paralleelharusse mittekuuluv samm (7).

Sümboli nimi	Sümbol	Kirjeldus (tähendus)
Hüpe		Hüppeid kasutatakse GRAFCET voodiag-rammi katkestamiseks, kui see on liiga keeruline või jaguneb mitme lehe peale. Hüppe kohas (lähte- ja sihtpunktis) tuleb märkida sihtpunkti samm (kust või kuhu hüpatakse) ja lehe number. Hüppeid tuleks kasutada ainult siis kui jooni ei saa enam kasutada.
Kommentaar		Kommentaar kirjutatakse jutumärkide vahele. See paigutatakse sammust ja tegevusest paremale poole. Siirde puhul võib panna kommentaari ka vasakule poole.
Piiritlev samm (lisasamm)		GARFCET'is hõlmab piiritlev samm piirava raamiga arendaja poolt alamstruktuuriks määratletud samme (alamalgoritm). Piiritleva sammu number kirjutatakse GRAFCET'i alamstruktuuri tähistava raami ülemisse vasakupoolsesse ossa. Allaäärde piiritleva sammu nimi mis sisaldab G tähte ja muid tähiseid (enamasti numbrit) või alamstruktuuri nime. GRAFCET'i piiritleva sammuga esitatud alamstruktuuris tähistatakse esimesena aktiveeruvat sammu tärniga. GRAFCET'i alamstruktuuri täidetakse ainult nii kaua kuni piiritlev samm (st lisasamm) on aktiivne.
Algust piiritlev samm (lisasamm)		Sama mis on tavaline piiritlev samm. Erinevus seisneb selles, et GRAFCET'i alamstruktuur on seotud GRAFCET põhistruktuuri (põhi-programmi) esimese sammuga.
Makrosamm		Makrosammu kasutatakse GRAFCET'is alamstruktuuri piiritlemiseks ja tähistamiseks. Makrosammu tähistatakse GRAFCET'is tähega M ja sellele järgneva arvuga. GRAFCETi alamstruktuuri esimest sammu tähistatakse samamoodi kui makrosammu, kuid täht M asendatakse tähega E. Alamstruktuuris viimane samm omab ka makrosammuga sama nime, kuid tähistamisel kasutatakse tähte S. Makrosammu ei saa nii kaua desaktiveerida kuni GRAFCET alamstruktuur pole veel täidetud, st et makrostruktuuri viimane samm tähega S ei ole veel aktiveeritud.

Joonisel 10.6 on esitatud näidisrakenduse juhtimisalgoritm GRAFCET sümbolitega. Kõrval haru (samm 5) kasutatakse selleks et liigutada toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi kui kaks toorikut jääb kinni. See võimaldab masina operaatoril eemaldada toorikud kasseti juurest.

Rakenduse edasi arendamiseks tuleks lisada lambid, mis näitavad masina töö seisundit (masin töötab ja masinas on viga).



Joonis 10.6. GRAFCET diagramm kahe pneumosilindriga rakenduse kirjeldamiseks

Näidisrakenduse juhtimisalgoritmis kirjeldatud reaalseid liikumisi teostatakse PLC juhtimis-programmis kasutatud muutujatega, mille sümbolkujul tähised on tabelis 9.1.

Tabel 10.2. PLC programmi muutujad

Sümbol	Aadress	Andmetüüp	Kommentaar
S1	%I0.0	Bool	Nupp – Start
S2	%I0.1	Bool	Toorik väljas
S3	%I0.2	Bool	Pöördhoob tooriku võtmiskohas
S4	%I0.3	Bool	Pöördhoob tooriku panekukohas
B1	%I0.4	Bool	Toorikut väljalükkav silinder tagastunud
B2	%I0.5	Bool	Toorikut väljalükkav silinder väljunud
Y1	%Q0.0	Bool	Lükka toorik kassetist välja
Y2_1	%Q0.1	Bool	Vii pöördhoob tooriku võtmiskohta

Y2_2	%Q0.2	Bool	Vii pöördhoob tooriku panekukohta
Y3	%Q0.3	Bool	Vaakum tööle

PLC programmid on kirjutatud SCL, LAD ja FBD keeltes. Allpool on esitatud erinevates keeltes kirjutatud programmi väljatrükk koos kommentaaridega.

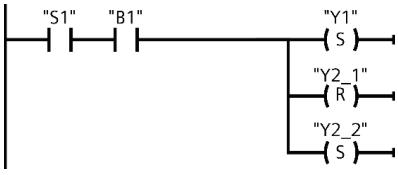
SCL (struktureeritud juhtimiskeel)

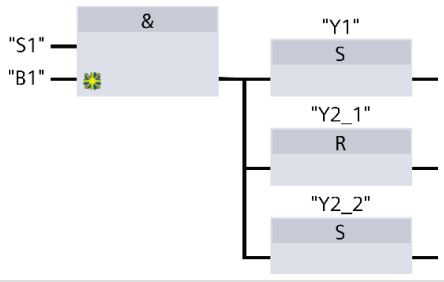
```
//Lükata toorik välja
IF "S1" AND "B1" THEN //Kui start nupp on vajutatud ning väljalükkav silinder on sees
   "Y1" := True;              //siis lükata toorik kassetist välja
   "Y2_1" := False;  //mitte liigutada pöördhooba kasseti poole
   "Y2_2" := True;   //ja liigutada see tooriku maha panekukoha poole
END_IF;

//Liigutada pöördhoob kasseti poole
IF "B2" AND "S2" AND NOT "Y3" THEN //Kui väljalükkav silinder on väljas ja toorik on välju jõudnud (võtmiskohas)
                                                    ning vaakum ei ole kasutusel
   "Y2_2" := False;  //siis mitte liigutada pöördhooba tooriku maha panekukoha poole
   "Y2_1" := True;   //ja liigutada see tooriku võtmiskoha poole
END_IF;

//Haarata toorik ja liigutada see maha panekukohata
IF "S3" AND "S2" THEN //Kui pöördhoob on kasseti juures ning toorik on võtmiskohas
   "Y3" := True;              //siis lülitada vaakum sisse
   "Y2_1" := False;  //mitte liigutada pöördhooba kasseti poole
   "Y2_2" := True;   //ja liigutada see tooriku maha panekukoha poole
END_IF;

//Lasta toorik lahti selle maha panekukohas
IF "S4" THEN                  //Kui pöördhoob on tooriku maha panekukohas
   "Y3" := False;             //siis lülitada vaakum välja
END_IF;

//Liigutada toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi
IF NOT "S2" AND "Y3" THEN          //Kui toorik ei puuduta lõpulülitit S2 ning vaakum on sisse lülitatud
   "Y1" := False;             //siis liigutada toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi
END_IF;

//Kui kaks toorikut jääb kinni, siis masin algolekusse
IF NOT "B1" AND NOT "B2" AND "S2" THEN          //Kui toorik väljalükkav silinder ei ole sees ega väljas aga
                                                    lõpulüliti S2 on vajutatud
   "Y1" := False;             //siis liigutada toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi
END_IF;
```

LAD (kontaktskeem)	FBD (loogikaskeem)

Network 1: *Lükata toorik välja*

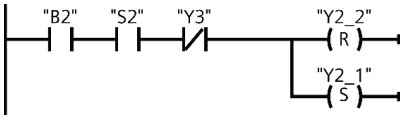
Kui start nupp on vajutatud (S1) ning väljalükkav silinder on tagastunud (B1), siis lükata toorik kassetist välja ning liigutada pöördhoob maha panekukoha poole nullides Y2_1 ja lülitades Y2_2 sisse.

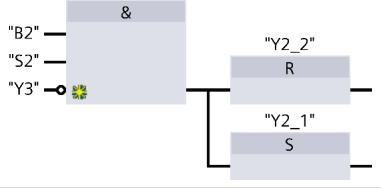




Network 2: *Liigutada pöördhoob kasseti poole*

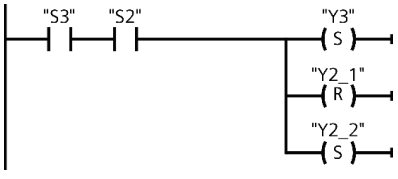
Kui väljalükkav silinder on väljas (B2), toorik on välja jõudnud (S2) ning vaakum ei ole kasutuses (Y3), siis liigutatakse pöördhoob tooriku võtmiskoha juurde.

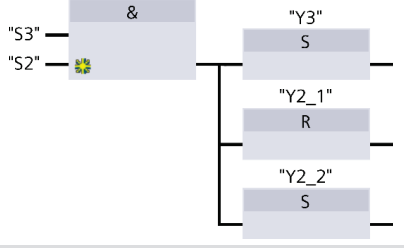




Network 3: *Haarata toorik ja liigutada see maha panekukohata*

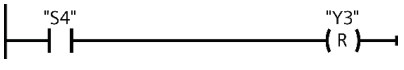
Kui pöördhoob on kassetti juures (S3) ning toorik on väljas (S2), siis lülita vaakum sisse ja samal ajal liigutatakse pöördhoob tooriku võtmiskohast eemale.





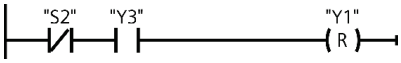
Network 4: *Lasta toorik lahti selle maha panekukohas*

Kui pöördhoob on tooriku panekukoha juures (S4), siis lülitatakse vaakum välja.



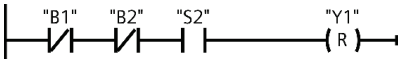
Network 5: *Liigutada toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi*

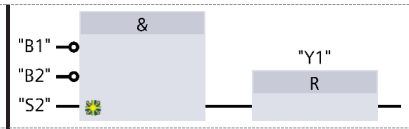
Kui toorik ei puuduta lõpulülitit (S2 tooriku võtmiskohas) ning vaakum on sisse lülitatud, siis liigutatakse toorikut väljalükkav silinder sisse tagasi.



Network 6: *Kui kaks toorikut jääb kinni, siis masin algolekusse*

Kui väljalükkav silinder pole sees (B1), ega väljas (B2) aga tooriku lõpulüliti on vajutatud (S2), siis tõmmatakse väljalükkav silinder tagasi.





11 SAGEDUSMUUNDURIGA RAKENDUSE JUHTIMINE

On olemas mitmeid viise ajamite juhtimiseks PLC'ga. Ajami käivitamise ja peatamise juhtimine on hõlpsasti teostatav PLC digitaalväljundite kaudu, kuid ajami kiirusejuhtimine varieerub rakendusest rakendusse. Kõige lihtsam on kasutada kiirusejuhtimiseks sagedusmuunduris olevaid digitaalsisendeid. Tabeli 11.1 kohaselt saab kahe DI abil valida sagedusmuunduris neli erinevat ajami kiirust (pöörlemise sagedust). Sageduse juhtimist DI abil tuleb uurida täpsemalt sagedusmuunduri kasutusjuhendis, kuna erinevate tootjate sagedusmuundurite puhul võib see olla teostatud erinevalt. Juba 3 DI kasutamine lubab määrata ja kasutada 8 erinevat sagedust.

Tabel 11.1. Määratud sageduste valimine vastavalt sagedusmuunduri sisendite olekule

Digitaalsisendi 1 olek	Digitaalsisendi 2 olek	Ettemääratud sagedus
0	0	Sagedus 1
0	1	Sagedus 2
1	0	Sagedus 3
1	1	Sagedus 4

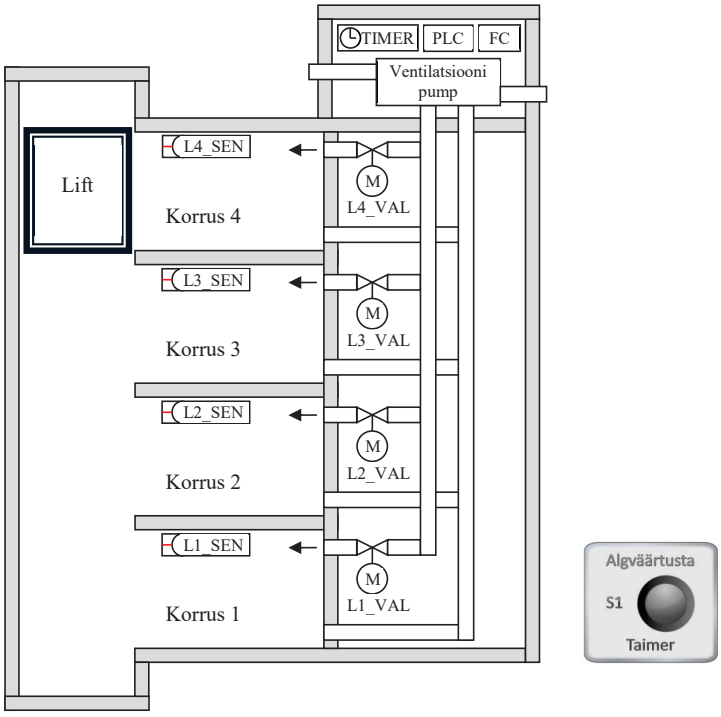
Pöörlemissageduse väärtused tuleb sagedusmuunduris eelnevalt seadistada (kasutades menüüd). Sagedusmuunduri DI'd ühendatakse seejärel juhtmete abil otse S7-1200 PLC SM'i digitaalväljunditega. Nüüd tuleb kirjutada TIA-Portal'is (STEP 7 keskkonnas) kontrollerile rakendusprogramm. Programm juhib kontrolleri DO'si ja sealt edasi juhtmete kaudu sagedusmuunduri DI'si.

Digitaalsignaalide kasutamise puuduseks on asjaolu, et kasutada saab ainult kindlat arvu varemmääratud pöörlemissagedusi. Puuduse ületamiseks on paljudesse sagedus-muunduritesse sisseehitatud analoogsisendid, enamasti 0 – 10 V või 4 – 20 mA. Seega saab PLC juhtida sagedusmuundurit otse analoogsignaali abil. Analoogsignaali väikseim väärtus 0 V või 4 mA vastab sagedusmuunduri sagedusele 0 Hz'le (või väikseim lubatud sagedus) ja suurim 10 V või 20 mA 50 Hz'le (või suurim lubatud sagedus). Ajami kiirust juhtiva signaali võib saada kontrolleris oleva PID-regulaatori abil, mis edastatakse siis kontrolleri analoogmooduli väljundisse.

Lisaks DI'dele ja AI'dele võib kasutada sagedusmuunduri juhtimiseks andmeside-kanaleid. Protokolliks võib olla näiteks PROFIBUS, PROFINET, MODBUS jne. Peale kiiruse juhtimise saab muuta ka teisi sagedusmuunduri parameetrite väärtusi (nt kiirendus ja aeglustus), valida kiiruse juhtimise meetodit ning jälgida elektriajami parameetrite väärtusi (pinge, vool, moment jne). Täpsemat infot sagedusmuunduri võimaluste kohta leiab tema kasutusjuhendist.

11.1 Rakenduse näide

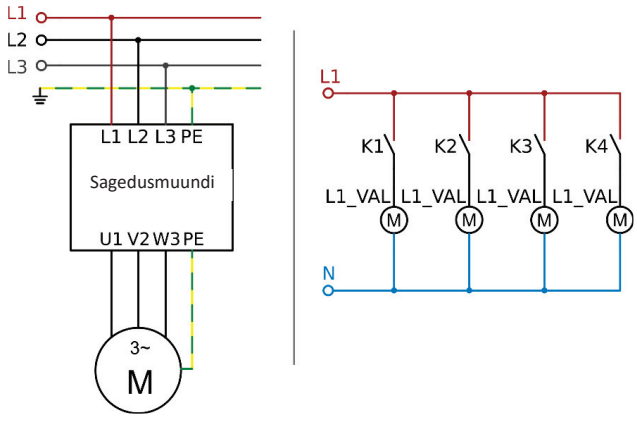
Joonisel 11.1 on kujutatud 4 korruselise laohoone ventilatsiooni juhtimissüsteemi näide [2]. Igal korrusel on liikumisandurid tööliste kohaloleku tuvastamiseks. Vastav liikumissignaal saadetakse PLC'le. PLC juhib ventilatsioonisüsteemi ventilaatori kiirust ja selle õhuklappide asendeid. Hoone esimesel korrusel on nupp (S1), mis võimaldab ventilatsioonisüsteemil töötada kauem kui tööliste tööaeg ette näeb.



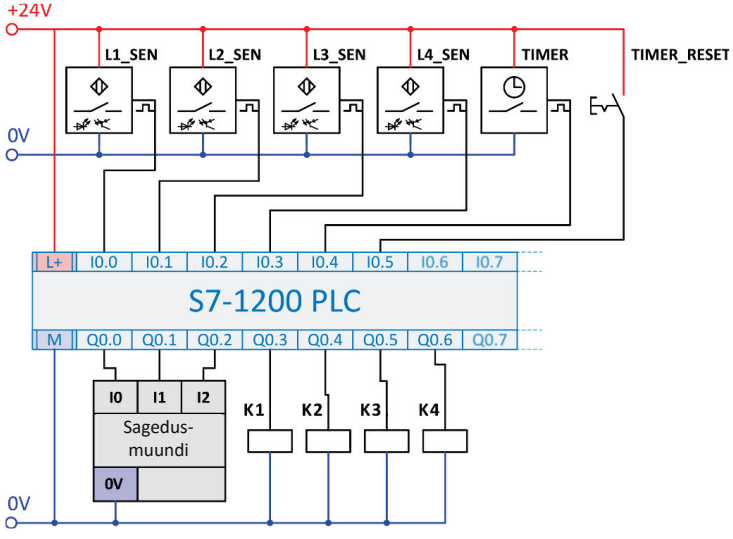
Joonis 11.1. Laohoone skemaatiline läbilõige

11.2 Elektriskeem

Süsteemi elektriosa koosneb neljast infrapunakiirega liikumisandurist (L1_SEN, L2_SEN, L3_SEN, L4_SEN), ühest eraldi seisvast taimerist (TIMER), ühest surunupust (S1), sagedus-muundurist (FC), neljast kontaktorist (K1, K2, K3, K4), neljast elektrimootoriga juhitavast õhuklapist (L1_VAL, L2_VAL, L3_VAL, L4_VAL) ning ühest Siemens S7-1200 PLC'st (joonised 11.2 ja 11.3).



Joonis 11.2. Ventilatsioonisüsteemi jõuosa elektriskeemi



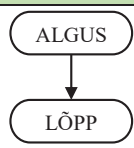
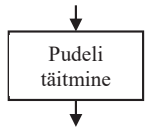
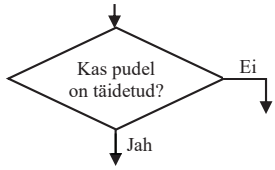
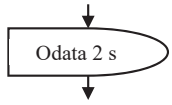
Joonis 11.3. Ventilatsioonisüsteemi juhtimisosa elektriskeem

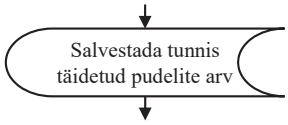
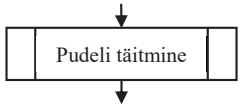
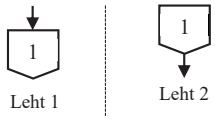
11.3 PLC Programm

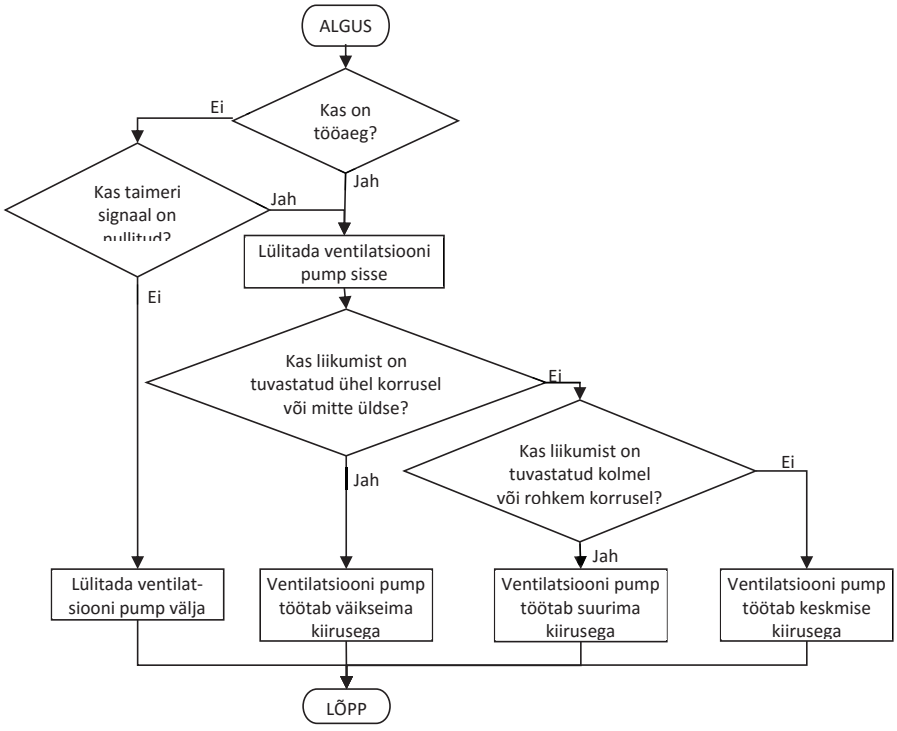
Ventilaator töötab kolme kiirusega. Väikseimat kiirust kasutatakse siis, kui ühelgi korrusel pole liikumist või on ainult ühel korrusel. Keskmist kiirust kastutatakse siis kui liikumisandurid tuvastavad liikumist kahel korrusel ning suurimat kiirust siis kui tuvastatakse liikumist kolmel või neljal korrusel korraga. Kiiruse väärtused on sagedusmuundurisse etteprogrammeeritud ja neid valitakse DI'de kaudu vastavalt tabelile 11.1. Tabelist kasutatakse sagedusi 1, 2 ja 4. Soovitatav on seada sageduse 3 väärtuseks sageduse 2 väärtus, kuigi seda juhtimisprogrammis ei kasutata. See tagab süsteemi töö ka siis, kui PLC väljundid ühendatakse sagedusmuunduri sisendite külge valesti.

Korrus(t)el inimeste liikumist tuvastavad andurite signaalid on sageli lühiajalised. PLC programmi koostamisel kasutatakse taimereid (nende nimed on T0, T1, T2, T3), et pikendada liikumissignaalide ajalist kestust PLC's. Kui tööajal tuvastatakse mingil korrusel liikumine ja see lõppes, siis alustatakse vastava korruse taimeris viivitusaja loendamist algusest.
Välist (füüsilist) taimerit kasutatakse ventilatsiooni lülitamiseks (tööpäeva lõpus välja ja hommikul uuesti sisse). Esimesel korrusel on käsilüliti, mis võimaldab eirata taimeri signaali ja kasutada ventilatsiooni ka teistel aegadel – nt tagada värsket õhku peale tööaega.
Liikumisanduri signaali alusel avatakse vastava korruse õhuklapp (võimaldab õhul siseneda antud korrusele). Siin kasutatakse ka taimerite (T0, T1, T2, T3) signaale.
Näidisrakenduse programmi kirjeldamiseks on kasutatud algoritmi blokkskeemi keelt. Tabelis 11.2 on esitatud algoritmi blokkskeemi keele enimkasutatavad sümbolid [17].
Joonistel 11.4 ja 11.5 on esitatud laohoone ventilatsioonisüsteemi juhtimisalgoritm. Esimene algoritm juhib ventilaatorit ja teine õhuklappe. Algoritmide alusel on koostatud PLC juhtimisprogrammid.

Tabel 11.2. Blokkskeemi põhisümbolid

Sümboli nimi	Sümbol	Kirjeldus
Alguse ja lõpu sümbol		Kasutatakse blokkskeemi alguse ja lõpu tähistamiseks. Blokkskeemil on üks algus ja üks lõpp. Blokkskeem joonistatakse nende sümbolite vahele. Sõna "ALGUS" märgib blokkskeemi algust ja "LÕPP" lõppu.
Protsess		Kasutatakse mingi tegevuse, ülesande või protsessi kujutamiseks. Tegevuse nimi või lühikirjeldus kirjutatakse ristküliku sisse. Selle sees võib olla rohkem kui üks tegevus
Otsus		Kujutatakse tingimusi, mille puhul programm liigub edasi järgmise ülesandeploki või protsessi juurde. Igal otsusel on vähemalt kaks (või rohkem) tulemust. Enamasti on vastusteks "Jah" ja "Ei" või "Õige" ja "Vale". Tähised kirjutatakse väljuvate joonte juurde.
Viivitus		Kujutab ooteaega või viivitusaega, mis on vajalik protsessi toimumiseks.
Andmed		Kujutab andmete sisestust ja/või väljastust blokkskeemis.

Sümboli nimi	Sümbol	Kirjeldus
Andmete salvestamine		Kasutatakse andmete salvestamise tähistamiseks blokkskeemis.
Ettemääratud protsess		Hõlmab üht või mitu protsessi sammu, mis on kirjeldatud ja määratud mujal (sama dokumendi erinevates kohtades).
Ühenduspunkt		Tähistatakse samal lehel blokkskeemi siseseid hüppeid. Ühenduspunktide tähistamiseks kasutatakse enamasti suuri tähti (A, B, AA).
Leheülene ühenduspunkt		Tähistatakse blokkskeemi siseseid hüppeid, mis ulatuvad diagrammil ühelt lehelt teisele (blokkskeem jätkub teisel lehel). Leheüleste ühenduspunktipaaride identifitseerimiseks kasutatakse täisarve (1, 2, 11).



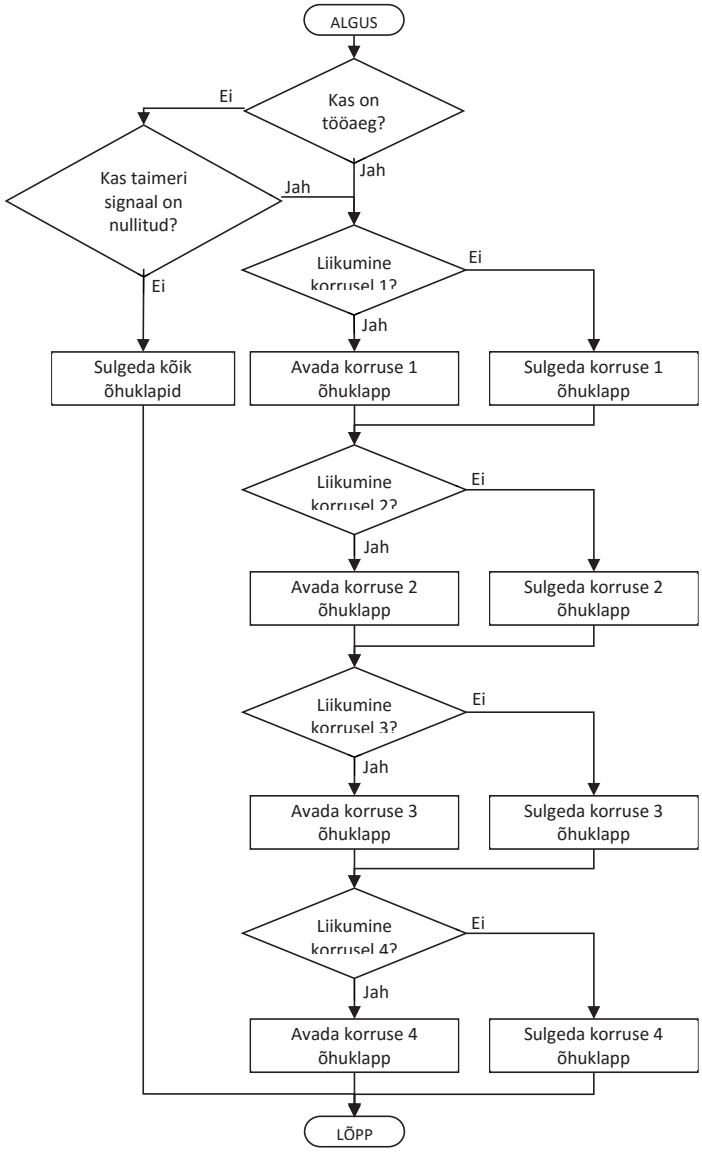
Joonis 11.4. Ventilaatori juhtimise blokkskeem

PLC juhtimisprogrammis kasutatavad muutujate kirjeldus on esitatud tabelis 9.1. Abimuutujad Speed1 ja Speed3 on mõeldud programmi lihtsustamiseks.

Tabel 11.3. PLC programmi muutujad

Sümbol	Aadress	Andmetüüp	Kommentaar
L1_SEN	%I0.0	Bool	Korruse 1 liikumisandur
L2_SEN	%I0.1	Bool	Korruse 2 liikumisandur
L3_SEN	%I0.2	Bool	Korruse 3 liikumisandur
L4_SEN	%I0.3	Bool	Korruse 4 liikumisandur
TIMER	%I0.4	Bool	Esmaspäevast reedeni kella 8:00 kuni 17:00 on signaal 1. Teistel aegadel on see signaal 0
S1	%I0.5	Bool	Käsijuhtimine. Lülitist tulev signaal võib nullida välisest taimerist tuleva signaali
FC_IN1	%Q0.0	Bool	Väljundsignaal. Sagedusmuunduri kiirus DI 1
FC_IN1	%Q0.1	Bool	Väljundsignaal. Sagedusmuunduri kiirus DI 1
FC_WORK	%Q0.2	Bool	Sagedusmuundur peab töötama

Sümbol	Aadress	Andmetüüp	Kommentaar
L1_VAL	%Q0.3	Bool	Väljundsignaal. Avada korruse 1 õhuklapp
L2_VAL	%Q0.4	Bool	Väljundsignaal. Avada korruse 2 õhuklapp
L3_VAL	%Q0.5	Bool	Väljundsignaal. Avada korruse 3 õhuklapp
L4_VAL	%Q0.6	Bool	Väljundsignaal. Avada korruse 4 õhuklapp
Speed1	%M0.0	Bool	Mälumuutuja. Ajam töötab väikseima kiirusega
Speed3	%M0.1	Bool	Mälumuutuja. Ajam töötab suurima kiirusega

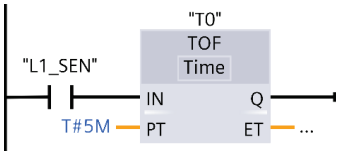


Joonis 11.5. Õhuklappide juhtimise blokkskeem

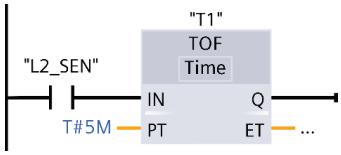
PLC programm on kirjutatud LAD keeles. Allpool on esitatud erinevates keeltes kirjutatud programmi väljatrükk koos kommentaaridega.

LAD (kontaktskeem)

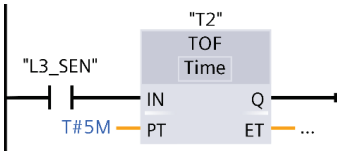
Network 1: *Liikumisandur 1*



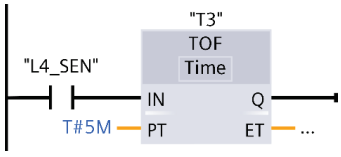
Network 2: *Liikumisandur 2*



Network 3: *Liikumisandur 3*



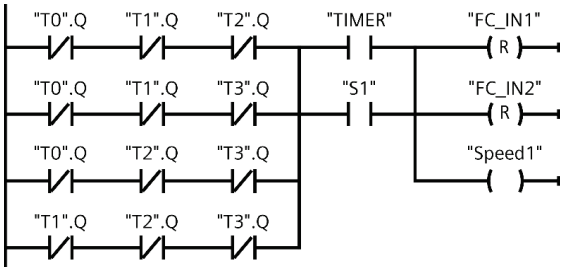
Network 4: *Liikumisandur 4*



Network 1 kuni 4 kasutatakse liikumisanduritest tulevate signaalide eluea pikendamiseks. Korrusel liikumise tuvastamisel aktiveeritakse taimeri väljund. Andurist signaali kadumisel taimer aktiveerub ja väljund on nii kaua aktiivne kuni viivitusaeg PT on läbi. Kui andurist tuleb uus signaal enne viivitusaja lõppu, siis lähtestatakse taimer.

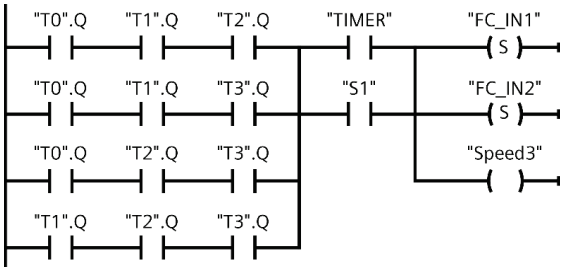
Network 5: *Ventilatsioon töötab väikseima kiirusega*

Kui on tööaeg ning üks või mitte ükski liikumisandur pole aktiivne, siis töötab ventilatsiooni pump väikseima kiirusega. Kuna see on kõige väikseim kiirus, siis kasutatakse Sagedust 1 ning mõlemad sagedusmuunduri sisendid on 0.



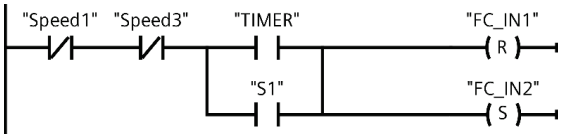
Network 6: *Ventilatsioon töötab suurima kiirusega*

Kui on tööaeg ning vähemalt kolm liikumisandurit väljastavad signaali 1, siis töötab ventilatsioon suurima kiirusega. Nüüd kasutatakse Sagedust 4 ning mõlemad sagedusmuunduri sisendid on 1.



Network 7: *Ventilatsioon töötab keskmise kiirusega*

Kui on tööaeg ning ventilatsioon ei tööta väikseima ja suurima kiirusega, siis töötab ventilatsiooni pump keskmise kiirusega. See saavutatakse väikseima ja suurima kiiruse elimineerimisega (tuvastatakse Network 5 ja 6'ga). Kasutatakse Sagedust 2 (sagedusmuunduri esimese sisendi signaal on 0 ja teise sisendi signaal on 1).

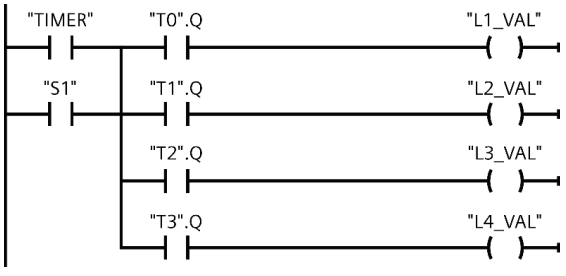


Network 8: *Sagedusmuundur lülitatakse sisse*

Kui on tööaeg või keegi lülitas "TIMER_RESET" sisse (nullis taimeri signaali), siis lülitatakse sagedusmuundur töörežiimi.

Network 9: *Korruse õhuklapid avatakse ja hoitakse lahti*

Kui on tööaeg ning mingi korruse liikumisandur annab signaali 1, siis avatakse vastava korruse õhuklapp.



Nt kui tööajal tuvastatakse korrusel 3 liikumine, siis pikendatakse selle korruse liikumisanduri signaali eluiga 5 min võrra (Network 3). Ventilatsioon pannakse väikseima kiiruse peal tööle (Network 5) ja korruse 3 õhuklapp avatakse (Network 9). Peale 5 minuti möödumist, kui ei tuvastata liikumist, suletakse korrusel 3 õhuklapp.
Laohoone valgustussüsteemi saab ka automatiseerida nii, et töölised ei pea valgust sisse ja välja lülitama. Selleks on vaja elektrisüsteemi täiendada nelja kontaktoriga (mis lülitavad igal korrusel valguse sisse ja välja) ning lisaks on vaja natuke muuta programmis Network 9.

12 PLC VALIK, OHUTUS JA KASUTUSELEVÕTT

12.1 PLC valimine

Rakenduse juhtimiseks valitakse PLC vajalike I/O arvu ja funktsionaalsuse alusel. Esimene oluline valik on tüübi valik: kompaktne, moodul-, kassett-, OPLC, tööstusarvuti, kaart- ja tarkvaraline PLC. Tüübivaliku otsus sõltub järgmistest kriteeriumidest [23]:

- uus või vana valmistussüteem (masin). Viimase puhul tuleb jälgida et valitav PLC sobiks kokku juba olemas olevate seadmetega. See tähendab et kõik sobiks omavahel kokku (andmeside, pinged, voolud, spetsiaalsed moodulid, jne) ja olemas olevaid seadmeid ei ole vaja välja vahetada. Uue süsteemi puhul tuleks kasutada ühe ettevõtte tooteid, et vältida võimalike probleeme seadmete kokku sobitamisel;
- keskkonna tingimustest (temperatuur, niiskus, tolm, vibratsioon, elektrooniline müra, jne). Ekstreemsete tingimuste jaoks (nt -10 ºC) tuleb valida sobiv PLC, et see töötaks piisavalt kaua ilma tõrgeteta;
- digitaal- ja analoogsisendite ja -väljundite arvust, nende tööks kasutatavad pinged (±10 V DC, 24 V DC, 230 V AC) ja voolud (20 mA, 0,5 A, 5 A), väljundite lülituskordade arv, Sourcing (pingestamine) või Sinking (madaldamine) jne;
- funktsiooni- ja spetsiaalsete moodulite arvust - ebatavalise rakenduse jaoks, võib vajalik olla suur arv spetsiaalseid lisamooduleid (nt servo- või sammmootori juhtimine);
- nõutud mälumaht sõltub kirjutatud programmi pikkusest. Enamus PLC programmeerimise keskkondadest on võimelised välja arvutama kasutaja programmi poolt tarbitavat mälumahtu;
- programmi tsükliaeg – suured programmid või kiired protsessid vajavad lühemaid tsükliaegu (kiiremaid PLC'sid). PLC programmeerimiskeskkond on võimeline välja arvutama tsükliaega. Tegelik tsükliaeg võib olla lühem, st et programmi reaalsel töötamisel jäetakse osa programmilõike vahele, kuna neid ei aktiveerita või ei täideta;
- andmeside – jada- ja võrguühendused lubavad PLC'd programmeerida, ühendada teiste PLC'dega (andmete vahetamiseks) ning automatiseerimisseadmetega (nt sujuvkäiviti, sagedusmuundur, SQL server, operaatorpaneel, HMI puutepaneel jne). Andmesidevajadused (andmeside protokoll, ühenduste arv, juhtmed, jne) määratakse rakenduse (automatiseeritava protsessi või masina) nõuetega;
- tarkvara – programmeerimise ja teiste tarkvaratööriistade saadavus turul ja nende funktsioonid määravad programmeerimise ja veaotsingu lihtsuse;
- konkreetses protsessis vajamineva PLC riist- ja tarkvara maksumus. Peale PLC ja selle moodulite maksumuse võib see sisaldada tarkvara, programmeerimis-seadme, kasutusjuhendite ja mõnikord ka koolituse hinda (maksumust).

PLC mudeli valikul saab lähtuda eespool loetletud üldnõuetest, kuid tihti tuleb arvestada ka teisi tegureid. Probleemid võivad tekkida, kui samas tehases kasutatakse eri protsesside juhtimiseks erinevate tootjate PLC'sid. Erinevate PLC'de kasutamine esitab operaatoritele ja teenindavale personalile suuri nõudmisi. Personal peab olema pädev kasutama erinevaid PLC'si ja nende programmeerimistarkvarasid, lisaks sellele tuleb suurendada tehase laos hoitavate varuosade arvu. Iga PLC ei pruugi sobida ettevõtte protsesside juhtimiseks. Tavaliselt lähtuvad ettevõtted PLC mudeli valikul protsessispetsiifilistest nõuetest, kuid PLC

perekonna valik tehakse kõrgemal tasemel. PLC tarnija valimisel tuleb peale PLC funktsionaalsuse lähtuda ka teistest kriteeriumidest. Nendeks võivad olla toodete (asendusmoodulid) kättesaadavus ja tarneajad, tehniline tugi ja koolitus, hinnatase ja kogemused töös vastava tarnijaga.

12.2 PLC ohutus

Tänapäeva automatiseeritud süsteemid (protsessid ja masinad) peavad olema ohutud kasutajale (inimesele) ja toodangule. Igas tehnilises süsteemis võib esineda mingi rike või viga. Rikete võimalust tuleks vähendada juba automatiseeritud süsteemi projekteerimise, ehitamise ja kasutuselevõtu etappides, hiljem on raskem ja ka kulukam ilmnevaid rikkeid kõrvaldada. Automatiseeritud süsteemid ei saa kunagi täielikult rikkevabaks ja seetõttu on ohutusnõuetega vaja arvestada juba projekteerimise etapil [7].

PLC'ga juhitavate süsteemide rikked tulenevad andurite sisemistest riketest, ummistunud solenoidventiilidest, juhtmete purunemisest, lühistest või maalühistest põhjustatud vigastatud kaablitest. Väike osa riketest tuleneb PLC signaalimoodulite ja CPU elektroonika riketest [7], seega tuleb PLC programm kirjutada nii, et juhtimissüsteemis ilmnevad rikked ei viiks kogu süsteemi ohtlikku olukorda. See kehtib kogu juhtimissüsteemi (mis võib sisaldada teisi juhtimistehnoloogiaid nagu hüdraulilist, pneumaatilist või mehaanilist juhtimist) korral.

Ohutuse tagamiseks tuleb automatiseeritud süsteemi projekteerimisel ja ehitamisel arvestada erinevate määrustega. Masinatootjate jaoks on tähtsateks määrusteks masinadirektiiv 2006/42/EC, elektromagnetilise ühilduvuse (EMC) direktiiv 2014/30/EU ja madalpingedirektiiv 2014/35/EU. Protsessi automatiseerimisel tuleb arvestada ka muid Euroopa ja rahvusvahelisi standardeid.

Automatiseeritud süsteemi (masina) projekteerimise käigus tuleb koostada võimalike riskide, mis võivad ohustada inimesi ja masina tööd, analüüs standarti ISO 12100 ja ISO 13849 või IEC 62061 (lähtub standartist IEC 61508) ning masinadirektiivi järgi. Analüüsist lähtudes koostatakse võimalikud riskide kõrvaldamise lahendused ja hinnatakse nende efektiivsust. Riskide analüüsiks ja kõrvaldamiseks pakub Siemens tasuta spetsiaalset veebipõhist tööriista nimega „Safety Evaluation Tool", mis leiab aadressil http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/safety-integrated/machine-safety/safety-evaluation-tool/pages/default.aspx. Selle kasutamine eeldab kasutaja registreerimist.

Algeline masina töö ohutus (nt SIL-1 või PLa) on võimalik saavutada kasutades ohutusseadmeid, nt hädaväljalülitusseadmeid (lülitid), kaitsevõret ja/või ohutuspiirilüliteid. Keerulisematel juhtudel (nt SIL-3 või PLe taseme saavutamiseks) tuleb kasutada spetsiaalseid (dubleeritud) juhtimisseadmeid ja andmesidesüsteeme (nt PROFIsafe). Selleks pakub Siemens spetsiaalseid tõrkekindlaid PLC'si, mida tähistatakse tähega F (nt CPU 1214 FC). Sellise PLC CPU'd omavad kaht osa, mis töötlevad täiesti sõltumatult programmi erinevaid osi. Üks töötleb tavalist juhtimisprogrammi ja teine ohutusega seotud programmi. Ohutusega seotud programm kirjutatakse F LAD ja F FBD keeltes, mis võrreldes tava programmeerimiskeeltega omavad vähem andmetüüpe ja piiratud arvu käske. Need keelemoodulid tuleb eraldi juurde osta.

Automatiseeritud süsteemi ohutuse jaoks on olulised järgmised sätted:

- tuleb vältida ohtlikke olukordi, mis võivad vigastada inimest või masinat;
- rikked juhtimissüsteemi sisendahelates (juhtmete purunemine, lühised või maa-lühised) ei tohi põhjustada süsteemi taaskäivitumist ning takistada selle peatamist;
- pärast voolukatkestust ei tohi süsteem tahtmatult taaskäivituda;
- rikete puhul peavad hädaväljalülitusseadmed ja ohutusepiirlülitid tööle jääma. Hädaväljalülituse aktiveerumisel tuleb automatiseeritud süsteemis saavutada võima-likult kiiresti kahjutu/ohutu seisund. Hädaväljalülitusseadme lähteoleku taastumisel ei tohi süsteem automaatselt taaskäivituda (käivitamieks tuleb kasutada eraldi nuppu). Juhtimissüsteemi hädaväljalülitusahel tuleb luua tavalisest PLC juhtimissüteemist eraldi, kasutades selleks nt ohutuse releesid (kontaktoreid) või tõrkekindlat PLC'd;
- kasutada tõrkekindlaid seoseid nt „Stopp" funktsiooni ja hädaväljalülituse juures. See tähendab, et täituri, anduri, lüliti jne signaal on alati 1, kui see ei ole aktiivne. Andurite ja/või nuppude aktiveerumisel, juhtme purunemisel või täituri lahtiühendamisel muutub täituri signaal 0'ks ja peatab süsteemi töö või tõkestab selle käivitamise;
- kasutada blokeeringuid, et vältida soovimatuid süsteemi lülitustingimusi ja tõkestada seadme liikumist üle piiride. Vastastikku toimuvad liikumised (nt vasakule ja paremale) tuleks blokeeritakse elektriskeemis ja samuti PLC programmis. Liikumisteljele tuleks lisada piirlüliteid, mis mõjutavad otse mootori toiteahelat (katkestavad toite mootorile);
- kasutada liiasusega süsteeme. Automatiseeritava süsteemi ohtlikes kohtades tuleks kasutada rohkem kui ühte seadet (lüliti, andur, nupp jne). Nt võiks kasutada kahte ohutuspiirlülitit normaalselt avatud ja suletud kontaktidega telje ühes otsas, et jälgida selliseid rikkeid nagu juhtmete purunemist, vigast kontakti (normaalselt avatud kontakt ei sulgu või normaalselt suletud kontakt ei avane), lühist kahe juhtme vahel ning ühe lüliti riket (üks enam ei tööta);
- kasutada varjestatud kaableid, et vältida soovimatuid signaaliväärtuse muutusi (digitaalsed I/O) ja eksitava väärtusega mõõtesignaale (analoog I/O);
- kasutada häirefiltrit ja kondensaatorit võrgutoiteallika pingehäirete vältimiseks. Võrguhäire filter kaitseb ülepingete ja toitevõrgust tulevate häiresignaalide eest. Kondensaator salvestab enesesse elektrienergiat, mis tagab kontrolleri toite ka lühiajalise voolukatkestuse korral;
- vastastikuse induktsiooni pinge tuleb kõrvaldada otse lähtepunktis, st mähise juures. Kasutada selleks summutusdioodi (ainult DC puhul), kondensaatorit (AC puhul) või varistori (pinge väärtusest sõltuv takisti);
- „Start" funktsiooni võib teostada ainult siis, kui kaitsesignaalid näitavad süsteemi ohutut olekut;
- süsteemi „Stopp" funktsioon omab eesõigust süsteemi „Start" funktsiooni ees.

Automatiseeritud süsteemi kasutuselevõtmisel tuleb jälgida ka ohutusnõudeid. Kasutaja programmi muutmine süsteemi töötamise ajal on sama mis juhtme vahetamine pinge all. See võib põhjustada süsteemis ootamatu reaktsiooni, mis võib vigastada inimesi ja/või hävitada seadmeid.

12.3 Kasutuselevõtmine

PLC programmid ei ole kunagi lõplikud, neis on alati võimalik teha parandusi ja kohandada uue süsteemi joaks või vastavalt kliendi muutunud nõudmistele.
Sageli on vaja programmi muuta isegi kasutuselevõtu ajal. Siiski tuleks programm valmis saada enne tehasekatsetuste algust. Automatiseeritud süsteemi PLC programmi kasutuselevõtu võib jagada neljaks sammuks:

- riistvara kontroll;
- tarkvara (juhtimisprogrammi) ülekandmine kontrollerisse ja testimine;
- tarkvara optimeerimine;
- kogu süsteemi kasutuselevõtmine.

12.3.1 Riistvara kontroll

Iga sensor, lüliti ja nupp on ühendatud spetsiifilise sisendiga ja iga täitur vastava väljundiga. Automatiseeritud süsteemi projekteerimise ja ehitamise ajal ei tohi juhtmeid ja aadresse segamini ajada [14]. Tuleks kontrollida ka andurite ja täiturite asukohti süsteemis, et nad oleksid kindlasti õiges kohas.
Riistvara kontrollimise käigus aktiveeritakse väljundid katserežiimis ja soovitavalt ühe kaupa. Seejuures peavad täiturid teostama neile määratud funktsioone.
Kui süsteemis tehakse muudatusi, tuleb ka dokumentatsioon uuendada (uuendada detailide/seadmete paigutuse jooniseid, nimekirju, jne).

12.3.2 Tarkvara ülekandmine ja testimine

Enne süsteemi kasutuselevõttu tuleb programmis olevate vigade otsimiseks kasutada kõiki PLC programmi (virtuaalseid) testimistööriistu. Selleks pakub Siemens tarkvara S7-PLCSIM (eraldi paketina või TIA-Portal'i täisversioonis), mis simuleerib PLC tööd (virtuaalne PLC) ja võimaldab kasutaja poolt kirjutatud programmi katsetada. Selle meetodi kohaselt laetakse programm virtuaalse PLC virtuaalsesse CPU'sse. Programmi täidetakse ilma reaalse PLC'ta. Kasutaja peab simuleerima sisendsignaalide muutusi ja jälgima, kuidas väljundid sellele reageerivad.
Mõnede firmade PLC'd võimaldavad testida programmi reaalse PLC peal. Seadme juhtimisprogramm täidetakse ilma reaalsete sisendite ja väljundite külge ühendamiseta. PLC väljundite töötlemine leiab aset ainult PLC-väljundite protsessikuvas, kusjuures see ei ole seotud PLC füüsiliste väljunditega. PLC füüsilisi I/O'sid ei uuendata PLC I/O'de protsessikuva abil (vastupidi ka ei tehta), seega väljastab see võimalust kahjustada masinaid või süsteemi osasid.
Pärast seda testitakse üksikuid programmi osasid ja süsteemi funktsioneerimist: käsitsi töötamine, seadistamine, individuaalsed jälgimisprogrammid, iga masina osa eraldi, jne ning lõpuks programmi osade vastastikust koostööd põhiprogrammi (OB1 Siemensi PLC's) abil.
Süsteemi saab ja tuleks kasutusele võtta samm-sammult. Kasutuselevõtu ja vigade tuvastamise oluliseks aspektiks on programmeerimissüsteemi testfunktsioonide võimalused nagu näiteks ühesammurežiim või peatuspunktide seadistamine. Eriti tähtis on ühesammu-režiim, kus PLC mälus olevat programmi täidetakse rida-realt või samm-sammult, niiviisi saab tuvastada kohe programmis esinevad vead.

12.3.3 Tarkvara optimeerimine

Kasutaja programme saab peaaegu alati pärast esimest katsekäivitamist täiustada. Oluline on, et mistahes parandused või muudatused tehakse mitte üksnes PLC programmis, vaid võetakse arvesse ka dokumentatsioonis [14].

12.3.4 Kogu süsteemi kasutuselevõtmine

See toimub osaliselt juba testimise ja optimeerimise etapil. Kui PLC-programmi ja dokumentatsiooni lõplik versioon on valmis, tuleb kontrolleri kõiki funktsioone (vastavalt automatiseerimise ülesandele) uuesti sammhaaval täita. Kui kogu süsteemi kasutuselevõtmisel ei ilmnenud ühtegi riket/viga, siis on süsteem valmis kliendile üleandmiseks.

12.4 Teadmiste kontroll

1) Milliseid järgmisi kriteeriume ei arvestata PLC valikul?
   a) I/O'de number
   b) Kasutaja programmi suurus
   c) Kasutatud programmeerimiskeel
   d) Programmi täitmise aeg (ühe töötsükli aeg)
   e) Andmeside

2) Milline allpool loetletud funktsioonidest omab kõrgemat prioriteeti teiste ees?
   a) "Start" funktsioon
   b) "Restart" funktsioon
   c) "Stopp" funktsioon
   d) "Nullimine" (reset) funktsioon
   e) „Soe käivitus" funktsioon

3) Mille eest kaitseb võrgutoite häirefilter (mitu vastust)?
   a) Ülepinge eest
   b) Voolukatkestuse eest
   c) Toitevõrgust tulevate häire-signaalide eest
   d) Vastastikuse induktsioonipinge eest
   e) Juhtme purunemise eest

4) Milline järgmine väide ei ole tõene?
   a) Hädaväljalülituse ahel tuleb luua PLC süsteemist lahus (sõltumatult) kasutades selleks näiteks releesid või tõrkekindlat PLC'd.
   b) Hädaväljalülituse lõpus ei tohi automatiseeritud süsteem käivituda automaatselt.
   c) Hädaväljalülituse (avarii) korral tuleb signaalid kõikidele väljunditele muuta 1.
   d) Süsteemi töö taaskäivitamiseks pärast hädaväljalülitust tuleb kasutada spetsiaalset nuppu.
   e) Hädaväljalülituse (avarii) korral tuleb automatiseeritud süsteemis saavutada ohutu seisund nii kiiresti kui võimalik

5) Milleks kasutatakse blokeeringut?
   a) Et vastastikku töötavad väljundid ja sisendid üksteise vastu blokeerida.
   b) Et luua tõrkekindlaid ühendusi automatiseeritud süsteemi kriitiliselt ohtlikes osades/seadmetes.
   c) Tagada automatiseeritud süsteemi töö lihtsate väheoluliste rikete esinemisel.
   d) Lukustada hädaväljalülituse korral (peatada) automatiseeritud süsteemi töö.
   e) Kasutada rohkem kui ühte seadet (nt andur) automatiseeritud süsteemi kriitilistes kohtades.

6) Mis on esimene samm PLC kasutuselevõtmisel automatiseeritud süsteemis?
   a) Kogu süsteemi kasutuselevõtmine.
   b) Tarkvara ülekandmine ja testimine.
   c) Tarkvara optimeerimine.
   d) Riistvara kontroll.

e) Dokumentatsiooni uuendamine.

7) Mis on viimane samm, mille järel on automatiseeritud süsteem valmis kliendile üleandmiseks?
   a) Kogu süsteemi kasutuselevõtmine.
   b) Tarkvara ülekandmine ja testimine.
   c) Tarkvara optimeerimine.
   d) Riistvara kontroll.
   e) Dokumentatsiooni uuendamine.

Teadmiste kontrolli küsimuste tulemused

Tabelist leiate õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele. Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimuse nr.										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
1. Programmeeritav loogikakontroller	C	B	A	B	E	A	C	B	C	A	D
2. PLC programmeerimine	C, D, F	A	A-2, B-3, C-1	C	C	D	C	E	B	-	-
4. Binaarloogika funktsioonid	B, D, E	A, B, C, D	B, C, D	D	A	B, C	C	B	-	-	-
5. Arenenud binaarloogika funktsioonid	C	C	C	C	C	D	D	C	D	A, B	-
6. Ülekande- ja programmi juhtimisfunktsioonid	A	B	E	D	A	-	-	-	-	-	-
7. Matemaatilised ja teisendusfunktsioonid	B	D, E	B, D, E	B	A	A	B	-	-	-	-
8. PID-regulaator	A, B, D	A	B	D	B	D	A, B, D, E	B, E, F	-	-	-
12. PLC valik, ohutus ja kasutuselevõtt	C	C	A, C	C	A	D	A	-	-	-	-

KIRJANDUS

[1] E. P. Degarmo, J. T. Black, R. A. Kohser and B. E. Klamecki, Materials and processes in manufacturing., New Jersey:: Wiley&Sons, 2003.

[2] E. Pettai, Tootmise automatiseerimine, Tallinn: TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut, 2005.

[3] V. R. Segovia and A. Theorin, History of Control, History of PLC and DCS, Lund Universitet, 2012.

[4] *EVS-EN 61131-2:2004, Programmable controllers - Part 2: Equipment requirements and tests,* 2004.

[5] K.-H. John and M. Tiegelkamp, IEC 61131-3 : programming industrial automation systems : concepts and programming languages, requirements for programming systems, aids to decision-making tools, Berlin: Springer, 2001.

[6] EVS-EN 61131-1:2003, Programmable controllers Part 1: General Information, IEC, 2003.

[7] Siemens, SIMATIC S7-1200 Programmable controller, System Manual, Nürnberg: Siemens AG, 2015.

[8] IEC, IEC 61499-1:2012: Function blocks - Part 1: Architecture, Eesti Standartikeskus, 2012.

[9] Siemens, Programming Guideline for S7-1200/S7-1500, STEP 7 (TIA Portal) and STEP 7 Safety in TIA Portal, Siemens AG, 2015.

[10] SIEMENS, SIMATIC, Function Block Diagram (FBD) for S7-300 and S7-400 Programming, Reference Manual, Nürnberg: Siemens AG, 2010.

[11] R. Bliesener, F. Ebel, C. Löffler, B. Plagemann, H. Regber, E. Terzi and A. Winter, Programmable Logic Controllers, Basic Level, Textbook TP 301, Denkendorf: Festo Didactic GmbH & Co., 2002.

[12] H. Berger, Automating with SIMATIC S7-1200, Erlangen: Publicis Publishing, Erlangen, 2011.

[13] H. Bischoff, D. Hofmann and E. v. Terzi, Process Control System, Control of temperature, flow and filling level, Workbook, Festo Didactic GmbH & Co., 1997.

[14] J. A. Shaw, The PID Control Algorithm, How it works, how to tune it, and how to use it, Process Control Solutions, 2003.

[15] IEC, "GRAFCET specification language for sequential function charts (IEC 60848:2013)," Eesti Standardikeskus, Tallinn, 2013.

[16] G. Schmidt, FESTO, GRAFCET, Denkendorf: Festo Didactic GmbH & Co. KG, 2007.

[17] G. Häberle, H. Häberle, R. Heinzelmann, R. Kilgus, R. Krall, H. Paetzold, W. Röhrer, B. Scheimann, S. Schmitt, M. Schultheiss and T. Urian, Tabellenbuch Mechatrinik, Haan-Gruiten: Verlag EUROPA-LEHRMITTEL, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 2007.

[18] J. Riives and J. Lavin, Tootmise korraldamine, õppematrejalid kutsekoolidele, Tallinn: AS Atlex, 2014.

[19] E. Brindfeldt, V. Rottenberg and U. Lepiksoo, Mehhatroonika komponendid, õppematerjal kutsekoolidele, Tallinn: As Atlex, 2014.

[20] IEC, Programmable controller Part 1: General information, Eesti Standardikeskus, 2003.

[21] H. Mürkel, Tööstuskontrolleri, kasutajaliidese ja sagedusjuhtimisega elektriajami koostöö tööstuslik näidisrakendus, Tallinn, 2012.

[22] J. Von Aspen, SPS Grundlagen, Aufbau, Programmierung (IEC 61131, S7), Simulation, Internet, Sicherheit, Heidelberg: Hüthig Verlag, 2009.

[23] H. Berger, Automatisiern mit STEP 7 in AWL und SCL, Speicherprogrammierbare Steuerung SIMTAIC S7-300/400, Erlangen: Publicis Corporate Publishing, 2004.

[24] IEC, IEC 61131-3:2013 Programmable controller - Part3: Programming languages, IEC, 2013.

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 08. MÕÕTMINE JA ANDMEHÕIVE [M008ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

MICHAŁ SMATER, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
BOGUMIŁA WITTELS, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)
PIOTR FALKOWSKI, AUTOMAATIKA JA MÕÕTMISE TÖÖSTUSLIK INSTITUUT (PIAP)

2018

Teave selle dokumendi kohta

Seda dokumenti kasutatakse põhilise õpikuna moodulis „Mõõtmine ja andmehõive“.

Sisukord

Teave selle dokumendi kohta 3
Jooniste loend 7
Tabelite loend 8
Sissejuhatus 9
Mõisted 9
Sissejuhatus 9
1 Põhimõisted 10
1.1 Mõisted
10
1.2 Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem 13
1.3 Inglise ja ameerika tollimõõdustikud 14
1.4 Kokkuvõte 15
1.5 Teadmiste kontroll 15
2 Signaaliteooria 17
2.1 Sissejuhatus. Signaal 17
2.2 Perioodilised signaalid 17
2.2.1 Siinus- ja koosinussignaal 17
2.2.2 Harmoonilised signaalid 18
2.2.3 Fourier' rida 19
2.2.4 Polüharmooniline signaal 20
2.3 Mitteperioodilised signaalid 20
2.3.1 Peaaegu perioodilised signaalid 21
2.4 Analoog-, diskreet- ja digisignaal 22
2.4.1 Analoogsignaalid 22
2.4.2 Diskreetsignaalid 22
2.5 Teadmiste kontroll. Peatükk 2 23
3 Mõõtemeetodid ja -vead 25
3.1 Sissejuhatus. Mõõtemeetod 25
3.1.1 Otsene mõõtmine 25
3.1.2 Kaudne mõõtmine 25
3.1.3 Kompleksne mõõtmine 26
3.1.4 Mõõtmise põhimeetod 26
3.1.5 Otsese võrdluse meetod 27
3.1.6 Diferentsiaalmeetod 27
3.1.7 Nullmeetodiga mõõtmine 27
3.2 Mõõteviga 27
3.2.1 Absoluutviga 28
3.2.2 Suhtviga 28
3.2.3 Korduvmõõtmisega seotud mõõtevead 28
3.2.4 Mõõtemääramatus 29
3.3 Teadmiste kontroll. Peatükk 3 31
4 Mõõtemuundur ja selle mõõtevead 32
4.1 Sissejuhatus 32
4.2 Mõõtemuundur 32
4.2.1 Mõõtemuunduri täpsus ja kordustäpsus 33
4.2.2 Mõõtemuunduri tundlikkus 33
4.2.3 Mõõtemuunduri lineaarsus 35
4.2.4 Mõõtemuunduri korratavusviga 36
4.2.5 Mõõtemuunduri reprodutseeritavus 36
4.2.6 Mõõtemuunduri resolutsioon 37
4.2.7 Mõõtemuunduri ulatus 37
4.2.8 Mõõtemuunduri stabiilsus 37
4.2.9 Mõõtemuunduri dünaamiline viga 37

4.3 Teadmiste kontroll. Peatükk 4 38
5 Mõõtesüsteemid 40
5.1 Sissejuhatus. Mõõtesüsteem 40
5.2 Mõõtesüsteemi valimine 40
5.3 Mõõtesüsteemi mõõtemääramatus 40
5.4 Digitaalsed mõõtesüsteemid 42
5.4.1 ADC (analoog-digitaalmuundur) 42
5.4.2 ADC-süsteem 43
5.5 Mõõtesüsteemide struktuurid 43
5.5.1 Järjestikuse mõõtesüsteemi struktuur 43
5.5.2 Diferentsiaalsed mõõtesüsteemid 44
5.6 Teadmiste kontroll. Peatükk 5 45
Enesekontroll – küsimuste vastused 46
Viited 47

JOONISTE LOEND

Joonis 1. Staatilise mõõtmise korral mõõtetulemus ei erine 10
Joonis 2. Dünaamilise mõõtmise korral on mõõtetulemus erinev 11
Joonis 3. Pikkuse mõõtmine nihiku abil [7] 12
Joonis 4. Mõõtetulemuse esitamine 13
Joonis 5. Perioodilise signaali näide, perioodiga T = 7 [s] 17
Joonis 6. Koosinusfunktsiooni näide, perioodiga T = 12 [s] 18
Joonis 7. Harmoonilise signaali näide 19
Joonis 8. Polüharmoonilise signaalikuju näide 20
Joonis 9. Mitte perioodilise signaali näide (sumbub) 21
Joonis 10. Mitteperioodilise signaali näide (2) 21
Joonis 11. Peaaegu perioodilise signaali näide 22
Joonis 12. Analoog- ja diskreet-/digisignaal 22
Joonis 13. Pikkuse mõõtmine nihiku abil 25
Joonis 14. Kaudse mõõtmise näide [20] 26
Joonis 15. Multimeeter[21] 26
Joonis 16. Joonlaud [21] 27
Joonis 17. Kahe kaalukausiga kaal [22] 27
Joonis 18. Sisend- ja väljundsignaal 32
Joonis 19. Täpsus ja kordustäpsus 33
Joonis 20. Tundlikkus – lineaarne kalibreerimiskõver 34
Joonis 21. Tundlikkus – mittelineaarne kalibreerimiskõver 34
Joonis 22. BFSL (parim lineaarne sobivus) 35
Joonis 23. TBL (otstel põhinev lineaarsus) 36
Joonis 24. Mõõtesüsteem Fluke Connect 40
Joonis 25. Mõõtetulemuse esitamine 41
Joonis 26. Parallaksi viga [23] 42
Joonis 27. Analoog-digitaalmuundur (ADC-i joonis) 43
Joonis 28. Analoog-digitaalmuunduri funktsioonid (ADC-süsteemi operatsioonid) 43
Joonis 29. Järjestikuse mõõtesüsteemi näide 44
Joonis 30 . Diferentsiaalse mõõtesüsteemi näide 1 44
Joonis 31. Diferentsiaalse mõõtesüsteemi näide 2 44

TABELITE LOEND

Tabel 1. Kasutatud mõisted 9
Tabel 2. SI-süsteemi mõõtühikud 13
Tabel 3. Inglise ja ameerika tollimõõdustike erinevused 14

SISSEJUHATUS

Mõisted

Tabel ARABIC. Kasutatud mõisted

Amplituud	Maksimaalne hälve tasakaaluasendist võnkelises ja lainelises liikumises.
Sagedus	Sagedus on korduvate sündmuste esinemine ühes ajaühikus.
Ringsagedus	Pöörlemismäära skalaarmõõt. Tähistab nurganihet ühes ajaühikus.
Faas	Punkti ajaline asend (hetkeline) lainelises tsüklis.
Faasinihe	Ühe füüsikalise suuruse faasis tekkiv muutus või muutus kahe või enama füüsikalise suuruse faasinihkes.
Ristjoon	Joon, mis ristub teise joonega täisnurga (90°) all.

Sissejuhatus

Mõõtmine ja andmehõive on väga olulised ja vajalikud meid ümbritsevate füüsikaliste nähtuste mõistmiseks ja nende kohta paremate teadmiste saamiseks. See on alus, millele toetudes saab arendada meile igapäevaselt kasu toovaid teaduse- ja tehnikasaavutusi, mis muudavad elu lihtsamaks, aitavad täita igapäevaseid ülesandeid ja võimaldavad säästa väärtuslikku aega.

Kodumajapidamises annab see meile otseselt juurde vaba aega.

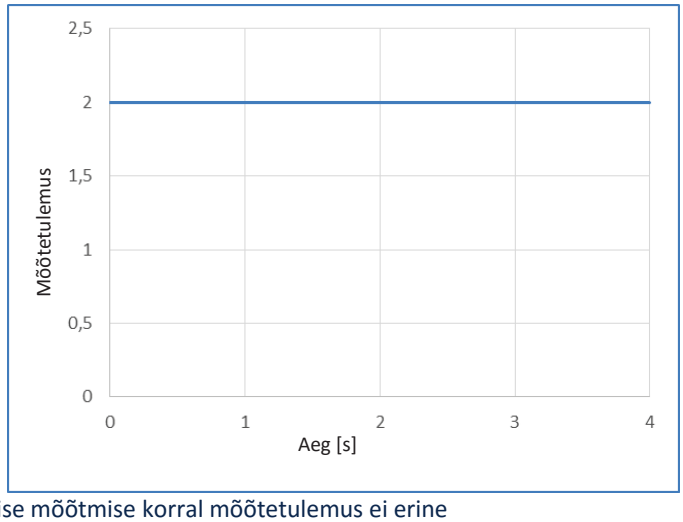
Tööülesannete lihtsama ja kiirema täitmisega saavutame parema tööjõudluse samal väsimustasemel. Säästetud aega saame kasutada uute tööülesannete täitmiseks. Teadlastele ja inseneridele lisab see võimalusi järgmiste teadusuuringute või ehitustööde jaoks. Nii parandab iga uus avastus iga inimese arenguvõimalusi.

Kõige selle jaoks on meil vaja teadmisi õigetest mõõtemeetoditest, mõõtevigade tuvastamisest ja hindamisest ning mõõtetulemuste kogumisest, töötlemisest ja tõlgendamisest. See õppematerjal tutvustab just selliseid teemasid.

1 PÕHIMÕISTED

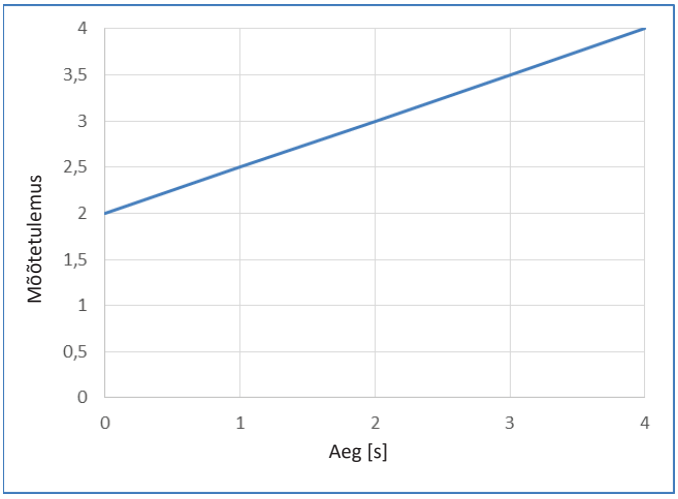
1.1 Mõisted

- **Metroloogia** – mõõtmisteadus. Selle käsitusala on objektiivne mõõtetegevus.
- **Mõõtmine** – täpse mõõtetulemuse kindlaksmääramine standardses mõõtühikutes (teadaoleva mõõtemääramatusega).
- **Mõõtmise jälgitavus** – mõõtetegevuse teaduslik aspekt. See tähendab, et kõik mõõtetulemused on kontrollitavad standardite ja standardsete mõõtühikute abil.
- **Mõõtühik** – füüsikalise suuruse väärtus, mida kasutatakse üldlevinud mõõtesüsteemis. See võimaldab võrrelda erinevaid mõõtetulemusi.
- **Mõõtetegevus** – tegevused eeldatava mõõtetulemuse saamiseks. Saadud mõõtetulemus sõltub alati mõõtetingimustest, -meetoditest ja -vahenditest.
- **Staatiline mõõtmine** – kui mõõtetulemus mõõtmise kestel ei erine või erineb vaid lubatud mõõtevea piires (Joonis 1. Staatilise mõõtmise korral mõõtetulemus ei erine
-).



Joonis 1. Staatilise mõõtmise korral mõõtetulemus ei erine

- **Dünaamiline mõõtmine** – kui mõõtetulemus mõõtmise kestel on erinev (Joonis 2. Dünaamilise mõõtmise korral on mõõtetulemus erinev
-).



Joonis 2. Dünaamilise mõõtmise korral on mõõtetulemus erinev

- **Mõõtetulemus** – mõõteobjekti omadus, mis on kindlates tingimustes, kohas ja ajaühikus kindlaks tehtud mõõtmise tulemus. Mõõtetulemus on väljendatud konkreetses ühikusüsteemis (nt SI-süsteemi ühikud).

- **Mõõtesuurus** – mõõteobjekti omadus, mida on võimalik numbrite või sümbolite abil kvantitatiivselt määrata või kvalitatiivselt eristada. See võib näiteks hõlmata koguse (mass) või füüsikalise suuruse (võnkesagedus) kindlaksmääramist.

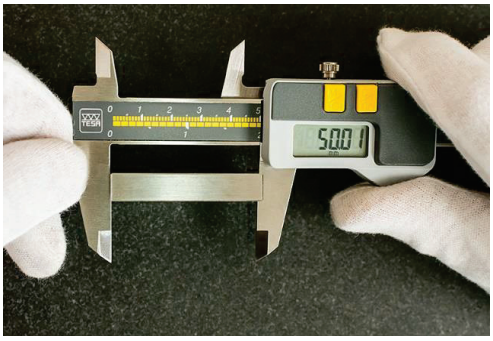
- **Signaal / ajaline kestus** – funktsioon, mis iseloomustab füüsikaliste suuruste ajalist muutumist.

- **Mõõtesignaa**l – mõõdetava objekti teatud omaduste füüsikaline väärtus. See kannab endas infot konkreetse nähtuse omaduste ja käitumise kohta.

- **Mõõtemeetod** – menetlusviis, mida kasutatakse mõõtesuuruse väärtuse võrdlemiseks kokkulepitud väärtusega.

- **Kaudne mõõtmine** – mõõtemeetod, mida kasutatakse mõõteobjekti omaduse määramiseks mõõteobjekti teiste omaduste mõõtmise kaudu.

Otsene mõõtmine – mõõtemeetod, mida kasutatakse mõõteobjekti omaduse määramiseks mõõteobjekti konkreetse omaduse mõõtmise kaudu. See tähendab, et mõõtetulemus on mõõdetud väärtusest otseselt tuletatav. Otsene mõõtmine on näiteks pikkuse mõõtmine nihiku abil (Joonis 3. Pikkuse mõõtmine nihiku abil [7]
).



Joonis 3. Pikkuse mõõtmine nihiku abil [7]

- **Mõõtemuundur** – mõõteseade, mis muundab mõõdetava füüsikalise suuruse väljundsignaaliks, mis sisaldab infot mõõdetava objekti kohta. Näiteks, kui sisendsignaalideks on elektripinge ja -vool, saab neid Ohmi seaduse abil muundada signaaliks, mis kannab endas infot elektritakistuse kohta. See on näide kaudse mõõtmise kohta.

$$R = \frac{U}{I},$$

kus:
R – elektritakistus,
I – alalisvool (DC),
U – alalispinge (DC).

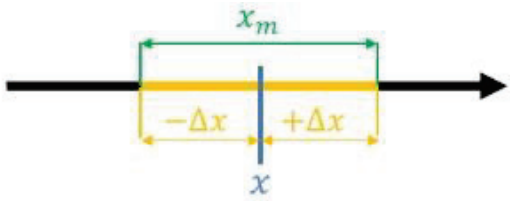
- **Mõõtesüsteem** – üksteisega ühendatud mõõtemuundurid, mis on mõeldud mõõtesuuruse väärtuse ja andmete vastuvõtmiseks.

- **Muunduri viga** – mudeli alusel eeldatud ja tegelikult saadud omaduste erinevus.

- **Andmehõive** – mõõtesignaalide diskreetimise protsess, mille käigus vastuvõetud signaalid muundatakse digitaalkujule. Selle otstarve on muuta andmed arvutis töödeldavateks. Andmehõivesüsteemid muundavad üldjuhul analoogsignaalid digisignaalideks.

- **Mõõteviga** – mõõtesuuruse tõelise väärtuse ja mõõdetud väärtuse erinevus. See on puudulike mõõtemeetodite, -vahendite, -tingimuste ja -oskuste mõju mõõtetäpsusele. Tehtud mõõtmiste hulga suurendamine vähendab küll mõõtevea suurust, kuid see ei kaota mitte kunagi konkreetset mõõteviga. Teadmata mõõteveaga mõõtetulemus on

kasutu, seega on mõõtevea määramine otsustava tähtsusega. Mida väiksem on mõõtevea vahemik, seda täpsemad on mõõtetulemused.



Joonis 4. Mõõtetulemuse esitamine

Mõõtetulemus tuleb esitada koos eeldatava mõõteveaga (Joonis 4. Mõõtetulemuse esitamine).

$$x_m = x \pm \Delta x,$$

kus:
x_m – mõõtetulemus,
x – parim eeldatav mõõtetulemus,
Δx – eeldatav mõõteviga.

1.2 Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem

Mõõtühikute süsteem on mõõtühikute ja nendega seotud reeglite kogum. Nüüdseks on kõige levinumad mõõtühikud kogutud **Rahvusvahelise Standardiorganisatsiooni (ISO)** standardisse. Kõige laiemalt kasutatav mõõtühikute süsteem on meetermõõdustik **SI** (**rahvusvaheline mõõtühikute süsteem**), kuid kasutusel on ka **inglise** ja **ameerika tollimõõdustikud.**

SI-süsteemi mõõtühikud on esitatud Tabel 2. SI-süsteemi mõõtühikud.

Tabel 2. SI-süsteemi mõõtühikud

Mõõtühiku tähis	Mõõtühiku nimetus	Dimensiooni tähis	Mõõtesuuruse nimetus
m	meeter	L	pikkus
kg	kilogramm	M	mass
s	sekund	T	aeg
A	amper	I	elektrivoolu tugevus
K	kelvin	Θ	termodünaamiline temperatuur
mol	mool	N	ainehulk
cd	kandela	J	valgustugevus

SI-süsteemi mõõtühikute definitsioonid on esitatud allpool.

Pikkus – vahemaa, mille valgus läbib vaakumis $\frac{1}{299792458}$sekundi jooksul.

Mass – väikese ruumalaga umbes 47 cm^3 plaatina-iriidiumsulamist silindrikujulise prototüübi mass, mida hoitakse ühes laboris Prantsusmaal.

Aeg – tseesium-133 põhiseisundi kahe ülipeenstruktuurilise energianivoo vahelisele siirdele vastava kiirguse 9 192 631 770-kordne periood.

Elektrivoolu tugevus – püsiv vool, mis tekitab elektrijuhtide vahel võrdse jõu 2×10^{-7} njuutonit meetri kohta, kui elektrijuhtideks on kaks paralleelset määramata pikkuse ja väga väikese ristlõikepindalaga elektrijuhti, mis asuvad vaakumis üksteisest 1 m kaugusel.

Termodünaamiline temperatuur – mõõteobjekti kogu keskmise siseenergia absoluutne mõõt väljendatuna kelvinites. Kelvin on $\frac{1}{273,16}$ vee kolmikpunkti termodünaamilisest temperatuurist.

Ainehulk – on ainekogus, mis sisaldab sama palju elementaarosakesi, kui on aatomeid 0,012 kilogrammis süsiniku isotoobis ^{12}C.

Valgustugevus – monokromaatilise kiirgusallika valguslaine tugevus kindlas suunas sagedusel $5,4 \times 10^{14}$ Hz ja kiirgustugevusega $\frac{1}{683}$ W steradiaani kohta.

1.3 Inglise ja ameerika tollimõõdustikud

- **Inglise tollimõõdustik** on süsteem, mida kasutatakse ametlikult Suurbritannias, Kanadas, Indias ja muudes riikides, mis olid varem Briti impeeriumi osad. See süsteem määratleti esmakordselt Inglise kaalu- ja mõõteseaduses 1824. aastal. 1965. a hakati kasutama meetermõõdustikku ja nüüd määratletakse inglise tollimõõdustikku meetermõõdustiku kaudu.

- **Ameerika tollimõõdustik** on Ameerika Ühendriikides kasutatav süsteem, mis on tuletatud inglise tollimõõdustikust. Ühise päritolu tõttu on need kaks mõõdustikku üsna sarnased, kuid siiski esineb ka erinevusi. Näiteks ameerika tollimõõdustikus on üks mõõtühikute määratlus vedelike ja teine puistainete jaoks, samas inglise tollimõõdustikus on ainult üks määratlus ja see erineb ameerika tollimõõdustikust.

Inglise ja ameerika tollimõõdustike erinevused on esitatud Tabel ARABIC. Inglise ja ameerika tollimõõdustike erinevused.

Tabel ARABIC. Inglise ja ameerika tollimõõdustike erinevused

Inglise tollimõõdustik	**Ameerika tollimõõdustik**	**Ameerika puistainete mõõdustik**	**Meetermõõdustik**
1 vedelikuunts [imp fl oz]	0,961 [US fl oz]	-	0,0296 [l]

1 pint [imp pt] = 20 [imp fl oz]	1,201 [US pt]	1,032 [US dry pt]	0,568 [l]
1 tsentner = **112 naela [lb]**	1 tsentner = **100 naela [lb]**	-	**112[lb]** ≈ 50,802 [kg] **100 [lb]** ≈ 45,359 [kg]

1.4 Kokkuvõte

Mida hõlmavad mõõtmisteadus ja andmehõive (kõige tähtsamad teemad)?

- Mõõtesüsteemi kavandamine;
- Mõõtesüsteemi modelleerimise kirjeldus;
- Mõõtetulemuse mõõtmine ja kogumine;
- Mõõtesüsteemide dünaamiliste omaduste kindlaksmääramine (eksperimentaalmeetod);
- Dünaamilise vea kindlaksmääramine;
- Filtreerimine ja andmete edastamine;
- Signaalitöötlus.

Mõõtmisega seotud teadusvaldkonnad:

- Matemaatika,
  - matemaatiline analüüs,
  - diskreetne matemaatika,
  - lineaarne matemaatika,
- vigade hindamine,
- signaalitöötlus (nt audio, digitaalne, kujutis, video),
- juhtimisteooria,
- informatsiooniteooria (nt kodeerimise teooria, allikateooria),
- telekommunikatsioon,
- filtreerimine.

1.5 Teadmiste kontroll

1. Metroloogia on …
   a) … komplekt mõõteriistu;
   b) … Komplekt mõõtühikuid;
   c) … teadusvaldkond mis uurib objektiivsete mõõtmiste meetodeid ja vahendeid;
   d) … teadus mille eesmärk on luua mõõtühikute süsteem.

2. Enimkasutatud mõõtühikute süsteem on …
   a) SI;
   b) ISO;
   c) Inglise tollimõõdustik;
   d) Ameerika Ühendriikide tollimõõdustik.

3. Mõõteviga …
   a) saab vältida kasutades häid mõõteriistu;
   b) ei sõltu mõõtetingimustest;

c) ei saa välistada;
d) saab kõrvaldada ainult kui mõõdetava suuruse väärtus ei muutu mõõtmise ajal.

4. Mõõdetav suurus on …
   a) .mõõtmistulemus;
   b) … objekti atribuut mida saab kindlaks määrata;
   c) … mõõdetud suuruse tegeliku väärtuse ja mõõdetud väärtuse erinevus;
   d) … ainult selline suurus mille väärtus ei muutu mõõtmise ajal.

5. Rahvusvaheline mõõtühikute süsteemis sümbol „N“
   a) … tähistab Njuutonit – jõu nime;
   b) … tähistab aine kogust mida moolides;
   c) … tähistab vee sulamise termodünaamilist temperatuuri;
   d) … tähistab väärtust Kelvinites.

6. Inglise tollimõõdustik …
   a) … on sama nagu Ameerika Ühendriikide tollimõõdustik;
   b) … on tuletatud Ameerika Ühendriikide tollimõõdustikust;
   c) … on Ameerika Ühendriikide tollimõõdustiku alus, seega need ei erine üksteisest;
   d) … on aluseks Ameerika Ühendriikide tollimõõdustikule, kuid nende vahel on erinevusi.

7. SI mõõtühikute süsteemis mõõtesuurus nimetusega aeg …
   a) … määratletakse kui teekonda, mida valgus läbib vaakuumis $\frac{1}{299792458}$ sekundi jooksul;
   b) … mõõdetud väärtust väljendatakse sekundites;
   c) … ühiku tähiseks on „S“;
   d) … tähendab heleduse intensiivsust.

8. Termodünaamilist temperatuuri rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis …
   a) … väljendatakse Celsiuse kraadides;
   b) … ei sõltu vee kolmikpunkti (kolme olekufaasi tasakaaluoleku) temperatuurist;
   c) … väljendatakse kandelates;
   d) … väljendatakse kelvini kraadides;
   e) … ühiku tähiseks on sümbol „I“.

9. Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis , ühik tähisega „J“ …
   a) … tähendab drzauli – energia ühikut;
   b) … tähendab elektrivoolu mille suuruse ühikuks on amper.
   c) … sellist ühikut pole olemas;
   d) … tähendab valgustugevust mille ühik on kandela.

2 SIGNAALITEOORIA

2.1 Sissejuhatus. Signaal

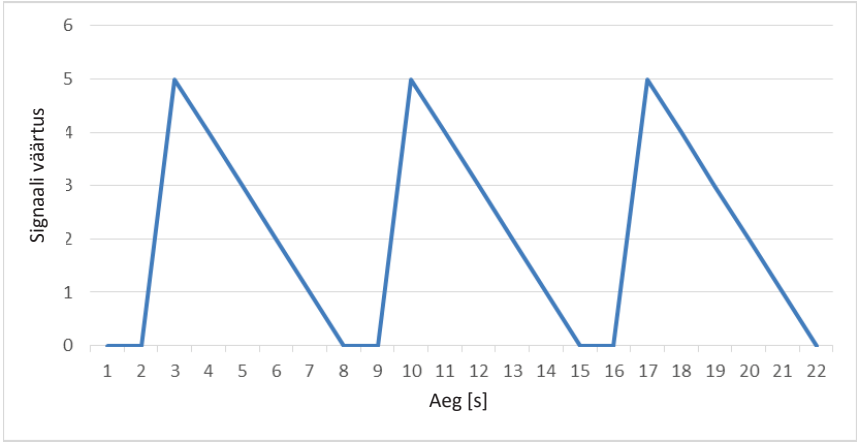
Signaal on funktsioon, mis kirjeldab füüsikaliste suuruste muutumist ajas.
Signaale jaotatakse erinevate tunnuste alusel. Üks võimalik jaotus on perioodilised ja mitteperioodilised signaalid.

2.2 Perioodilised signaalid

Perioodiline signaal on selline, mille väärtused korduvad korrapäraste ajavahemike järel (Joonis 5, Joonis 6). Neid saab kirjeldada perioodiliste funktsioonidena, mille üldvalem on järgmine.

$$f(x) = f(x+T)\,,$$

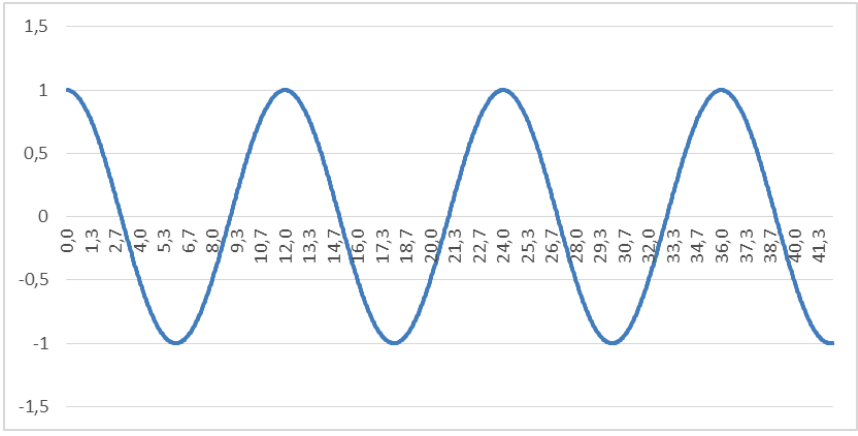
kus: T – nullist erinev periood



Joonis 5. Perioodilise signaali näide, perioodiga T = 7 [s]

2.2.1 Siinus- ja koosinussignaal

Perioodilise signaali näiteks on signaal, mida kirjeldab siinus- või koosinusfunktsioon (joonis6).



Joonis 6. Koosinusfunktsiooni näide, perioodiga T = 12 [s]

Koosinusfunktsioon (Joonis 6. Koosinusfunktsiooni näide, perioodiga T = 12 [s]
) on perioodiline ja periood on 2π.

$$\cos x = \cos(x + 2\pi)$$

Analoogne siinusfunktsioon on perioodiga 2π.

$$\sin x = \sin(x + 2\pi)$$

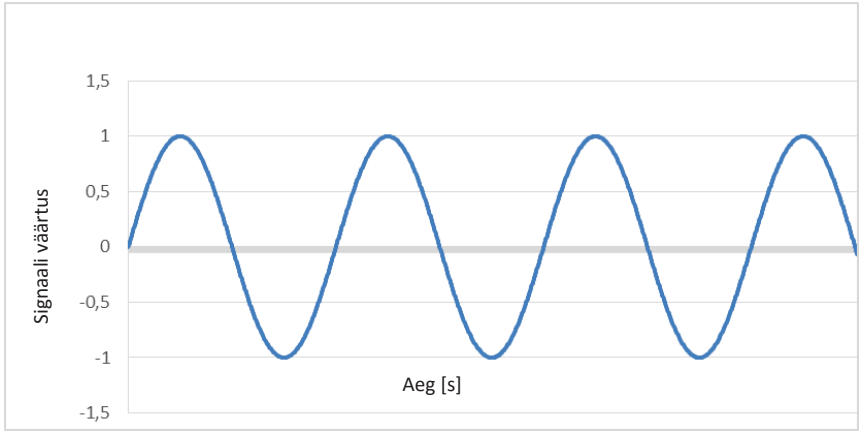
Kõik harmoonilised funktsioonid on perioodilised.

2.2.2 Harmoonilised signaalid

Harmoonilisi signaale (Joonis 7) saab kirjeldada harmooniliste funktsioonidega kindlas aja-vahemikus järgmise üldise valemi alusel.

$x(t) = Acos(2\pi ft + \varphi)$,
kus:

A – funktsiooni amplituud,
f – tüüpiline sagedus,
ϕ – funktsiooni x(t) faasinihe,
2πf = ω – ringsagedus.



Joonis 7. Harmoonilise signaali näide

2.2.3 Fourier' rida

Iga perioodilist signaali saab jaotada lihtvõnkumiste summaks ja trigonomeetrilisteks funktsioonideks – siinusteks ja koosinusteks. Selle väite esitas ja tõestas Jean-Baptiste Joseph Fourier. Teiste sõnadega, Fourier' rida S(x) on viis esitada funktsiooni lihtsate siinus- ja koosinuslainete summana. Oletame, et:
S(x) – Fourier' rida,
T – funktsiooni periood,
ω – ringsagedus, $\omega = \frac{2\pi}{T}$,
f – tüüpiline sagedus, $\omega = 2\pi f$.

Võtame perioodiliseks funktsiooniks f(x): R->R koos $T \in R^+$, mis on integreeritav vahemikus $[-\frac{T}{2}; \frac{T}{2}]$. Kui kasutada signaali ringsageduse definitsiooni ω, saab Fourier' rida kirjutada järgmiselt.

$$S(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega x) + b_n \sin(n\omega x)),$$

kus:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(x) \cos(n\omega x) dx, \quad for\ n = 0, 1, 2, 3 \ldots,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(x) \sin(n\omega x) dx, \quad for\ n = 1, 2, 3, 4 \ldots.$$

2.2.4 Polüharmooniline signaal

Polüharmooniline signaal – signaal mis moodustub vähemalt kahe harmoonilise signaali summeerimisel. Polüharmooniline signaal mis koosneb kahe harmoonilise signaali summast on esitatud järgmisel kujul:

$$x(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \varphi_2),$$

kus

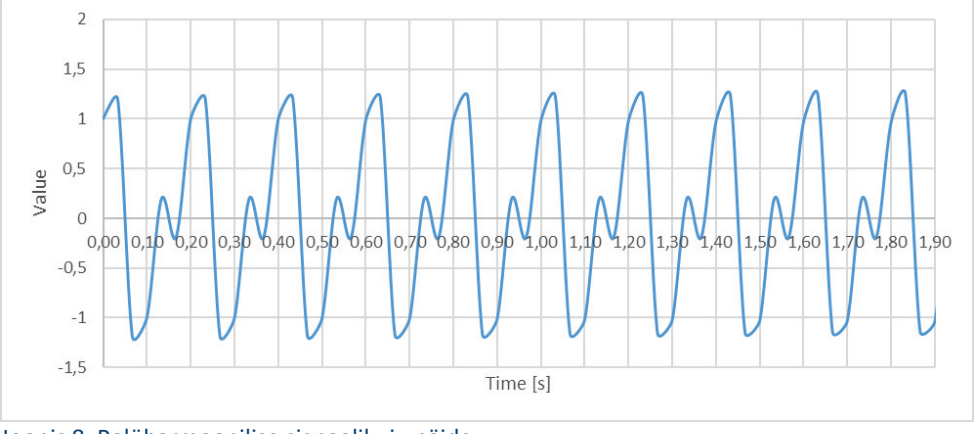
A_1, A_2 - on harmooniliste amplituudid,

$f_1,\ f_2$ - tavalised harmooniliste sagedused,

φ_1, φ_2 - hrmooniliste (omavaheline) faasinihe.

Polüharmoonilise signaali näide on esitatud Joonis 8:

$$x(t) = \cos(2\pi * 5ft) + 0{,}8 * \sin(2\pi * 10ft)$$



Joonis 8. Polüharmoonilise signaalikuju näide

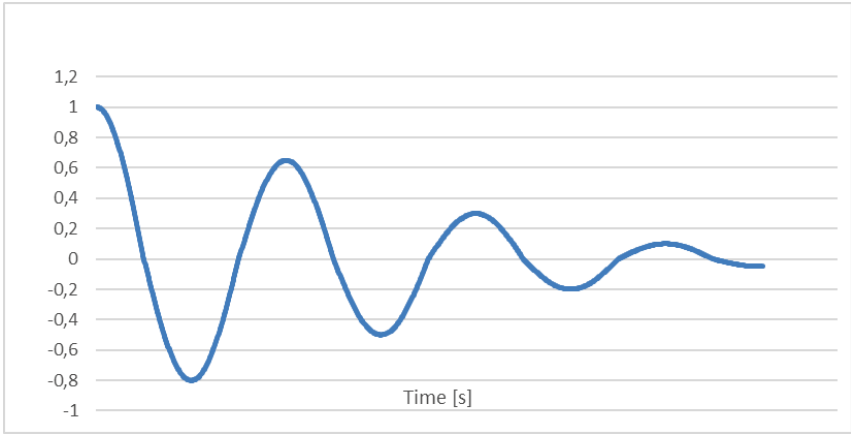
2.3 Mitteperioodilised signaalid

Mitteperioodiline signaal (Joonis 9, Joonis 10) – on signaal, mida ei saa kirjeldada võrrandiga:

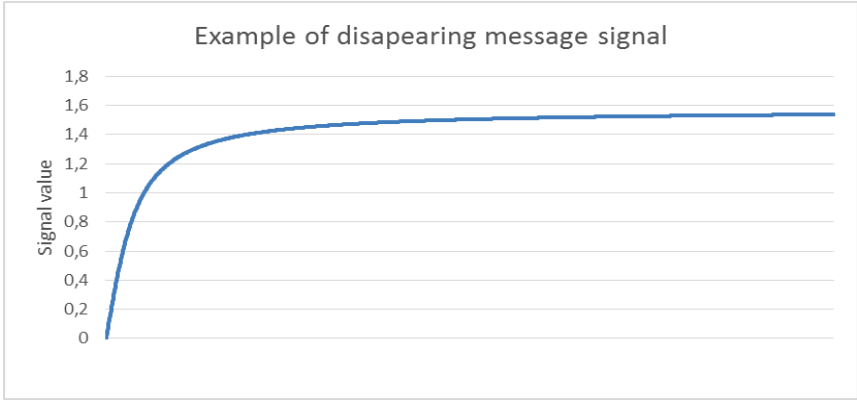
$$f(x) = f(x + T)$$

kus:

T – null-väärtusest erinev funktsiooni periood.



Joonis 9. Mitte perioodilise signaali näide (sumbub)



Joonis 10. Mitteperioodilise signaali näide (2)

2.3.1 Peaaegu perioodilised signaalid

Peaaegu perioodiline signaal (Joonis 11) – signaal, mida saab kirjeldada harmoonilise funktsioonide seeriaga järgmise võrrandi abil.

$$x(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \, sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$$

kus:

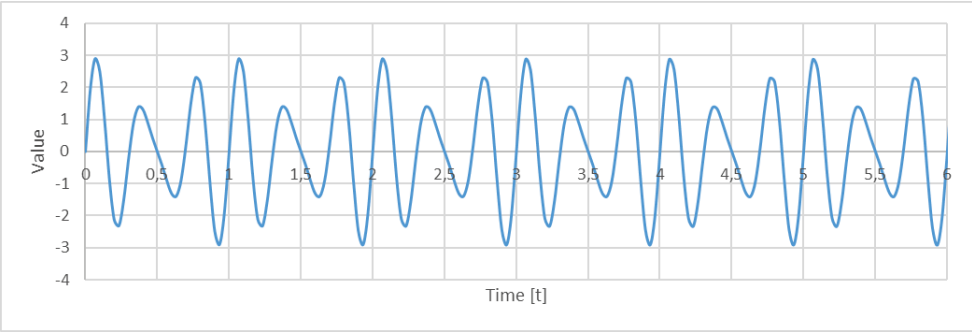
A_n funktsiooni n-inda komponendi amplituud,

f_n funktsiooni n-inda komponendi nurksagedus

φ_n funktsiooni n-nda komponendi algfaas.

Peaaegu perioodilise signaali võrrandi näide.

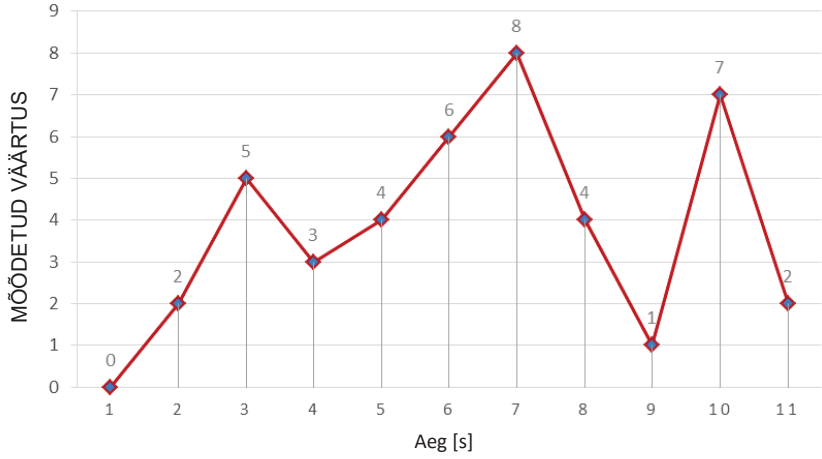
$$x(t) = 2\sin(2\pi * 3t) + \sin(2\pi * 4t)$$



Joonis 11. Peaaegu perioodilise signaali näide

2.4 Analoog-, diskreet- ja digisignaal

Signaale saab jaotada ka nende jätkuvuse abil (Joonis 12). Need võivad olla analoogsed või diskreetsed. Põhi- ja alatüüpe on kirjeldatud allpool.



Joonis 12. Analoog- ja diskreet-/digisignaal

2.4.1 Analoogsignaalid

Analoogsignaal – signaal, mille väärtused võivad igal ajahetkel muutuda ja see on signaali loendamatuks (jätkuvaks) osaks. See on kasulik, kui on vaja kogu infot mõõteväärtuse muutumise kohta.

2.4.2 Diskreetsignaalid

Diskreetsignaal – signaal, mille väärtused saadakse mõõteväärtuse pideva mõõtmise ja kindlate ajavahemike järel registreerimisega.

Digisignaal – diskreetsignaal, millel on piiratud arv väärtuseid.

2.5 Teadmiste kontroll. Peatükk 2

1. Signaal…

a) … on funktsioon, mis kirjeldab ainult füüsilisi suurusi mis on ajas pidevad;

b) … on funktsioon, mis kirjeldab füüsiliste suuruste muutlikkust ajas.

c) … on harmoonilise signaali liik;

d) … ei muutu ajas.

2. Kosinus funktsiooni abil…

a) … ei saa kirjeldada signaali;

b) … saab kirjeldada perioodilist signaali ainult siis kui selle periood on 2π;

c) … ei saa kirjeldada harmoonilist signaali;

d) … saab kirjeldada perioodilist signaali.

3. Harmoonililist signaali…

a) … ei saa kirjeldada perioodilise funktsiooniga;

b) … saab kirjeldada ainult kosinus funktsiooniga;

c) …ei saa kirjeldada sinus funktsiooniga;

d) … saab kirjeldada sinus funktsiooniga;

e) … saab kirjeldada ainult sinus funktsiooniga.

4. Fourier rida …

a) … ei esita harmoonilist funktsiooni;

b) … on viis kuidas esitada peaaegu perioodilisi signaale;

c) … on hea kasutada analoogsignaalide muundamiseks digitaalsignaalideks;

d) … esitab perioodilist funktsiooni lihtsate siinuslainete summana.

5. Polüharmoonilne signaal …

a) … seda saab kirjeldada ainult ühe harmoonilise signaaliga;

b) … on perioodilise signaali liik;

c) … on ajas püsiva väärtusega;

d) … ei ole kirjeldatav Fourier reaga.

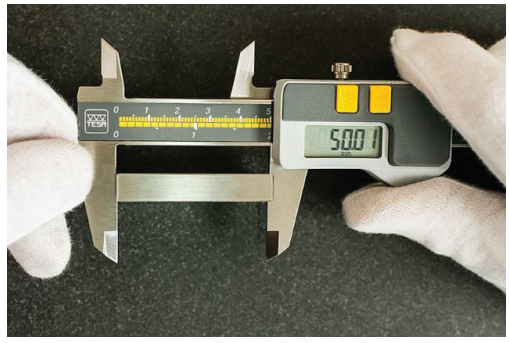
3 MÕÕTEMEETODID JA -VEAD

3.1 Sissejuhatus. Mõõtemeetod

Mõõtemeetod on menetlusviis, mida kasutatakse mõõtesuuruse väärtuse võrdlemiseks kokkulepitud väärtusega. Sobiva meetodi valik sõltub muuhulgas mõõtetingimustest ja eeldatavatest tulemustest. Mõõtetulemuse saavutamise viisist olenevalt saab meetodeid jagada otseseks, kaudseks ja kompleksseks mõõtmiseks.
Samuti on kasutusel mõõtemeetodite jaotus üheks põhimeetodiks ja mitmeks võrdlusmeetodiks.

3.1.1 Otsene mõõtmine

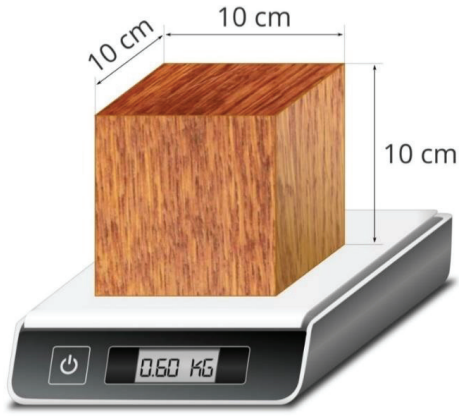
Otsene mõõtmine on mõõtemeetod, mida kasutatakse mõõtesuuruse väärtuse määramiseks mõõteobjekti konkreetse omaduse otsese mõõtmise kaudu. See tähendab, et mõõtetulemus on mõõdetud väärtusest otseselt tuletatav. Kõige lihtsam asjakohane näide on pikkuse mõõtmine nihiku abil (Joonis 13. Pikkuse mõõtmine nihiku abil
).



Joonis 13. Pikkuse mõõtmine nihiku abil

3.1.2 Kaudne mõõtmine

Kaudne mõõtmine on mõõtemeetod, mida kasutatakse mõõtesuuruse väärtuse määramiseks mõõteobjekti muude omaduste mõõtmise kaudu. Kaudse mõõtmise näide on materjali tiheduse mõõtmine, mis põhineb materjali massi ja mahu mõõtmisel (Joonis 14).



Joonis 14. Kaudse mõõtmise näide [20]

3.1.3 Kompleksne mõõtmine

Kompleksne mõõtmine on mõõtemeetod, mis seisneb üksteisega seotud mõõdetavate suuruste määramises algebraliste võrrandite abil.

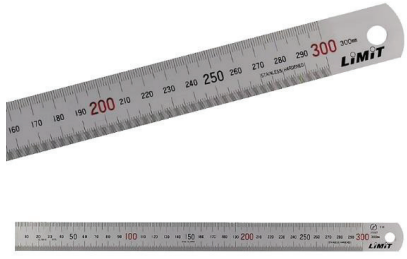
3.1.4 Mõõtmise põhimeetod

Põhimeetod on mõõtemeetod, millega mõõtesuuruse määrangus esitatud põhilisi omadusi mõõdetakse selleks, et saada mõõtetulemus. Näiteks elektripinge ja -voolu tõelise väärtuse mõõtmine võib anda teavet võimsuse tõelise väärtuse kohta. Multimeeter on näide selleks kasutatavast mõõtevahendist (Joonis 15).

Joonis 15. Multimeeter[21]

3.1.5 Otsese võrdluse meetod

Otsese võrdluse meetod põhineb mõõtesuuruse koguväärtuse võrdlusel tugiväärtusega. Näiteks pikkuse mõõtmine joonlaua abil (Joonis 16).



Joonis 16. Joonlaud [21]

3.1.6 Diferentsiaalmeetod

Diferentsiaalmeetod on meetod, kus teadaolev alusväärtus lahutatakse mõõdetud väärtusest. Seejärel mõõdetakse saadud erinevust otsese võrdluse meetodil.

3.1.7 Nullmeetodiga mõõtmine

Nullmeetodiga mõõtmine on diferentsiaalmeetodi erijuhtum, kus erinevus teadaoleva alusväärtuse ja mõõdetava väärtuse vahel on null. Näiteks kahe kaalukausiga kaal (Joonis 17).

Joonis 17. Kahe kaalukausiga kaal [22]

3.2 Mõõteviga

Mõõtmise hoolikusest olenemata on võimatu saada täiesti täpset tulemust. Alati on võimalus mõõtevea tekkimiseks. Mõõteviga on seotud:

- vale mõõtemeetod;
- mõõtevahendite puudulik kalibreerimine;
- muutused keskkonnas, mis mõjutavad mõõteprotsessi;
- puudulik vaatlusmeetod;
- ja paljud muud põhjused.

Eespool nimetatud põhjustel tuleb mõõtetulemus alati esitada summana (joonis 4).

$$x_m = x \pm \Delta x ,$$

kus:
x_m – mõõtetulemus;
x – parim eeldatav mõõtetulemus;
Δx – mõõtemääramatus on esitatud maksimaalse täpsusega kaks kümnendkohta ja väljendatud samades mõõtühikutes, kui mõõtetulemus.

3.2.1 Absoluutviga

Absoluutviga on viga, mida kasutatakse väikese arvu mõõtmiste korral.

$$\Delta = x_m - \vartheta ,$$

kus:
Δ – absoluutviga;
x_m – mõõtetulemus;
ϑ – tõeline väärtus.

3.2.2 Suhtviga

Suhtviga on absoluutse mõõtevea ja tehtud mõõtmise suhe. Sellel mõõteveal puuduvad mõõteühikud ja seda väljendatakse protsentides.

$$\delta = \frac{\Delta}{\vartheta} ,$$

kus:
δ – suhtviga;
Δ – absoluutviga;
ϑ – tõeline väärtus.

3.2.3 Korduvmõõtmisega seotud mõõtevead

Ühe suuruse korduvmõõtmine tundliku mõõtevahendi abil annab veidi erinevaid tulemusi. Tavaliselt jaotatakse mõõtevead järgmisteks lisavigadeks:

- süstemaatiline viga;
- juhuslik viga;
- liigviga.

3.2.3.1 Süstemaatilised vead

Süstemaatilised vead on mõõtevead, mis sama suuruse mõõtetulemuse pikkades mõõteseeriates alati esinevad ja tehakse alati samadel tingimustel ning sama mõõtevahendiga. Neid mõõtevigu saab osaliselt või täielikult elimineerida teoreetiliselt või eksperimentaalselt määratud arvutuste abil.

3.2.3.2 Juhuslikud vead

Juhuslikud vead on mõõtevead, millel on erinevad väärtused, mille muutumist ei ole võimalik kindlaks määrata ja mis ilmnevad püsivatel mõõtetingimustel.

3.2.3.3 Liigvead

Liigvead on mõõtevead, mille korral mõõtetulemus erineb teistest mõõtetulemustest olulisel määral. Sellise mõõteveaga mõõtetulemus tuleb hoolikalt üle vaadata.

3.2.4 Mõõtemääramatus

Mõõtemääramatus on parameeter, mis on seotud mõõtetulemusega, mis iseloomustab nende väärtuste dispersiooni, mida võib põhjendatult seostada mõõtesuurusega.
1995. a avaldas Rahvusvaheline Standardiorganisatsioon (ISO) mõõtemääramatuse hindamise juhendi [18]. Selles dokumendis esitatud mõisted ja normid on kohustuslikud. Mõõtemääramatuse hindamise juhendis eristatakse kahte mõõtemääramatuse hindamise meetodit:

- A-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine;
- B-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine.

3.2.4.1 A-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine

A-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine on määramatuse hindamise meetod, milles kasutatakse vaatlusseeria statistilist analüüsi. Seda meetodit kasutatakse, kui on võimalik teha palju mõõtmisi samades tingimustes.

Suuruse q eeldatava väärtuse μ_q parim eeldatav mõõtetulemus on enamikel juhtudel aritmeetiline keskmine või $\bar{q}$ keskmine väärtus, mille korral on tehtud n sõltumatut vaatlust q_k kohta [18].

$$\bar{q} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} q_k$$

$\bar{q}$ hindamisega seotud standardset mõõtemääramatust saab kindlaks teha järgmiselt:

1) esiteks tuleb arvutada q_j väärtusest eksperimentaalne dispersioon $s^2(q)$

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}(q_j - \bar{q})^2$$

2) seejärel tuleb arvutada eksperimentaalse dispersiooni keskmine $s^2(\bar{q})$.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n}$$

$s^2(\bar{q})$ positiivse märgiga teine aste on keskmise $s(\bar{q})$ eksperimentaalne standardhälve.

Standardmääramatus $u(\bar{q})$ on keskmise eksperimentaalne standardhälve:

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q})$$

3.2.4.2 B-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine

B-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine on määramatuse hindamise meetod, milles kasutatakse muid analüüsimeetodeid kui vaatlusseeria statistiline analüüs. Selle meetodiga määratakse standardmääramatus kindlaks teadusliku analüüsi abil, mis põhineb kogu saadaoleval informatsioonil sisendväärtuse võimalike variatsioonide kohta. Seda meetodit kasutatakse, kui on tegemist väikese arvu mõõtmistega. See meetod põhineb üld- ja kogemuspõhistel teadmistel, mida on võimalik omandada praktilise tegevuse käigus.

Andmekogum võiks sisaldada:

- eelmisi mõõteandmeid,
- üld- või kogemuspõhiseid teadmisi asjakohaste materjalide ja vahendite kasutamise ja omaduste kohta,
- tootja tehnilisi andmeid,
- kalibreerimise ja muude sertifikaatidega seotud andmeid,
- käsiraamatutes esitatud tugiandmetega seotud mõõtemääramatusi.

3.3 Teadmiste kontroll. Peatükk 3

1. Süstemaatilisi vigu…

   a) … saab arvutusvahendite kasutamisega osaliselt vältida;

   b) … saab vältida tehes sama mõõtesuuruse väärtuse leidmiseks ainult mõned mõõtmised;

   c) … ei saa kõrvaldada;

   d) … esineb tänapäeval harva.

2. Liigvead…

   a) … on raskesti avastatavad;

   b) … on tekkinud, kui suuruse mõõdetud väärtused on üksteisest oluliselt erinevad;

   c) … ei ole tähtsad;

   d) … ei mõjuta mõõdetud väärtust.

3. Juhuslik viga…

   a) … esineb stabiilsetes (samades) tingimustes ja sellel on konstantne väärtus;

   b) … esineb stabiilsetes (samades) tingimustes ja selle väärtused on erinevad;

   c) … sellel on ennustatav väärtus;

   d) … on kergesti välditav.

4. B-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine …

   a) … on määramatuse hindamise meetod, milles kasutatakse muid analüüsimeetodeid kui vaatlusseeria statistiline analüüs;

   b) … on määramatuse hindamise meetod, milles kasutatakse vaatlusseeria statistilist analüüsi;

   c) … meetodit kasutatakse kui tegemist on suure arvu järjestikuste mõõtmistega;

   d) … meetodit on lihtne kasutada inimestel, kellel pole kogemusi mõõtetulemuste analüüsi valdkonnas.

5. A-tüüpi mõõtemääramatuse hindamine …

   a) … meetodit kasutatakse kui on tegemist väikese arvu mõõtmistega.

   b) … meetodit kasutatakse väikese arvu mõõtmiste tulemuste (mis saadi erinevates tingimustes) statistiliseks analüüsiks;

   c) … meetodit kasutatakse, kui on võimalus teha palju mõõtmisi samades tingimustes.

4 MÕÕTEMUUNDUR JA SELLE MÕÕTEVEAD

4.1 Sissejuhatus

Uusimates mõõtevahendites on infokandjana tavaliselt kasutusel elektriline signaal. Signaali edastamine on sarnane energia edastamisele.

4.2 Mõõtemuundur

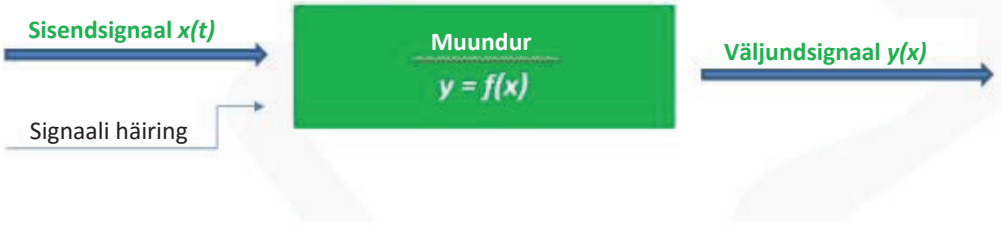
Mõõtemuundur on seade või omavahel ühendatud seadmete kogum energia muundamiseks ühest vormist teise. Mõõtemuundurid sisaldavad komponente, mis salvestavad potentsiaalset ja kineetilist energiat, kuid ka komponente, mis põhjustavad energiakadu (tavaliselt hajub soojusena). Tavaliselt teisendavad mõõtemuundurid signaali ühest vormist teise.

Mõõtemuundurid on jagatud rühmadeks:

- Analoogmuundurid,
- Digitaalmuundurid,
- analoog-digitaalmuundurid,
- digitaal-analoogmuundurid.

Sisendsignaal [joonis 16] on mõõtetulemusega seotud signaal, mis edastatakse muundurile.

Väljundsignaal [Joonis 18] on muunduri muundatud signaal.



Joonis 18. Sisend- ja väljundsignaal

Igal muunduril on asjakohane signaalide töötlemisviis, mis esindab sisendsignaali valitud parameetri ja väljundsignaali vastava parameetri suhet stabiilsetes mõõtetingimustes. Muundurite muutumatuid nimiandmeid tuleb teada, et osata neid koos mõõtevahenditega kasutada, ja aru saada, kuidas need mõjutavad mõõtetulemust.

Muutumatud nimiandmed on muunduri tööomadused, mis on püsivad või muutuvad ajas aeglaselt. Muutumatud nimiandmed on näiteks täpsus, kordustäpsus, tundlikkus, lineaarsus, korratavus, reprodutseeritavus, resolutsioon, ulatus, stabiilsus ja triiv.

4.2.1 Mõõtemuunduri täpsus ja kordustäpsus

Täpsus on määr, mis näitab, kui lähedal on mõõtetulemus tõelisele väärtusele.

Kordustäpsus on määr, mis näitab, kui paljud samades tingimustes tehtud mõõteseeria mõõtetulemused sobivad üksteisega kokku.

Mõõtetegevuses ei ole täpsus ja kordustäpsus ekvivalentsed mõisted [Joonis 19].

Joonis 19. Täpsus ja kordustäpsus

4.2.2 Mõõtemuunduri tundlikkus

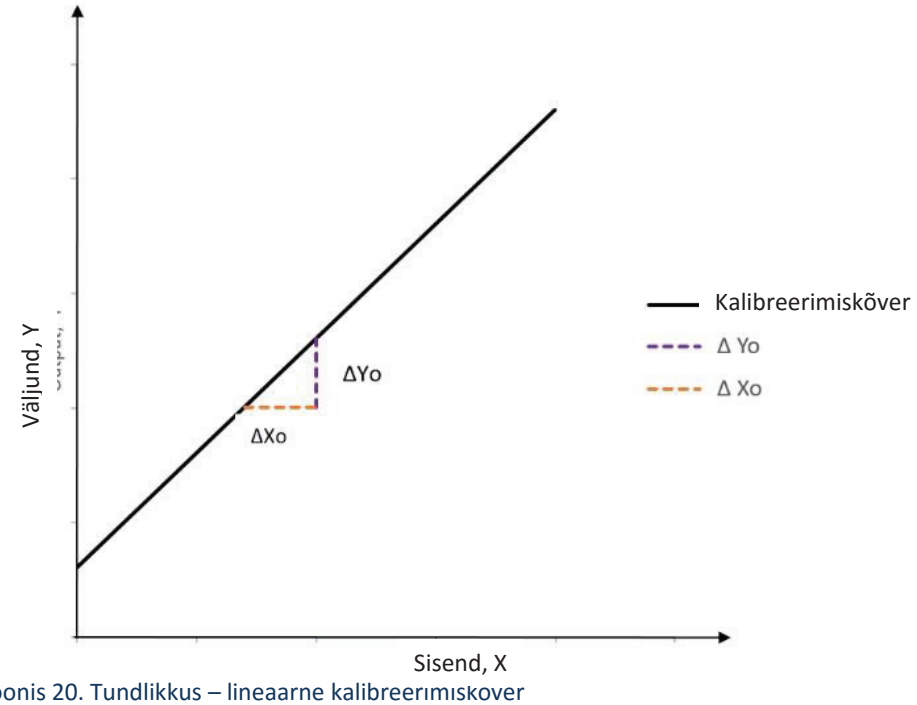
Muunduri tundlikkus on kõige väiksem muutus sama muutuja mõõtetulemustes, mis on saadud samades mõõtetingimustes lühikese ajavahemiku kestel. Matemaatiliselt:

$$S = \frac{\Delta y_0}{\Delta x_0},$$

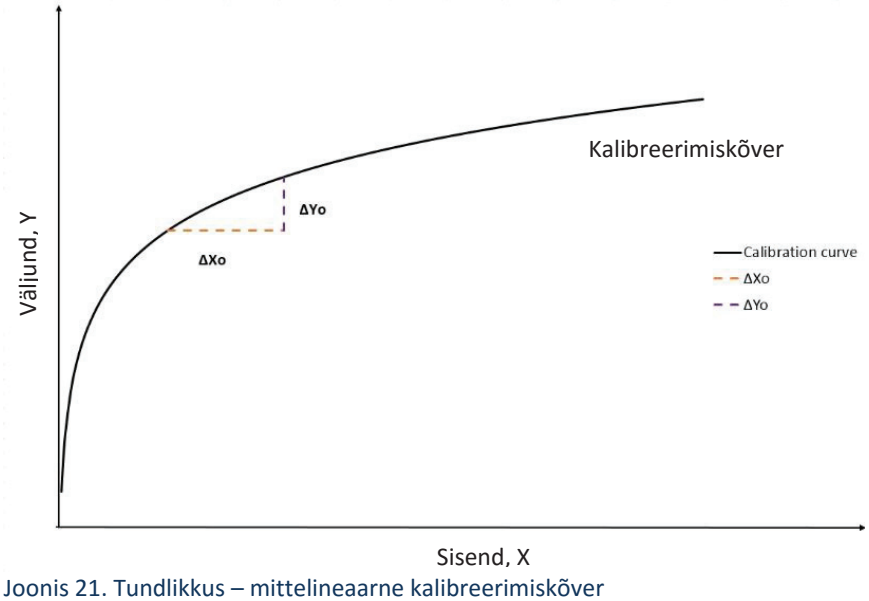
kus:
S – tundlikkus,
Δy_0 – lõpmata väike muutus väljundis,
Δx_0 – lõpmata väike muutus sisendis.

Lineaarse kalibreerimiskõvera korral on muunduri tundlikkus kalibreerimiskõvera kalle [Joonis 20].

Mittelineaarse kalibreerimiskõvera korral muutub muunduri tundlikkus sisendis [Joonis 21].



Joonis 20. Tundlikkus – lineaarne kalibreerimiskover



Joonis 21. Tundlikkus – mittelineaarne kalibreerimiskõver

4.2.3 Mõõtemuunduri lineaarsus

Muunduri lineaarsus väljendab seda, kui palju muunduri tegelik mõõtekõver (väljundi kõver) erineb ideaalsest tunnuskõverast. Lineaarsusviga nimetatakse tihti ebalineaarsuseks ja väljendatakse ebalineaarsuse protsendina.

Tuleb kindlasti teada, millistes tingimustes kehtivad muunduri tehnilised omadused ja milline kõrvalekalle ei peaks põhjustama muutusi lineaarsuses. Mõned lineaarsust sageli mõjutavad tegurid on näiteks:

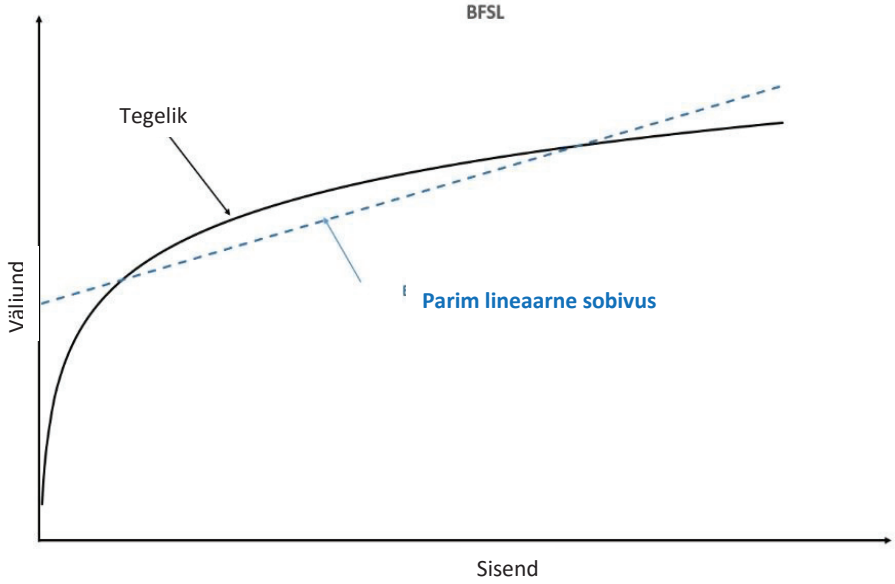
- niiskus;
- temperatuur;
- vibratsioon.

Kõige rohkem kasutatakse muunduri lineaarsuse esitamiseks ja tõlgendamiseks järgmisi meetodeid:

- BFSL (parim lineaarne sobivus);
- TBL (otstel põhinev lineaarsus / lõpp-punkti lineaarsus).

4.2.3.1 Mõõtemuunduri lineaarsusvigade mõõtmine. BFSL ja TBL

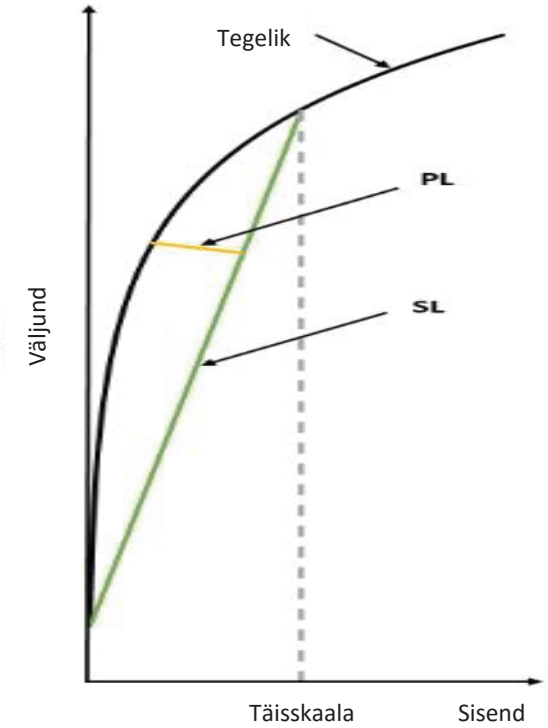
Lineaarsusviga on muunduri väljundkõvera kõrvalekalle etteantud sirgjoonest soovitud piirkonnas. Lineaarsusvea arvutamise üks meetod on vähimruutude meetod, mis esitab andmepunktidega matemaatiliselt **kõige paremini sobiva sirge (BFSL)** [Joonis 22].



Joonis 22. BFSL (parim lineaarne sobivus)

Teine meetod on tunnusjoone **otstel põhinev lineaarsus (TBL).** Seda määratakse mitmes etapis (Joonis 23):

1) esimene etapp on sirgjoone (SL) tõmbamine väljundkõvera andmete lõpp-punktide vahele
2) teine etapp on ristjoone (PL) tõmbamine algsest joonest (SL) väljundkõvera andmepunktini
3) see andmepunkt valitakse selline, mille korral on ristjoone pikkus maksimaalne
4) ristjoone pikkus esindab otstel põhinevat lineaarsusviga.



Joonis 23. TBL (otstel põhinev lineaarsus)

4.2.4 Mõõtemuunduri korratavusviga

Korratavusviga on mõõtesuuruse samades mõõtetingimustes lühikese ajavahemiku kestel tehtud järjestikuste mõõtmiste mõõtetulemuste kõrvalekalle.

4.2.5 Mõõtemuunduri reprodutseeritavus

Reprodutseeritavus on mõõtesuuruse mõõtetulemuste kokkulangevus, kui mõõtmisi teevad erinevad isikud, erinevates kohtades ja erinevate vahenditega teatud ajavahemike järel.

4.2.6 Mõõtemuunduri resolutsioon

Resolutsioon on kõige väiksem juurdekasv, mis peab olema ületatud, et tuvastada väljundväärtuse muutus, kui toimub mistahes sisendväärtuse aeglane juurdekasv.

4.2.7 Mõõtemuunduri ulatus

Muunduri ulatus on mõõtesuuruse väärtuse ülemine ja alumine piir, mida selle muunduri abil saab mõõta.

4.2.8 Mõõtemuunduri stabiilsus

Muunduri stabiilsus on muunduri võime säilitada oma tööomadused mingis ajavahemikus. Tavaliselt väljendatakse stabiilsust protsendina väljundi täisskaalast etteantud ajavahemiku kestel.

Muutused stabiilsuses võivad ilmneda järgmistel põhjustel:
- komponentide vananemine
- komponentide tundlikkuse langemine
- signaali ja müra suhte muutumine jms.

4.2.9 Mõõtemuunduri dünaamiline viga

Dünaamilise mõõtmise tegemiseks tuleb teada muunduri selliseid muutuvaid nimiandmeid, nagu näiteks ajalised ja sageduslikud omadused. Kui mõõtetulemus ei ole ajas stabiilne, tuleb arvesse võtta dünaamilist viga. Dünaamiline viga on ajas muutuv, seetõttu kasutatakse tavaliselt integraalset ruutkeskmise viga.

Integraalset ruutkeskmise viga väljendatakse järgmise matemaatilise valemiga.

$$\bar{\Delta}^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T \Delta^2(t)dt ,$$

kus:
$\bar{\Delta}^2$ – integraalne ruutkeskmine viga
Δ - dünaamiline viga ajavahemikus T
T – ajavahemik.

4.3 Teadmiste kontroll. Peatükk 4

1. Mõõtemuundur…
   a) …muundab energiat ühest vormist teise;
   b) …ei muunda analoogsignaali digitaalsignaalis;
   c) ...ei muunda digitaalsignaali analoogsignaaliks;
   d) …ei põhjusta energiakadusid.

2. Mõõtemuunduri täpsus ja kordustäpsus…
   a) …on näited mõõtemuunduri staatilistest karakteristikutest;
   b) …ei sõltu mõõtemuundurist;
   c) …tähendavad ühte ja sama mõõtmiste valdkonnas;
   d) …on näited mõõtemuunduri dünaamilistest karakteristikutest.

3. Mõõtemuunduri tundlikkus…
   a) …tähendab sama muutuja väärtuse mõõtmisel samades mõõtetingimustes saadud mõõtetulemuste suurimat kõrvalekallet;
   b) …on omadus mida ei ole võimalik määratleda, kui kalibreerimiskõver ei ole lineaarne;
   c) …võib olla kalibreerimiskõvera kalle;
   d) …tähendab vähimat muutust sama suuruse mõõtetulemustes, mis on saadud pika mõõteperioodi jooksul.

4. Mõõtemuunduri lineaarsus…
   a) …ei sõltu tingimustest, millistes mõõtmisi tehakse;
   b) …näitab seda, palju mõõtemuunduri tegeliku väljundkõvera kuju erineb ideaalsest kõvera kujust;
   c) …ei näita seda, kui palju mõõtemuunduri väljundkõvera kuju erineb ideaalsest kõvera kujust;
   d) …ei sõltu temperatuurist.

5. Lineaarsusviga …
   a) …ei saa kirjeldada mittelineaarsuse %-i mõistega;

b) …ei saa esitada mõõtemuunduri tunnusjoonega (väjundkõveraga) kõige paremini sobiva sirgjoonega;

c) …saab esitada ainult mõõtemuunduri tunnusjoone otstel põhinev lineaarsuse määramise meetodiga;

d) … saab esitada ainult andmepunktidega matemaatiliselt kõige paremini sobiva sirgjoonega;

e) …saab esitada kahe meetodiga: a) mõõtemuunduri väljundkõvera kõrvalekaldega etteantud sirgjoonest soovitud piirkonnas või siis b) tunnusjoone otstel olevate mõõtepunktide vahele tõmmatud sirgjoone kasutamisel põhineva meetodiga.

5 MÕÕTESÜSTEEMID

5.1 Sissejuhatus. Mõõtesüsteem

Mõõtesüsteem on mõõtesuuruse väärtuse mõõtmiseks üksteisega ühendatud (tervikuks kokku seotud) mõõtemuundurid/-seadmed.

Õigeks mõõtmiseks ja mõõtevigade hindamiseks tuleb teada muundurite tööomadusi.

Igal muunduril on asjakohane signaalide töötlemisviis, mis esindab sisendsignaali valitud parameetri ja väljundsignaali vastava parameetri suhet stabiilsetes mõõtetingimustes.

5.2 Mõõtesüsteemi valimine

Joonis 24. Mõõtesüsteem Fluke Connect

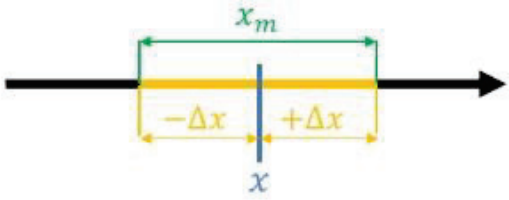
Mõõtesüsteemi valiku õigsuse tagab mõõteobjekti ja mõõtmise põhiparameetrite õige määratlemine. Tuleb teada järgmist:

- mõõdetava füüsikalise suuruse liik
- mõõtesuuruse väärtuse eeldatav vahemik
- soovitav mõõtetäpsus
- andmete kogumise ja esitamise meetod
- kas mõõtmine on eeldatavalt üksik- või mitmikmõõtmine
- arvesse tuleb ka võtta majanduslikke tingimusi. Tähtsad on sellised aspektid, nagu mõõteseadmete hind, mõõtesüsteemi koostamise hind ja mõõtmise hind.

5.3 Mõõtesüsteemi mõõtemääramatus

Tulenevalt eespool mainitust, ei ole olemas eksimatuid mõõtemeetodeid ja igas mõõtesüsteemis esineb mõõteviga.

Mõõtemääramatus mõjutab mõõtetulemust ja põhjustab seda, et mõõtetulemust ei saa väljendada ainult ühe väärtusega. Mõõtetulemus tuleb esitada koos hinnangulise mõõte-veaga.



Joonis 25. Mõõtetulemuse esitamine

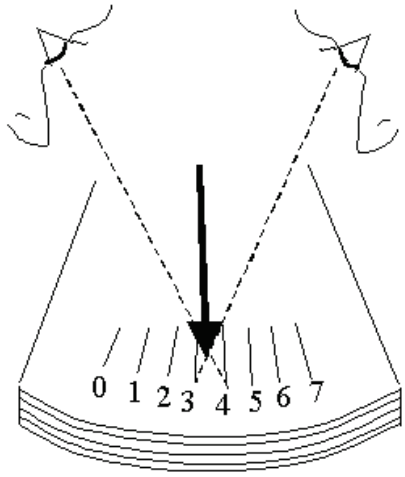
Mõõtetulemus tuleb esitada koos hinnangulise mõõteveaga [Joonis 25. Mõõtetulemuse esitamine].

$$x_m = x \pm \Delta x,$$

kus:
x_m – mõõtetulemus,
x – parim eeldatav mõõtetulemus,
Δx – hinnanguline mõõteviga.

Võimalikke mõõtemääramatuse põhjuseid on palju, mõned nendest on näiteks:

- mõõtetulemuse mittetäielik määratlemine,
- määratletud mõõtetulemuse ebatäpne rakendamine,
- puudulikud teadmised keskkonnatingimuste mõjust mõõtmisprotsessile,
- keskkonnatingimusi iseloomustavate parameetrite ebatäpne mõõtmine mõõtmisprotsessi ajal,
- ebapiisav diskreetimine,
- lõplik resolutsioon, ergastuslävi, mõõtevahendi tundlikkuse vähenemine,
- komponentide vananemine,
- signaali ja müra suhte muutumine,
- mõõtemeetodites ja -protsessides kasutatavate lähenduste ja eelduste lihtsustamine,
- etalonide ja etalonmaterjalide ebatäpselt teadaolevad väärtused,
- välistest allikatest saadud konstantide ja muude parameetrite ebatäpselt teadaolevad väärtused, mida kasutatakse andmetöötluses,
- näiliselt ühetaolistes tingimustes korduvvaatluse käigus mõõdetud mõõtesuuruse väärtuste hajuvus,
- mõõtjate vead analoogseadmete näitude lugemisel (näit. parallaksi viga, Joonis 26).



Joonis 26. Parallaksi viga [23]

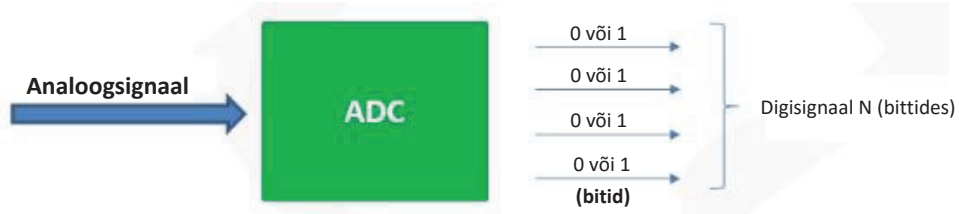
5.4 Digitaalsed mõõtesüsteemid

Digitaalsed mõõtesüsteemid on käesoleval ajal kõige levinumad mõõtesüsteemid. Sellistel mõõtesüsteemidel on palju eeliseid:

- suur häirekindlus,
- metroloogiliste toimingute suurem tõhusus,
- lihtne andmete salvestamine ja pikaajaline kogumine,
- mõõtja vigade elimineerimine,
- programmeeritava seadme paindlik vajadustele vastavaks kohandamine tööalgoritmide abil,
- soodne hind,
- ja palju muud.

5.4.1 ADC (analoog-digitaalmuundur)

Digitaalne mõõtesüsteem sisaldab analoog-digitaalmuundurit (ADC) analoogsignaali mõõtmiseks.
ADC on muundur, mis muudab analoogsignaali digisignaaliks.
ADC-i täpsus on määratud kahendsüsteemiga. Kui N on bittide arv, siis kvantimisaste on 2^N.
Väljundväärtuste ulatus on $2^N - 1$ [Joonis 27. Analoog-digitaalmuundur (ADC-i joonis)
].



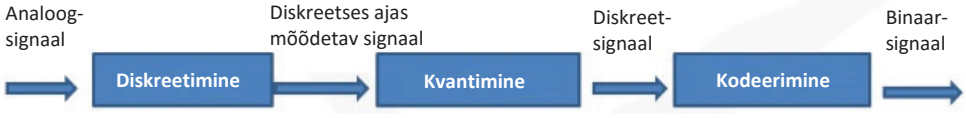
Joonis 27. Analoog-digitaalmuundur (ADC-i joonis)

5.4.2 ADC-süsteem

ADC-i mõõtetäpsus oleneb diskreetimissagedusest. Minimaalne diskreetimissagedus peab olema vähemalt kaks korda suurem kui diskreeditava signaali sageduse väärtus.

ADC-süsteem teeb järgmisi operatsioone [joonis 28]:

1) diskreetimine – mõõtesuuruse pidevas ajas saadava signaali taandamine diskreetses ajas mõõdetavaks signaaliks,
2) kvantimine – mõõtesuuruse diskreetses ajas mõõdetud signaali (diskreetsignaali) taandamine diskreetseks rühmaks (signaalirühmaks), kasutades ettemääratud algoritmi,
3) kodeerimine – diskreetsignaali taandamine (väärtuse muundamine) binaarkoodiks.



Joonis 28. Analoog-digitaalmuunduri funktsioonid (ADC-süsteemi operatsioonid)

5.5 Mõõtesüsteemide struktuurid

5.5.1 Järjestikuse mõõtesüsteemi struktuur

Sisendsüsteem/andur – töötleb sisendsignaali elektrisignaaliks, mida on mugav edasi töödelda (Joonis 29).

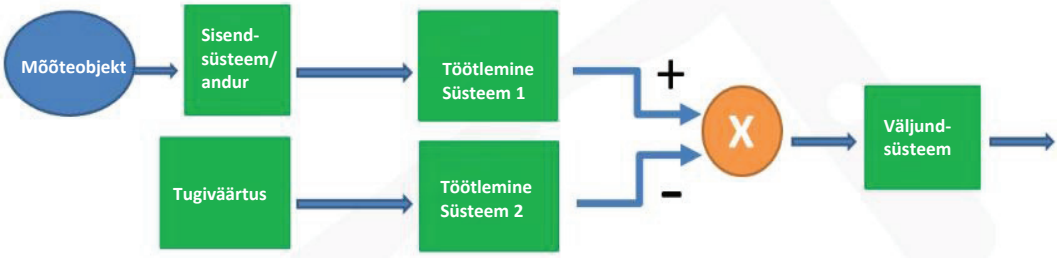
Andmetöötlussüsteemid – mõõtesignaali analüüsimine ja võrdlemine etaloni suhtes.

Väljundsüsteem – vormistab vaatleja jaoks sobivad mõõteandmed või muundab signaali vastavasse vormi edasiseks kasutamiseks.

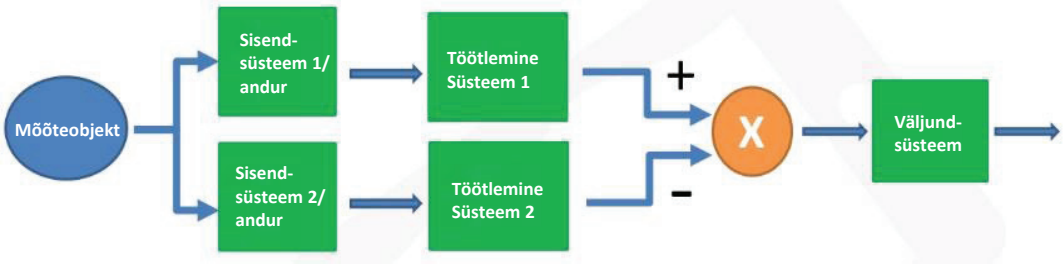
Joonis 29. Järjestikuse mõõtesüsteemi näide

5.5.2 Diferentsiaalsed mõõtesüsteemid

Joonis 30, ja Joonis 31on esitatud veel kaks signaalide (väärtuste) võrdlust kasutava mõõtesüsteemi näidet.



Joonis 30 . Diferentsiaalse mõõtesüsteemi näide 1



Joonis 31. Diferentsiaalse mõõtesüsteemi näide 2

5.6 Teadmiste kontroll. Peatükk 5

1. Et valida õigesti mõõtesüsteemi …

   a) …peab teadma mõõdetava füüsilise suuruse tüüpi;

   b) …ei ole vaja teada mõõdetava suuruse väärtuste võimalikku ulatust;

   c) …on oluline arvesse võtta ka mõõteseadmete maksumust;

   d) …on tarvis prognoosida kas tegemist tuleb üksikmõõtmisega või mitmikmõõtmisega.

2. Mõõtemääramatuse võimalikud allikad on…

   a) …proovide võtmise iseloomulik viis;

   b) …komponentide vananemine;

   c) …mõõtesuuruse mittetäielik määratlemine (defineerimine);

   d) …puuduvad muutused signaali/müra suhtarvus.

3. Digitaalsed mõõtesüsteemid…

   a) …neid kasutatakse nüüdisajal laialdaselt;

   b) …ei välista operaatori tehtavaid vigu;

   c) …vähendavad metroloogias mõõtetegevuste efektiivsust;

   d) …vähendavad mõõtesüsteemi maksumust;

   e) …on häirete suhtes väga immuunsed.

4. Analoog-digitaalmuundur (ADC)…

   a) …on osa digitaalsest mõõtesüsteemist isegi kui on vaja mõõta analoogsignaale;

   b) …täpsus on määratletud kahendsüsteemis toimiva osaga;

   c) …täpsus ei ole määratletud kahendsüsteemis toimiva osaga;

   d) …väljundsignaali väärtuste vahemik on $(2^N - 1)$ kus N- on bittide arv.

5. ADM süsteem…

   a) …muundab pidevas ajas signaali (analoogsignaali) väärtuse diskreetses ajas signaaliks (diskreetsignaaliks);

   b) …muundab diskreetsignaali binaarsignaaliks (binaarkoodiks);

   c) …muundab (taandab) diskreetses ajas signaali (diskreetsignaali) diskreetseks rühmaks (signaalirühmaks) kasutades varem kindlaksmääratud algoritmi.

   d) …ei oma diferentsiaalset mõõteblokkidest struktuuri.

ENESEKONTROLL – KÜSIMUSTE VASTUSED

Tabelist leiate õiged vastused teadmiste kontrolli küsimustele.
Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimuse nr.									
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	-
1. Põhimõisted	C	A	C	B	B	D	B	D	D	-
2. Signaaliteooria	B	D	D	D	B	-	-	-	-	-
3. Mõõtemeetodid ja -vead	A	B	B	A	C	-	-	-	-	-
4. Mõõtemuundur ja selle mõõtevead	A	A	C	B	E	-	-	-	-	-
5. Mõõtesüsteemid	A, C, D	B, C, E	A, D, E	A, B, C, D	A, B, C, D	-	-	-	-	-

VIITED

[1] Tomasz P. Zieliński „Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań", WKŁ, 2009
[2] Morecki A., Nazarczuk K., „Zarys Miernictwa Dynamicznego Wielkości Mechanicznych", Wyd. PW, Warszawa 1984
[3] Gruca M., Grzelka J., Pyrc M., Szwaja S., Tutak W. „Miernictwo i systemy pomiarowe", Częstochowa 2008
[4] Tumanski S., „Principles of elektrical Measurement", CRC Press Taylor & Francis Group, 2006
[5] Encyclopedia Britannica https://www.britannica.com
[6] National Institute of Standards and Technology NIST https://www.nist.gov
[7] Krajowe Usługi Metrologiczne http://www.kumlab.eu/wzorcowanie-suwmiarek
[8] „Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement", JCGM 2008
[9] Badźmirowski K., Karkowska M., Karkowski Z.: *Cyfrowe systemy pomiarowe*, Warszawa WNT 1979
[10] Jakubiec J., Roj J.: „Pomiarowe przetwarzanie próbkujące", Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000
[11] Kulka Z., Nadachowski M. „Przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe." Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1987
[12] Measurement Computing Data Acquisition Knowledgebase http://kb.mccdaq.com
[13] Apogee Instruments https://www.apogeeinstruments.com
[14] Mouser Electronics https://pl.mouser.com/
[15] USGS Publications Warehouse https://pubs.usgs.gov
[16] Applied Measurements Limited https://appmeas.co.uk
[17] National Instruments http://www.ni.com
[18] *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, ISO, Switzerland 1995.
[19] *Wyrażanie niepewności pomiaru: Przewodnik*, tłum. Jaworski J.M, Główny Urząd Miar, Warszawa 1999.
[20] epodreczniki.pl http://www.epodreczniki.pl
[21] Robo-Kop https://robo-kop.com.pl
[22] Karuzela Prezentów https://karuzelaprezentow.pl/waga-sklepowa
[23] Fizykon www.fizykon.org

Erasmus+

MECHMATE

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 09: ANDURID MEHHATROONIKAS [M009ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

PROF ZVEZDITSA NENOVA, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
PROF TOSHKO NENOV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)
DOTSENT STEFAN IVANOV, GABROVO TEHNIKAÜLIKOOL (TUGAB)

2018

Teave selle dokumendi kohta

Seda dokumenti kasutatakse õpikuna moodulis „**Andurid mehhatroonikas“**.

Sisukord

Teave selle dokumendi kohta 3
Jooniste loetelu 7
Tabelite loetelu 12
Sissejuhatus 14
Lühendid 15
1 Andurite klassifikatsioon 16
1.1 Andurid 16
1.2 Klassifitseerimispõhimõtted 18
1.3 Teadmiste kontroll 21
2 Andurite karakteristikud 22
2.1 Staatilised karakteristikud ja parameetrid 22
2.1.1 Ülekandefunktsioon 22
2.1.2 Tundlikkus 22
2.1.3 Mõõtepiirkond 24
2.1.4 Väikseim tuvastatav signaal 24
2.1.5 Mõõtetäpsus ja -vead 24
2.1.6 Tundetus- ja küllastuspiirkond 26
2.1.7 Stabiilsus 27
2.1.8 Töötemperatuuride vahemik 27
2.2 Dünaamilised karakteristikud ja parameetrid 27
2.2.1 Hüppekaja 28
2.2.2 Impulsskaja 28
2.2.3 Sageduskaja 28
2.2.4 Bode amplituudikarakteristik ja Bode faasikarakteristik 29
2.2.5 Anduri reageerimisaeg ja taastumisaeg 29
2.2.6 Piirsagedus 29
2.2.7 Faasinihe 29
2.2.8 Resonantssagedus 29
2.3 Teadmiste kontroll 30
3 Asendi-ja nihkeandurid 31
3.1 Kontaktandurid 31
3.2 Potentsiomeetrilised andurid 33
3.2.1 Mehaaniliste kontaktidega potentsiomeetrilised andurid 33
3.2.2 Mehaaniliste kontaktideta potentsiomeetrilised andurid 35
3.3 Induktiivandurid ja vastastikku induktiivsed andurid 38
3.3.1 Muutuva õhupiluga magnetsüdamikuga andurid δ 39
3.3.2 Õhupilu muutuva pindalaga magnetsüdamikuga andurid 40
3.3.3 Liikuva südamikuga andurid 42
3.4 Mahtuvuslikud andurid 44
3.4.1 Elektroodide muutuva vahekaugusega mahtuvuslikud andurid lineaarnihke mõõtmiseks 45
3.4.2 Mahtuvuslikud andurid muutuva pindalaga elektroodidega lineaar- ja nurknihke mõõtmiseks 45
3.4.3 Muutuva dielektrilise läbitavusega ε mahtuvuslikud andurid väikeste nihete ja nivoode mõõtmiseks 48
3.5 Absoluutandurid 48
3.6 Optilised andurid 49
3.6.1 Optilised asendiandurid 49
3.6.2 Optilised inkrementaalandurid (suhtelised andurid) 50
3.7 Püsimagnetandurid 51
3.7.1 Liikuva mähisega püsimagnetandurid 51
3.7.2 Liikuva magnetiga püsimagnetandurid 52
3.7.3 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid 52
3.8 Teadmiste kontroll 54

4 Jõu-, Tenso- ja Puuteandurid 55
4.1 Tensoandurid 55
4.1.1 Voolujuht-tensoandurid 55
4.1.2 Foolium-tensoandurid 56
4.1.3 Pooljuht-tensoandurid 56
4.2 Piesoandurid 66
4.3 Magnetoelastsed andurid 68
4.3.1 Magnetoelastsed induktiivandurid 68
4.3.2 Vastastikku induktiivsed magnetoelastsed andurid 68
4.3.3 Magnetoanisotroopsed andurid 69
4.4 Taktiilandurid 70
4.5 Teadmiste kontroll 74
5 Inertsiaalandurid 76
5.1 Kiirendusandurid 76
5.1.1 Mahtuvuslikud kiirendusandurid 76
5.1.2 Piesotakistuslikud kiirendusandurid 79
5.1.3 Piesoelektrilised kiirendusandurid 80
5.1.4 Termilised kiirendusandurid 81
5.2 Güroskoobid 82
5.2.1 Pöördgüroskoop 83
5.2.2 Vibratsioongüroskoop 84
5.2.3 Optilised güroskoobid (lasergüroskoobid) 85
5.3 Inklinomeetrid 88
5.4 Teadmiste kontroll 90
6 Rõhuandurid 91
6.1 Mõõtemeetodi alusel eristatavad rõhuandurid 91
6.1.1 Absoluutväärtuse mõõtmine 91
6.1.2 Suhtelise väärtuse mõõtmine 92
6.1.3 Rõhuerinevuse mõõtmine 92
6.2 Tööpõhimõtte alusel eristatavad anduritüübid 93
6.2.1 Vastastikku induktiivsed andurid 93
6.2.2 Mahtuvuslikud andurid 94
6.2.3 Piesoandurid 94
6.2.4 Tensoandurid 95
6.2.5 Optilised andurid 95
6.3 Teadmiste kontroll 96
7 Vooluhulgaandurid 97
7.1 Pöördelemendiga vooluhulgaandurid 97
7.1.1 Tiivikuga vooluhulgaandurid 97
7.1.2 Turbiini ja induktiivmuunduriga andurid 98
7.2 Rõhu mõõtmisel põhinevad vooluhulgaandurid 98
7.2.1 Kalibreeritud avaga andur 98
7.2.2 Venturi toruga andur 99
7.2.3 Düüsiga andur 100
7.3 Ultraheliga vooluhulgaandurid 100
7.3.1 Pideva ultrahelisignaaliga andur 100
7.3.2 Ultraheliimpulssidega andur 100
7.3.3 Doppleri efekti kasutav andur 101
7.4 Magnetinduktiivsed vooluhulgaandurid 101
7.5 Kalorimeetrilised vooluhulgaandurid 102
7.6 Vooluhulga keerisandurid 102
7.7 Avatud kanalite vooluhulgaandurid 103
7.8 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandur 103
7.9 Teadmiste kontroll 107

8 Lähedusandurid, objektide tuvastusandurid ja tasemeandurid 108
8.1 Objektide tuvastamise kontaktandurid 108
8.2 Lähedusandurid 108
8.2.1 Muutuva magnettakistusega induktiivandurid 109
8.2.2 Pöörisvooluandurid 109
8.2.3 Mahtuvuslikud lähedusandurid 110
8.2.4 Halli efektil põhinevad lähedusandurid 110
8.3 Optilised andurid objektide tuvastamiseks 113
8.4 Ultraheliandurid 116
8.5 Radarandurid 121
8.6 Nivooandurid 121
8.6.1 Nivoo piirväärtuste tuvastamine 121
8.6.2 Nivoo pidev mõõtmine 123
8.7 Teadmiste kontroll 126
9 Temperatuuriandurid 128
9.1 Termoelektrilised andurid 128
9.2 Termotakistuslikud andurid 138
9.2.1 Metallilised termotakistid (RTD) 138
9.2.2 Termistorid 143
9.3 Termodioodid, termotransistorid ja integreeritud temperatuuriandurid 149
9.4 Kontaktivaba temperatuuriandur 152
9.5 Teadmiste kontroll 155
Teadmiste kontrolli tulemused 156
Kirjanduse viited 157

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1. Andurisüsteemi tööpõhimõte 16
Joonis 1.2. Aktiivandurid (a) ja passiivandurid (b) 17
Joonis 1.3. Andurite klassifikatsioon muunduspõhimõtte alusel 18
Joonis 2.1. Lineaarsed ülekandefunktsioonid 23
Joonis 2.2. Tundlikkus mittelineaarse ülekandefunktsiooni korral 23
Joonis 2.3 Mittelineaarsusest tingitud viga 25
Joonis 2.4. Hüstereesiviga 26
Joonis 2.5 . Anduri tundetus- ja küllastuspiirkond 26
Joonis 2.6 Hüppekaja 28
Joonis 2.7 Impulsskaja 28
Joonis 3.1 Ühepiirkonna-kontaktandurid 31
Joonis 3.2 Kahepiirkonna-kontaktandurid 31
Joonis 3.3 Mitmepiirkonna-kontaktandurid 32
Joonis 3.4 Magnetjuhitav kontaktandur (herkon) 32
Joonis 3.5 Herkonite juhtimine a) püsimagneti liigutamisega, b) püsimagneti keeramisega, c) püsimagneti ja ampulli vahele paigutatud ekraani liigutamisega 33
Joonis 3.6 Potentsiomeetrilised andurid: a) lükandpotentsiomeeter, b) pöördpotentsiomeeter, c) mitmepöördeline potentsiomeeter 34
Joonis 3.7 Lineaarne reostaat: a) konstruktsioon, b) karakteristikud 35
Joonis 3.8 Eriotstarbeline reostaat: a) konstruktsioon, b) karakteristikud 35

Joonis 3.9 Optilise ühendusega pöördpotentsiomeeter 36
Joonis 3.10 Magnetpotentsiomeeter 36
Joonis 3.11 Magnetpotentsiomeetri takistuse R_1 muutumine olenevalt nurkhälbest α 37
Joonis 3.12 Lükandpotentsiomeetrid 37
Joonis 3.13 Pöördpotentsiomeetrid 37
Joonis 3.14 Mitmepöördelised potentsiomeetrid 38
Joonis 3.15 Magnettakistid 38
Joonis 3.16 Muutuva õhupiluga δ magnetsüdamikuga üksik-induktiivandur 39
Joonis 3.17 Muutuva õhupiluga magnetsüdamikuga diferentsiaalne induktiivandur 39
Joonis 3.18 Vastastikku induktiivne üksikandur, mille õhupilu muutub lineaarnihkega 40
Joonis 3.19 Vastastikku induktiivne diferentsiaalandur, mille õhupilu muutub lineaarnihkega 40
Joonis 3.20 Õhupilu muutuva pindalaga s magnetsüdamikuga üksik-induktiivandur: a) lineaarnihke mõõtmiseks, b) nurknihke mõõtmiseks 41
Joonis 3.21 Õhupilude muutuvate pindaladega s_1 ja s_2 magnetsüdamikuga diferentsiaalne induktiivandur 41
Joonis 3.22 Lineaarnihet mõõtev üksik vastastikku induktiivne andur 42
Joonis 3.23 Nurknihet mõõtev diferentsiaalne vastastikku induktiivne andur 42
Joonis 3.24 Liikuva südamikuga üksik-induktiivandur 43
Joonis 3.25 Liikuva südamikuga diferentsiaalne induktiivandur 43
Joonis 3.26 Lineaarmuutuvusega diferentsiaaltrafo (LVDT) konstruktsioon 44
Joonis 3.27 Üksik mahtuvuslik andur, millel muutub elektroodide vahekaugus 45
Joonis 3.28 Mahtuvuslik diferentsiaalandur, millel muutub elektroodide vahekaugus 45
Joonis 3.29 Elektroodide muutuva pindalaga üksik mahtuvuslik andur lineaarnihke mõõtmiseks 46
Joonis 3.30 Elektroodide muutuva pindalaga diferentsiaalne mahtuvuslik andur lineaarnihke mõõtmiseks 46
Joonis 3.31 Elektroodide muutuva pindalaga üksik mahtuvuslik andur nurknihke mõõtmiseks 46
Joonis 3.32 Elektroodide muutuva pindalaga diferentsiaalne mahtuvuslik andur nurknihke mõõtmiseks 47
Joonis 3.33 Üksik silindriline mahtuvuslik andur 47
Joonis 3.34 Diferentsiaalne silindriline mahtuvuslik andur 47
Joonis 3.35 Muutuva dielektrilise läbitavusega paralleelsete plaatelektroodidega mahtuvuslikud andurid 48
Joonis 3.36 Muutuva dielektrilise läbitavusega silindriline mahtuvuslik andur 48
Joonis 3.37 Absoluutandurid: a) lineaarnihke mõõtmiseks, b) nurknihke mõõtmiseks 49
Joonis 3.38 Optiline asendiandur 50
Joonis 3.39 Optiline inkrementaalandur (suhteline andur) 50
Joonis 3.40 Nihkesuuna määramiseks kasutatava elektroonikaahela ajadiagrammid 51
Joonis 3.41 Liikuva mähisega püsimagnetandur nurknihke mõõtmiseks 51
Joonis 3.42 Liikuva mähisega püsimagnetandur lineaarnihke mõõtmiseks 52
Joonis 3.43 Liikuva magnetiga püsimagnetandurid 52
Joonis 3.44 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid lineaarnihke mõõtmiseks 53

Joonis 3.45 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid pöörlemiskiiruse mõõtmiseks 53
Joonis 4.1 Voolujuht-tensoandur 55
Joonis 4.2 Foolium-tensoandur 56
Joonis 4.3 Keeruliste mehaaniliste pingete määramiseks kasutatav kolmest tensoandurist koosnev rosett 56
Joonis 4.4 Teineteise suhtes 90° nurga all paiknevast kahest tensoandurist koosnev rosett 57
Joonis 4.5 Tensoanduritest koosneva roseti kasutamine seadmete pöörlevate võllide pinnal mehaaniliste pingete määramiseks 57
Joonis 4.6 Sillatüüpi tensoandurite ühendusskeemid: a) veerandsild, b) poolsild, c) täissild. 57
Joonis 4.7 Kaksik-tensoandurite ja poolsild-tensoandurite rosetid: a) lineaarsed ja paralleelsed, b) lineaarne ja risti, c) kaldu ja risti 58
Joonis 4.8 Täissild-tensoandurite rosetid: a) lineaarne ja paralleelne, b) lineaarne ja risti, c) radiaalne ja ringikujuline 59
Joonis 4.9 Mitmesuguste nurkade alla paiknevate elementidega tensoandurite rosetid 60
Joonis 4.10 Lineaarsed LY-tensoandurid 61
Joonis 4.11 Ühelõikelise deformatsiooni üksikandurid S 61
Joonis 4.12 DY-tensoandurid 61
Joonis 4.13 Tensoandurite rosetid: poolsild kahe paralleelse tensoanduriga 62
Joonis 4.14 XY-tensoandurite rosetid (T-tüüpi rosetid) 62
Joonis 4.15 V-tüüpi tensoandurite rosetid, mille elemendid on 45° nurga all 63
Joonis 4.16 RY-tensoandurite rosetid 64
Joonis 4.17 Täissild-tensoandurite rosetid 65
Joonis 4.18 Täissild-tensoandurite membraanrosetid 65
Joonis 4.19 Lineaarsete täissild-tensoandurite rosettidega membraan 65
Joonis 4.20 KY-tensoandurite ahelad 66
Joonis 4.21 Valmisühendustega tensoandurid 66
Joonis 4.22 Piesoandur 67
Joonis 4.23 Piesotrafo 67
Joonis 4.24 Magnetoelastsed induktiivandurid 68
Joonis 4.25 Vastastikku induktiivsed magnetoelastsed andurid 69
Joonis 4.26 Painduva magnetahelaga magnetoelastne trafo-diferentsiaalandur 69
Joonis 4.27 Magnetoanisotroopne andur 70
Joonis 4.28 Membraantüüpi taktiiltajur 71
Joonis 4.29 Takistuslikku tüüpi taktiilandur 71
Joonis 4.30 Tensoanduritest tajuritega takistusanduri skeem 72
Joonis 4.31 Mahtuvuslik taktiilandur 72
Joonis 4.32 Piesoelektriline taktiilandur 73
Joonis 4.33 Valgusmodulatsiooniga optilised taktiilandurid 73
Joonis 4.34 Valgust peegeldavad optilised taktiilandurid 74
Joonis 4.35 Peegeldav optiline taktiilandur 74
Joonis 5.1 Mehaanilise kiirendusanduri skeem 76
Joonis 5.2 Mahtuvuslik diferentsiaalne kiirendusandur 77
Joonis 5.3 MEMS-tehnoloogial põhineva mahtuvusliku kiirendusanduri konstruktsioon 77
Joonis 5.4 MEMS-tehnoloogial põhinev mahtuvuslik kiirendusandur 78
Joonis 5.5 Kolmeteljelise kiirendusmõõturi ADXL330 tööpõhimõtte skeem 78

Joonis 5.6 Piesotakistuslik kiirendusandur 79
Joonis 5.7 MEMS-tehnoloogial piesotakistuslik kiirendusandur 79
Joonis 5.8 Piesotakistuslikud kiirendusandurid (tootja ASC GmbH) 80
Joonis 5.9 Piesoelektriline kiirendusandur 80
Joonis 5.10 Kistler Instrumenti toodetud piesoelektrilised kiirendusandurid 81
Joonis 5.11 Termiline kiirendusandur, a - üldvaade 81
Joonis 5.12 Ettevõtte MEMSIC Inc. toodetud termilised kiirendusandurid 82
Joonis 5.13 Kolme vabadusastmega klassikaline güroskoop 83
Joonis 5.14 Mehaaniline pöördgüroskoop 83
Joonis 5.15 Vibratsioongüroskoobi skeem 84
Joonis 5.16 Vibratsioongüroskoop 85
Joonis 5.17 Sagnaci efekt 86
Joonis 5.18 Ringlasergüroskoop, mille valmistamiseks on kasutatud kolmnurkset optilist resonaatorit 87
Joonis 5.19 Kiudoptiline güroskoop 87
Joonis 5.20 SPI-liidesega kolmeteljelise täppisinklinomeetri ADIS16210 tööpõhimõtte skeem 88
Joonis 5.21 Elavhõbelülitil põhinev inklinomeeter 89
Joonis 5.22 Elektrolüütiline inklinomeeter 89
Joonis 6.1 Absoluutväärtuse mõõtmise rõhuandur 92
Joonis 6.2 Suhtelise rõhu andur 92
Joonis 6.3 Rõhuerinevuse andur 93
Joonis 6.4 Vastastikku induktiivne rõhuandur 93
Joonis 6.5 Mahtuvuslik rõhuandur 94
Joonis 6.6 Piesoelektriline rõhuandur 94
Joonis 6.7 Rõhu mõõtmiseks kasutatavad tensoandurid 95
Joonis 6.8 Optilised rõhuandurid 95
Joonis 7.1 Tiivikuga vooluhulgaandur 97
Joonis 7.2 Turbiiniga vooluhulgaandur 98
Joonis 7.3 Kalibreeritud avaga vooluhulgaandur 99
Joonis 7.4 Venturi toruga vooluhulgaandur 99
Joonis 7.5 Düüsiga vooluhulgaandur 100
Joonis 7.6 Ultraheliga vooluhulgaandur 101
Joonis 7.7 Doppleri efekti kasutav ultraheliga vooluhulgaandur 101
Joonis 7.8 Magnetinduktiivne vooluhulgaandur 102
Joonis 7.9 Kalorimeetriline vooluhulgaandur 102
Joonis 7.10 Vooluhulga keerisandur 103
Joonis 7.11 Avatud kanali vooluhulgaandurid 103
Joonis 7.12 Coriolisi tüüpi vooluhulgaanduri konstruktsioon 104
Joonis 7.13 Toru deformatsioon voolamisel tekkiva Coriolisi jõu mõjul 105
Joonis 7.14 Coriolisi tüüpi vooluhulgaanduri kahest andurist tulevad signaalid 105
Joonis 7.15 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandurid (tooteseeria Motion ELITE ja Micro Motion D, tootja Emerson) 106
Joonis 7.16 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandur SITRANS FCS400 (tootja SIEMENS) 106
Joonis 8.1 Lülitid 108
Joonis 8.2 Muutuva magnettakistusega induktiiv-lähedusandur 109

Joonis 8.3 Pöörisvoolu-lähedusandur 109
Joonis 8.4 Mahtuvuslik lähedusandur 110
Joonis 8.5 Mahtuvusliku lähedusanduri ekvivalentahel 110
Joonis 8.6 Halli efekti skeem 111
Joonis 8.7 Halli efektil analoogandur 111
Joonis 8.8 Halli efektil digitaalandur 112
Joonis 8.9 Halli anduri tööpõhimõte 112
Joonis 8.10 Allegro MicroSystems LLC toodetud Halli andurid 113
Joonis 8.11 TDK-Micronas GmbH toodetud Halli andurid 113
Joonis 8.12 Optiline andur 114
Joonis 8.13 Difusioonmeetod objektide tuvastamiseks 114
Joonis 8.14 Tõkestusmeetod objektide tuvastamiseks 115
Joonis 8.15 Peegeldusmeetod objektide tuvastamiseks 115
Joonis 8.16 Ultraheli anduri hajupeegeldus 116
Joonis 8.17 Mõõtmise põhimõte hajuefektiga ultraheli anduris 117
Joonis 8.18 Ultraheli anduri pimeala 117
Joonis 8.19 Kinnikatmisega ultraheli andur 118
Joonis 8.20 Peegeldiga ultraheli andur 118
Joonis 8.21 Kahe muunduriga andur: a – hajuefektiga režiim, b – peegeldumisega režiim .. 119
Joonis 8.22 Ultraheli andurid 119
Joonis 8.23 Kauguse mõõtmise radarandur, Baumer 121
Joonis 8.24 Ultraheliga nivoolüliti vedelike jaoks 122
Joonis 8.25 Nivoo mõõtmine ultraheliga 123
Joonis 8.26 Ultraheli andur Rosemont 3100 (tootja Emerson) 124
Joonis 8.27 Nivoo mõõtmine radaranduriga 124
Joonis 8.28 Radariga nivooandur Rosemount 5408 (tootja Emerson) 125
Joonis 8.29 Hüdrostaatiliste andurite paiknemine mahutis 125
Joonis 8.30 Hüdrostaatilised nivooandurid (tootja Emerson) 126
Joonis 9.1 Termopaar 128
Joonis 9.2 Termopaari ühendamine pikendusjuhtmete abil 129
Joonis 9.3 Termopaari ühendusskeem külma liite temperatuuri kompenseerimisega termotakisti abil 129
Joonis 9.4 Erinevat tüüpi termopaaride karakteristikud 131
Joonis 9.5 Termopaari juhtide isoleerimise erinevad viisid 132
Joonis 9.6 Erineva kaitstuse ja termotundliku elemendi erineva konstruktsiooniga termopaarid 132
Joonis 9.7 Ühenduspistikuga termopaarid 133
Joonis 9.8 Termopaar-mõõteandurid 133
Joonis 9.9 Käepidemega termopaar-mõõteandurid 134
Joonis 9.10 Pistikuga termopaar-mõõteandurid 134
Joonis 9.11 Pinnatemperatuuri termopaar-andurid 135
Joonis 9.12 Unikaalsed ümarotsaga andurid plaatide, seinte, vormide, matriitside jm püsiobjektide pinnatemperatuuri mõõtmiseks 135
Joonis 9.13 Unikaalsed plokkotsaga termopaar-andurid, pinna liikumise korral paindumise minimeerimiseks varustatud klambriga 135
Joonis 9.14 Rullikutega otsaga termopaar-andurid 136

Joonis 9.15 Magnetpaigaldusega termopaarid 136
Joonis 9.16 Leht-tüüpi termopaarid ja kleepuva pinnaga termopaarid 136
Joonis 9.17 Silindriliste objektide pinnatemperatuuri termopaar-andurid 137
Joonis 9.18 Seib-kinnitusega termopaarid poltühenduste jaoks 137
Joonis 9.19 Poldikujuline termopaar kaablisukaga 137
Joonis 9.20 Paigalduskeermega termopaarid 137
Joonis 9.21 Toruliitmikuga termopaar-andur 138
Joonis 9.22 Ühenduspeaga termopaar-andurid 138
Joonis 9.23 Vasest termotakistid 140
Joonis 9.24 Niklist termotakistid 140
Joonis 9.25 Plaatinast termotakistid 141
Joonis 9.26 Plaatinast temperatuuriandurid 142
Joonis 9.27 Ühenduspeaga plaatinast temperatuuriandurid 142
Joonis 9.28 Temperatuuriandurid Pt100/Pt1000 käsitsi kasutamiseks 142
Joonis 9.29 Erinevat tüüpi termistoride ja plaatinast termotakisti karakteristikud 143
Joonis 9.30 Erinevat tüüpi termistorid 144
Joonis 9.31 Väliskuju järgi rühmitatud termistorid 148
Joonis 9.32 Anduri KTY81-210 karakteristik 148
Joonis 9.33 Ränist temperatuuriandur KTY81-210 ja selle ühendamine mikrokontrolleriga 149
Joonis 9.34 Termodiood ja termotransistor 149
Joonis 9.35 Termotransistorite paar ühes korpuses 150
Joonis 9.36 Analoog-pingeväljundiga temperatuuriandurid LM35 ja LM45 150
Joonis 9.37 Analoog-vooluväljundiga temperatuuriandurid 151
Joonis 9.38 Komparaatorväljundiga temperatuuriandur LM56 151
Joonis 9.39 Digiväljundiga temperatuuriandur (I^2C) 152
Joonis 9.40 Infrapunatermomeetri struktuur 153
Joonis 9.41 Termopaari maatriksstruktuur (termopatarei maatriks) 154
Joonis 9.42 Ettevõtte Micro-Epsilon Messtechnik GmbH toodetud infrapuna-temperatuuriandurid 154

TABELITE LOETELU

Tabel 1.1 Andurite tööpõhimõtteid 19
Tabel 6.1 Erinevate rõhuühikute teisendamine 91
Tabel 9.1 Enamlevinud termopaaritüüpide põhiandmed 130
Tabel 9.2 Ettevõtete Analog Devices (AD), National Semiconductor (LM), Maxim (MAX) ja Dallas Semiconductor (DS) digitaal-temperatuuriandurid 152

SISSEJUHATUS

Andureid kasutatakse juhitavatelt objektidelt seisundiinfo saamiseks. Need on juhtsüsteemide elemendid, mis muundavad juhitava suuruse mugavalt mõõdetavaks, salvestatavaks ja töödeldavaks signaaliks.

Mooduli „Andurid mehhatroonikas“ eesmärk on anda põhiteadmisi automaatikasüsteemide koostamisel kasutatavate andurite kohta. Moodulit saab kasutada väikese ja keskmise suurusega ettevõtete töötajate kutseoskuse täiendamise ja ümberõppe koolitusprogrammide lähtematerjalina. Nende teadmiste omandamiseks peavad koolitatavatel olema põhiteadmised matemaatikas ja füüsikas.

1. peatükis on käsitletud andurite klassifikatsiooni ja neile esitatavaid nõudeid. Tutvustatakse ka nende peamisi tööpõhimõtteid.
2. peatükis on kirjeldatud andurite staatilisi ja dünaamilisi omadusi ning parameetreid.
3. peatükis on käsitletud asendi- ja nihkeandureid. Kirjeldatakse ka kontaktandureid, potentsiomeetrilisi andureid, induktiivandureid, vastastikuse induktiivsusega andureid, mahtuvuslikke andureid, optilisi andureid ja püsimagnetandureid. Kirjeldatud on ka andurite konstruktsiooni.
4. peatükis on kirjeldatud jõu-, tenso- ja taktiilandurite põhitüüpe, tööpõhimõtteid, alamtüüpe, omadusi ja konstruktsiooni.
5. peatükis on tutvustatud inertsiaalandureid ning kiirendusmõõturite, güroskoopide ja kaldemõõturite põhitüüpe.
6. peatükis on kirjeldatud rõhuandureid. Esitletakse mitmesuguseid rõhuandurite tüüpe: vastastikuse induktiivsusega, mahtuvuslikke, piesoandureid, tensoandureid ja optilisi andureid.
7. peatükis on käsitletud vooluhulgaandureid. Kirjeldatakse pöörd-, ultraheli-, keerismagnet-induktiiv-, rõhuerinevuse, kalorimeetrilisi ja Coriolisi andureid.
8. peatükis on tutvustatud lähedusandureid, objektide tuvastamise andureid ja tasemeandureid. Kirjeldatakse nende tööpõhimõtteid, alamtüüpe, töörežiime ja kasutamise eripärasid.
9. peatükk on pühendatud temperatuurianduritele. Kirjeldatakse termoelektrilisi andureid ja termotakistuslikke andureid. Tutvustatakse termistore, termodioode, termotransistoreid, integreeritud ja kontaktivabu temperatuuriandureid.

Lühendid

ADC, A/D	Analoog-digitaalmuundur
ASIC	Rakendusespetsiifiline kiip
atm	Atmosfäär
CCW	Vastupäeva
CTR	Kriitilise temperatuuri takisti
CW	Päripäeva
DAQ	Andmehõive
EEPROM	Elektriliselt ümberprogrammeeritav püsimälu
e.m.f.	Elektromotoorjõud
FOG	Kiudoptiline güroskoop
FMCW	Sagedusmoduleeritud pidevlaine
IEC	Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon
I2C	I^2C-siin
LED	Märgutuli
LVDT	Lineaarmuutuvusega diferentsiaaltrafo
MEMS	Elektromehaaniline mikrosüsteem
MOS	Metall-oksiid-pooljuht
NC	Normaalselt suletud
NO	Normaalselt avatud
NTC	Negatiivne temperatuuritegur
PLC	Programmeeritav kontroller
ppm	Miljondik
psi	Naela ruuttolli kohta
PTC	Positiivne temperatuuritegur
PVDF	Polüvinülideenfluoriid
PWM	Kestusmodulatsioon
PZT	Pliitsirkanaattitanaat
RLG	Ringlasergüroskoop
RTD	Termotakistuslik andur
SAW	Akustiline pinnalaine
SGs	Tensoandurid
SMBus	Süsteemi haldussiin
SPI	Perifeerne jadaliides
TCR	Takistuse temperatuuritegur
t.e.m.f.	Termoelektromotoorjõud
USB	Universaalne jadasiin

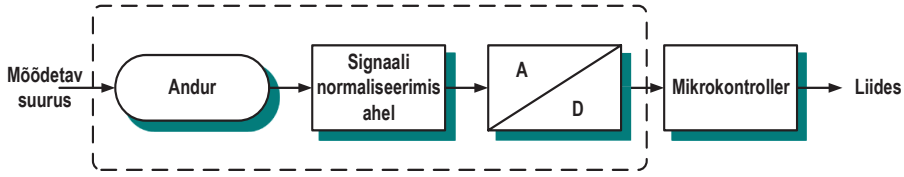
1 ANDURITE KLASSIFIKATSIOON

1.1 Andurid

Andurid on muutunud automaatika ja robootika oluliseks osaks ning nende osatähtsus süsteemide konstruktsioonielementidena on kasvamas.

Üldjuhul on andurid seadmed, mis muundavad füüsikalise või keemilise suurused mugavalt kasutatavateks elektrisignaalideks. Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon (IEC) on anduri defineerinud järgmiselt: „Andur on mõõteahela esmane osa, mis muundab sisendsuuruse mõõdetavaks signaaliks".

Andurid on andurisüsteemide osa ja need on esimesed elemendid, mille ülesanne on esitada mõõdetavat infot. Andurisüsteemi tööpõhimõtte üldskeem on esitatud Joonis 1.1.



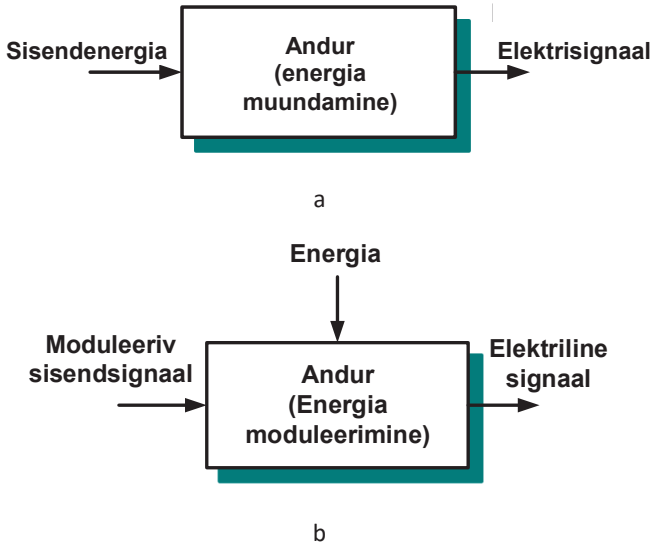
Joonis 1.1. Andurisüsteemi tööpõhimõte

Tavaliselt on andurisse sisenev signaal väikese amplituudiga ning segatud häiringute ja müraga. Peale selle võib tekkida vajadus signaali lineariseerimiseks. Edasiseks töötlemiseks optimaalsete omadustega signaal saadakse normaliseerimisahela abil (selles võib olla võimendi, filter jm analoogahelad). Mõnel juhul on need ahelad anduri vahetus läheduses. Seejärel muundatakse tekkiv analoogsignaal digitaalseks ja edastatakse mikrokontrollerile.

Andurisüsteemi omadused määrab suures osas andur. Andur muundab energia ühest liigist teise. Andurite põhitüüpe on kaks: aktiivsed ja passiivsed. Aktiivandur muundab energia vahetult ühest liigist teise ilma välise energiaallikata või ergastuseta (Joonis 1.2, a).

Passiivandur ei saa energiat vahetult muundada, kuid see juhib muust allikast tulevat ergastusenergiat (Joonis 1.2, b).

Anduri funktsioonide täitmiseks kasutatakse mitmesuguseid füüsikalisi nähtuseid ja tööpõhimõtteid. Andur võib olla mõõdetava suurusega kontaktis või kontaktivaba. Tööpõhimõtete ja nähtuste arv suureneb pidevalt ja nende põhjal töötavaid protsesse täiustatakse.



Joonis 1.2. Aktiivandurid (a) ja passiivandurid (b)

Anduritele on kehtestatud kindlad nõuded. Üldised nõuded kehtivad kõikide andurite kohta ja spetsiifilised nõuded kehtivad vaid kindlat tüüpi andurite kohta. Tööpõhimõttest ja anduri konstruktsioonist olenevad peamised nõuded on järgmised:

- suur tundlikkus
- lineaarsus
- suur täpsus
- hüstereesi puudumine
- korratavustäpsus
- kiire reageerimine
- selektiivsus
- vahetatavus
- lai mõõtevahemik
- lai töötemperatuurivahemik
- häirekindlus (mürakindlus)
- lihtne korrigeerimine (lihtne kalibreerimine)
- suur töökindlus
- pikk kasutuskestus
- vananemiskindlus
- vastupidavus ümbritseva keskkonna mõjule (kuumus, vibratsioon, vesi, tolm jne)
- ohutus (andurid ei tohi tekitada kahju)
- soodne hind
- väikesed mõõtmed, väike mass ja tugevus.

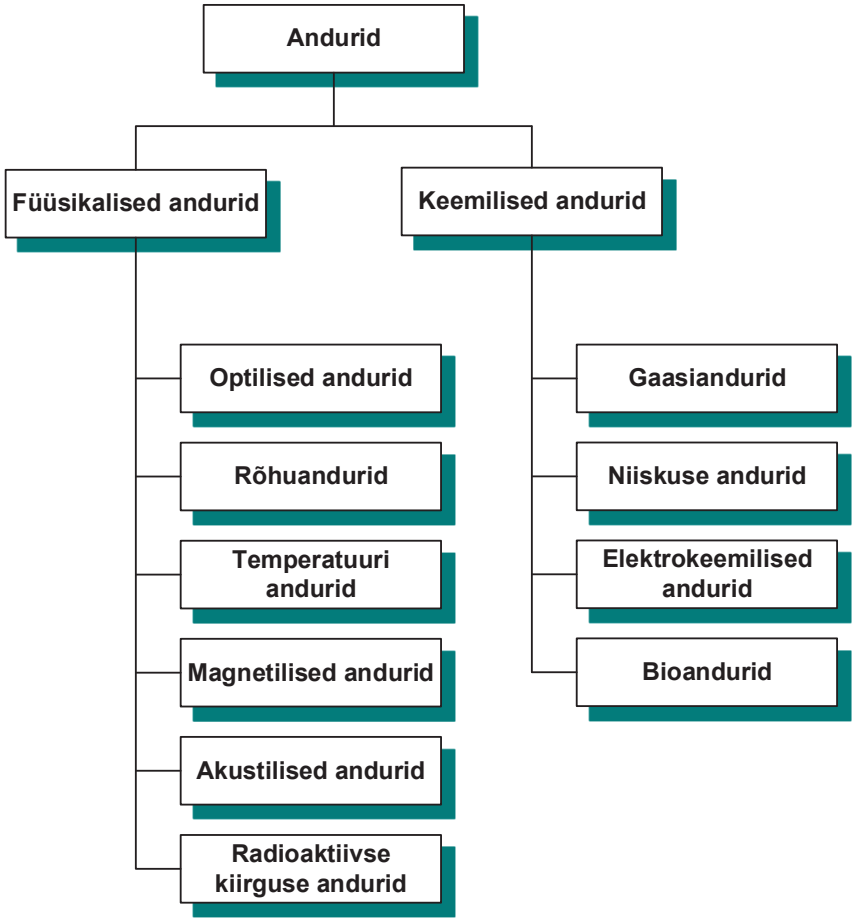
1.2 Klassifitseerimispõhimõtted

Andureid saab klassifitseerida muunduspõhimõtte (talitluse aluseks oleva füüsikalise või keemilise nähtuse), eesmärgi, väljundsignaalide tüübi, materjalide ja tootmisprotsessi järgi. Andurite klassifikatsioon muunduspõhimõtte alusel on esitatud Joonis 1.3. Andurid jagunevad füüsikalisteks ja keemilisteks.

Füüsikalised andurite korral muundatakse mõõdetavate füüsikaliste nähtuste (nt piesoelektriliste, magnetostriktiivsete, ioniseerivate, termoelektriliste, fotoelektriliste, magnetoelektriliste jm omaduste) muutused elektrisignaalideks.

Keemiliste andurite korral muundatakse mõõdetava suuruse muutused elektrisignaalideks keemilise absorptsiooni, elektrokeemiliste reaktsioonide jne tulemusena.

Mõnda andurit ei saa üheselt klassifitseerida ei füüsikalisteks ega keemilisteks.



Joonis 1.3. Andurite klassifikatsioon muunduspõhimõtte alusel

Mõned andurite tööpõhimõtted ja võimalikud kasutusalad on esitatud Tabel 1.1

Tabel 1.1 Andurite tööpõhimõtteid

Anduri tüüp	Tööpõhimõte	Mõõdetav mitteelektriline suurus
Tensoandur Termistor (NTC, PTC) Pooljuhtandur	Takistuse muutumine	Jõud, mass, rõhk, kiirendus, paisumine, tase, temperatuur, niiskus, gaas
Mahtuvuslik andur	Mahtuvuse muutumine	Jõud, mass, rõhk, kiirendus, nivoo, niiskus
Induktiivandur	Induktiivsuse muutumine	Jõud, mass, rõhk, kiirendus, pöörete arv, pöördemoment, magnetväli
Halli andur	Halli efekt	Nurk, pöörete arv, jõud, magnetväli
Piesoandur Ultraheliandur	Piesoelektriline efekt	Rõhk, jõud, kiirendus, vahemaa
Püroelektriline andur	Püroelektriline efekt	Suits, tuli, soojuse jaotumine
Optoelektroonilised andurid	Optoelektroonilised efektid	Kiirgus, nurk, pöörete arv, nihe, pöördemoment

Otstarbe järgi jaotatakse andurid järgmiselt**:**

- rõhu- ja jõuandurid
- tasemeandurid
- kiirusandurid
- kiirendusandurid
- vibratsiooniandurid
- magnetväljaandurid
- vaakumiandurid
- nihkeandurid
- kuluandurid
- temperatuuriandurid
- radioaktiivse kiirguse andurid
- niiskusandurid
- gaasiandurid
- bioandurid jne.

Väljundsignaali liigist olenevalt jaotatakse andurid järgmiselt:

- analoogandurid – muundavad mõõdetud mitteelektrilised väärtused analoog-signaalideks;
- digitaalandurid – muundavad mõõdetud mitteelektrilised väärtused otse või kaud-selt digisignaalideks;
- pseudodigitaalandurid – muundavad mõõdetud väärtused vahetult või kaudselt sageduseks või ajavahemikuks;
- lülitusandurid – reageerivad mõõdetava muutuja läviväärtusele (piirväärtusele) ja lülitavad väljundsignaali madalale või kõrgele tasemele.

Erinevad materjalid reageerivad välisteguritele erinevalt. Välistegurite suhtes kõige tundli-kumaid (st funktsionaalsete omadustega) materjale kasutatakse **andurite tajuritena.**

Kasutatavate materjalide järgi rühmitatakse andureid järgmiselt.

- Materjali järgi:
  - metall
  - keraamiline materjal
  - polümeer
  - komposiitmaterjal.

- Materjali füüsikaliste omaduste järgi:
  - juhid
  - pooljuhid
  - dielektrikud
  - magnetilised.

- Materjali kristallstruktuuri järgi:
  - kristall
  - polükristall
  - amorfne.

- *Tootmisprotsessi alusel* jaotatakse andurid järgmiselt:
  - integreeritud andurid
  - õhukesed kileandurid
  - paksud kileandurid
  - keraamilised andurid.

1.3 Teadmiste kontroll

1. Aktiivandur (generaator):
   a) ei muunda energiat otseselt;
   b) muundab energiat otseselt ühest vormist teise vormi;
   c) ei vaja töötamiseks välist energiaallikat või ergutust;
   d) juhib energiat või ergutust mis saabub teisest allikast.

2. Anduritele esitatav põhinõuete komplekt sisaldab järgmisi nõudeid:
   a) kõrge tundlikkus;
   b) põhiline viga;
   c) hüstereesi olemasolu;
   d) korratavus;
   e)lai mõõteala;
   f) kitsas töötemperatuuride vahemik.

3. Andureid liigitatakse vastavalt nende tööpõhimõttele:
   a) füüsilisteks;
   b) lülititeks;
   c) keemilisteks;
   d) pseudo-digitaalseteks.

4. Sõltuvalt materjali füüsilistest omadustest rühmitatakse andureid:
   a) (elektri)juhtideks;
   b) pooljuhtideks;
   c) komposiitseteks;
   d) dielektrilisteks;
   e) kristall.

5. Sõltuvalt valmistustehnoloogiast, rühmitatakse andureid:
   a) integreeritud andurid;
   b) õhukese-kilelised andurid;
   c) amorfsed;
   d) paksu-kilelised andurid.

2 ANDURITE KARAKTERISTIKUD

Andurite karakteristikud ja parameetrid jaotatakse kahte rühma:

- staatilised
- dünaamilised.

2.1 Staatilised karakteristikud ja parameetrid

Staatilised karakteristikud ja parameetrid on sellised, mida saab määrata pärast kõigi siirdeprotsesside lõppemist ja lõpliku või statsionaarse seisundi saavutamist. Staatilised karakteristikud näitavad, kuidas anduri väljundsignaal reageerib sisendväärtuse muutustele, kuidas välised või seesmised häiringud võivad mõjutada tööd ja kui stabiilne on andur.

2.1.1 Ülekandefunktsioon

Anduri peamine karakteristik on selle *ülekandefunktsioon*, mis väljendab väljundsuuruse ja sisendsuuruse (mõõdetud suuruse) vahelist sõltuvust staatilisel režiimil:

$$y = f(x)\,. \tag{2.1}$$

Seda saab esitada valemi, graafiku või tabelina.

Kui lineaarne ülekandefunktsioon läbib koordinaatsüsteemi alguspunkti, siis

$$y = kx\,. \tag{2.2}$$

Väljundsuurus oleneb mitte ainult mõõdetud suurusest, vaid ka muudest suurustest (häirivatest teguritest), nagu ümbritseva keskkonna temperatuur, rõhk jne. Ülekandefunktsioon võib olla lineaarne ja mittelineaarne (logaritmiline, eksponentsiaalne jne). Paljudel juhtudel saab mittelineaarse ülekandefunktsiooniga andureid sisendsuuruse muutuse piiratud vahemikus lugeda lineaarseteks.

Üldjuhul võivad sama tüüpi andurite ülekandefunktsioonid olla nende üksikute omaduste tõttu erinevad. Neil juhtudel määratakse konkreetset tüüpi andurite üldistatud karakteristikud, mis keskmistatakse mitmete mõõtmiste või suure arvu ühesuguste anduritega saadud tulemuste abil.

Ülekandefunktsiooni saab määrata anduri mõõtepiirkonna teatud punktides nii tavatingimustes kui ka häirivate väliste tegurite esinemisel.

Andurit iseloomustatakse sel viisil saadud ülekandefunktsiooniga või sellele parimaks lähenduseks oleva matemaatilise funktsiooniga. Seda teisendusfunktsiooni nimetatakse *gradueerimiskarakteristikuks*. Selle saab esitada analüütiliselt, aga ka tabeli või graafikuna.

2.1.2 Tundlikkus

Absoluutne ja suhteline tundlikkus

Tundlikkus *S* iseloomustab anduri sisendsuuruse muutustele reageerimise võimet. Seda saab käsitleda väljundsuuruse muutuse ja seda muutust põhjustava sisendsuuruse muutuse suhtena.

Lineaarse ülekandefunktsiooni korral (Joonis 2.1a) on *absoluutne tundlikkus S* konstantne suurus ja see on määratletud kui

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta x}\,, \tag{2.3}$$

kus Δy ja Δx on vastavalt väljund- ja sisendsuuruse muutused.

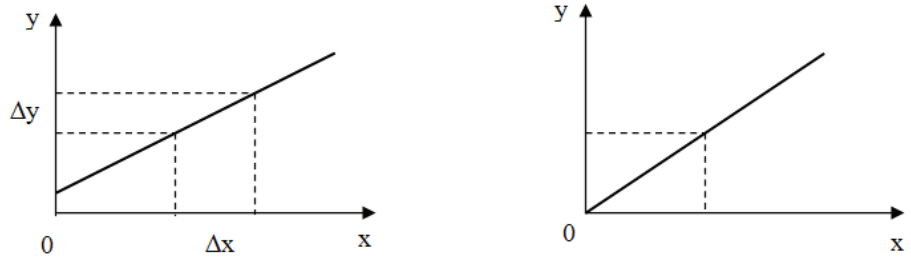
Kui ülekandefunktsioon on lineaarne ja graafik läbib koordinaatsüsteemi alguspunkti (Joonis 2.1b), siis

$$S = \frac{y}{x}. \tag{2.4}$$

Kui ülekandefunktsioon on mittelineaarne, on tundlikkus määratletud kui

$$S = \frac{dy}{dx}. \tag{2.5}$$

Tegemist on muutliku suurusega, mis oleneb sisendsuuruse *x* väärtusest (Joonis 2.2). Praegusel juhul $S_1 > S_2 > S_3 > S_4 > \dots$.



a b

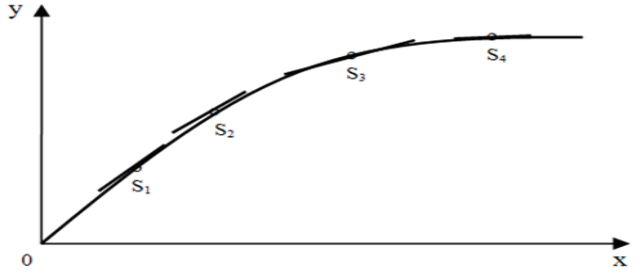
Joonis 2.1. Lineaarsed ülekandefunktsioonid

Suhtelist tundlikkust saab määratleda ka järgmiselt:

$$S_{o1} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\frac{x}{x}} \text{ või } S_{o2} = \frac{\frac{\Delta y}{y}}{\frac{\Delta x}{x}} = \frac{\frac{\Delta y}{\Delta x}}{\frac{y}{x}}, \tag{2.6}$$

st. vastavalt väljundsuuruse muutuse ja sisendsuuruse suhtelise muutuse suhtena või väljundsuuruse suhtelise muutuse ja sisendsuuruse suhtelise muutuse suhtena.

Täiuslikul anduril on tööulatuses suur ja eelistatavalt konstantne tundlikkus.



Joonis 2.2. Tundlikkus mittelineaarse ülekandefunktsiooni korral

2.1.3 Mõõtepiirkond

Mõõtepiirkonnaks või mõõteulatuseks nimetatakse mõõdetava füüsikalise suuruse maksimum- ja miinimumväärtuse vahet. Kõik andurid on ette nähtud töötamiseks teatud tööulatuses. Mõõtepiirkonnast väljas olevad signaalid võivad anda lubamatult ebatäpseid tulemusi või andurit isegi pöördumatult kahjustada.
Tavaliselt on anduri mõõtepiirkond esitatud selle tehnilistes andmetes. Näiteks kui temperatuurianduri mõõtepiirkond on 100–800 °C, võib kokkupuude sellest vahemikust väljas oleva temperatuuriga andurit kahjustada või anda ebatäpseid mõõtetulemusi.

2.1.4 Väikseim tuvastatav signaal

Andurisüsteemis on väikseim tuvastatav signaal mõõdetud suuruse väikseim väärtus, mis tekitab kõiki häirivaid tegureid arvesse võttes väljundsuuruse muutuse. Kui häiringud on anduri sisendsignaaliga võrreldes suured, on väljundsignaali eristamine raske ja väikseima signaali tuvastamine ei ole võimalik. Väikseimat tuvastatavat signaali määratakse mõõdetud suuruse absoluutsete või suhteliste ühikutena (temperatuurianduri korral on see näiteks 0,5 °C ehk 0,2% 250 °C-st mõõtepiirkonnast).

2.1.5 Mõõtetäpsus ja -vead

Andurite olulisim metroloogiline karakteristik on nende mõõtetäpsus või -viga. Andurite vigu saab rühmitada mitmesuguste liigituskriteeriumide alusel.

- *Vea väljendamise viisist olenevalt*

- Absoluutne viga Δx

See on määratletud mõõdetud suuruse väärtuse x ja selle suuruse tegeliku väärtuse x_0 vahena.

$$\Delta x = x - x_0 . \tag{2.7}$$

Absoluutse vea mõõteühik on sama, kui mõõdetaval suurusel. Seda saab määrata anduri sisendis või väljundis.

- Suhteline viga ε

Suhteline viga on absoluutse vea ja anduri mõõdetud suuruse tegeliku väärtuse suhe, mida tavaliselt väljendatakse protsendina.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{x_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% . \tag{2.8}$$

- Normaliseeritud viga ε_n

Anduri mõõtetäpsuse hindamiseks saab kasutada normaliseeritud viga, mis on absoluutse vea ja mingi normaalväärtuse suhe. Tavaliselt võetakse normaalväärtuseks anduri mõõtepiirkond $\left(x_{\max} - x_{\min}\right)$.

$$\varepsilon_n = \frac{\Delta x}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot 100\% . \tag{2.9}$$

- *Sisendsuuruse väärtusest olenevalt*

- Aditiivne viga (nulli hälve)

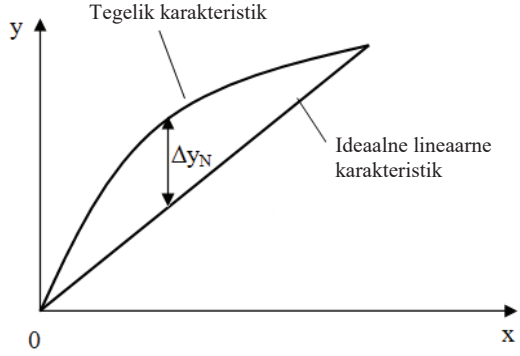
Aditiivne viga ei olene mõõdetud suuruse väärtusest, st mõõdetud suuruse iga väärtuse korral on aditiivne viga konstantne. Seda nimetatakse ka nulli hälbeks, sest kui mõõdetud suurus on null, on anduri väljundis nullist erinev väärtus.

- *Multiplikatiivne viga (tundlikkuse viga)*

Multiplikatiivne viga oleneb mõõdetud suuruse väärtusest ja see suureneb lineaarselt koos mõõdetud suuruse kasvuga. Seda nimetatakse ka tundlikkuse veaks.

- *Mittelineaarsusest tingitud viga*

Mittelineaarsusest tingitud viga on anduri karakteristiku ja ideaalse lineaarse karakteristiku maksimaalne erinevus (Joonis 2.3). Ideaalne lineaarne karakteristik on ülekandefunktsiooni lähendus. Kõige sagedamini määratakse see joon vähimruutude meetodiga, kuid kasutada saab ka muid meetodeid, näiteks siis, kui on ühendatud karakteristiku kaks otspunkti.

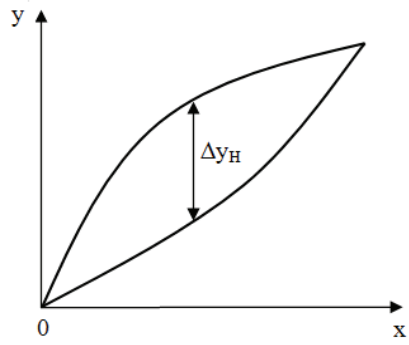


Joonis 2.3 Mittelineaarsusest tingitud viga

Sageli määratakse mittelineaarsusest tingitud suhteline viga, mis on määratletud anduri tegeliku karakteristiku ja ideaalse lineaarse omaduse maksimaalse erinevuse ning muutumispiirkonna suhtena (väljendatakse protsendina).

- *Hüstereesiviga*

Hüstereesinähtuse tõttu tekib andurites nn *hüstereesiviga*, sest mõõdetud suuruse suurenemise (edasiliikumise) ja vähenemise (tagasiliikumise) ülekandefunktsioonid (Joonis 2.4) ei pruugi kokku langeda.



Joonis 2.4. Hüstereesiviga

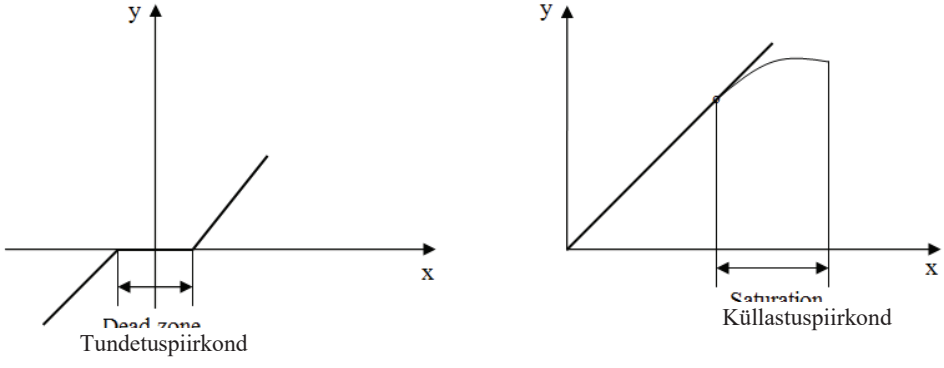
Hüstereesiviga on määratletud kui anduri väljundis oleva mõõdetud suuruse suurendamisel ja sellele järgneval vähendamisel tekkinud maksimaalse erinevus mõõtepiirkonna suhtes. Hüstereesi tekkimise põhjus on hõõrdumine ja tajuri materjalis tekkivad struktuursed muutused.

- *Korratavusviga*

Korratavusviga on anduri karakteristik, mis määrab, kui hästi reprodutseeritakse samu väljundsignaale, kui samad sisendsignaalid saabuvad järjekindlalt samasugustes tingimustes ja muutuvad samas suunas. Selle vea kindlaksmääramiseks kasutatakse tavaliselt kahte mõõtetsüklit. Korratavusviga on kahes mõõtetsüklis leitud anduri suurenevas või vähenevas suunas muutuvate väljundsignaalide maksimaalse erinevuse ja mõõtepiirkonna suhe. Need kaks tsüklit peavad toimuma samades tingimustes ja ümbritseva keskkonna parameetrid peavad jääma samaks.

2.1.6 Tundetus- ja küllastuspiirkond

Igal anduril on omad piirangud. Alumine piir määrab tundetuspiirkonna ja ülemine piir määrab küllastuspiirkonna (Joonis 2.5).



Joonis 2.5 . Anduri tundetus- ja küllastuspiirkond

Tundetuspiirkond (Joonis 2.5a) avaldub anduri tundetusena nõrkade sisendsignaalide suhtes. Selles piirkonnas on väljundsignaal peaaegu muutumatu (nullis). Teisest küljest tekib isegi lineaarse anduri korral selline olukord, kus sisendsignaali teatud tasemest edasi ei ole väljundsignaali muutus enam lineaarne. Sellisel juhul on andur jõudnud küllastuspiirkonda (Joonis 2.5b).

2.1.7 Stabiilsus

Anduri stabiilsus on omadus saada anduri väljundis sama väärtusega signaal alati, kui anduri sisendisse antakse kindla ajavahemiku jooksul mõõdetava suuruse muutumatu väärtus.
Stabiilsus oleneb vananemisprotsessidest, mis muudavad anduri materjalide elektrilisi, keemilisi ja soojuslikke omadusi. Anduriparameetrite muutumine võib kesta kuid ja aastaid. Stabiilsus on täppismõõtmisteks kasutatavate andurite oluline omadus. Stabiilsuse suurendamiseks läbivad andurid tehisliku vanandamise, mis tehakse äärmuslikes tingimustes toimuvates töötsüklites.

2.1.8 Töötemperatuuride vahemik

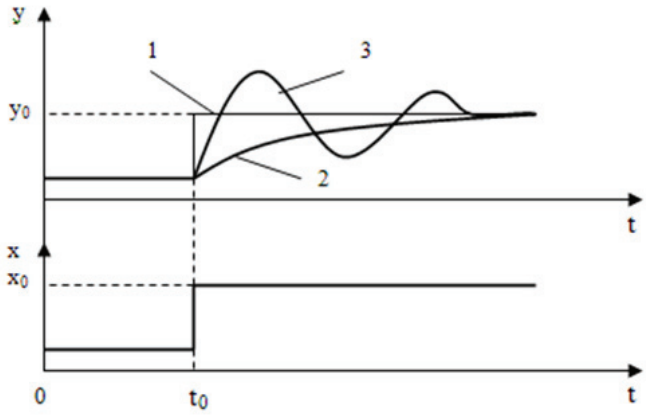
Ümbritseva keskkonna temperatuur mõjutab andurite tööd. Töötemperatuuri vahemik on ümbritseva keskkonna temperatuuri kõrge ja madala piirväärtuse vahemik, milles andur töötab ettenähtud täpsusega. Mõne anduritüübi korral on see vahemik jagatud osadeks, kus igaühe jaoks on näidatud oma täpsus.
Andurite või nendega ühendatud mõõteahelate temperatuurivigade vähendamiseks rakendatakse temperatuurikompensatsiooni.

2.2 Dünaamilised karakteristikud ja parameetrid

Dünaamilised karakteristikud on sellised, mis avalduvad anduri töötamise korral dünaamilisel režiimil ehk siis, kui anduri mõõdetav suurus oleneb ajast. Dünaamilisi karakteristikuid saab esitada mitmesugusel kujul: ülekandeomadused, siirdeomadused, sagedusomadused jne. Dünaamilised karakteristikud on seotud energiat salvestavate elementide olemasoluga andurites. Nendeks võivad olla induktiivsus, mahtuvus, mehaanilised elemendid (nt vibreerivad kehad) ja soojusenergiaga kütteseadmed.
Juhtimisteoorias saab seadme sisendite ja väljundite vahelist sidet kirjeldada konstantsete teguritega lineaarsete diferentsiaalvõrrandite abil. Nende võrrandite lahendamise abil saab määrata seadme dünaamilised karakteristikud. Anduri konstruktsioonist olenevalt võivad neid karakteristikuid kirjeldada erinevat järku võrrandid.
Nulljärku anduritel on lineaarsed staatilised karakteristikud, mida kirjeldab lineaarne sõltuvus. Anduris puuduvad energiat salvestavad elemendid. Nulljärku andurid ei vaja dünaamilisi karakteristikuid.
Esimest järku anduritel on üks energiat salvestav element. Neid kirjeldab esimest järku diferentsiaalvõrrand. Sellise anduri tüüpiline näide on temperatuuriandur, mille energiat salvestav element on soojusmahtuvuslik.
Teist järku anduritel on kaks energiat salvestavat elementi ja neid kirjeldab teist järku diferentsiaalvõrrand. Sellise anduri näide on sisseehitatud massi ja vedruga kiirendusmõõtur. Pärast astmelise signaali andmist teist järku anduri sisendisse, tekivad selle väljundis võnkumised.

2.2.1 Hüppekaja

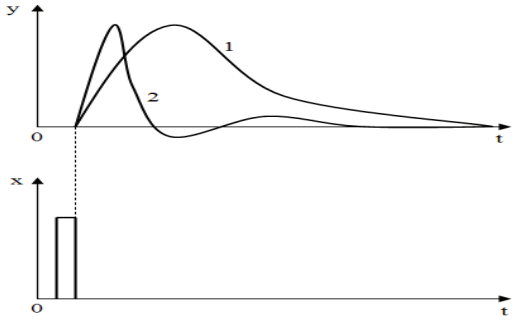
Hüppekaja näitab, kuidas muutub anduri väljund sisendi hüppelisel (astmelisel) muutumisel. Hüppekaja võimalikud tüübid on näidatud Joonis 2.6, kus 1 tähistab ideaalset hüppekaja, 2 aperioodilist karakteristikut ja 3 perioodilist (võnkuvat) karakteristikut.



Joonis 2.6 Hüppekaja

2.2.2 Impulsskaja

Impulsskaja näitab, kuidas muutub anduri väljundsignaal, kui selle sisendisse anda ühik-impulssfunktsioon. Anduri sisendsignaali nimetatakse ka deltafunktsiooniks (Joonis 2.7), kus 1 tähistab aperioodilist karakteristikut ja 2 perioodilist (võnkuvat) karakteristikut.



Joonis 2.7 Impulsskaja

Esimest järku anduri siirdeprotsess on aperioodiline, teist järku andurite siirdeprotsess on võnkuv (perioodiline).

2.2.3 Sageduskaja

See on polaarkoordinaatsüsteemis esitatav karakteristik, mis näitab väljund- ja sisendsignaalide amplituudi ja faasinihke sõltuvust sagedusest.

2.2.4 Bode amplituudikarakteristik ja Bode faasikarakteristik

Bode amplituudikarakteristik näitab väljundsignaali amplituudi sõltuvust sisendsignaali sagedusest.
Bode faasikarakteristik näitab väljund- ja sisendsignaali vahelise faasinihke sõltuvust sagedusest.

2.2.5 Anduri reageerimisaeg ja taastumisaeg

Need karakteristikud võimaldavad hinnata, kuidas anduri väljundsuurus jälgib sisendsuuruse (mõõdetud suuruse) muutust ajas. Sellist käitumist iseloomustatakse järgmiste parameetritega.

- *Reageerimisaeg*

Reageerimisaeg on määratletud kui aeg, mis pärast anduri sisendisse ühik-impulssfunktsiooni andmist kulub anduri väljundsignaali jõudmiseks 90% tasemele. Mida lühem on see aeg, seda kiirem on anduri töö.

- *Taastumisaeg*

Taastumisaeg on määratletud kui aeg, mis pärast anduri sisendisse ühik-impulssfunktsiooni andmist kulub anduri väljundsignaali jõudmiseks 10% tasemele (maksimumväärtuselt miinimumväärtusele).

- *Anduri ajakonstant*

Ajakonstant on anduri inertsuse mõõde. Ajakonstant on aeg, mis pärast anduri sisendisse ühik-impulssfunktsiooni andmist kulub anduri väljundsuuruse jõudmiseks 0,63 statsionaarse väärtuse või maksimumväärtuse tasemele.

2.2.6 Piirsagedus

Piirsagedus on sisendsignaali suurim või väikseim sagedus, mida andur suudab mõõnutusteta tajuda. Kõrgemat sagedust, mille korral anduri väljundpinge või väljundvool väheneb 30% võrra, loetakse anduri maksimaalseks töösageduseks. Mõne anduri korral on olemas ka sageduse alumine piirväärtus, mis iseloomustab anduri minimaalset töösagedust.

2.2.7 Faasinihe

Kindlal sagedusel esinev faasinihe iseloomustab anduri väljundsignaali faasinihet sisendsignaali suhtes. Faasinihet mõõdetakse kraadides või radiaanides ja see leitakse perioodiliste signaalidega töötavate andurite jaoks. Kui andur on tagasisidega süsteemi osa, on vaja teada selle faasikarakteristikuid. Anduri faasinihe võib vähendada kogu süsteemi faasivaru ja põhjustada ebastabiilsust.

2.2.8 Resonantssagedus

Igat teist järku andurit iseloomustab resonantssagedus. Resonantssagedusel suureneb anduri väljundsignaal olulisel määral. Tajuri mehaanilised, soojuslikud ja elektrilised omadused olenevad resonantssagedusest. Tavaliselt valitakse anduri töösagedusvahemik reso-

nantssagedusest tunduvalt madalamal või kõrgemal. Mõne anduritüübi korral on resonants-sagedus anduri töösagedus.

2.3 Teadmiste kontroll

1. Andurite staatilisi omadusi (karakteristikuid) ja parameetreid iseloomustatakse:
   a) tundlikkusega;
   b) ülekandeteguriga;
   c) taastumisajaga;
   d) mittelineaarsusest tingitud veaga;

2. Absoluutne viga:
   a) on tavaliselt väljendatud protsentides;
   b) on defineeritud kui erinevus suuruse mõõdetud väärtuse ja tegeliku väärtuse vahel;
   c) on defineeritud kui erinevus mõõdetud suuruse tegeliku väärtuse ja selle kindla väärtuse vahel;
   d) sellel on mõõdetud suuruse dimension (ühik).

3. Anduri a*ditiivne viga (nulli hälve)*:
   a) sõltub mõõdetud suuruse väärtusest;
   b) on seotud hüstereesi nähtusega;
   c) jääb konstantseks konkreetses mõõteulatuse piirkonnas;
   d) kutsutakse ka tundlikkuse veaks.

4. Andurite korratavuse viga:
   a) piiritleb kui hästi andur reprodutseerib väljundsignaali väärtust kui sisendisse antakse järjestikku sisendsignaalid samades tingimustes ja need muutuvad samas suunas.
   b) iseloomustab anduri tundlikkust väikeste sisendsignaali väärtuste korral;
   c) on defineeritud kui anduri väljundsignaali maksimaalne erinevus mõõdetava suuruse väärtuse suurendamisel ja siis järgneval vähendamisel mõõtepiirkonna suhtes;
   d) on maksimaalne erinevus anduri karakteristiku ja ideaalse lineaarse karakteristiku vahel.

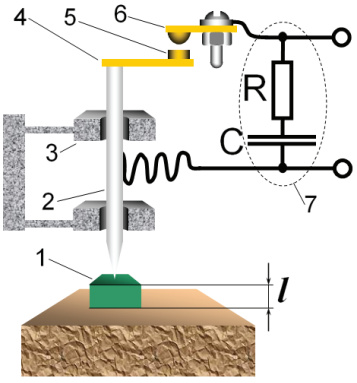
5. Anduri dünaamiline karakteristik ja parameetrid on seotud järgmiste mõistetega:
   a) ülekandefunktsioon;
   b) ühikhüpe;
   c) reaktsiooniaeg;
   d) Multiplikatiivne viga *(tundlikkuse viga)*.

6. Anduri impulsikaja:
   a) on väljundsignaali amplituudi ja sisendsignaali sageduse vaheline sõltuvus;
   b) määrab sisendsageduse suurima või vähima väärtuse, ilma, et andur moonutaks;
   c) iseloomustab andurist saadud signaali faasinihet sisendsignaali suhtes;
   d) näitab, kuidas muutub anduri väljundsignaal, kui selle sisendisse anda ühik-impulss-funktsioon.

3 ASENDI-JA NIHKEANDURID

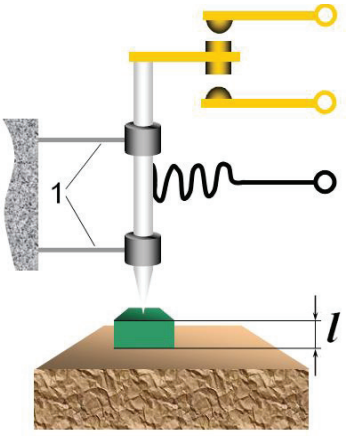
3.1 Kontaktandurid

Kontaktandurid on muundurid, milles lineaar- või nurknihe (mõõtmed) muundatakse elektri-ahelat juhtivate kontaktide avatud või suletud seisundiks.
Välja on töötatud ühepiirkonna- (Joonis 3.1), topeltpiirkonna- (Joonis 3.2) ja mitmepiirkonna-kontaktandurid (Joonis 3.3).



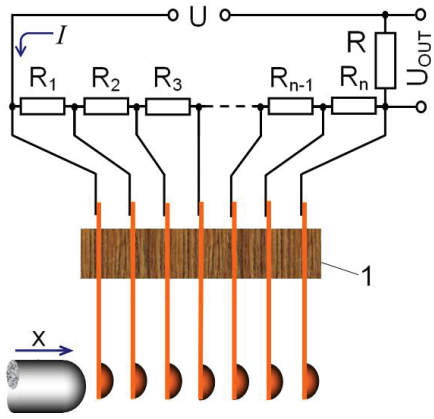
1 – juhitav objekt, 2 – võll, 3 – silindrilised juhikud, 4 – kontaktelektrood,
5 – lame (silindriline) kontakt, 6 – liikumatu kontakt, 7 – kaarekustutusgrupp

Joonis 3.1 Ühepiirkonna-kontaktandurid



1 – lehtvedrud

Joonis 3.2 Kahepiirkonna-kontaktandurid



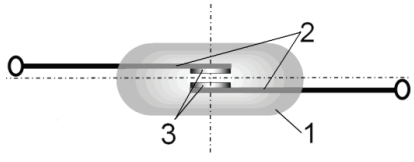
1 – isolatsioon

Joonis 3.3 Mitmepiirkonna-kontaktandurid

Kontaktid võivad olla valmistatud hõbedast, vasest, plaatinast, roodiumist, volframist, molübdeenist jne. Kaarekustutusgruppi kasutatakse sädemete ja kaarlahenduse tekke vältimiseks.

Magnetjuhitavad kontaktid

Tegu on kontaktandurite variandiga (Joonis 3.4), mida nimetatakse ka herkoniks (hermeetiliseks kontaktiks) või keelkontaktiks.



1 – klaasampull, 2 – pehmest magnetmaterjalist (nt permalloist) elektroodplaadid, 3 – kontaktid (plaatina, kuld, hõbe jne).

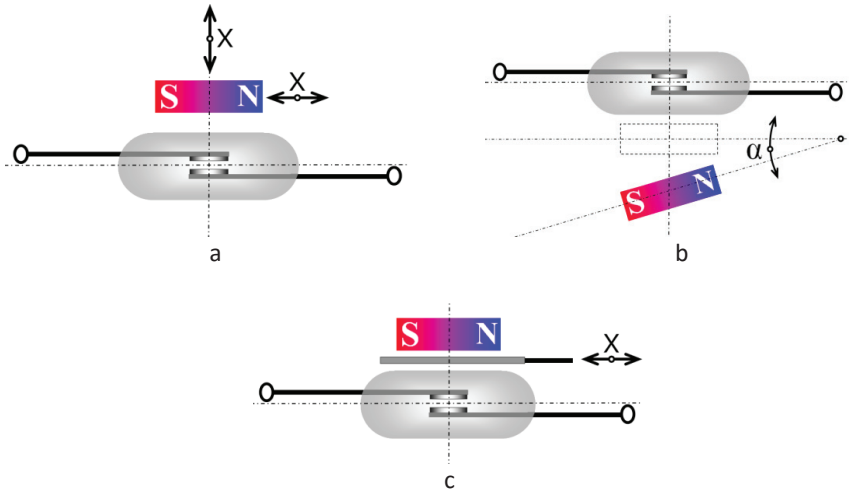
Joonis 3.4 Magnetjuhitav kontaktandur (herkon)

Klaasampulli läbimõõt on umbes 3 mm ja pikkus umbes 20 mm. See on täidetud inertgaasiga (lämmastik, argoon või vesinik) või on selles vaakum. Sellesse on pressitud elektroodplaadid. Need on valmistatud pehmest magnetmaterjalist (tavaliselt permalloi). Neid ja kontaktide vahelist õhupilu läbib magnetväli. Kontaktid on kaetud hõbeda, kulla, plaatina, plaatina-roodiumi või nende sulamitega. Elektroodid töötavad magnetahelatena, kontaktidena ja vedrudena.

Kontakte juhib püsimagneti tekitatud väline magnetväli. Magnetväli muutub kahel viisil: magnetvälja tekitava püsimagneti liigutamise või keeramisega (Joonis 3.5 a), b)

- püsimagneti ja ampulli vahele paigutatud ekraani liigutamisega (Joonis 3.5 c).

Magnetjuhitavatel kontaktidel on järgmised eelised: väikesed mõõtmed, soodne hind, hea kaitse oksüdeerumise ja tolmu eest, suur lülituste arv (10^6–10^9), suur reageerimiskiirus (0,2–0,5 μs) jne.



Joonis 3.5 Herkonite juhtimine a) püsimagneti liigutamisega, b) püsimagneti keeramisega, c) püsimagneti ja ampulli vahele paigutatud ekraani liigutamisega

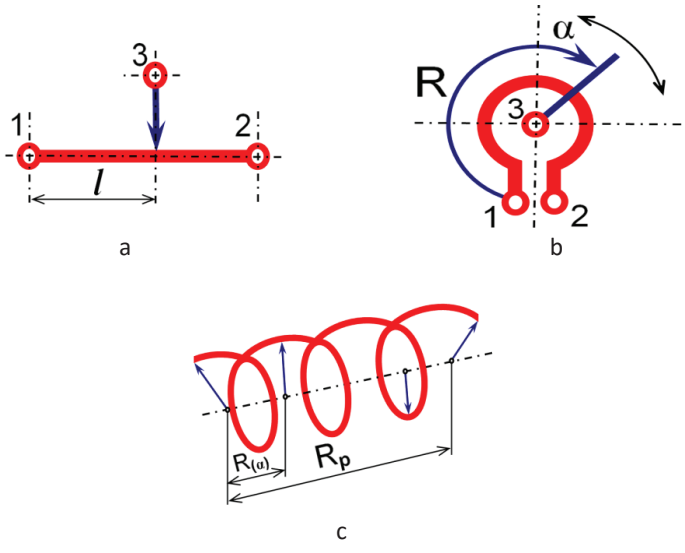
3.2 Potentsiomeetrilised andurid

3.2.1 Mehaaniliste kontaktidega potentsiomeetrilised andurid

Potentsiomeeter on takisti, mille püsitakistus on R_p. Piki takistit liigub elektriliselt ühendatud liugur. Liugur on mehaaniliselt ühendatud uuritava objektiga, mille nihet tuleb muundada. Liuguri ja takisti ühe otsa vaheline takistus R oleneb järgmistest teguritest:

- liuguri asukoht
- takisti konstruktsioon.

Kui takisti konstruktsioon on homogeenne, on potentsiomeeter lineaarne, sest takistuse R ja liuguri asukoha vahel on proportsionaalne sõltuvus. Sel juhul saab olenevalt liuguri nihke-trajektoorist eristada:
lükandpotentsiomeetrid (Joonis 3.6 a)



Joonis 3.6 Potentsiomeetrilised andurid: a) lükandpotentsiomeeter, b) pöördpotentsiomeeter, c) mitmepöördeline potentsiomeeter

- nurknihkepotentsiomeetrid

Sellesse alarühma kuuluvad:

= pöördpotentsiomeetrid ($\alpha_m < 360°$) (Joonis 3.6 b)

= mitmepöördelised potentsiomeetrid ($\alpha_m > 360°$) (Joonis 3.6 c).

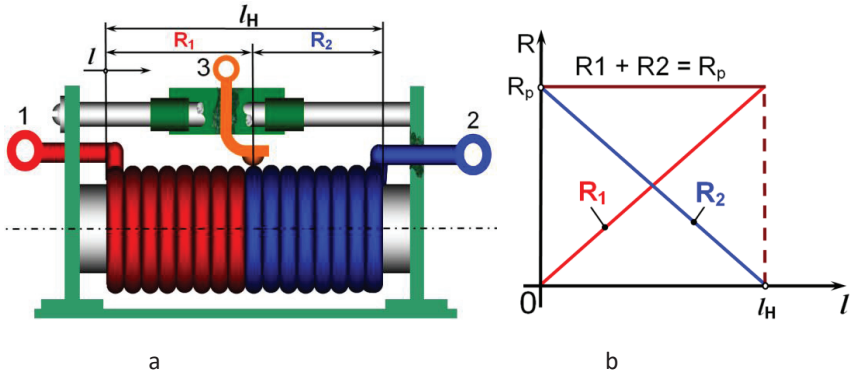
Potentsiomeetrilise anduri takisti võib olla juht või juhtiv riba.

Kui nendes andurites on kasutatud õhukest kalibreeritud juhti koos liuguriga, nimetatakse neid ka *reohordanduriteks (reohordideks)*.

Kui juht on mähitud karkassile, on tegemist *reostaatanduriga*.

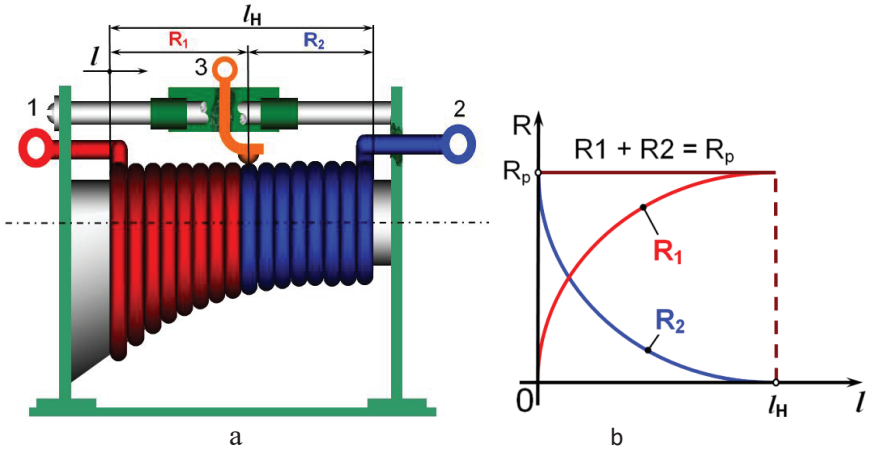
Reostaatandurid on erilahendusega reostaadid, mille liugur liigub sisendsuuruse (lineaar- või nurknihke) või eelnevalt lineaar- või nurknihkeks teisendatud muu suuruse (jõu, rõhu jne) toimel.

Kõige sagedamini kasutatakse lineaarseid reostaate. Nende takistustraat on kogu ühesuguse ristlõikega karkassi ulatuses mähitud ühtlase sammuga (Joonis 3.7 a). Liuguriga on ühendatud kaks klemmi ning liuguri ja klemmide vahel tekib kaks väljundtakistust R_1 ja R_2. Joonis 3.7 3.7 b olevad kõverad näitavad nende takistuste muutumist.



Joonis 3.7 Lineaarne reostaat: a) konstruktsioon, b) karakteristikud

Toodetakse ka eriotstarbelisi reostaate, mille tunnusjoon on teadlikult tehtud mitte-lineaarne. Seda saab saavutada karkassi sobiva kujuga (Joonis 3.8), sobiva keerdude sammuga või lineaarse reostaadi osade lühistamisel takistiga.



Joonis 3.8 Eriotstarbeline reostaat: a) konstruktsioon, b) karakteristikud

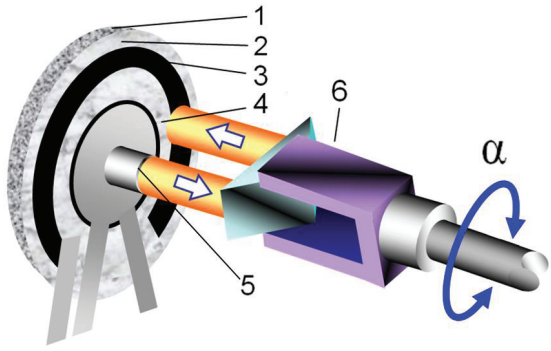
3.2.2 Mehaaniliste kontaktideta potentsiomeetrilised andurid

Nende töö põhineb mitmesugustel nähtustel. Nende peamised eelised on kontaktpindade hõõrdumise ja kulumise puudumine. Nendel anduritel ei ole kontakte.

- Fotoefektil põhinevad potentsiomeetrid (optilise ühendusega pöördpotentsiomeeter)

Valgustundliku kihi takistus väheneb valguse mõjul järsult (Joonis 3.9).

Langeva valgusvihu ja valgustundliku ala kokkupuutekoht muutub juhtivaks ja moodustab sel viisil kontakti alades 4 ja 2. Seega on valgusvihk liuguri rollis.



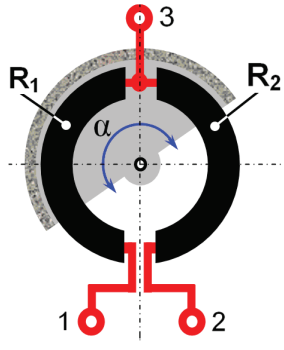
1 –fikseeritud ketas, 2 – juhtivast materjalist rõngas (kontaktala), 3 – valgustundlik rõngas (valgustundlik ala), 4 – takistusala (mõõteala), 5 – valgusdiood (tekitab valgusvihu), 6 – pöördelement. Sellel on kaks teineteise suhtes täisnurga all paiknevat peeglit.

Joonis 3.9 Optilise ühendusega pöördpotentsiomeeter

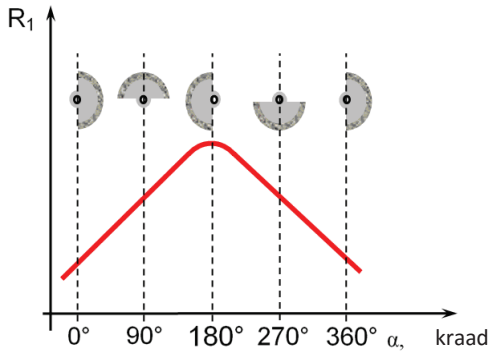
- *Magnetpotentsiomeetrid*

Neis kasutatakse magnettakisteid. Need on takistid, mille takistus muutub magnetvälja mõjul. Kui selline takisti paikneb magnetväljas, siis selle takistus suureneb järsult.

Magnetpotentsiomeetri konstruktsioon (Joonis 3.10) koosneb poolkettakujulisest kambrist, millesse sisenevad kaks magnettakistit R_1 ja R_2. Ketta ülemisele ja alumisele pinnale on paigutatud magnetpoolused, mis tekitavad magnettakistitega lõikuva magnetvälja. Punkt 3 on neile ühine. Kui ketast keeratakse, muutuvad R_1 ja R_2 erinevates suundades. Mida suurem osa magnettakistist on kaetud magnetväljaga, seda suurem on takistus. Joonis 3.11 on näidatud takistuse R_1 muutumine olenevalt nurkhälbest α.



Joonis 3.10 Magnetpotentsiomeeter



0° - ketas katab R_2 ja takistusel R_1 on miinimumväärtus
90° - takistusel on keskmine väärtus ja $R_1 = R_2$
180° - R_1 on maksimumväärtusega
270° - takistusel on jälle keskmine väärtus ja $R_1 = R_2$
360° - takistusel R_1 on jälle miinimumväärtus

Joonis 3.11 Magnetpotentsiomeetri takistuse R_1 muutumine olenevalt nurkhälbest α .

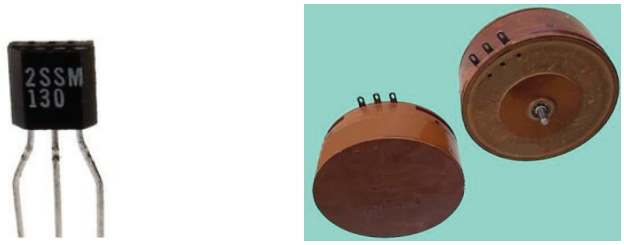
Joonis 3.12 on kujutatud erinevate ettevõtete toodetud lükandpotentsiomeetrid, Joonis 3.13 pöördpotentsiomeetrid ja Joonis 3.14 mitmepöördelised potentsiomeetrid.

Joonis 3.12 Lükandpotentsiomeetrid

Joonis 3.13 Pöördpotentsiomeetrid

Joonis 3.14 Mitmepöördelised potentsiomeetrid

Magnettakistite välimust on kujutatud Joonis 3.15.



Joonis 3.15 Magnettakistid

3.3 Induktiivandurid ja vastastikku induktiivsed andurid

Induktiivandurid koosnevad induktiivpoolist, mis paikneb õhupiluga magnetsüdamikul. Pooli parameetrid olenevad sisendsuurusest, mis on tavaliselt lineaar- või nurknihe või muu nihkeks teisendatud suurus.

Sisendsuuruse *X* mõjul muutuvad õhupilu parameetrid (pikkus δ või pindala *s*) ja koos sellega õhupilu ja kogu pooli magnetahela takistus. Selle tulemusel muutub pooli induktiiv- ja näivtakistus.

Need andurid töötavad vahelduvvooluga. Kui δ ja *s* muutuvad, muutub ka pooli takistus. Seetõttu kasutatakse anduri konstruktsioone, milles muutub üks kahest parameetrist.

Võimalik on ehitada nii üksik- kui ka diferentsiaalandureid.

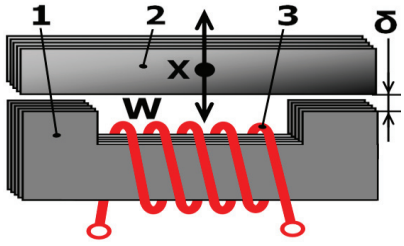
Diferentsiaalandurid võimaldavad suurendada tundlikkust, parandada muundusfunktsiooni lineaarsust ja vähendada vigu.

Iga *induktiivanduri* saab muuta *vastastikku induktiivseks* anduriks (*trafoanduriks*). Selleks paigutatakse magnetsüdamikule teine mähis (mõõtemähis), milles indutseeritakse elektromotoorjõud. Esimest mähist nimetatakse ergutusmähiseks (magneetimismähiseks). Diferentsiaalanduritele lisatakse kaks täiendavat sekundaarmähist.

Andurite konstruktsioon

3.3.1 Muutuva õhupiluga magnetsüdamikuga andurid δ

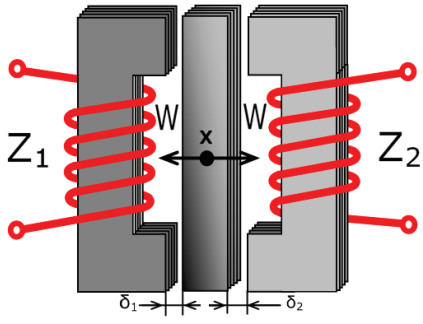
Need on levinumad induktiivandurid. Joonis 3.16 on kujutatud seda tüüpi *üksik-induktiivandur*.



1 – magnetsüdamik, 2 – ankur, 3 – mähis

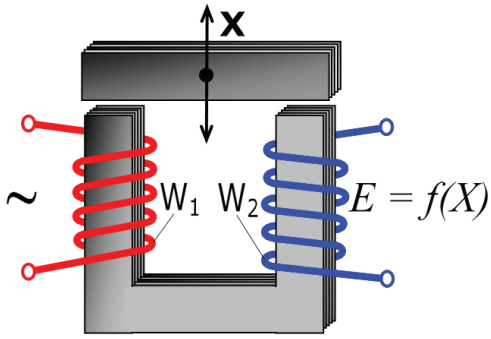
Joonis 3.16 Muutuva õhupiluga δ magnetsüdamikuga üksik-induktiivandur

Ankur liigub sisendsuuruse *X* mõjul ja tekitab õhupilu muutuse δ ning mähise näivtakistuse muutuse.
Joonis 3.17 on kujutatud *diferentsiaalset induktiivandurit,* milles muutub δ.

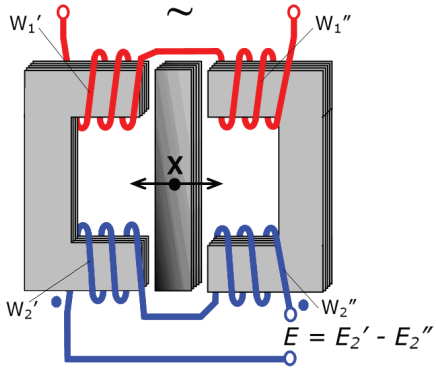


Joonis 3.17 Muutuva õhupiluga magnetsüdamikuga diferentsiaalne induktiivandur

Joonis 3.18 ja Joonis 3.19 kujutavad vastavalt *vastastikku induktiivset üksik- ja diferentsiaalandurit,* mille õhupilu δ muutub lineaarnihkega.



Joonis 3.18 Vastastikku induktiivne üksikandur, mille õhupilu muutub lineaarnihkega

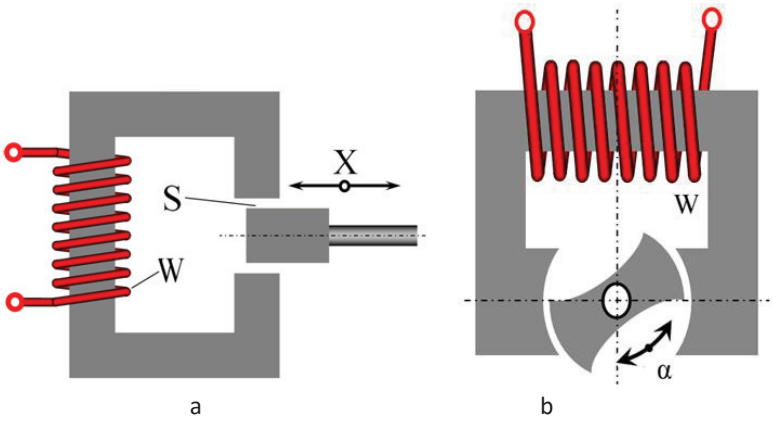


Joonis 3.19 Vastastikku induktiivne diferentsiaalandur, mille õhupilu muutub lineaarnihkega

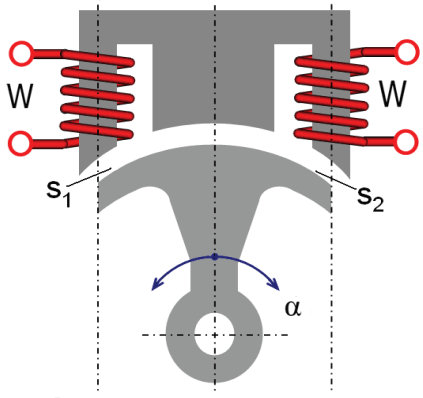
3.3.2 Õhupilu muutuva pindalaga magnetsüdamikuga andurid

Joonis 3.20 on kujutatud seda tüüpi üksik-induktiivandur ja Joonis 3.21 on kujutatud diferentsiaalne induktiivandur.

Joonisel 3.20 a olev üksik-induktiivandur mõõdab *lineaarnihet.* Sisendsuurus *X* liigutab ankrut vasakule või paremale ja suurendab või vähendab sellega pindala *s*.



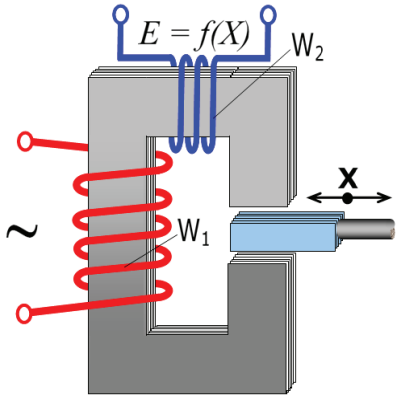
Joonis 3.20 Õhupilu muutuva pindalaga s magnetsüdamikuga üksik-induktiivandur: a) lineaarnihke mõõtmiseks, b) nurknihke mõõtmiseks



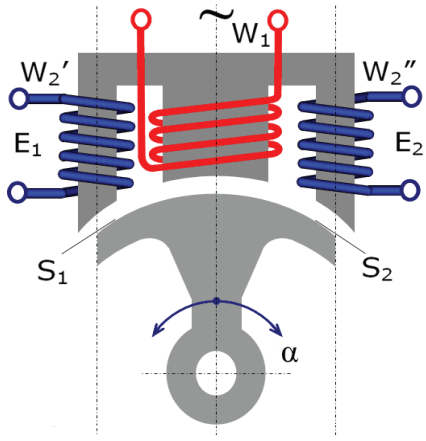
Joonis 3.21 Õhupilude muutuvate pindaladega s_1 ja s_2 magnetsüdamikuga diferentsiaalne induktiivandur

Joonis 3.20 b näidatud üksik-induktiivandur mõõdab *nurknihet.*
Seda tüüpi diferentsiaalne induktiivandur (Joonis 3.21) mõõdab *nurknihet,* mille tulemusel muutuvad õhupilude pindalad s_1 ja s_2.

Joonis 3.22 on kujutatud *lineaarnihet mõõtev üksik vastastikku induktiivne andur* ja Joonis 3.23 on kujutatud nurknihet mõõtev õhupilude muutuvate pindaladega *diferentsiaalne vastastikku induktiivne andur*.



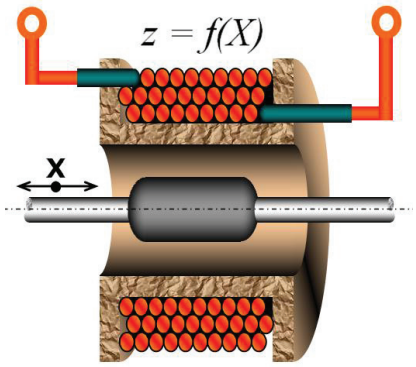
Joonis 3.22 Lineaarnihet mõõtev üksik vastastikku induktiivne andur



Joonis 3.23 Nurknihet mõõtev diferentsiaalne vastastikku induktiivne andur

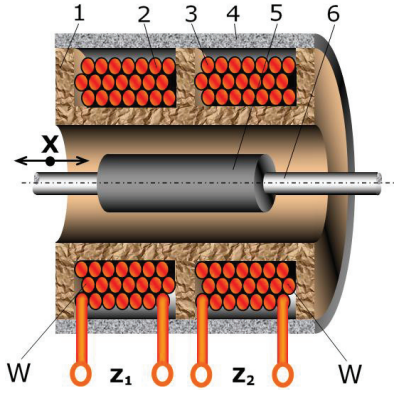
3.3.3 Liikuva südamikuga andurid

Joonis 3.24 on kujutatud *liikuva südamikuga üksik-induktiivandurit.* Seda kasutatakse suuremate (kuni mitme millimeetri suuruste) lineaarnihete mõõtmiseks.



Joonis 3.24 Liikuva südamikuga üksik-induktiivandur

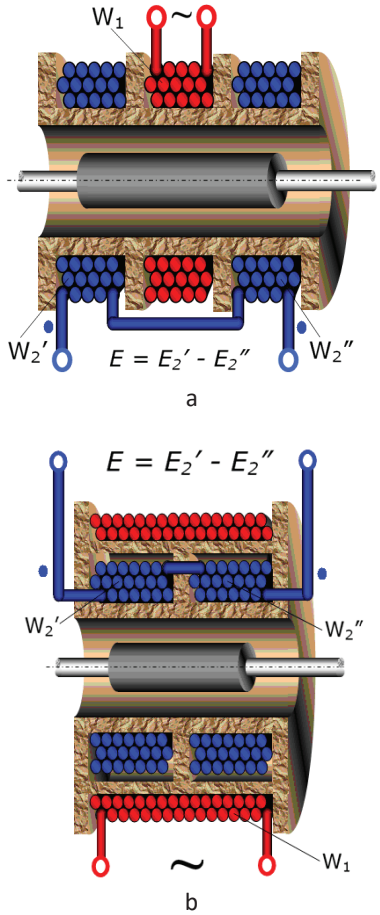
Diferentsiaalandur on esitatud Joonis 3.25.



1 – isoleerivast materjalist karkass, 2 ja 3 – ühesuguse keerdude arvuga mähised W, 4 – fikseeritud ferromagnetiline silinder, 5 – ferromagnetilisest materjalist liikuv südamik, 6 – mittemagnetilisest materjalist (messingist) juhikud

Joonis 3.25 Liikuva südamikuga diferentsiaalne induktiivandur

Ankru liikumise korral ühe mähise induktiivsus suureneb ja teise oma väheneb. Mõlemad mähised on ühendatud vahelduvvoolusilla vastasõlgadesse.
Kui andurile lisatakse ergutusmähis W_1 ja vaadeldud mähiseid W_2 kasutatakse mõõtmiseks, siis saadakse vastastikku induktiivne andur, mida sageli nimetatakse *lineaarmuutuvusega diferentsiaaltrafoks* (LVDT). Nende konstruktsioon võib olla erinev (Joonis 3.26 a ja b).



Joonis 3.26 Lineaarmuutuvusega diferentsiaaltrafo (LVDT) konstruktsioon

3.4 Mahtuvuslikud andurid

Mahtuvuslikeks anduriteks nimetatakse andureid, milles mõõdetav mitte-elektriline suurus muundatakse kondensaatori mahtuvuse muutuseks.

Ääreefekti arvestamata jätmise korral saab paralleelsete plaatelektroodidega kondensaatori mahtuvuse *C* arvutada valemiga

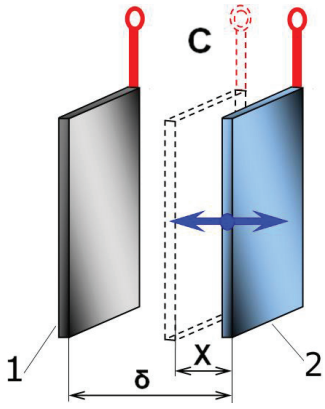
$$C=\frac{\varepsilon s}{\delta}=\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r s}{\delta}, \tag{3.1}$$

kus ε on elektroodide vahelise keskkonna dielektriline läbitavus, *s* on nende pindala, δ on nende vaheline kaugus, ε_0 = 8,854×10^{-12} F/m on vaakumi dielektriline läbitavus, ε_r on elektroodide vahelise aine suhteline dielektriline läbitavus (õhu korral ε_r = 1,0006).

Seega saab mahtuvust *C* muuta ε, *s* ja δ abil. Muundusfunktsioon $C = f(\delta)$ on mittelineaarne ning muundusfunktsioonid $C = f(s)$ ja $C = f(\varepsilon)$ on lineaarsed.

3.4.1 Elektroodide muutuva vahekaugusega mahtuvuslikud andurid lineaarnihke mõõtmiseks

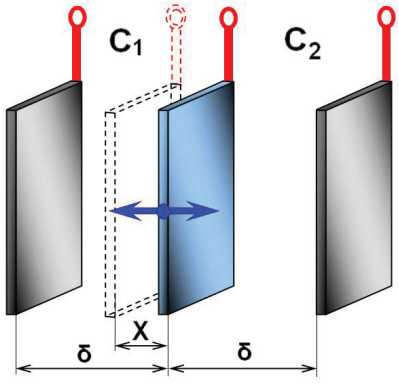
Joonis 3.27 on kujutatud *üksikut mahtuvuslikku andurit,* millel muutub δ.



1 – fikseeritud elektrood, 2 – liikuv elektrood

Joonis 3.27 Üksik mahtuvuslik andur, millel muutub elektroodide vahekaugus

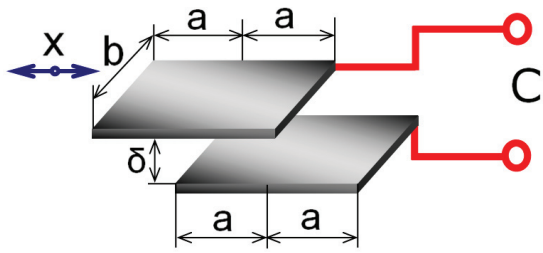
Sellel anduril on kitsas lineaarsuspiirkond.
Joonis 3.28 on kujutatud *diferentsiaalandurit*.



Joonis 3.28 Mahtuvuslik diferentsiaalandur, millel muutub elektroodide vahekaugus

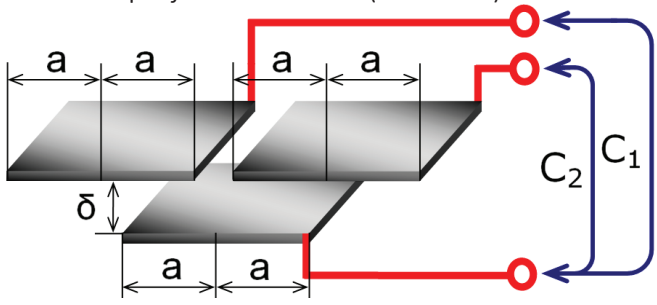
3.4.2 Mahtuvuslikud andurid muutuva pindalaga elektroodidega lineaar- ja nurknihke mõõtmiseks

Joonis 3.29 on kujutatud *üksikut mahtuvuslikku andurit*, milles lineaarnihke mõõtmiseks muutub *s*.



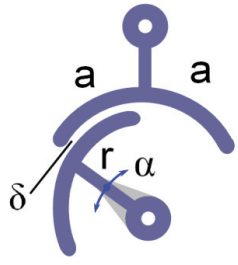
Joonis 3.29 Elektroodide muutuva pindalaga üksik mahtuvuslik andur lineaarnihke mõõtmiseks

Elektroodi liigutamise korral väheneb mahtuvus alati, olenemata nihke *x* suunast. See puudus on kõrvaldatud sama tüüpi *diferentsiaalanduris* (Joonis 3.30).

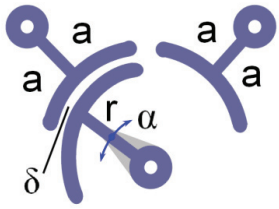


Joonis 3.30 Elektroodide muutuva pindalaga diferentsiaalne mahtuvuslik andur lineaarnihke mõõtmiseks

Joonis 3.31 on kujutatud *üksikut* mahtuvuslikku andurit, milles muutub *s* nurknihke mõõtmiseks, ning Joonis 3.32 on kujutatud sama tüüpi *diferentsiaalandurit*.

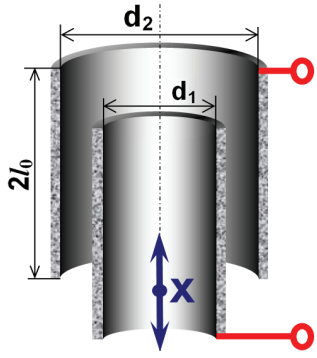


Joonis 3.31 Elektroodide muutuva pindalaga üksik mahtuvuslik andur nurknihke mõõtmiseks



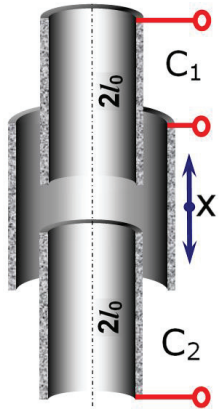
Joonis 3.32 Elektroodide muutuva pindalaga diferentsiaalne mahtuvuslik andur nurknihke mõõtmiseks

Laialdaselt kasutatakse ka silindrilisi (koaksiaalseid) mahtuvuslikke andureid (Joonis 3.33).



Joonis 3.33 Üksik silindriline mahtuvuslik andur

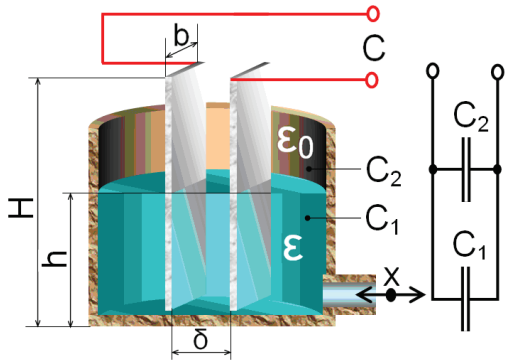
Sellises anduris võib liikuda nii sisemine kui ka välimine silinder.
Selle anduri võib muuta diferentsiaalseks kolmanda silindri lisamisega, jättes liikuvaks vaid ühe silindri (Joonis 3.34).



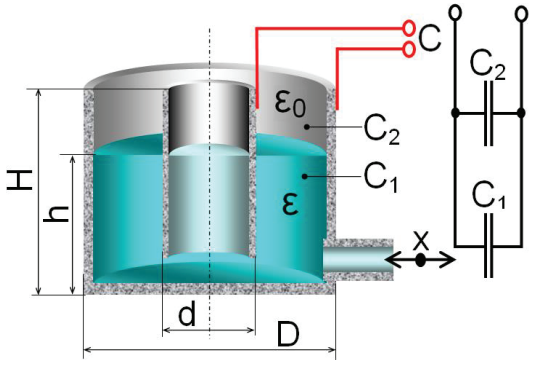
Joonis 3.34 Diferentsiaalne silindriline mahtuvuslik andur

3.4.3 Muutuva dielektrilise läbitavusega ε mahtuvuslikud andurid väikeste nihete ja nivoode mõõtmiseks

Sellist andurit on kujutatud Joonis 3.35 ja Joonis 3.36Joonis 3.36.



Joonis 3.35 Muutuva dielektrilise läbitavusega paralleelsete plaatelektroodidega mahtuvuslikud andurid

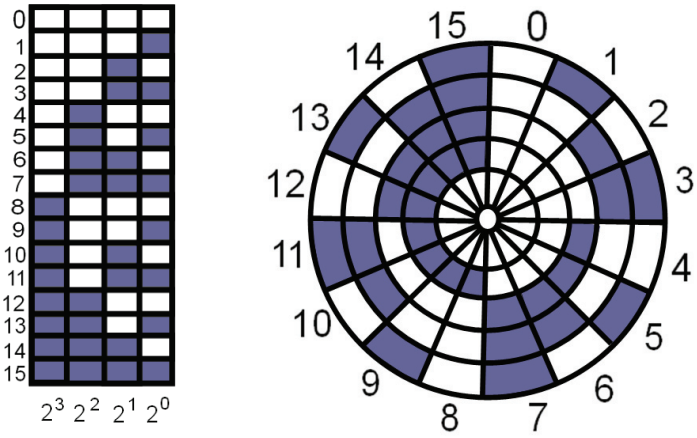


Joonis 3.36 Muutuva dielektrilise läbitavusega silindriline mahtuvuslik andur

Mõlemat tüüpi andureid (Joonis 3.35 ja Joonis 3.36) saab kasutada väikeste nihete *X,* vedelikunivoo ja selliste tahkete ainete nivoo mõõtmiseks, mille dielektrilise läbitavuse ε väärtus on suurem kui 1.
Muundamine on mõlemal juhul lineaarne.

3.5 Absoluutandurid

Nihete (nurk- või lineaarnihete) mõõtmiseks saab välja töötada anduri, mille väljundsignaal on otseselt digitaalne.
Absoluutandurid võivad olla lineaarsed (Joonis 3.37a) või pöörlevad (võlliga) (Joonis 3.37b). Joonis 3.37 on kujutatud kahendkoodi põhimõttel töötavaid absoluutandureid.



Joonis 3.37 Absoluutandurid: a) lineaarnihke mõõtmiseks, b) nurknihke mõõtmiseks

Kõik *n* bitti, mis moodustavad sõna, on moodustatud vastavalt *n* paralleelsele või kontsentrilisele rajale, kus loogilise 0 või 1 määramiseks kasutatakse kahte erinevat seisundit:

- mittemagneetuv või ferromagnetiline pind – magnetiliseks lugemiseks
- isoleeriv või juhtiv pind – elektriliseks lugemiseks
- läbipaistmatu või läbipaistev pind – optiliseks lugemiseks

Optilist lugemist kasutatakse väga sageli. Igal rajal on allikas (elektromagnetiline diood) ja vastuvõtja (fototransistor).
Elementide arv *N* igal rajal määrab lahutusvõime:

- lineaarsetel absoluutanduritel pikkusega *L* on see *L*/*N*
- pöörlevatel absoluutanduritel on see 360°/*N*.

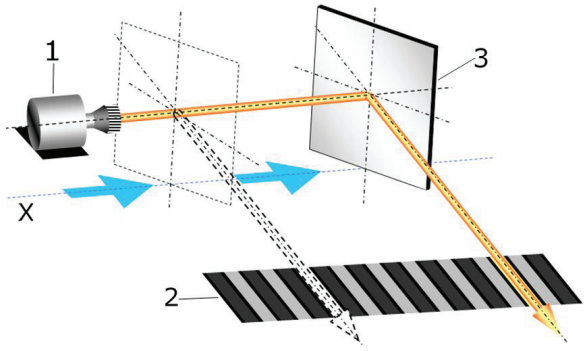
Vahetu kahendkoodi saamiseks tuleb saadud infot töödelda arvutusseadmega. Ent kuna teatud kahendarvude muutmisel ühe võrra võib korraga muutuda mitu bitti, võib tekkida lugemisviga.
Vale lugemit saab vältida järgmiselt:

- kasutatakse koodi, milles elementaarnihkel muutub ainult üks bitt (tavaliselt kasutatakse spetsiaalseid koode, nt Gray koodi)
- otsene kahend- või BCD-kood täiendava lugemisseadisega, mis võimaldab vältida mitmetähenduslikku lugemit üleminekutsoonis (kasutatakse kaherajalisi kontrollitult loetavaid koodikandjaid). Selle näiteks on nn U-kujuline salvestis.

3.6 Optilised andurid

3.6.1 Optilised asendiandurid

Sellise anduri lihtsustatud skeemi on kujutatud Joonis 3.38.



1 – laser, 2 – fotodioodid, 3 – tõke

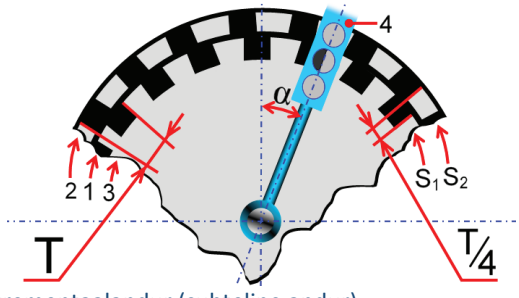
Joonis 3.38 Optiline asendiandur

Valgusallikana kasutatakse laserit. Laserikiir peegeldub tõkkelt, mis liigub koos objektiga, mille asendit määratakse. Asendist olenevalt satub peegeldunud kiir vastavatesse kiirgust vastuvõtvatesse fotodioodidesse.

3.6.2 Optilised inkrementaalandurid (suhtelised andurid)

Nendega saab määrata objekti nihkeid, aga ka pöörlemiskiirust. Selleks kasutatakse kahte või kolme rada, mille mask ei ole nii keeruline kui absoluutanduritel.

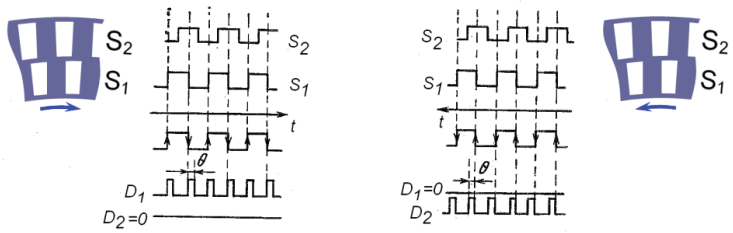
Kaks kontsentrilist (pöördanduril) või paralleelset rada (lineaaranduril) on jaotatud *N-ks* võrdseks elemendiks (sammuks), mis on vaheldumisi läbipaistmatud ja läbipaistvad. Ühel radadest on elemendid nihutatud teise raja suhtes veerandi sammu võrra (*T*/4). Mõnikord lisatakse kolmas rada (millel on ainult üks läbipaistev element), mis võimaldab pöörete loendamist ja loenduri nullimist (Joonis 3.39).



Joonis 3.39 Optiline inkrementaalandur (suhteline andur)

Iga rada loetakse optilise paariga: valgusallikas (valgusdiood) ja vastuvõtja (fototransistor), mis on paigutatud ketta vastaskülgedele.

Nihke suuna määramiseks kasutatakse elektroonikaahelat. See võimaldab alates raja 1 signaalidest S_1 tuvastada nende tõusvaid $\{\uparrow: (dS_1/dt) > 0\}$ või langevaid $\{\downarrow: (dS_1/dt) < 0\}$ fronte, mis sõltuvad raja 2 hetkeseisundist S_2 (0 või 1) (Joonis 3.40).



Joonis 3.40 Nihkesuuna määramiseks kasutatava elektroonikaahela ajadiagrammid

3.7 Püsimagnetandurid

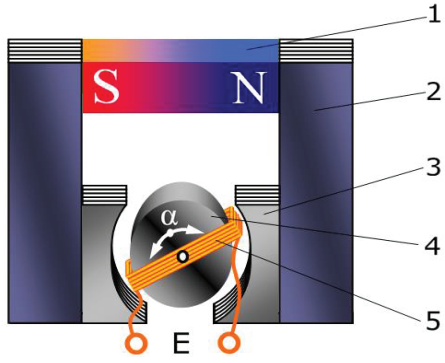
Nende andurite töö põhineb elektromagnetilise induktsiooni seadusel.
Need koosnevad püsimagnetist (vahel elektromagnetist) ja mähisest. Sisendsuuruse (lineaar- või nurknihke) muutus kutsub esile mähise aheldusvoo muutuse, mille tulemusena indutseeritakse mähises sisendsuuruse muutusega võrdeline elektromotoorjõud. Tegemist on generaatoritüüpi anduritega.

Püsimagnetandurite tüübid

- Püsimagneti ja väljundsuuruse poolt mõjutatava mähise vastastikuse asendi põhjal töötavad andurid. See tüüp on jaotatud kaheks alamtüübiks:
  - fikseeritud magneti ja liikuva mähisega
  - fikseeritud mähise ja liikuva magnetiga.
- Fikseeritud magneti ja mähisega andurid, kus sisendsuuruse alusel muutub kolmanda liikuva komponendi asend.

3.7.1 Liikuva mähisega püsimagnetandurid

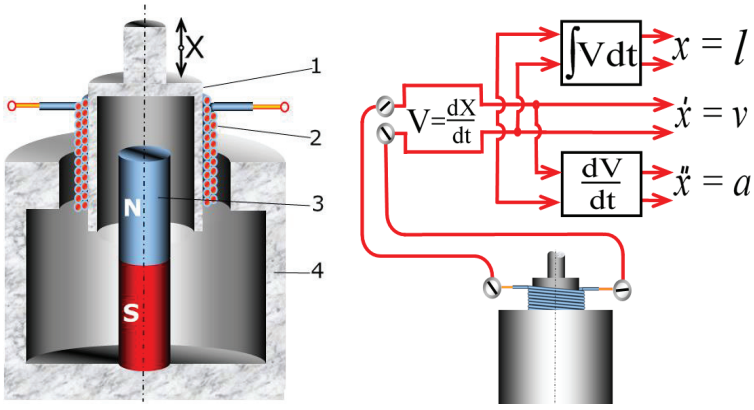
- Kasutatakse: *Nurknihke mõõtmiseks*



1 – püsimagnet, 2, 3, 4 – ferromagnetilised elemendid, 5 – sisendsuuruse mõjul pöörlev mähis

Joonis 3.41 Liikuva mähisega püsimagnetandur nurknihke mõõtmiseks

- Kasutatakse: *Lineaarnihke mõõtmiseks*



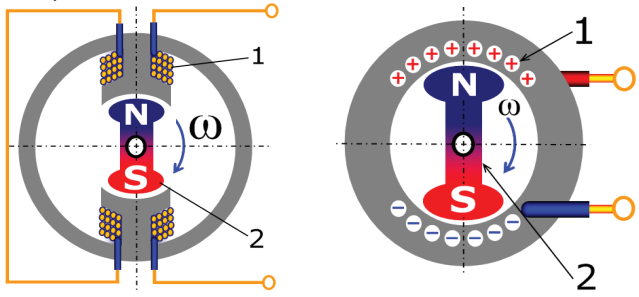
1 – mittemetalliline mähisekarkass, 2 – sisendsuuruse muutusega seotud liikuv mähis, 3 – püsimagnet, 4 – magnetsüdamik

Joonis 3.42 Liikuva mähisega püsimagnetandur lineaarnihke mõõtmiseks

Indutseeritud elektromotoorjõud on võrdeline kiirusega. Integreeriva või diferentseeriva anduri kasutamise korral võib väljundis saada signaali, mis on võrdeline vastavalt nihkega *X* või kiirendusega *a*.

3.7.2 Liikuva magnetiga püsimagnetandurid

Kasutatakse: *võlli pöörlemise nurkkiiruse mõõtmiseks*



1 – mähis, 2 – püsimagnet

Joonis 3.43 Liikuva magnetiga püsimagnetandurid

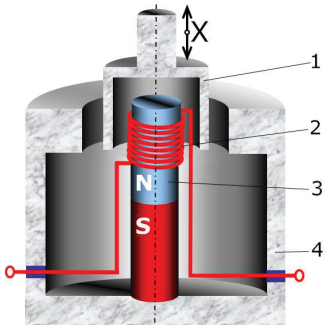
Sellisel juhul on indutseeritud elektromotoorjõud võrdeline nurkkiirusega.

3.7.3 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid

Nende andurite püsimagnet ja mähis on liikumatud.

- Kasutatakse: *Lineaarnihke mõõtmiseks* (Joonis 3.44)

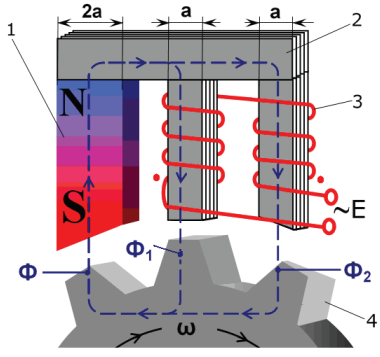
Magnetsüdamik on silindrilise kujuga. Silindrilise osa keskele (püsimagneti külge) on kinnitatud mähis. Magneti ja magnetsüdamiku vahelises pilus liigub ferromagnetiline element (ankur). Ankru liikumise korral muutub õhupilu magnetiline takistus, mis tekitab magnetvoo muutuse.



1 – liikuv ferromagnetiline element, 2 – mähis, 3 – püsimagnet, 4 – magnetsüdamik

Joonis 3.44 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid lineaarnihke mõõtmiseks

Kolmanda elemendi liikumist ära kasutavad andurid (teine tüüp).
Kasutatakse: *pöörlemiskiiruse mõõtmiseks* (Joonis 3.45)
Püsimagnetvoog Φ on sama, kuid see on kahe samba vahel erinevalt jaotatud olenevalt sellest, milline liikuva elemendi osa (hammas või hammaste vahekoht) vastava samba alla satub. Õhupilu magnettakistus magnetsüdamiku samba ja hammasratta vahel on minimaalne, kui samba all on hammas, ja maksimaalne, kui samba all on hammaste vahekoht. Ülejäänud juhtudel on takistuse väärtus maksimumi ja miinimumi vahel. Sellega muutub diferentsiaalselt ühendatud mähiseid läbiv magnetvoog Φ_1 ja Φ_2 ning indutseeritakse elektromotoorjõud, mis oleneb ketta pöörlemise nurkkiirusest.



1 – püsimagnet, 2 – magnetsüdamik, 3 – liikuv element (hammasratas), 4 – mähis

Joonis 3.45 Kolmanda elemendi liikumisel põhinevad püsimagnetandurid pöörlemiskiiruse mõõtmiseks

3.8 Teadmiste kontroll

Potentsiomeetrilised andurid (põhinevad) võivad olla:
a) fotoefektil.
b) mehhaaniliste liugkontaktidega.
c) venitusjõu andurid.
d) magnetilised.

2. Induktiivsed andurid võivad olla:
a) õhupilu muutuva pikkusega;
b) reostaadid;
c) õhupilu muutuva pindalaga;
d) diferentsiaalsed.

3. Lineaarmuutuvusega diferentsiaaltrafo (LVDT) on:
a) pieso-trafoga mõõtemuundur;
b) vastastikku induktiivne andur liikuva süsdamikuga;
c) magneto-anisotroopne andur.

4. Kui mõõtmisel kasutatakse mahtuvuslikke andureid siis mille väärtus võib muutuda?
a) elektroodide vaheline kaugus;
b) selle keskkonna optilised parameetrid millesse on elektroodid paigutatud;
c) elektroodide vahelise keskkonna dielektriline läbitavus;
d) elektroodide pindala.

5. Kodeerimisseadmed (kooderid) võivad olla:
a) mahtuvuslikud;
b) absoluutse juurdekasvuga;
c) vastastikku induktiivsed;
d) (suhtelise) juurdekasvuga.

6. Induktiivandurid on:
a) statsionaarse magnetiga ja liikuva mähisega (pooliga);
b) liikuvate elektroodidega;
c) statsionaarse magnetiga ja mähisega ja liikuva kolmanda elemendiga;
d) statsionaarsete elementidega;
e) statsionaarse mähisega ja liikuva magnetiga.

4 JÕU-, TENSO- JA PUUTEANDURID

4.1 Tensoandurid

Tensoandurid on elektrijuht- või pooljuhtmuundurid. Nende töö põhineb venitusefektil. Venitusefekt on anduri aktiivtakistuse muutus anduri geomeetrilise kuju ja takistuse muutuse tõttu elastsel mehaanilisel deformatsioonil. Sel viisil saadud muutust iseloomustavad suhteliselt väikesed väärtused. Venitusefekti kvantitatiivseks iseloomustamiseks kasutatakse suhtelist venitustundlikkuse tegurit *k*, mis arvutatakse valemiga

$$k = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l} = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \tag{4.1}$$

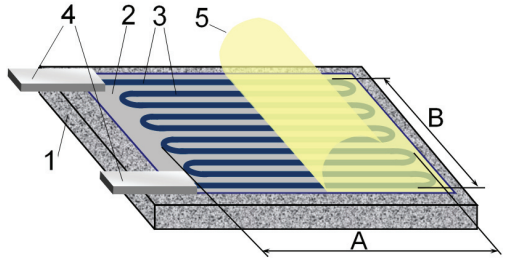
kus $\varepsilon_R = \Delta R/R$ on tensoanduri takistuse suhteline muutus ja $\varepsilon_l = \Delta l/l$ on anduri pikkuse suhteline muutus. Suurel osal voolujuht-tensoanduritel on *k* vahemikus 1,9–2,5.

Tensoandurid jaotatakse järgmiselt:

- voolujuht-tensoandurid
- foolium-tensoandurid
- pooljuht-tensoandurid.

4.1.1 Voolujuht-tensoandurid

Joonis 4.1 on kujutatud kõige tavalisema tensoanduri lihtsustatud konstruktsiooni.
Voolujuhtidena kasutatakse sulameid (manganiini, konstantaani jne), sest neil on väike takistuse temperatuuritegur (TCR) ja suur takistus.
Voolujuhi lõigupikkust *A* nimetatakse baasiks ja *B* on anduri laius.
Tensoandur liimitakse selle objekti külge, mille deformatsiooni tuleb mõõta. Anduri pikkus peab olema objekti mehaanilise pinge sihis.



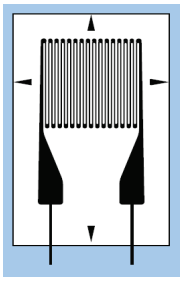
1 – uuritav objekt, 2 – baas (õhuke isoleeriv paber või plastplaat, tavaliselt tugev pärgamiin või lakk, Δ = 40–50 μm), 3 – voolujuht (d = 0,01–0,03 mm), 4 – tinatatud vaskjuhi klemmid (d = 0,1–0,3 mm), 5 – kondensaatoripaberist või lakist kattekiht (Δ = 10–15 μm)

Joonis 4.1 Voolujuht-tensoandur

Seda tüüpi tensoandurite puudus on nende suur tundlikkus ristisuunas. Voolujuht-tensoandurite piki- ja ristisuunalise tundlikkuse suhe arvutatakse valemiga *B*/*A*. Selle puuduse saab suures osas kõrvaldada ristisuunas paiknevatesse piirkondadesse paigutatud vasksildadega.

4.1.2 Foolium-tensoandurid

Foolium-tensoandureid kasutatakse praktikas laialdaselt (Joonis 4.2).



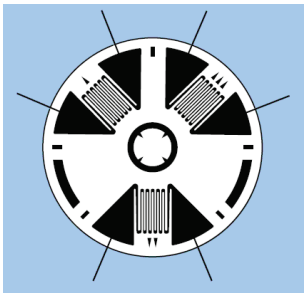
Joonis 4.2 Foolium-tensoandur

Neid valmistatakse fotokeemiliste meetoditega. Foolium kaetakse valgustundliku kihiga ja sellele fotografeeritakse anduri kuju. Nende eeliseks on voolujuhi suurem laius ristisuunas paiknevates piirkondades, mis vähendab nende piirkondade takistust ja seega ka tundlikkust ristisuunas.

4.1.3 Pooljuht-tensoandurid

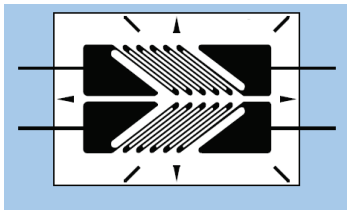
Pooljuht-tensoandureid valmistatakse foolium-tensoanduritega samal meetodil. Nende rakendusala on laiendatud germaaniumist, ränist, galliumarseniidist jne pooljuhtide kasutamisega. Nende venitustundlikkus väga väikese baasi (2,5 mm) korral on tavaliselt 50–60 korda suurem kui metallist tensoanduritel. Nende venitustundlikkuse tegur oleneb tugevasti temperatuurist ja tunnusjoon $\varepsilon_R = f(\varepsilon_l)$ on mittelineaarne.

Foolium- või pooljuht-tensoandurite alusel valmistatakse tensoandurite erinevaid konfiguratsioone ja kombinatsioone.

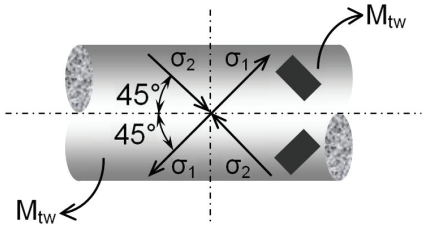


Joonis 4.3 Keeruliste mehaaniliste pingete määramiseks kasutatav kolmest tensoandurist koosnev rosett

Joonis 4.3 on kujutatud keeruliste mehaaniliste pingete määramiseks kasutatav kolmest tensoandurist koosnevat andurit.
Joonis 4.4 on kujutatud teineteise suhtes 90° nurga all paiknevast kahest tensoandurist koosnevat muundurit. Neid kasutatakse peamiselt seadmete pöördvõllide mehaaniliste pingete määramiseks (Joonis 4.5).

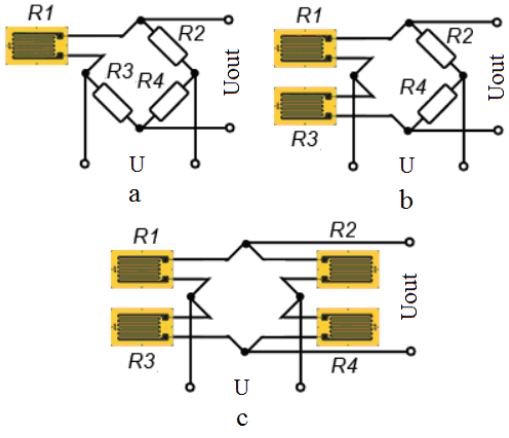


Joonis 4.4 Teineteise suhtes 90° nurga all paiknevast kahest tensoandurist koosnev rosett



Joonis 4.5 Tensoanduritest koosneva roseti kasutamine seadmete pöörlevate võllide pinnal mehaaniliste pingete määramiseks

Kõige sagedamini kasutatakse tensoandureid sillatüüpi mõõteskeemides. Silla harudega saab ühendada ühe, kaks või neli tööandurit (Joonis 4.6).
Nende ühendusvõimaluste alusel saab tensoandureid konstrueerida ühe-, kahe- või neljakaupa ühele plaadile. Neil juhtudel võivad need töötada üksiku tensoandurina (veerandsillana), poolsillana või täissillana.

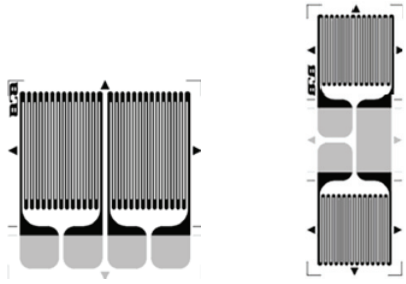


Joonis 4.6 Sillatüüpi tensoandurite ühendusskeemid: a) veerandsild, b) poolsild, c) täissild

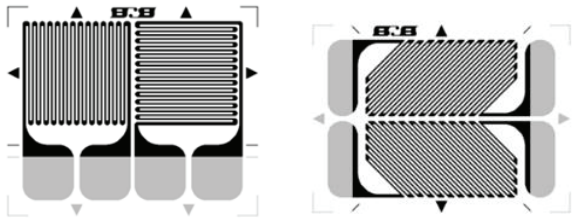
Kaksik-tensoandurite või poolsild-tensoandurite korral paiknevad kaks tensoandurit teineteise kõrval ja neid saab paigutada mitme põhiskeemi järgi (Joonis 4.7):

- lineaarselt ja paralleelselt

- lineaarselt ja ristі – elemendid on suunatud piki X- ja Y-telge
- kaldu ja risti (lõikuvad) – elemendid on X- ja Y-telje suhtes 45° ning üksteise suhtes 90° nurga all.



a

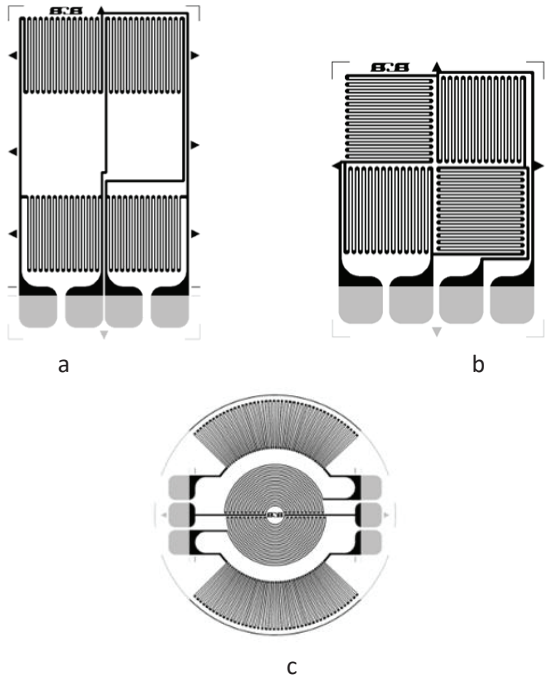


b c

Joonis 4.7 Kaksik-tensoandurite ja poolsild-tensoandurite rosetid: a) lineaarsed ja paralleelsed, b) lineaarne ja risti, c) kaldu ja risti

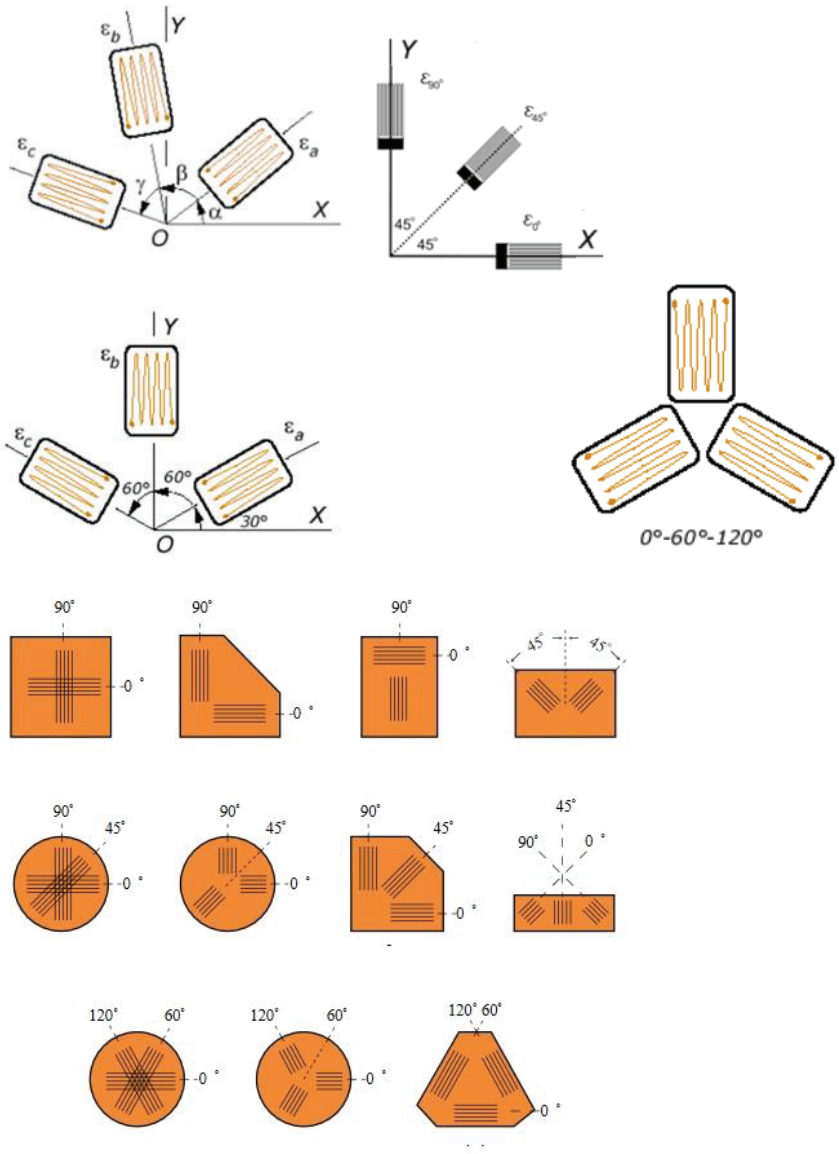
Tensoandurite täissilla korral (Joonis 4.8) kasutatakse nelja tensoandurit, mille elemente saab paigutada mitme põhiskeemi järgi:

- lineaarselt ja paralleelselt
- lineaarselt ja risti
- radiaalselt ja ringikujuliselt.



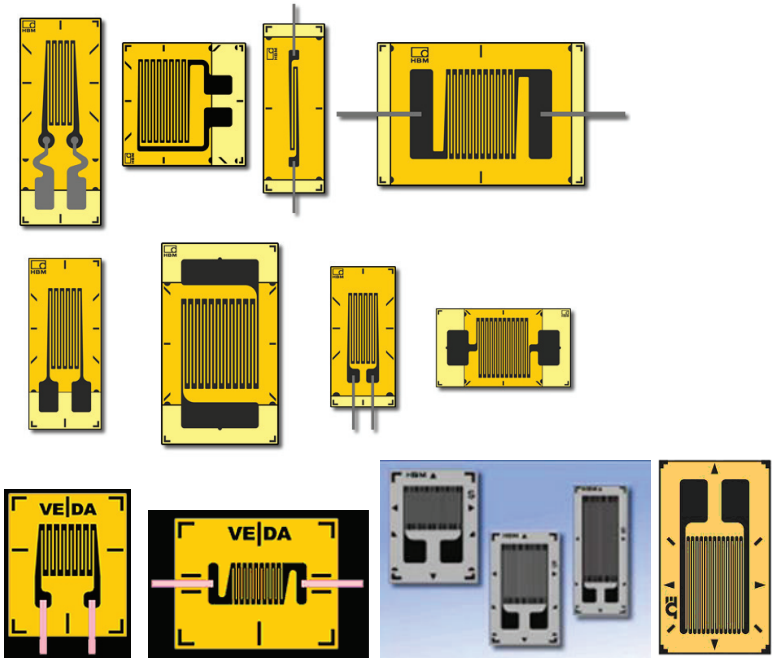
Joonis 4.8 Täissild-tensoandurite rosetid: a) lineaarne ja paralleelne, b) lineaarne ja risti, c) radiaalne ja ringikujuline

Keeruliste mehaaniliste pingete ja momentide mõõtmiseks on saadaval üksteise suhtes 45°, 60°, 90°, 120° või 135° nurga all või mitmes kihis paiknevate elementidega tensoandurite rosetid (Joonis 4.9).



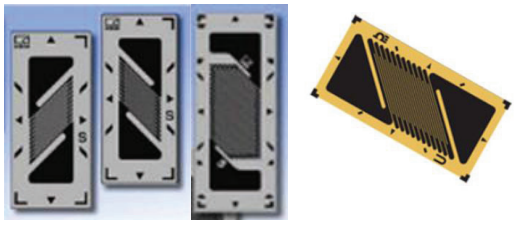
Joonis 4.9 Mitmesuguste nurkade alla paiknevate elementidega tensoandurite rosetid

Mitmesugust liiki, suuruse ja rakendusalaga tensoandureid ning tensoandurite rosette valmistavad mitmed ettevõtted.
Joonis 4.10 on kujutatud mitmesuguseid LY-tensoandureid, mis suudavad mõõta ühe-suunalisi mehaanilisi pingeid.



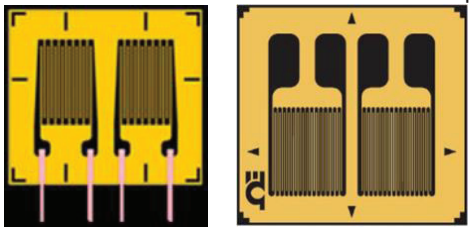
Joonis 4.10 Lineaarsed LY-tensoandurid

Joonis 4.11 on kujutatud ühelõikelise deformatsiooni üksikandureid S.



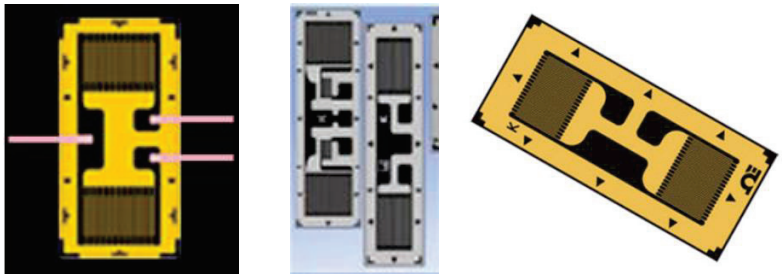
Joonis 4.11 Ühelõikelise deformatsiooni üksikandurid S

DY-tensoanduritel (Joonis 4.12) on kaks paralleelset paiknevat mõõteelementi. Neid tensoandureid kasutatakse tavaliselt talade painde mõõtmiseks.



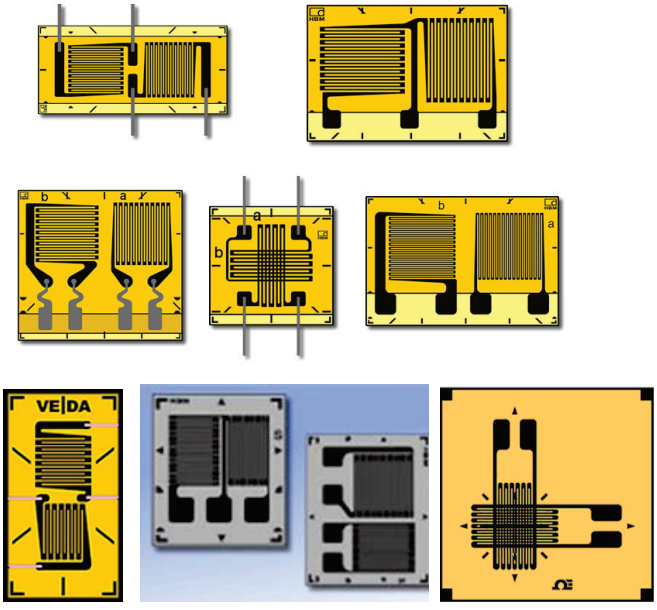
Joonis 4.12 DY-tensoandurid

Joonis 4.13 on kujutatud kahest paralleelse tensoanduriga poolsillast koosnevat rosetti.



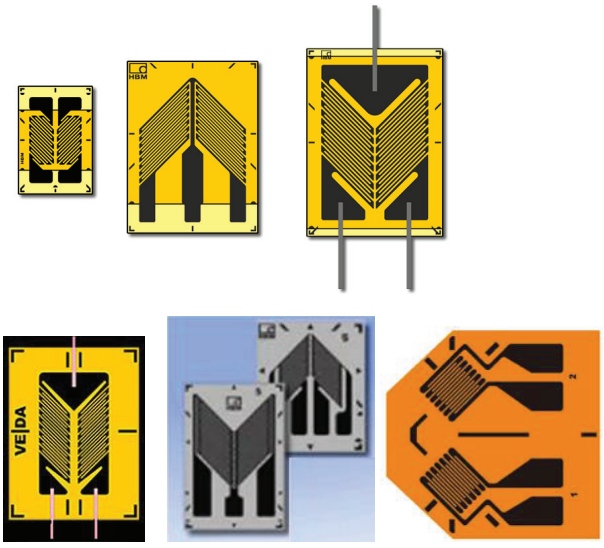
Joonis 4.13 Tensoandurite rosetid: poolsild kahe paralleelse tensoanduriga

Joonis 4.14 on kujutatud lineaarselt ja risti paiknevaid XY-tensoandurite rosette (T-tüüpi rosette), mille kaks mõõteelementi on teineteise suhtes 90° nurga all ja mis mõõdavad X- ja Y-suunalisi mehaanilisi pingeid.



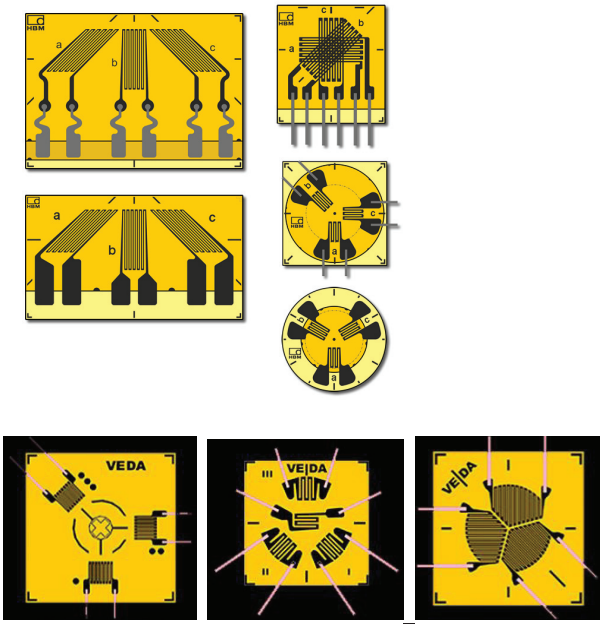
Joonis 4.14 XY-tensoandurite rosetid (T-tüüpi rosetid)

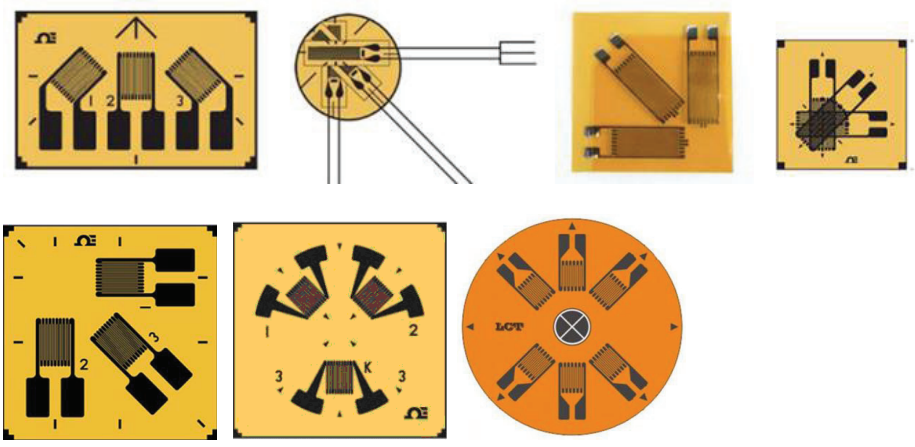
Joonis 4.15 on kujutatud tensoandurite kaksikrosette mehaanilise väände/nihkedeformatsiooni mõõtmiseks. Kaks mõõteelementi on X- ja Y-telje suhtes 45 nurga all (kahelõikelised) ja moodustavad niinimetatud V-kujulise tensoandurite roseti.



Joonis 4.15 V-tüüpi tensoandurite rosetid, mille elemendid on 45° nurga all

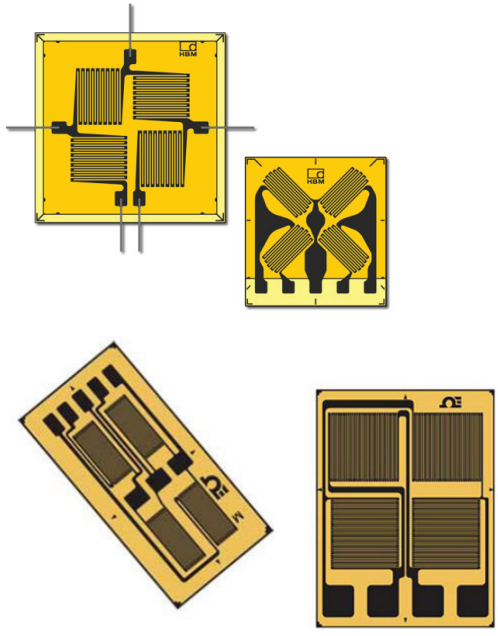
Neid tensoandureid kasutatakse tavaliselt mõõtmisteks väändevarrastel ja nihkeelementides neutraalsete kiudude alas tekkivate nihkejõudude mõõtmiseks.
Joonis 4.16 on kujutatud RY-tensoandurite rosette, mille kolm mõõteelementi paiknevad 0°/45°/90° nurga all (tüübid RY1, RY3, RY8, RY9, RY10) või 0°/60°/120° nurga all (tüübid RY4, RY7).

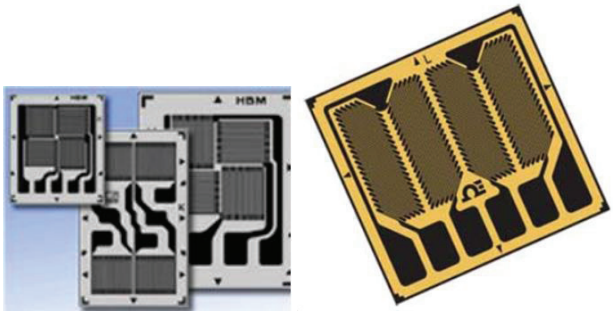




Joonis 4.16 RY-tensoandurite rosetid

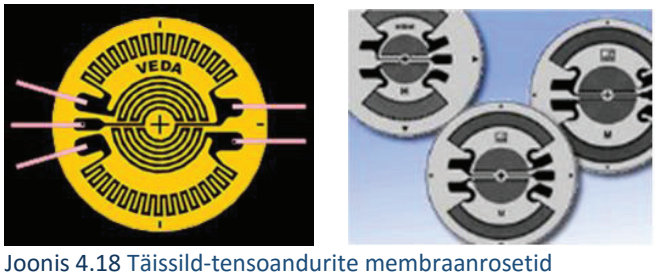
Need tensoandurid sobivad tasandpingsuse analüüsimiseks, kui mõju põhisuund ei ole teada.
Täissild-tensoandurite rosetid on esitatud Joonis 4.17.





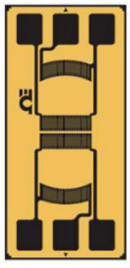
Joonis 4.17 Täissild-tensoandurite rosetid

Täissild-tensoandurite neli mõõteelementi võimaldavad teha tõmbe-/survevarraste ja väändevarraste mõõtmisi ja määrata nihkeelementides tekkivaid nihkepingeid.
Täissild-tensoandurite membraanrosetid on esitatud Joonis 4.18.



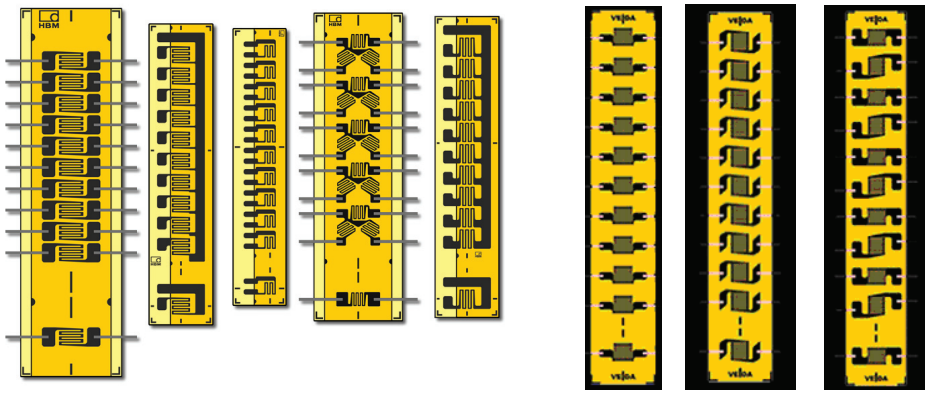
Joonis 4.18 Täissild-tensoandurite membraanrosetid

Lineaarsete täissild-tensoandurite rosettidega membraani on kujutatud Joonis 4.19.



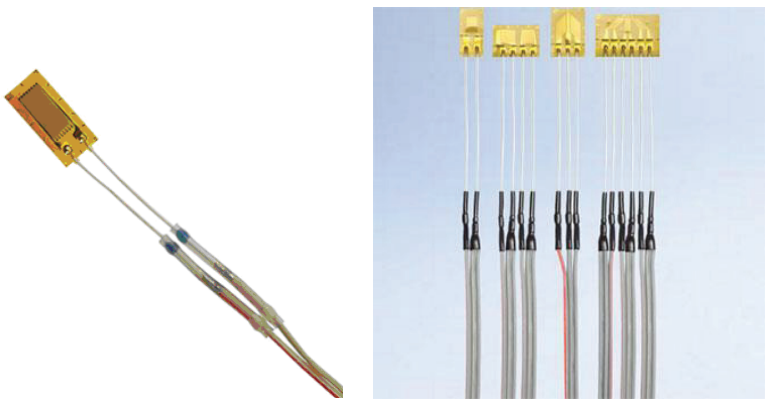
Joonis 4.19 Lineaarsete täissild-tensoandurite rosettidega membraan

Saadaval on ka mehaanilise pinge gradientide määramiseks ette nähtud KY-tensoandurite ahelad (Joonis 4.20).



Joonis 4.20 KY-tensoandurite ahelad

KY-tensoandurites on 10 või 15 väga väikest mõõteelementi, mis võrdse vahekaugusega paiknevad ühisel kanduril. Peale selle on üks kompenseeriv tensoandur. Tensoandurite ahelad sobivad eriti hästi pinge gradientide määramiseks.
Tootjad pakuvad ka valmisühendustega tensoandureid, mis lihtsustavad nende praktilist kasutamist (Joonis 4.21).

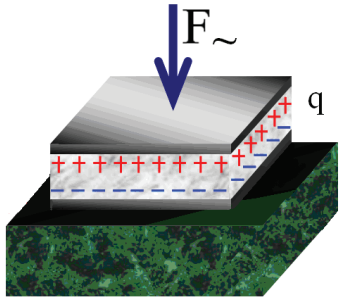


Joonis 4.21 Valmisühendustega tensoandurid

4.2 Piesoandurid

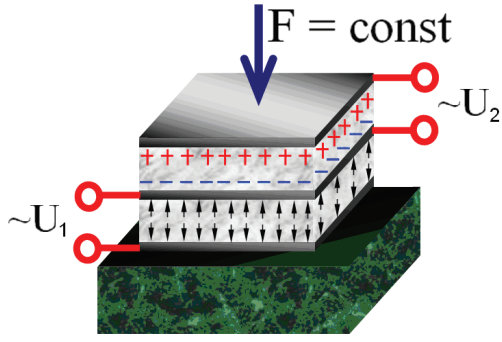
Nende andurite töö põhineb mõnes dielektrilises materjalis esineval piesoelektrilisel efektil. Kui sellise materjali kristallist lõigatud plaati mehaaniliselt koormata, siis see polariseerub ja selle pinnale tekivad rakendatud jõuga võrdelised elektrilaengud. Koormuse eemaldamise korral polariseerumine ja laeng kaovad. Seda nähtust nimetatakse otseseks piesoelektriliseks efektiks.
Sellise plaadi paigutamisel elektrivälja tekib selles mehaaniline pinge või muutuvad selle geomeetrilised mõõtmed. Seda nähtust nimetatakse kaudseks piesoelektriliseks efektiks.

Laialdaselt kasutatava piesoelektriku tüüpiline näide on moonutusteta kristallvõrega kvarts. Piesoelektrikutena kasutatakse ka Seignette'i soola (kaaliumnaatriumtartraati) ja keraamilisi materjale (kunstlikult polariseeritud baariumtitanaati, pliitsirkonaattitanaati jne).
Piesoandurid on generaatori tüüpi: elektrilaengud tekivad välise jõu mõjul.
Joonis 4.22 on kujutatud ristkülikukujulist piesoelektrilist plaati, millele mõjub dünaamiline jõud *F*. Sellele jõu rakendamise korral tekivad piesoanduris mehaanilised pinged ja anduri seintel tekib elektrilaeng *q*.



Joonis 4.22 Piesoandur

Piesoandureid kasutatakse dünaamiliste jõudude mõõtmiseks. Nende minimaalsed talitlussagedused on tavaliselt 1–0,5 Hz.
Kui piesoandurile mõjub staatiline jõud, jäävad tekkinud laeng ja pinge samaks ainult siis, kui mõõteahelal on lõpmatult suur sisendtakistus, mis praktikas ei ole võimalik. Seetõttu kasutatakse staatiliste jõudude mõõtmiseks nn piesotrafosid (Joonis 4.23).



Joonis 4.23 Piesotrafo

Kaks piesoandurit paigutatakse üksteise peale. Neist alumisele rakendatakse vahelduvpinge U_1. Piesoelektrilise pöördefekti mõjul hakkavad alumise kristalli geomeetrilised mõõtmed sageduse taktis muutuma, st tekivad lainetused ja see muutub emitteriks. Need lainetused mõjutavad staatilise jõuga koormatud ülemist tajurit ja selle seintele tekivad otsese piesoefekti mõjul elektrilaengud. Väljundelektroodide potentsiaalide vahe U_2 on võrdeline

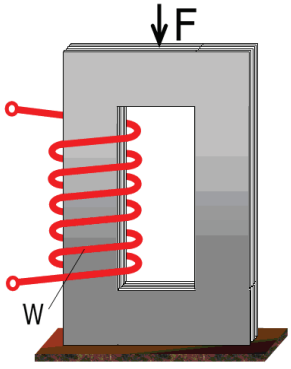
rakendatud jõuga. Viimast saab määrata kas U_2 väärtuse või U_1 ja U_2 faasinihke põhjal. Praktikas valmistatakse piesotrafod kolme elektroodiga muundurina.

4.3 Magnetoelastsed andurid

Magnetoelastsed andurid põhinevad magnetoelastsel efektil, mis avaldub ferromagnetiliste materjalide magnetilise läbitavuse muutuses välistest jõududest põhjustatud mehaaniliste pingete toimel.
On olemas ka vastupidine nähtus, mida nimetatakse magnetostriktiivseks efektiks. See avaldub magnetvälja paigutatud ferromagnetiliste materjalide geomeetriliste mõõtmete muutuses.
Magnetoelastse efekti abil saab mõõta jõude, mehaanilisi pingeid ja momente.

4.3.1 Magnetoelastsed induktiivandurid

Magnetoelastne induktiivandur on esitatud Joonis 4.24.

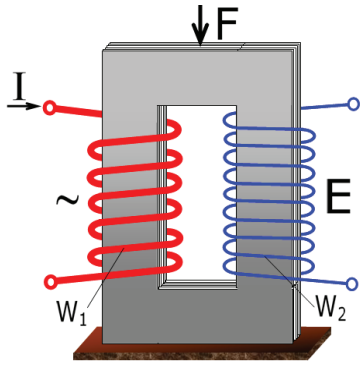


Joonis 4.24 Magnetoelastsed induktiivandurid

Magnetsüdamikule jõu *F* rakendamise korral tekivad selles mehaanilised deformatsioonid ja pinged σ, mille tulemusel muutub magnetiline läbitavus μ ja magnettakistus R_μ. Väärtuse R_μ muutumise korral muutub ka pooli induktiivsus *L*, mis tekitab näivtakistuse *z muutuse.*

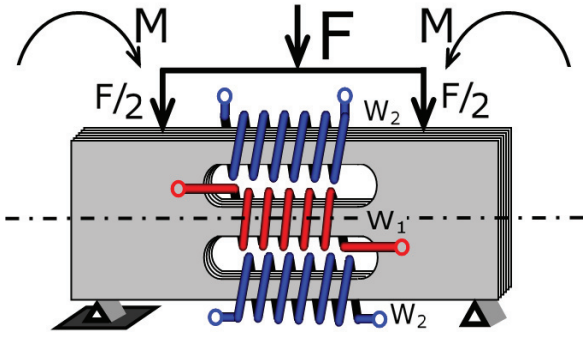
4.3.2 Vastastikku induktiivsed magnetoelastsed andurid

Iga magnetoelastse induktiivanduri saab muuta vastastikku induktiivseks anduriks (trafoks). Selleks mähitakse magnetsüdamiku ümber mõõtepool (Joonis 4.25).



Joonis 4.25 Vastastikku induktiivsed magnetoelastsed andurid

Need andurid võivad olla nii üksik- kui ka diferentsiaalandurid. Joonis 4.26 on kujutatud painduva magnetahelaga magnetoelastset trafo-diferentsiaalandurit.

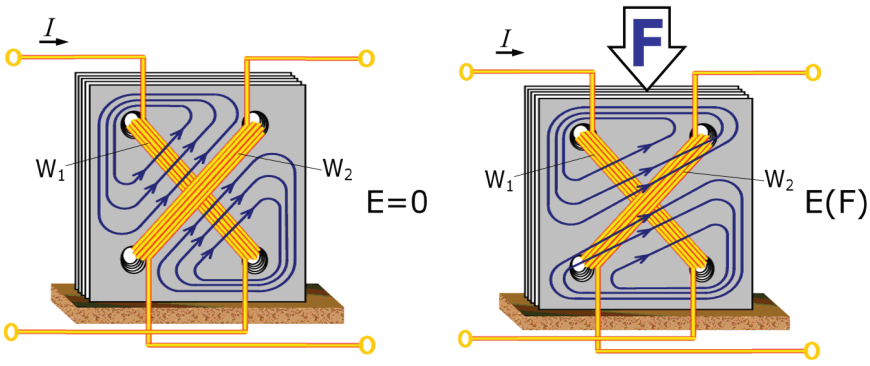


Joonis 4.26 Painduva magnetahelaga magnetoelastne trafo-diferentsiaalandur

Ferromagnetilisest materjalist varras on paigutatud kahele toele. Keskmisel sambal paikneb ergutusmähis W_1 ning mõõtepooli kaks sektsiooni $W_2^{'}$ ja $W_2^{''}$ on paigutatud kahele teisele sambale.

4.3.3 Magnetoanisotroopsed andurid

Niinimetatud magnetoanisotroopsed andurid kuuluvad magnetoelastsete andurite hulka. Need põhinevad ferromagnetiliste materjalide magnetilisel anisotroopial, kui neis tekivad välistest jõududest põhjustatud mehaanilised pinged.



a b

Joonis 4.27 Magnetoanisotroopne andur

Magnetiline anisotroopia on materjalide magnetilise läbitavuse erinevus erinevates geomeetrilistes piirkondades. Andurit on kujutatud Joonis 4.27 ja see on trafo tüüpi.
Magnetsüdamik on valmistatud lehtmaterjalist. Sellesse on puuritud neli ava, mis paiknevad ruudu tipunurkades. Ergutusmähis W_1 ja mõõtemähis W_2 paiknevad teineteise suhtes täisnurga all, mis väldib nende omavahelist induktiivset mõju.
Kui mõõtemuundur on koormamata (F = 0, Joonis 4.27a), siis ei esine materjalis magnetilist anisotroopiat. Ergutusmähise tekitatud magnetvoog kulgeb piki jooni, mis ei lõiku mõõtemähisega W_2. Seetõttu ei teki selles elektromotoorjõudu.
Jõu F rakendamise korral (Joonis 4.27b) tekivad magnetsüdamikus mehaanilised pinged (näites on esitatud survejõud). Materjalis tekib magnetiline anisotroopia. Positiivse magnetostriktsiooni korral väheneb magnetiline läbitavus rakendatud jõuga paralleelses suunas, kuid suureneb jõuga ristiolevas suunas. See põhjustab magnetvälja jõujoonte moondumise. Osa nendest jõujoontest ümbritsevad mõõtemähist ja elektromotoorjõudu.

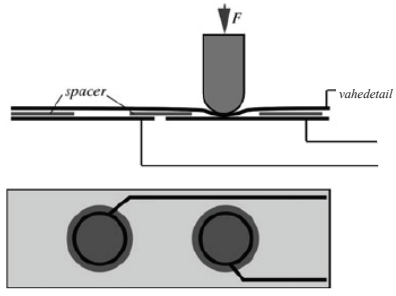
4.4 Taktiilandurid

Taktiilandurid on ette nähtud väliste objektidega otsepuute tuvastamiseks. Need täidavad sama ülesannet, kui elusorganismide meeleelundid. Robotitehnoloogias kasutatakse neid tööstusrobotite, manipulaatorite ja liikurrobotite tööorganitele tundlikuks muutmiseks. Need tuvastavad roboti töövahendi ja eseme kokkupuute, teevad kindlaks, millises suunas ja millise kiirusega libiseb ese haardepinnal, ning määravad survejõu. Eseme haaramisel mõõdetava vastastikmõju iseloomu järgi jaotatakse puuteandurid kolme rühma: puuteandurid, kontaktjõuandurid ja libisemisandurid. Taktiilandurisüsteeme kasutatakse ka eseme kuju kindlakstegemiseks selle puudutamise ja piirjoonte kindlaksmääramise abil.
Puute- ja kontaktjõuandurid on ette nähtud sama füüsikalise suuruse, st töötamisel mõjuva jõu mõõtmiseks. Need erinevad selle poolest, et esimestel on rakendumise läviväärtus. Sisuliselt on need releena toimivad jõuandurid, mis rakenduvad mõõdetava parameetri ettenähtud väärtusel. Haardes libisemise andureid läheb vaja eseme hoidmiseks sellise jõuga, et ta püsiks kindlalt, kuid ei läheks katki.

Taktiilandurid võivad olla üksikandurid, maatriksandurid (võtavad enda alla kindla pinna), analoogandurid ja diskreetandurid. Maatriks-taktiilanduritesse on sisse ehitatud mikrokontroller, kus töödeldakse tajuritelt saadud infot ja moodustatakse eseme kahendkoodis taktiilkujutis.
Taktiilandurid peavad olema väga töökindlad, vastupidavad, kulumis-, tolmu- ja niiskuskindlad ning taluma väga hästi mehaanilist ja termilist ülekoormust.
Taktiilandurite tüübid on järgmised.

- ***Taktiil-kontaktandurid***

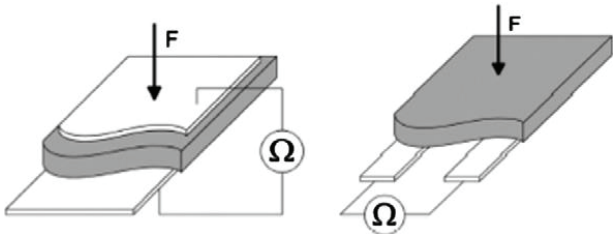
Joonis 4.28 on näidatud sisse-/väljalülitavat taktiilandurit. See koosneb kahest fooliumlehest ja isoleerivast vahedetailist. Vahedetaili on tehtud ümmargused avad. Kui vahedetaili ava kohal olevale fooliumlehele mõjub ülalt jõud, siis see paindub ja puutub vastu alumist fooliumit. Tekib elektrisignaal, mis näitab jõu mõjumist. Seda tüüpi tajuritest saab valmistada maatriksanduri.



Joonis 4.28 Membraantüüpi taktiiltajur

- ***Takistusandurid***

Seda tüüpi andurite töö põhineb voolujuhtiva elastomeeri kahe punkti vahelise takistuse mõõtmisel. Enamik andureid kasutavad elastomeerina grafiidilisandiga kummit. Jõu rakendamise korral muutub deformatsiooni tulemusel voolujuhtivate osakeste tihedus ja seega ka takistus (Joonis 4.29).



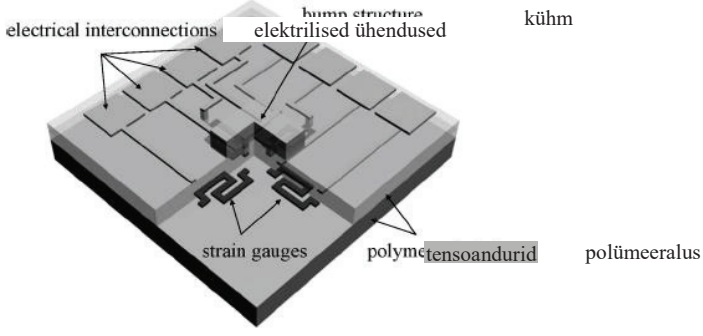
Joonis 4.29 Takistuslikku tüüpi taktiilandur

Kuigi need on lihtsa konstruktsiooniga, on seda tüüpi taktiilanduritel mitmeid puudusi. Pikaajalise kasutamise korral deformeerub elastomeer püsivalt. Seetõttu tuleb andur pärast kindlat kasutusaega välja vahetada. Peale selle iseloomustab andurit märkimisväärne hüsterees ja aeglus. Nendele puudustele vaatamata on enamikus tööstuslikes analoog-taktiil-

andurites kasutusel just see põhimõte. See on tingitud nende lihtsast konstruktsioonist ja roboti haaratsiga ühendamise lihtsusest.
Üldjuhul iseloomustab takistusandureid suur tundlikkus. Nende lihtne tööpõhimõte võimaldab neid ühendada lihtsate elektroonikaahelatega. Tavaliselt kasutatakse takistuse muutuse väljundpingeks muundamise jaoks Wheatstone'i silda.

- ***Tensoanduritega takistusandurid***

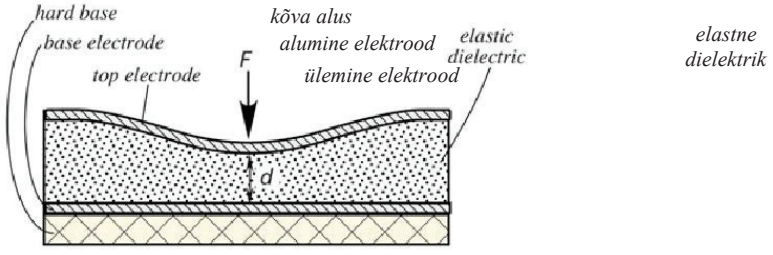
See taktiilandur kasutab tajuritena tensoandureid. Joonis 4.30 on kujutatud tensoanduritega takistusanduri skeemi.
Tensoandurid on paigutatud polümeermaterjali sisse. Need on moodustatud õhukestest metallikihtidest. Nii polümeermaterjal kui ka metallikihid võimaldavad anduril painduda. Anduri ülemisele pinnale tekitatakse niinimetatud kühm, mis lihtsustab koormuse jaotumist. Andurile välise jõu rakendamise korral polümeer ja õhukesed metallikihid deformeeruvad. Tekivad mehaanilised pinged ja tensoandurite elektritakistus muutub.



Joonis 4.30 Tensoanduritest tajuritega takistusanduri skeem

- ***Mahtuvuslikud taktiilandurid***

Mahtuvuslikes taktiilandurites on kaks eraldi paiknevatest metallplaatidest moodustatud elektroodi. Voolujuhtivad plaadid on eraldatud elastomeerse dielektrikuga. Jõu rakendamise korral muutub kondensaatori elektroodide vaheline kaugus, mille tulemusel muutub ka selle mahtuvus. Joonis 4.31 on kujutatud mahtuvusliku taktiilanduri konstruktsiooni.

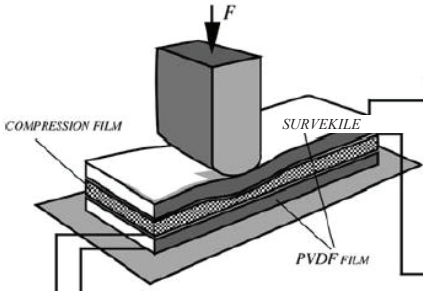


Joonis 4.31 Mahtuvuslik taktiilandur

Et mahtuvuslikud andurid võivad olla väga väikeste mõõtmetega, saab neid kasutada taktiil-maatriksite valmistamiseks.

- ***Piesoelektrilised taktiilandurid***

Piesoelektriliste omadustega polümeersed materjalid sobivad taktiilandurite tajurite valmistamiseks. Häid taktiilandureid saab valmistada polüvinülideenfluoriidil (PVDF) põhinevatest piesoelektrilistest kihtidest. Et seda materjali saab lihtsasti valmistada eri paksusega õhukeste kihtidena ja see on heade mehaaniliste omadustega, saab seda kasutada tehisnaha tootmiseks. Joonis 4.32 on kujutatud PVDF-i kihtidest moodustatud piesoelektrilise taktiilanduri konstruktsiooni.

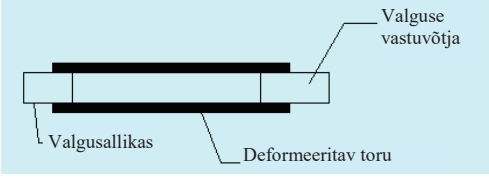


Joonis 4.32 Piesoelektriline taktiilandur

Andur koosneb kolmest kihist: PVDF-ist koosnev ülemine ja alumine kiht ning vahekiht, mis on ette nähtud kahe kihi akustiliseks sidumiseks. Vahekihi kõvadus määrab anduri tundlikkuse ja tööulatuse. Saadakse piesoelektriline trafo. Alumine piesoelektriline kiht on ühendatud generaatoriga, mille signaal tekitab kihis mehaanilise võnkumise. Need võnked kanduvad vahekihi kaudu PVDF-ist valmistatud ülemisse kihti. Mehaanilise võnkumise tulemusena tekib ülemises PVDF-kihis elektripinge. Jõu F mõjumisel ülemisele kihile muutub selle kihi väljundpinge amplituud ja faas. Neid muutusi töötleb ülemise kihiga ühendatud elektroonikaahel. Selle taktiilanduri eelised on lihtsus ja võime tuvastada staatilist jõudu.

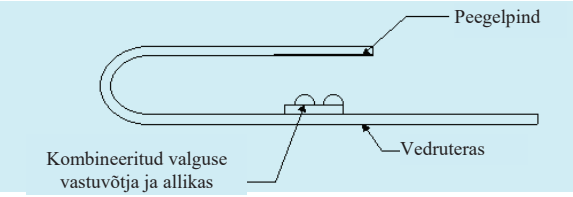
- ***Optilised taktiilandurid***

Optilised taktiilandurid on välja töötatud mitmesuguste optiliste tehnoloogiate abil. Üsna sageli kasutatakse valguse intensiivsuse moduleerimist (Joonis 4.33). Neid andureid iseloomustab suur tundlikkus. Need on valmistatud deformeeritavast torust.



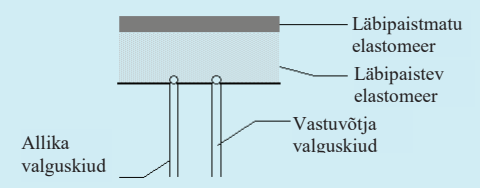
Joonis 4.33 Valgusmodulatsiooniga optilised taktiilandurid

Joonis 4.34 kujutatud anduri (peegeldusandur) tööpõhimõte kasutab valguse peegeldumist. Muudetakse reflektori ning valgusallika ja detektori tasandi vahelist kaugust. Peegeldunud valguse intensiivsus oleneb kaugusest ja seega ka rakendatud jõust. Andur on valmistatud vedruterasest ja on kompaktse konstruktsiooniga.



Joonis 4.34 Valgust peegeldavad optilised taktiilandurid

Peegeldusandureid saab konstrueerida nii, et jäika elastomeersesse struktuuri paigutatakse valgusallikasse/vastuvõtjasse viivate valguskiudude paar. Nagu on näha Joonis 4.35, paiknevad valguskiudude otsad läbipaistvas elastomeeris, mis on kaetud peegeldava silikoonkummikihiga. Vastuvõtjasse peegelduva valguse hulk on määratud rakendatud jõuga, mis muudab läbipaistva elastomeeri paksust. Valgusallika/vastuvõtja paaride abil saab tekitada objekti taktiilkujutise.



Joonis 4.35 Peegeldav optiline taktiilandur

4.5 Teadmiste kontroll

1. Elastse keha mehhaanilise deformatsiooniga (venitusefektiga) kaasneva geomeetriliste mõõtude muutuse ajal muutub ka mõõtemuunduri:
a) väljundpinge väärtus;
b) takistus;
c) termo-elektromotoorjõud (termo e.m.j.);
d) väljundmahtuvus.

2. Tensoandur võib olla tehtud:
a) kilest;
b) vasest;
c) pooljuhist;
d) metallniidist;
e) plaatinast.

3. Tensoandureid kasutatakse järgmiste (keha) omaduste mõõtmiseks:
a) mõjuvad jõud;
b) temperatuur;
c) mehhaanilised pinged;
d) elektripinged.

4. Piesoelektrilisi andureid kasutatakse järgmiste suuruste mõõtmiseks:
a) staatilised jõud;
b) dünaamilised jõud;
c) valgusvoog;
d) temperatuur.

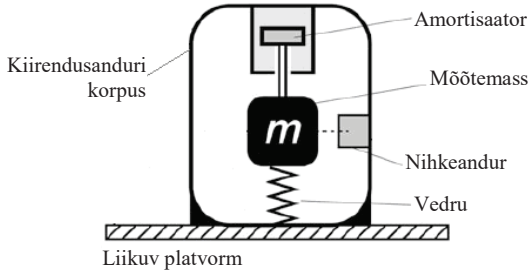
5. Magnetoelastsed andurid võivad olla:
a) vastastikku induktiivset tüüpi;
b) magnetoanisotroopsed;
c) mahtuvuslikku tüüpi;
d) induktiivset tüüpi;
e) piesotransformaatorid.

6. Objektide vastastikust mõju iseloomustavate parameetrite (väärtuste) mõõtmiseks sobivaid taktiilandureid (puuteandureid) võib nendele omaste iseloomulike (omaduste) tõttu liigitada:
a) rõhu andurid ja kiiruse andurid;
b) nivoo andurid, rõhu andurid ja kiirenduse andurid;
c) puute andurid, kontaktjõu andurid ja libisemise andurid;
d) kiiruse andurid, kiirenduse andurid ja rõhu andurid.

5 INERTSIAALANDURID

5.1 Kiirendusandurid

Kiirendusandur on objektide kiirendust mõõtev andur. Sellega saab mõõta kiirendust ühel, kahel või kolmel teljel. Üheteljeline kiirendusandur on ühe vabadusastmega seade, milles on spetsiaalne inertsiaalelement massiga *m* (mille liikumine jääb maha kiirendusanduri korpuse liikumisest), elastne tugisüsteem (vedru) ja amortisaator. Kiirendusanduri korpus on kinnitatud liikuvale platvormile (Joonis 5.1).

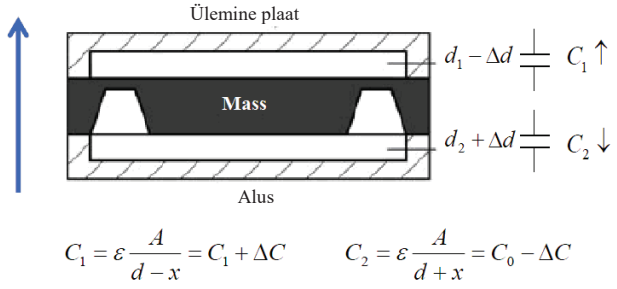


Joonis 5.1 Mehaanilise kiirendusanduri skeem

Mõõtemassi *m* toetab kokku surutav vedru, mis laseb kehal üles-alla liikuda. Kehaga on seotud kaks lisakomponenti: amortisaator ja nihkeandur. Kiirendusanduri peamine ülesanne on määrata mõõtemassi nihe korpuse suhtes ja muuta see liikumine elektrisignaaliks. Selleks on ette nähtud nihkeandur, mis on kiirendusanduri osa.
Mõõtemassi liikumise mõõteviisist olenevalt saab eristada mahtuvuslikke, piesotakistuslikke, piesoelektrilisi, termilisi ja muud tüüpi kiirendusandureid.

5.1.1 Mahtuvuslikud kiirendusandurid

Andur koosneb kahest plaadist: korpusega ühendatud liikumatust plaadist ja korpuses vabalt liikuvast plaadist, mille külge on ühendatud mõõtemass. Need plaadid moodustavad kondensaatori, mille mahtuvus oleneb nende vahekaugusest ja seega anduri tuvastatud liikumiskiirendusest. Anduri plaadid saavad nihkuda kuni 20 μm võrra. Nendes andurites tuleb kompenseerida mitmesuguste parameetrite triiv ja ühtlasi summutada võimalik müra. Seetõttu on kiirendusandurid tavaliselt diferentsiaalsed. Selleks tuleb neile lisada veel üks kondensaator, millel on põhikondensaatorile lähedane mahtuvus. Joonis 5.2 on näidatud mahtuvusliku diferentsiaalse kiirendusanduri läbilõige. Mõõtemass paikneb kaane ja aluse vahel.

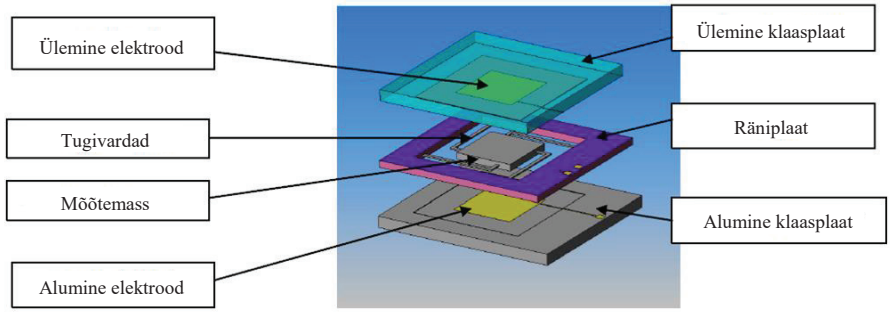


Joonis 5.2 Mahtuvuslik diferentsiaalne kiirendusandur

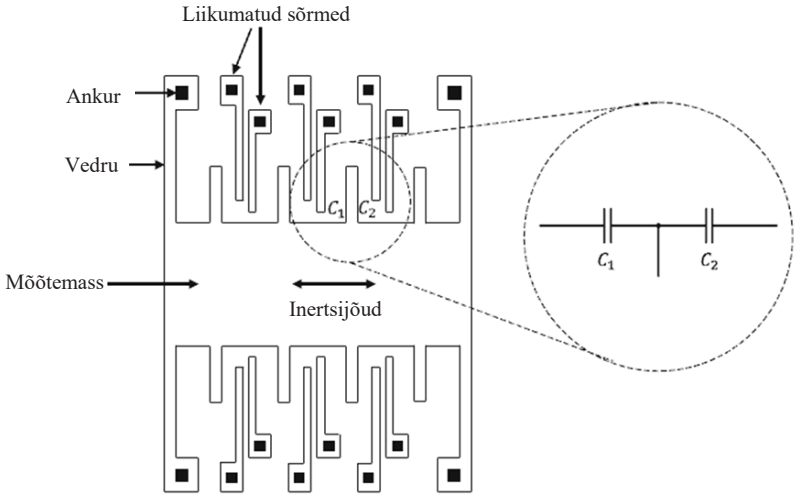
Mõõtemass eraldab kaant ja alust kaugusel d_1 ja d_2. Massi liikumise korral kaane suunas väheneb kaugus d_1 väärtuse Δd võrra ja kaugus d_2 suureneb sama väärtuse võrra. Δd on võrdeline mõõtemassile mõjuva mehaanilise jõuga.
Joonis 5.3 on kujutatud elektromehaanilistel mikrosüsteemidel (*Micro ElectroMechanical Systems*, MEMS) põhineva mahtuvusliku kiirendusanduri konstruktsiooni. Selle tehnoloogia korral paigaldatakse anduri mehaanilised komponendid ja sellega integreeritud andmeid töötlevad elektroonikaahelad ränikiibile. MEMS-tehnoloogia abil toodetud kiirendusandurid on väikesed, kerged, töökindlad ja soodsad. Saadaval on järgmised kiirendusandurid:

- analoog-kiirendusandurid, milles väljundsignaal on stabiilne pinge
- kiirendusandurid, mille väljundsignaal on kestusmodulatsiooniga
- digitaal-kiirendusandurid, millel on SPI- või I^2C-liidesed.

Joonis 5.4 on kujutatud MEMS-tehnoloogiaga mahtuvuslikku kiirendusandurit. Joonisel on üheteljeline kiirendusandur, mille telg paikneb korpuse alusega paralleelselt. Kiibil kaheteljelise kiirendusanduri tekitamiseks paigutatakse kaks plaati teineteisega risti. Igal plaadil on oma mõõteahel ja nende teljed on korpuse alusega paralleelsed. Kolmeteljelistes kiirendusandurites on kolmas plaat, mis on korpuse alusega risti.

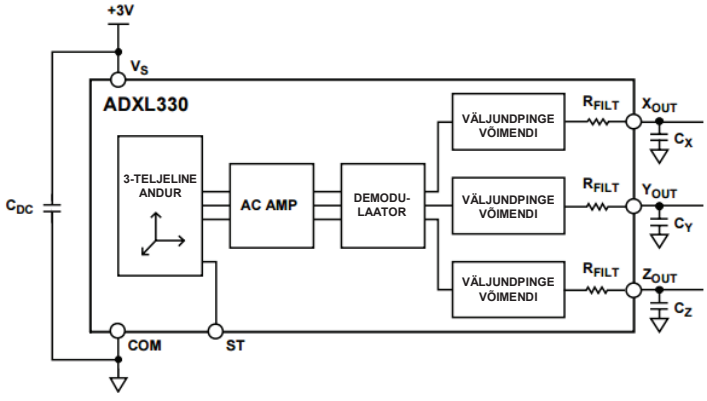


Joonis 5.3 MEMS-tehnoloogial põhineva mahtuvusliku kiirendusanduri konstruktsioon



Joonis 5.4 MEMS-tehnoloogial põhinev mahtuvuslik kiirendusandur

Joonis 5.5 on kujutatud kolmeteljelise kiirendusmõõturi ADXL330 (tootja Analog Devices) tööpõhimõtte skeemi.
Kolmel plaadil olevad pinged võimendatakse vahelduvpinge võimendiga (AC AMP). Seejärel määratakse faasitundliku demoduleerimise abil kiirenduse suurus ja suund. Väljundtakistid koos väliste kondensaatoritega C_X, C_Y ja C_Z moodustavad madalsagedusfiltri, mis määrab iga telje signaali soovitud maksimumsageduse. Sagedusriba laiuseks saab olenevalt rakendusest X- ja Y-telje jaoks valida 0,5–1600 Hz ning Z-telje jaoks 0,5–550 Hz.

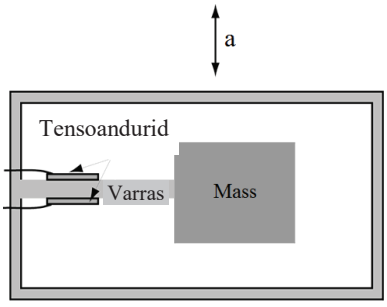


Joonis 5.5 Kolmeteljelise kiirendusmõõturi ADXL330 tööpõhimõtte skeem

Kiirendusandur suudab mõõta staatilist raskuskiirendust kallet jälgivates rakendustes, aga ka liikumisel, kokkupõrkel või vibratsioonil tekkivat dünaamilist kiirendust.
MEMS-kiirendusandureid toodavad näiteks Analog Devices, Freescale Semiconductor, Texas Instruments, ST Microelectronics, Epson jne.

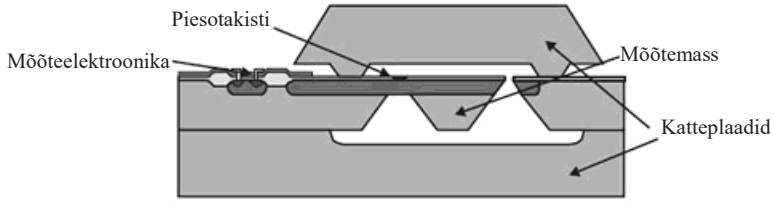
5.1.2 Piesotakistuslikud kiirendusandurid

Selliste kiirendusandurite tajur on tensoandur, mis mõõdab mõõtemassi toetava vedru deformatsiooni (Joonis 5.6). See deformatsioon on võrdeline mõõtemassi nihkeulatusega ja -kiirusega ning seega ka kiirendusega. Sellised andurid suudavad mõõta kiirendust laias sagedusvahemikus (0–13 kHz).



Joonis 5.6 Piesotakistuslik kiirendusandur

Diskreetkomponentidest valmistatud kiirendusanduritel on individuaalsed temperatuurikarakteristikud ja nende väljundpinge oleneb oluliselt temperatuurist. See tähendab, et iga anduri komponentide parameetrid tuleb eraldi valida. Selliste kiirendusandurite valmistamise probleemid on lahendatud MEMS-tehnoloogia abil (Joonis 5.7).



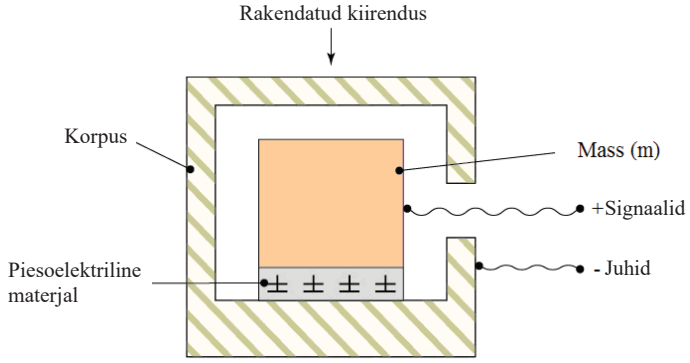
Joonis 5.7 MEMS-tehnoloogial piesotakistuslik kiirendusandur

Piesotakistuslike andurite elektritakistus muutub rakendatud mehaanilise mõjuga võrdeliselt. Üldjuhul on nende tundlikkus väike, mistõttu kasutatakse neid peamiselt löögikiirenduse ja madalsagedusliku vibreerimise mõõtmiseks. Neid kasutatakse laialdaselt löögikindluse määramiseks kokkupõrgetel.
Joonis 5.8 on kujutatud ASC GmbH (http://asc-sensors.com) valmistatud piesotakistuslikku kiirendusandurit.

Joonis 5.8 Piesotakistuslikud kiirendusandurid (tootja ASC GmbH)

5.1.3 Piesoelektrilised kiirendusandurid

Piesoelektrilistes kiirendusandurites tekib mehaanilise pinge mõjul elektrilaeng. Nende kiirendusandurite sageduspiirkond on mõnest kuni 30 kilohertsini. Anduri tajurid on valmistatud kvartsist või keraamilisest piesoelektrilisest materjalist (nt baariumtitanaat, pliitsirkonaattitanaat (PZT) jne). Tajur paikneb korpuse ja mõõtemassi vahel ning seda mõjutatakse kiirendusega võrdelise jõuga (Joonis 5.9).



Joonis 5.9 Piesoelektriline kiirendusandur

Olenevalt väljundsignaali liigist jaotatakse piesoandurid laenguväljundsignaaliga ja pinge-väljundsignaaliga anduriteks. Laenguväljundiga piesoelektriliste kiirendusandurite eelis on võime töötada kõrgel temperatuuril ja suur amplituudivahemik, mida saab reguleerida laenguvõimendi seadetega.

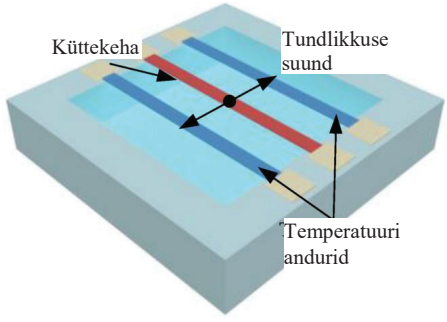
Tavapärane töötemperatuurivahemik on –55 kuni 288 °C. Kiirendusmõõturid on saadaval erineva tundlikkuse, massi, mõõtmete ja kujuga. Neid kasutatakse peamiselt vibratsiooni ja löökide mõju mõõtmiseks.

Joonis 5.10 on kujutatud Kistler Instrumenti toodetud piesoelektrilised kiirendusandurid.

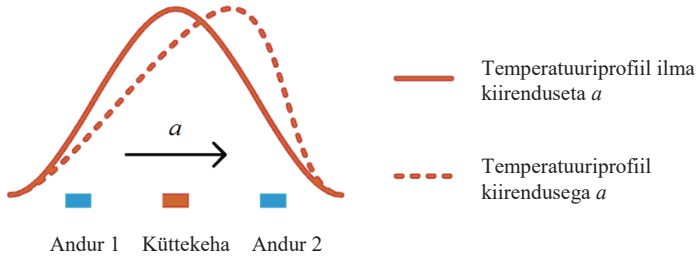
Joonis 5.10 Kistler Instrumenti toodetud piesoelektrilised kiirendusandurid

5.1.4 Termilised kiirendusandurid

Termilised kiirendusandurid töötavad vaba konvektsiooni põhimõttel. Nende valmistamiseks kasutatakse MEMS-tehnoloogiat. Nagu on näidatud Joonis 5.11a, paikneb keskel elektriküttekeha, mille mõlemal küljel on temperatuuriandur. Küttekeha kuumutatakse kõrgema temperatuurini ja see soojendab ümbritsevat gaasi või vedelikku. Kiirendusanduri temperatuuriprofiil on kiirenduse puudumise korral sümmeetriline (Joonis 5.11b näidatud pidevjoon). Sellisel juhul on kahe temperatuurianduri temperatuurid samad. Kiirenduse korral temperatuuriprofiil muutub (Joonis 5.11b näidatud katkendjoon). Kahe temperatuurianduriga mõõdetav küttekeha kahe külje temperatuurierinevus on võrdeline kiirendusega. Seega muundatakse kiirendus elektroonikaahelaga töödeldavaks temperatuurierinevuseks.
Termilise kiirendusanduri küttekeha on valmistatud metallist või polükristalsest ränist. Temperatuuriprofiili määramiseks saab kasutada kahte liiki temperatuuriandureid: termotakistid (metallist või polükristalsest ränist) ja termopaarid.



Joonis 5.11 Termiline kiirendusandur, a - üldvaade



b

Joonis 5.11. Termiline kiirendusandur. Kiirendusanduri temperatuuriprofiil

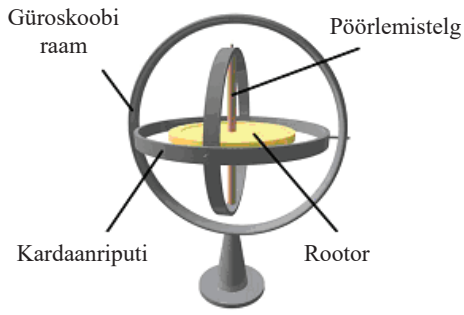
MEMSIC Inc. (http://www.memsic.com) toodab ühe-, kahe- ja kolmeteljelisi termilisi kiirendusandureid (Joonis 5.12).

Joonis 5.12 Ettevõtte MEMSIC Inc. toodetud termilised kiirendusandurid

5.2 Güroskoobid

Güroskoop on sümmeetriline tahke keha (kõige tavalisemalt ketas), mis pöörleb suure nurkkiirusega ümber oma sümmeetriatelje. Selle põhiomadus on, et telg püüab säilitada oma algset suunda ruumis. Güroskoobi tööpõhimõte kasutab impulsimomendi jäävuse seadust: isoleeritud (väliste jõudude mõjuta) süsteemi impulsimoment on jääv ehk ajas muutumatu. Güroskoobi leiutas 1852. aastal Prantsuse teadlane Léon Foucault, kes töötas välja seadme, millega uurida Maa pöörlemist ümber oma telje. Güroskoobid võivad olla ühe, kahe või kolme vabadusastmega. Joonis 5.13 on kujutatud kolme vabadusastmega klassikalist güroskoopi.

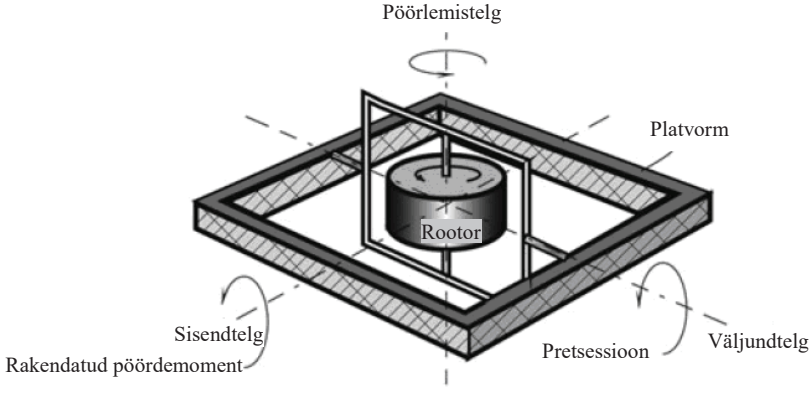
Güroskoop on nurkkiiruse andur, mida kasutatakse seadme pöörlemiskiiruse kindlaksmääramiseks kõikide telgede suhtes. Güroskoobiga saadud väärtusi saab kasutada seadme asendi kindlaksmääramiseks ruumis.



Joonis 5.13 Kolme vabadusastmega klassikaline güroskoop

5.2.1 Pöördgüroskoop

Mehaaniline pöördgüroskoop koosneb kettast, mis saab vabalt pöörelda ümber oma peatelje (pöörlemistelje). See on kinnitatud raamile, mis saab pöörelda ühe või kahe telje ümber (Joonis 5.14). Olenevalt pöörlemistelgede arvust on güroskoopidel seega üks või kaks vabadusastet. Väliste jõudude puudumise korral ei muuda güroskoobi peamine pöörlemistelg oma asendit ruumis. Peale selle on güroskoobi pöördemoment (väljundsignaal) võrdeline selle pöörlemise nurkkiirusega peamise pöörlemisteljega risti paikneva telje ümber.



Joonis 5.14 Mehaaniline pöördgüroskoop

Ketas (rootor) püüab vabal pöörlemisel säilitada alati telje asendit. Kui güroskoobi ketas pöörleb sisendtelje ümber, tekib sellega risti oleval teljel (väljundis) pöördemoment, mis paneb peamise pöörlemistelje pöörlema ümber väljundtelje. Seda nähtust nimetatakse güroskoobi pretsessiooniks. Pretsessioonil on alati selline suund, et rootori pöörlemissuund ja rakendatud pöördemoment langevad ühte.

Pöördgüroskoobid olid aastaid ainukesed navigeerimissüsteemide ehitamiseks kasutatavad seadmed. Kahjuks ei võimalda nende andurite tööpõhimõte teha väga väikeseid seadmeid.

Peale selle eeldab mehaaniliste pöördgüroskoopide kõigi osade valmistamine suurt täpsust, mis tõstab ka nende hinda.

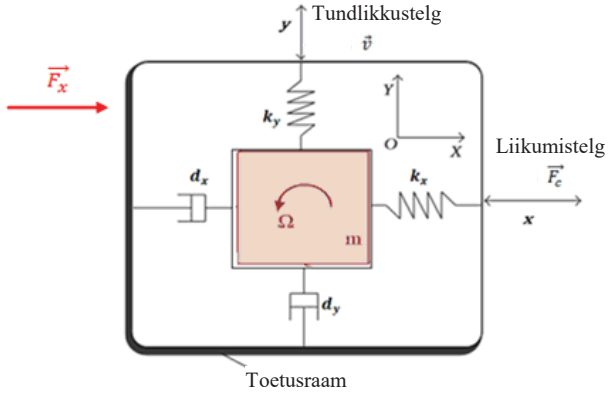
5.2.2 Vibratsioongüroskoop

Vibratsioongüroskoobi tööpõhimõte põhineb Coriolisi kiirendusel. Seda nähtust kirjeldas 1835. aastal Prantsuse teadlane Caspard-Gustave de Coriolis, kes näitas, et pöörlevas taustsüsteemis olevatele kehadele Newtoni seaduste rakendamisel tuleb liikumisvõrrandites arvestada inertsijõudu. Vastupäeva liikuvas taustsüsteemis on see suunatud keha liikumissuunast paremale ja päripäeva liikuvas taustsüsteemis vasakule.

MEMS-tehnoloogia abil valmistatud vibratsioongüroskoopidel on pöörlemine asendatud vibratsiooniga ja kiirenduse suurus on määratud liikumiskiirusega. Erinevalt rootoriga güroskoopidest, milles mõõtemass pöörleb, liigub vibratsioongüroskoopides mass lineaarselt ja tekitab harmoonilisi võnkumisi.

Kui keha liigub liikumissuunaga risti oleval teljel pöörlevas tugiraamis sirgjooneliselt, tekib Coriolisi kiirendus. Vibratsioongüroskoopide tootmisel kasutatakse mitmesuguseid konstruktsioonilahendusi. Need valitakse olenevalt riputi liigist, vibreerivate raskuste arvust ja tajuri liikumise liigist. Güroskoobi dünaamilisel süsteemil on kokku kaks vabadusastet (Joonis 5.15). Coriolisi jõud tekivad tajuri vibratsiooni ja süsteemi nurkkiiruse Ω mõjul.

Välise jõu F_x mõjul liigub mass piki x-telge joonkiirusega *v*. Nurkkiirusega Ω pöörlemise korral põhjustab Coriolisi jõud liikumise piki y-telge. Coriolisi jõu mõõtmiseks registreeritakse raskuse hälbe väärtus güroskoobi tugiraamile kinnitatud elektroodide suhtes. Võnkesageduste erinevus on võrdeline güroskoobi nurkkiirusega.

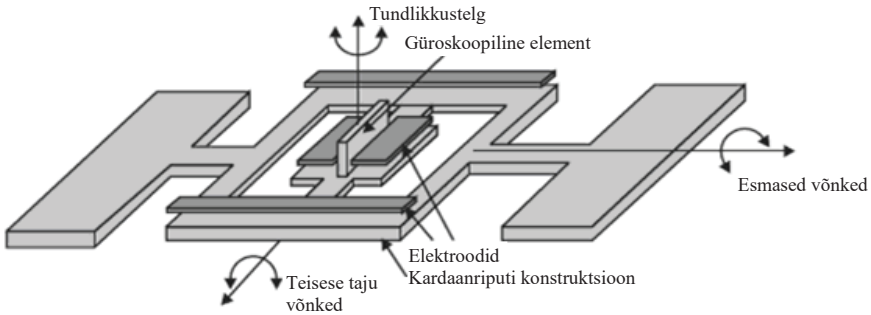


Ω – güroskoobi pöörlemise nurkkiirus, x- ja y-telg – vastavalt liikumistelg ja tundlikkustelg, k_x ja k_y – elastsustegurid, d_x ja d_y – sumbuvustegurid

Joonis 5.15 Vibratsioongüroskoobi skeem

Joonisel 5.16 on kujutatud vibratsioongüroskoopi, mis koosneb kahe pöörleva ja painduva elemendi külge kinnitatud kahepoolsest tarindist. Tarindi sees on pilud, mis tagavad liikuvate osakeste vaba liikumise aktiivalas. Välise raami töö ajal tekib vastava juhtpinge rakendamisel elektroodidele elektrostaatiliste jõudude tõttu pöördemoment. Selle tulemusena hakkab see

püsiva amplituudiga võnkuma. Need võnked kanduvad sisemise painduva elemendi kaudu sisemisele raamile, mille tulemusena hakkab võnkuma ka mõõtemass. Kui güroskoopiline element liigub nurkkiirusega Ω ümber seadme tasandiga risti oleva telje, tekitab Coriolisi jõud sisemise raami vibreerimise väljundtelje ümber juhtsagedusega võrdse sagedusega ja sisendnurkkiirusega Ω võrdelise amplituudiga.

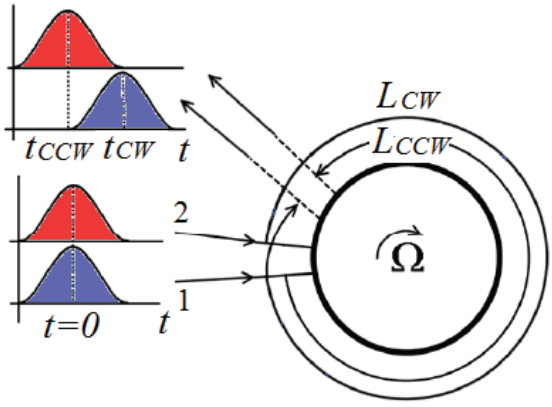


Joonis 5.16 Vibratsioongüroskoop

Sisendnurkkiiruse määrab sisemise raami ja elektroodipaari vahelise mahtuvuse muutus. Vibratsioongüroskoobid on väga stabiilsed ja vastupidavad ning üldjuhul kõikidest muudest güroskoopilistest seadmetest soodsamad.

5.2.3 Optilised güroskoobid (lasergüroskoobid)

Lasergüroskoobi töö põhineb niinimetatud Sagnaci efektil. Selle avastas 1913. aastal Georges Sagnac Maa pöörlemisdünaamika uurimise käigus. Sagnaci efekt seisneb selles, et rõnga-kujulises tarindis kahe vastassuunas liikuva optilise kiire suhteline faas muutub rõnga pöörlemise korral (Joonis 5.17). Üks kiir liigub päripäeva (CW) ja teine vastupäeva (CCW). Sel viisil tekib optiliste teede erinevus, mis on võrdeline rõnga nurkkiirusega.
Sagnaci efekti on kujutatud joonisel 5.17. Rõngas pöörleb ümber rõnga tasandiga risti oleva telje nurkkiirusega Ω. Rõnga pöörlemine tekitab valguskiire erinevad optilised teed, vastavalt L_{CW} ja L_{CCW}.

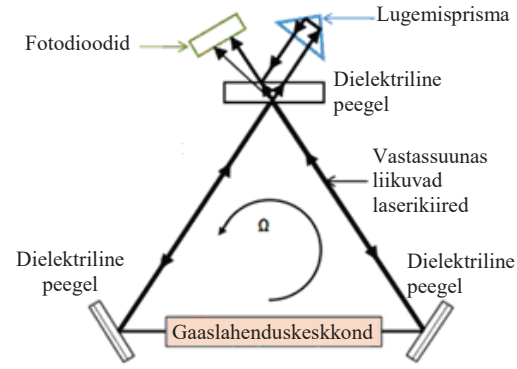


Joonis 5.17 Sagnaci efekt

Optiliste güroskoopide kaks põhiliiki on ringlasergüroskoop (RLG) ja kiudoptiline güroskoop (FOG).

- ***Ringlasergüroskoop (RLG)***

Lasergüroskoobis tekitatakse kolmest või enamast peeglist koosnevas suletud kontuuris kaks vastassuunas liikuvat kiirt. Seade on ehitatud resonaatorina, kus valgus liigub süsteemis resonantsi tekitamise korral korduvalt mööda kinnist kontuuri. Resonaatori nurkkiiruse Ω olemasolul tekitab kahe laine läbitud optilise tee pikkuste erinevus ka nende sageduste erinevuse. Sellise güroskoobi põhielemente on kujutatud Joonis 5.18a.
Lasergüroskoobi korpus on valmistatud kolmnurksest klaasplokist (joonis 5.18b). Klaaskorpusesse on puuritud kolm õhukanalit ja kolmnurkse optilise resonaatori saamiseks on igasse nurka paigutatud kolm peeglit. Kolm kanalit on täidetud madala rõhu all oleva He-Ne gaasiseguga. Kahe anoodi ja katoodi vahele tekitatakse kõrgepingelahendus. Optilistes kanalites tekitatakse kaks sõltumatut vastassuunas (päri- ja vastupäeva) liikuvat ja samal sagedusel resoneerivat laserikiirt. Poolläbipaistva peegli abil saab määrata pöörleva süsteemi nurkkiiruse. Selleks võetakse arvesse seadmes kahe laserikiire koostoime tulemusel tekkivat resonantssageduse muutust.
Ringlasergüroskoobi täpsus on määratud optilise kontuuri pikkusega. Seepärast on need güroskoobid äärmiselt täpsed spetsiifilistes rakendustes, kus selline mõõtmine on võimalik.



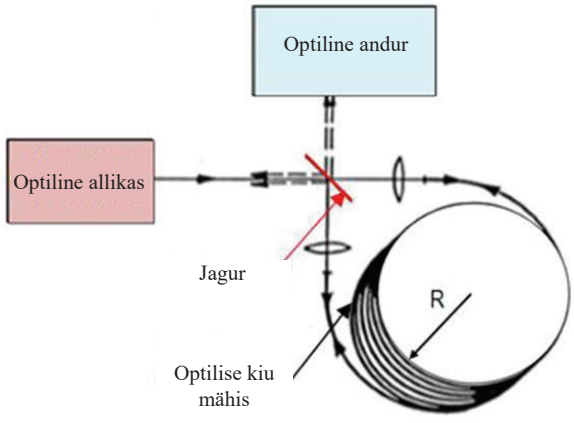
a

b

Joonis 5.18 Ringlasergüroskoop, mille valmistamiseks on kasutatud kolmnurkset optilist resonaatorit

- ***Kiudoptiline güroskoop (FOG)***

Et faaside vahe (Sagnaci efekt) on võrdeline pöörlemiskiirusega, suurendab tundlikkust mitme keeruga spiraal, mis suurendab süsteemi efektiivset pindala. See oli kiudoptiliste güroskoopide ilmumise algpõhjuseks. Güroskoobiefekt tekitatakse kiudoptilise spiraaliga, mis on Joonis 5.19 kujutatud seadme üldskeemi põhielement.



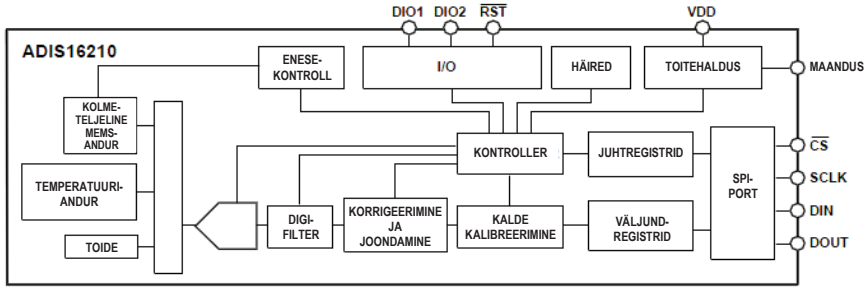
Joonis 5.19 Kiudoptiline güroskoop

Valgusallikast väljub kindla sagedusega elektromagnetlaine, mis suunatakse optilisest kiust valmistatud spiraali. Algne kiir satub jagurisse, mis tekitab kaks vastassuunas liikuvat lainet. Kui güroskoop pöörleb spiraali tasandiga risti oleva telje ümber, muutub kahe laine efektiivne optilise tee pikkus nagu ringlasergüroskoobis.
Güroskoope kasutatakse objekti asendi jälgimiseks ja selle muutumise korral elektrisignaali tekitamiseks. Mõnel juhul annab signaal täiturmehhanismidele märku asendi taastamiseks. Saadaval on ka kiirendusandurist ja güroskoobist koosnevad moodulid.

5.3 Inklinomeetrid

Maa raskusjõudu iseloomustab Maa keskpunkti suunatud konstantne jõud, mis tekitab kiirenduse 1 g ≈ 9,8 m/s^2. Kiirendusanduri üks võimalik kasutusala on raskusjõu suuna määramine ja seejärel selle suuruse mõõtmine. Selliseid spetsiaalseid kiirendusandureid nimetatakse sageli inklinomeetriteks ehk kaldeanduriteks, mis on ette nähtud mitmesuguste objektide kalde mõõtmiseks Maa gravitatsioonivälja suhtes.

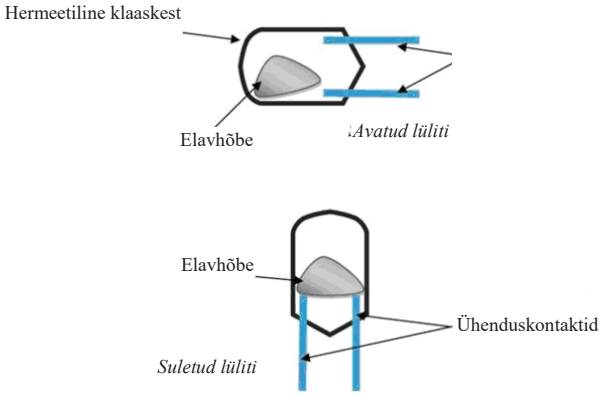
Joonis 5.20 on esitatud ettevõtte Analog Devices, Inc. toodetud SPI-liidesega kolmeteljelise täppisinklinomeetri ADIS16210 tööpõhimõtte skeem. ADIS16210 on digitaalne kalde määramise süsteem, mis tagab nii piki- kui ka külgkaldenurga täppismõõtmise kõikides suundades (±180°). Selles on ühendatud MEMS-põhine kolmeteljeline kiirendusandur ja digitaalsignaalitöötlus, andmehõiveks kasutatavad adresseeritavate kasutajate registrid ja programmeerimiseks kasutatav SPI-ga ühilduv jadaliides. ADIS16210 väljundis tekitatakse kaldenurgale vastav arvkood.



Joonis 5.20 SPI-liidesega kolmeteljelise täppisinklinomeetri ADIS16210 tööpõhimõtte skeem

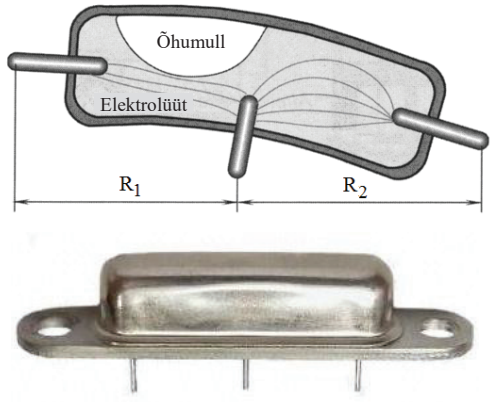
Kui on piisav raskusjõu suuna kindlaksmääramine üksnes väikese täpsusega, saab selleks kasutada lihtsaid ja soodsaid inklinomeetreid. Selline andur ei mõõda raskusjõu suurust, vaid ainult suunda. Sellel on oma sisemine telg, mille suhtes määratakse raskusjõu suund.

Traditsiooniline ja ikka veel laialdaselt kasutatav andur on elavhõbelüliti (Joonis 5.21). See on valmistatud elektrit mittejuhtivast torust (sageli klaasist), milles on kaks elektrikontakti ja elavhõbeda tilk. Kui andur on sellises asendis, et elavhõbe voolab kontaktide pealt ära, on lüliti avatud. Lüliti asendi muutmise korral liigub elavhõbe kontaktide peale, puudutab neid mõlemaid ja sulgeb lüliti.



Joonis 5.21 Elavhõbelülitil põhinev inklinomeeter

Kalde mõõtmiseks on vaja keerulisemat andurit. Sellist andurit, mida nimetatakse elektrolüütiliseks kaldeanduriks, on kujutatud Joonis 5.22.



Joonis 5.22 Elektrolüütiline inklinomeeter

Veidi kõver klaastoru on täidetud osaliselt juhtiva elektrolüüdiga. Selles on kolm elektroodi: kaks elektroodi toru otstes ja kolmas keskel. Torus on õhumull, mis toru kallutamise korral liigub piki toru. Keskmise ja otsmiste elektroodide vaheline takistus oleneb õhumulli asukohast. Kui toru on tasakaaluasendist väljas, vähenevad või suurenevad vastavalt ka takistused. Elektroodid on ühendatud sildlülitusega, mida toidetakse vahelduvpingega. Kaldeandureid on saadaval mitmesuguste konstruktsioonidega ja mõõdetavad kaldenurgad on vahemikus ±0,5° kuni ±80°.
Kaldeandureid kasutatakse maa- ja õhusõidukites, tee-ehituses, tööpinkides, inertsiaalsetes navigeerimissüsteemides, mobiiltelefonide ekraanides (kujutise suunatuse juhtimiseks), robotites, elektroonilistes mängudes ja mujal.

5.4 Teadmiste kontroll

1. Mis on kiirenduse mõõtmise andur?
a) andur, mis on projekteeritud objektide sirgjoonelise kiiruse mõõtmiseks;
b) andur, mis on projekteeritud objektide nurkkiiruse mõõtmiseks;
c) andur, mis on projekteeritud objektide kiirenduse mõõtmiseks;
d) andur, mis on projekteeritud objektide vahelise kauguse mõõtmiseks.

2. Mis tüüpi temperatuuri andureid kasutatakse termilistes kiirendusandurites?
a) tensoandurid ja fototakistid;
b) termotakistid ja termopaarid;
c) dioodid ja transistorid;
d) fototakistid ja fotodioodid.

3. Mis on güroskoop?
a) andur, mis on projekteeritud objektide kiirenduse mõõtmiseks;
b) andur, mis on projekteeritud pöörlevate objektide nurkkiiruse mõõtmiseks;
c) andur, mis on projekteeritud objektide sirgjoonelise kiiruse mõõtmiseks;
d) andur, mis on projekteeritud eri objektide vahekauguse mõõtmiseks.

4. Millise füüsikalise põhimõtte kohaselt vibratsioongüroskoobid töötavad?
a) Doppler-i effect;
b) Coriolise kiirendus;
c) Seebecki effect;
d) Halli effekt.

5. Millise füüsikalise põhimõtte kohaselt optilised güroskoobid töötavad?
a) Seebecki effekt;
b) Doppler-i effekt;
c) piesoelektriline effekt;
d) Sagnac effekt.

6. Kaldeandurit (inklinomeetrit) saab kasutada järgmiste omaduste mõõtmiseks
a) liikuvate objektide vahekauguse mõõtmiseks;
b) pöörlevate objektide nurkkiiruse mõõtmiseks;
c) erinevate objektide kalde mõõtmiseks maa gravitatsioonivälja suuna suhtes;
d) pöörlevate objektide temperatuuri mõõtmiseks.

6 RÕHUANDURID

Rõhk on füüsikaliselt määratletud kui kindlale alale rakendatud jõu mõju. Rõhku arvutatakse valemiga

$$P = \frac{F}{S}, \tag{6.1}$$

kus P on rõhk, F on jõud ja *S* on pindala, millele jõud on rakendatud.

SI-süsteemis on rõhu mõõtühik Pa (paskal). 1 Pa on määratletud kui 1 N/m^2 (njuuton ruutmeetri kohta): $Pa = \frac{N}{m^2}$. Peale paskalite kasutatakse praktikas rõhu mõõtmiseks ka muid ühikuid, näiteks psi (naela ruuttolli kohta), atm (atmosfäär), baar, millimeetrit elavhõbedasammast (sageli kasutatakse nimetust torr).

Teisendusväärtus SI-ühikuks (Pa) on näidatud Tabel 6.1.

Tabel 6.1 Erinevate rõhuühikute teisendamine

Ühik	Väärtus paskalites (Pa)
1 psi	6894,757
1 bar	100 000
1 atm	101 325
1 torr	133,322

Rõhu mõõtmiseks saab rakendada järgmisi põhimõtteid:

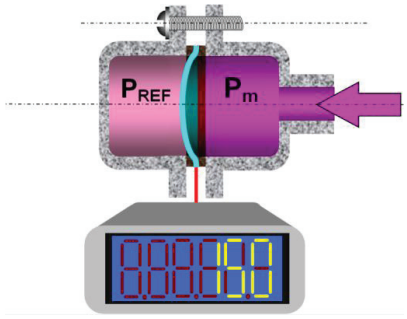
- atmosfäärirõhk: see on rõhk maapinnal. Loetakse, et merepinnal on atmosfäärirõhk 101,325 kPa. See rõhk väheneb kõrgusse suurenedes
- rõhk 0 Pa on täielikus vaakumis
- alarõhuks nimetatakse atmosfäärirõhu ja täieliku vaakumi vahele jäävaid rõhuväärtusi.

6.1 Mõõtemeetodi alusel eristatavad rõhuandurid

Praktikas mõõdetakse peamiselt vedelike ja gaaside rõhku. Selleks otstarbeks on välja töötatud erinevaid andureid, milles on rõhu mõõtmiseks kasutusel erinevad meetodid.

6.1.1 Absoluutväärtuse mõõtmine

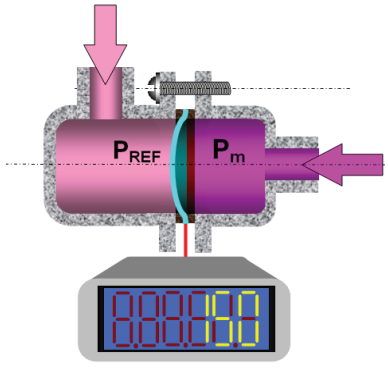
Seda tüüpi anduritega (Joonis 6.1) määratakse kindlaks rõhk vaakumi suhtes.



Joonis 6.1 Absoluutväärtuse mõõtmise rõhuandur

6.1.2 Suhtelise väärtuse mõõtmine

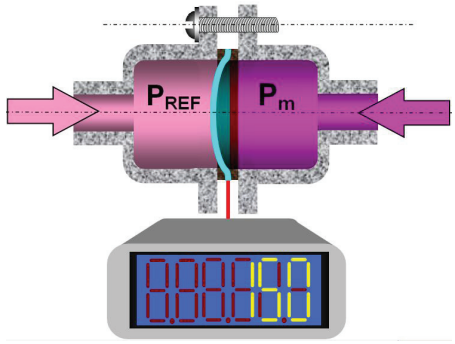
Seda tüüpi andurid mõõdavad rõhku atmosfäärirõhu suhtes (Joonis 6.2). Referentsrõhuna kasutatakse atmosfäärirõhku. Üks variant seda tüüpi andureid määrab rõhku atmosfäärirõhu suhtes merepinnal.



Joonis 6.2 Suhtelise rõhu andur

6.1.3 Rõhuerinevuse mõõtmine

Seda tüüpi andurid (Joonis 6.3) mõõdavad rõhku teatud referentsrõhu suhtes. Nende andurite tööpõhimõte on sarnane suhtelise rõhu mõõtmise andurite tööpõhimõttega, kuid referentsrõhk erineb atmosfäärirõhust ja andur mõõdab rakendatud ja referentsrõhu erinevust.



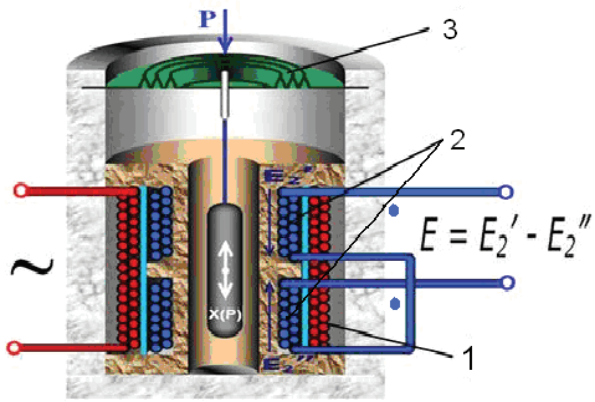
Joonis 6.3 Rõhuerinevuse andur

6.2 Tööpõhimõtte alusel eristatavad anduritüübid

Kõige levinumad on membraaniga rõhuandurid. See on rõhu rakendamisel painduv plaat, mille läbipaine oleneb rakendatud rõhu suurusest.

6.2.1 Vastastikku induktiivsed andurid

Seda tüüpi andurites on diferentsiaaltrafo, mille südamik on ühendatud anduri membraaniga (Joonis 6.4). Rõhu rakendamisel membraan paindub, mille tulemusena tekib diferentsiaal-trafo südamiku läbipaine. Trafo kaks sekundaarmähist on ühendatud vastandfaasides. Primaarmähist toidetakse siinuspingega. Kui südamik paikneb trafo magnetilises keskmes, siis on väljundsignaal null. Kui südamik nihkub, muutub väljundsignaali amplituud olenevalt nihkest. Nihke suuna saab määrata sisend- ja väljundsignaali vahelise faasinurga järgi.

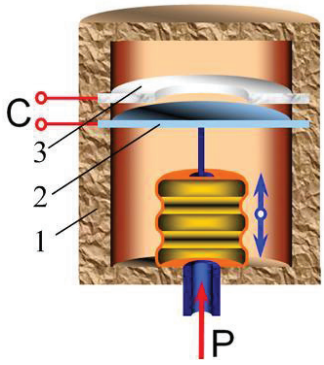


1 – primaarmähis, 2 – sekundaarmähised, 3 – membraan

Joonis 6.4 Vastastikku induktiivne rõhuandur

6.2.2 Mahtuvuslikud andurid

Rõhu rakendamisel membraan deformeerub. Viimane täidab kondensaatori plaadi osa (Joonis 6.5). Selle nihkumise korral muutub kondensaatori mahtuvus. Sobiva elektroonika-ahela abil saab mahtuvuse muutuse lihtsasti teisendada anduri väljundsignaali muutuseks.



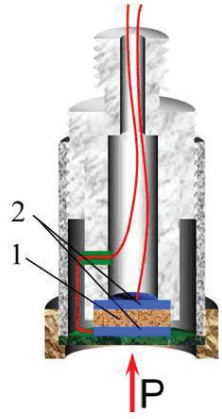
1 – anduri korpus, 2 – membraan, 3 – elektrood

Joonis 6.5 Mahtuvuslik rõhuandur

6.2.3 Piesoandurid

Seda tüüpi andurites kasutatakse andurimembraaniga ühendatud ühes või mitmes piesokristallis esinevat piesoefekti (Joonis 6.6).

Membraani deformeerumise korral tekib piesokristallis laeng, mille suurus oleneb membraanile rakendatud rõhust. See anduritüüp sobib dünaamiliselt muutuva rõhu mõõtmiseks.

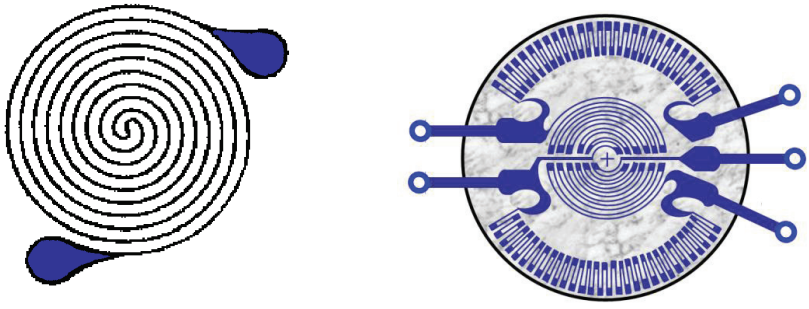


1 – piesoelektriline element, 2 – elektroodid

Joonis 6.6 Piesoelektriline rõhuandur

6.2.4 Tensoandurid

Seda anduritüüpi kasutatakse kõige laialdasemalt. Tensoanduritega konstruktsioone on välja töötatud väga palju. Tensoandurid valmistatakse sobiva kujuga (Joonis 6.7) ja paigutatakse deformeeruvale membraanile.



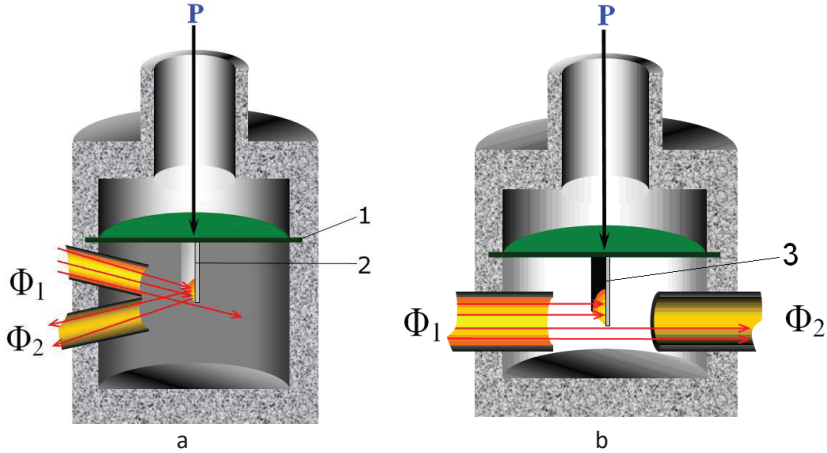
a b

Joonis 6.7 Rõhu mõõtmiseks kasutatavad tensoandurid

Rõhu mõjul muudab membraan kuju ja see tekitab tensoanduri kuju muutuse. Seega muutub nende takistus. Takistuse muutuse saab lihtsasti teisendada väljundsignaaliks, mis vastab andurile rakendatud rõhule. Joonisel 6.7b kujutatud tensoanduri elemendis on neli tensoandurit, mis moodustavad alalisvoolusilla neli haru.

6.2.5 Optilised andurid

Optilised andurid saavad töötada valguse peegeldamise või läbilaskmise põhimõttel (Joonis 6.8).



a b

1 – membraan, 2 – peegeldav element, 3 – tõke

Joonis 6.8 Optilised rõhuandurid

Esimest tüüpi andurites (joonis 6.8a) on peegeldav element paigutatud membraanile, mis peegeldab olenevalt rakendatud rõhust ja membraani paindest sellele langevast valgusest kindla osa tagasi vastuvõtjasse. Valgust läbilaskvates andurites (joonis 6.8b) vähendab membraanile kinnitatud tõke rõhu suurenemisel vastuvõtjasse langevae valguse hulka.

6.3 Teadmiste kontroll

1. Milline nendest on SI süsteemis rõhu mõõteühik ?
a) kg;
b) Pa;
c) psi;
d) N.

2. Mis rõhu väärtusest alates on meil tegemist vaakumiga?
a) vähem kui 101.325 kPa;
b) enam (suurem) kui 101.325 kPa;
c) üle 200 kP;
d) alates 300 kPa kuni 350 kPa.

3. Mis on rõhu absoluutväärtuse mõõtmine?
a) mõõdetakse rõhu väärtus vaakumi suhtes;
b) rõhu väärtus määratakse kindlaks atmosfääri rõhu suhtes;
c) rõhu väärtus mis on mõõdetakse 500 kPa juures.

4. Mis erinevus on näidikuga mõõteriista abil ja diferentsiaalrõhu mõõtmise meetodite vahel?
a) seal pole mingit vahet;
b) mõõteriistaga mõõtmisel määratakse rõhku atmosfääri rõhu suhtes;
c) mõlemal juhul mõõdetakse rõhku vaakumi suhtes,
d) diferentsiaalrõhu meetodil mõõtmisel määratakse kindlaks erinevus kahe rõhu vahel.

5. Rõhu andurites mis kasutavad diafragmat:
a) paindub diafragma rakendatud rõhu tulemusena;
b) diafragmat ei kasutata sellist tüüpi andurites;
c) võimaldab see lahendus elektrilist isolatsiooni (eraldamist);
d) rakendatakse seda ainult manomeetrilistes rõhuandurites.

7 VOOLUHULGAANDURID

Voolamine on vedeliku või gaasi liikumine torus või avatud kanalis. Seda iseloomustavad vooluhulk ja voolukiirus.

Vooluhulk on kindla aja jooksul toru või avatud kanalit läbiva vedeliku või gaasi kogus. Vedelike või gaaside vooluhulga mõõtmiseks kasutatakse ühikuid, mis iseloomustavad kindla aja jooksul ristlõiget läbinud aine mahtu või massi.

Mahtvooluhulga põhiühik on m^3/s. See näitab ajaühikus ristlõiget läbinud gaasi või vedeliku ruumala. Peale selle kasutatakse ka ühikut l/s, mis näitab ajaühikus ristlõiget läbinud gaasi või vedeliku ruumala liitrites. Vedeliku vooluhulga saab arvutada voolukiiruse ja toru või kanali ristlõikepindala korrutisena.

Vooluhulga mõõtmisel massi järgi kasutatakse ühikut kg/s. See näitab ajaühikus ristlõiget läbinud gaasi või vedeliku massi (kilogrammides).

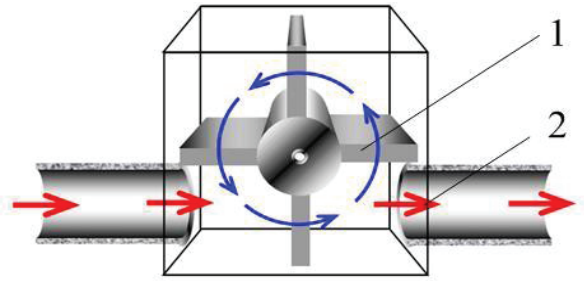
Vooluhulga mõõtmisel mahu järgi kasutatakse ka ühikut ft^3/s (kuupjalga sekundis) ja massi järgi mõõtmisel lb/s (naela sekundis).

7.1 Pöördelemendiga vooluhulgaandurid

Pöördelemendiga vooluhulgaandurites muundatakse tiiviku või turbiiniga käitatava rootori liikumine vooluhulga parameetrite lugemiks. Voolu suurenemisel suureneb ka rootori pöörlemiskiirus.

7.1.1 Tiivikuga vooluhulgaandurid

Selle vooluhulgaanduri konstruktsioon põhineb vooluga käitataval tiivikul (Joonis 7.1). Tiiviku pöörlemist mõõdetakse tajuritega ja lugem võetakse elektrooniliselt mõõteahela abil. See on praktikas kasutatavatest vooluhulgaanduritest üks soodsamaid konstruktsioonilahendusi.

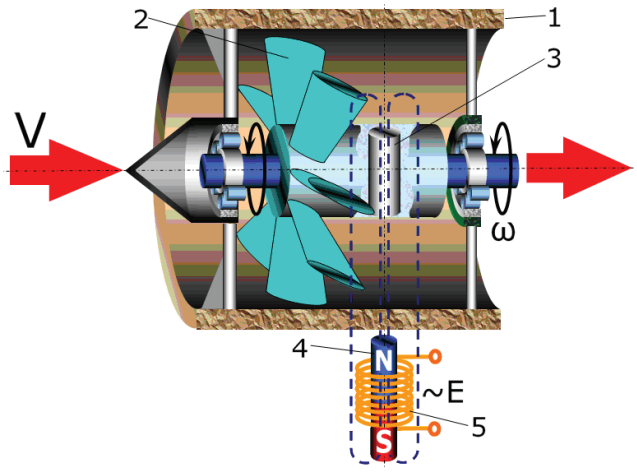


1 – tiivik, 2 – vool

Joonis 7.1 Tiivikuga vooluhulgaandur

7.1.2 Turbiini ja induktiivmuunduriga andurid

Seda tüüpi andurites on turbiiniga rootor paigaldatud toru keskele ja aine (vedeliku või gaasi) liikumise korral hakkab turbiin pöörlema (Joonis 7.2).



1 – mittemagnetilisest materjalist toru, 2 – turbiin, 3 – ferromagnetiline varras, 4 – püsimagnet, 5 – mähis

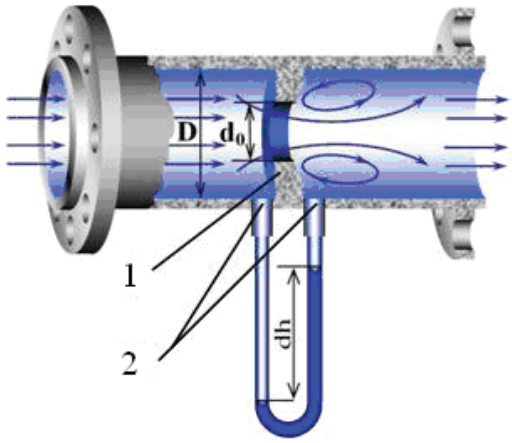
Joonis 7.2 Turbiiniga vooluhulgaandur

Turbiini on pressitud ferromagnetiline varras. Torust väljapoole selle vahetusse lähedusse on paigaldatud püsimagnet. Magneti ümber on mõõtemähis. Püsimagnet tekitab magnetvoo, mis on maksimaalne, kui varras on magnetiga paralleelne ja minimaalne, kui varras on magnetiga risti. Magnetvoo muutumise korral indutseeritakse mähises elektromotoorjõud, mis on võrdeline turbiini pöörlemiskiirusega ja seega ka voolukiirusega. Selle alusel arvutatakse vedeliku või gaasi vooluhulk.

7.2 Rõhu mõõtmisel põhinevad vooluhulgaandurid

7.2.1 Kalibreeritud avaga andur

Kalibreeritud ava on vedeliku või gaasi liikumise suunas laieneva avaga metalldiafragma (Joonis 7.3). See on paigaldatud voolusuunaga risti. Avast mõlemal pool on mõõteavad, mis näitavad torus olevat rõhku enne ja pärast ava. Vooluhulga suurus määratakse kindlaks nende kahe rõhu erinevuse alusel.

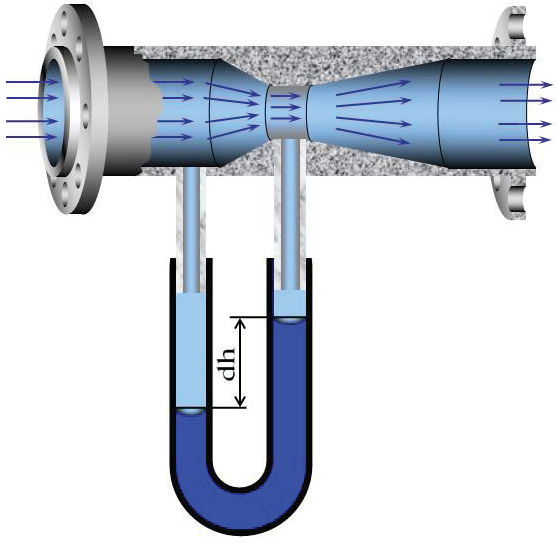


1 – kalibreeritud ava, 2 – mõõteavad

Joonis 7.3 Kalibreeritud avaga vooluhulgaandur

7.2.2 Venturi toruga andur

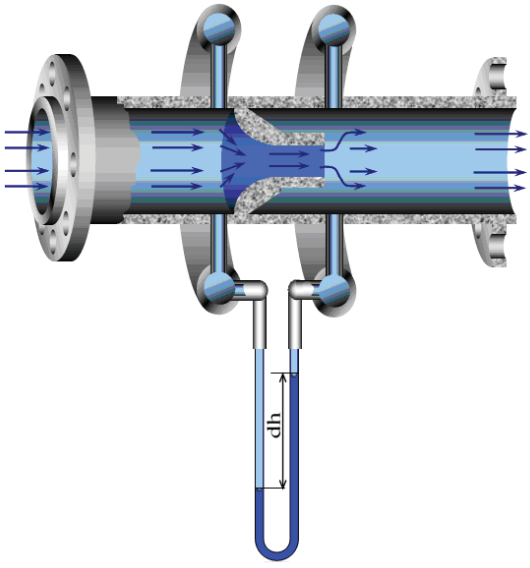
Vooluhulga mõõtmine Venturi toru abil (Joonis 7.4) toimub sama põhimõtte alusel kui kalibreeritud avaga mõõtmine, st rõhkude erinevuse järgi.



Joonis 7.4 Venturi toruga vooluhulgaandur

7.2.3 Düüsiga andur

Seda tüüpi vooluhulgaandurid (Joonis 7.5) töötavad kalibreeritud avaga ja Venturi toruga anduritega sarnasel põhimõttel. Düüsi kuju on kindlaks määratud toru läbimõõduga.



Joonis 7.5 Düüsiga vooluhulgaandur

7.3 Ultraheliga vooluhulgaandurid

Ultraheliga vooluhulgaandurid mõõdavad ultrahelisignaali ajalist viivitust voolava aine läbimisel päri- ja vastuvoolu. Vedelikus pärivoolu leviva ultrahelisignaali kiirus on suurem kui vastuvoolu.

Ultraheli abil mõõdetakse vooluhulka järgmiselt:

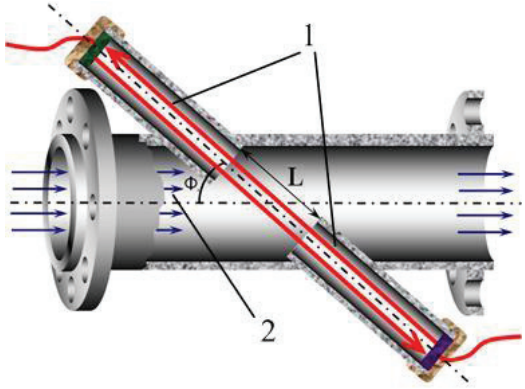
- pideva ultrahelisignaaliga
- ultraheliimpulssidega
- Doppleri efekti abil.

7.3.1 Pideva ultrahelisignaaliga andur

Pideva ultrahelisignaali kasutamise korral tekib kiiratud ja vastuvõetud signaali vahel faasinihe. Vooluhulga väärtus määratakse faasinihke alusel.

7.3.2 Ultraheliimpulssidega andur

Impulsside tekitamist kasutaval mõõtmisel (Joonis 7.6) kiirgavad kaks ultraheliandurit impulsse, mis liiguvad vedelikus või gaasis päri- ja vastuvoolu. Mõõdetakse impulsside vastuvõtjasse jõudmiseks kuluvat aega. Vooluhulga väärtus määratakse mõlemas suunas liikunud impulsside vastuvõtmisaja erinevuse põhjal.



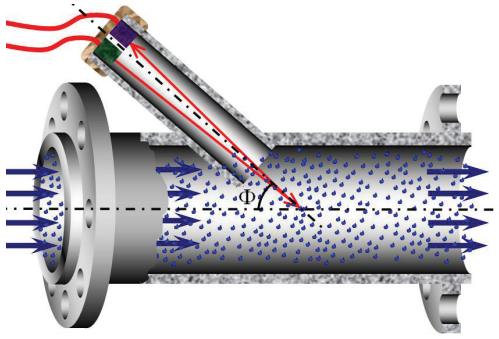
1 – ultrahelikiirgurid/-vastuvõtjad, 2 – voolusuund

Joonis 7.6 Ultraheliga vooluhulgaandur

7.3.3 Doppleri efekti kasutav andur

Doppleri efekt on vastuvõetava sageduse ja lainepikkuse muutumine allika ja/või vastuvõtja liikumisel üksteise suhtes. Sagedus suureneb, kui allikas ja vastuvõtja lähenevad, ning väheneb, kui need teineteisest kaugenevad.

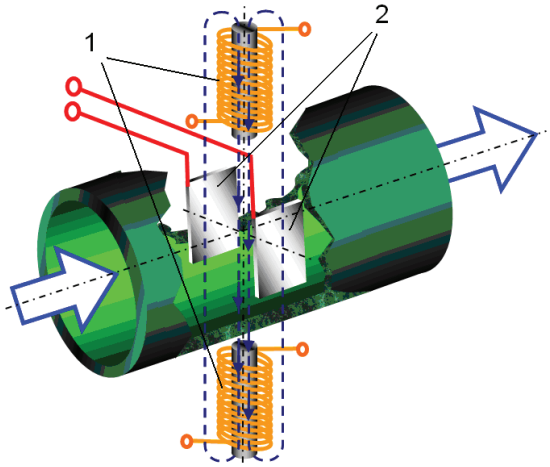
Selle meetodi korral (Joonis 7.7) määratakse kindlaks ultrahelisignaali peegeldumine voolavatelt osakestelt. Osakesele langemise korral ultrahelisignaal peegeldub ja selle sagedus muutub. Sageduse muutust kasutatakse vooluhulga kindlaksmääramiseks. Selle meetodi puuduseks on võimalik mõõtevea suurenemine osakeste arvu suurenemise korral.



Joonis 7.7 Doppleri efekti kasutav ultraheliga vooluhulgaandur

7.4 Magnetinduktiivsed vooluhulgaandurid

Magnetinduktiivsed vooluhulgaandurid (Joonis 7.8) põhinevad nähtusel, et kui elektrijuht pikkusega *l* liigub magnetväljas jõujoontega risti, indutseeritakse juhis elektromotoorjõud. Sellistes andurites on liikuvaks juhiks voolav vedelik. Vedelik peab juhtima elektrit. Toru mõlemale küljele on paigutatud elektroodid, mis määravad voolujuhi pikkuse *l*. Indutseeritud pinge on võrdeline aine liikumiskiirusega. Seda tüüpi andurid on täpsed, kuid kallid.

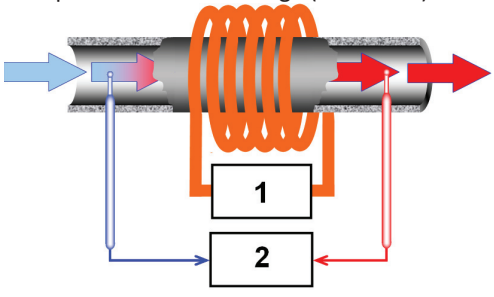


1 – induktsioonmähised, 2 – elektroodid

Joonis 7.8 Magnetinduktiivne vooluhulgaandur

7.5 Kalorimeetrilised vooluhulgaandurid

See meetod põhineb küttekehas tekkiva soojuse levimisel. Temperatuuri mõõdetakse küttekeha suhtes sümmeetriliselt paikneva kahe anduriga (Joonis 7.9).



1 – küttekeha juhtimine, 2 – mõõtemoodul

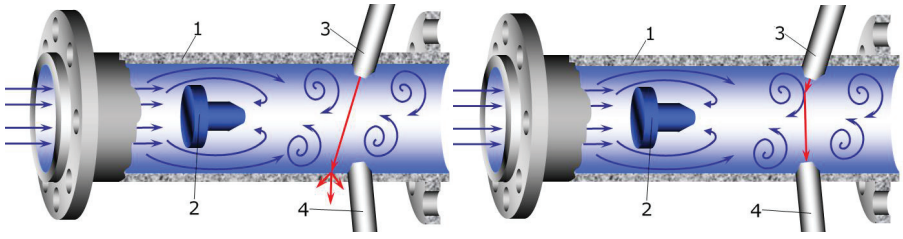
Joonis 7.9 Kalorimeetriline vooluhulgaandur

Vedeliku/gaasi liikumine on võrdeline kahe anduri näitude erinevusega. Suure mõõtetäpsuse tagamiseks on selle meetodi korral kasutusel vedeliku või gaasi temperatuurikompensatsioon.

7.6 Vooluhulga keerisandurid

Vooluhulga keerisandurid (Joonis 7.10) põhinevad keeriste tekkel vedeliku- või gaasivoolu tõkke paigutamise tõttu. Ei ole liikuvaid osi, mis on mõne rakenduse korral eelis. Moodustuvate keeriste sagedus ja arv on võrdeline vooluhulgaga. Nendes andurites rakendatav

meetod sobib gaasi ja vedeliku suuremate vooluhulkade mõõtmiseks, kuid väiksemate kiiruste korral on viga oluliselt suurem.
Keeriste arvu saab mõõta termistoridega, ultraheliandurite ga ja optiliste anduritega, aga ka tensoandurite, mahtuvuslike andurite ja piesoandurite ga.



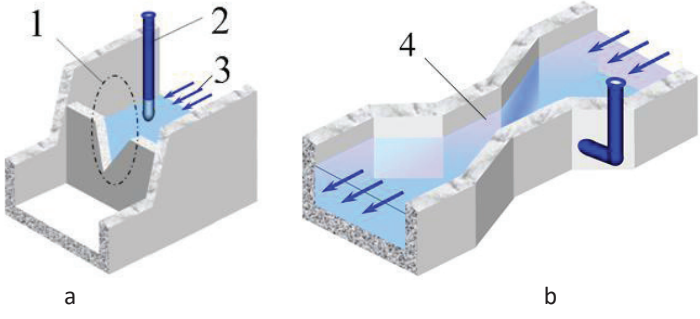
1 – voolusuund, 2 – tõke, 3, 4 – keeriseid tuvastavad andurid

Joonis 7.10 Vooluhulga keerisandur

7.7 Avatud kanalite vooluhulgaandurid

Praktikas tuleb sageli mõõta vedeliku voolamist avatud kanalites. Sel juhul kasutatakse peamiselt kahte meetodit:

ülevooluga (Joonis 7.11a);
renniga (Joonis 7.11b).



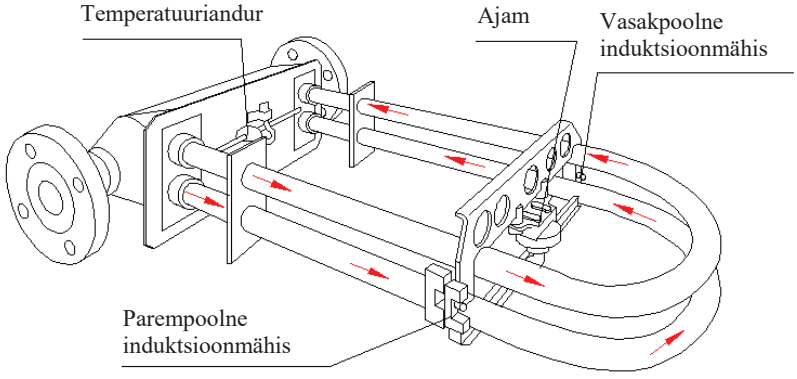
1 – ülevool, 2 – tasemeandur, 3 – kanal , 4 – renn

Joonis 7.11 Avatud kanali vooluhulgaandurid

7.8 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandur

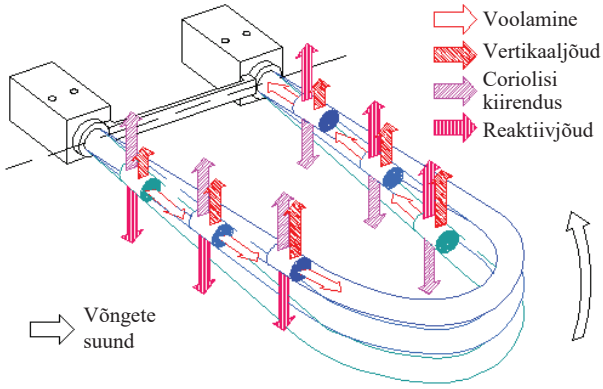
Seda tüüpi andur mõõdab massvooluhulka otse. Nii kaob ka vajadus mahu massiks teisendamise ning täiendavate mõõtmiste ja matemaatiliste arvutuste järele. Coriolisi tüüpi andureid ei mõjuta vedeliku rõhk, temperatuur, viskoossus ega tihedus. Neid saab kasutada nii vedeliku kui ka gaasi korral. See on eriti tähtis keemiatööstuses, kus massvooluhulka tuleb täpselt mõõta.

Anduris on üks või mitu roostevabast terasest vibreerivat toru. Need on U-kujulised, kuid võivad olla ka teistsuguse kujuga. Enamikus konstruktsioonides on toru kinnitatud kahes punktis. Nende kahe punkti vahel pannakse toru võnkuma.
Coriolisi tüüpi andurite tööpõhimõte põhineb sellel, et mõõtetoru võnkumisel tekib süsteemis täiendav inertsijõud: Coriolisi jõud (prantsuse füüsiku Gaspard-Gustave de Coriolisi nime järgi). Selle jõu mõjul hakkab toru painduma. Selle paindumise registreerivad andurid. Kui andur koosneb kahest paralleeltorust, jaguneb voolamine sissevooluavas kaheks ja ühineb uuesti väljavooluavas (Joonis 7.12). Elektromagnetiline täitur paneb toru vibreerima. Elektromagnetajamis on ühe toruga sidestatud mähis ja teise toruga ühendatud magnet. Mähisest lastakse läbi vahelduvpinget, mis tekitab magneti perioodilise tõmbumise ja tõukumise. Et magnet ja mähis on kindlalt torude külge kinnitatud, tõmbab jõud torud kokku või lükkab teineteisest eemale. Eeltingimuseks on vahelduvpinge laskmine läbi mähise, sest jõud peab muutma suunda. Torudele paigaldatakse kaks elektromagnetandurit, millega saab määrata torude asendi, kiiruse või kiirenduse. Anduri väljunditesse tekkiv siinuspinge peegeldab torude liikumist.

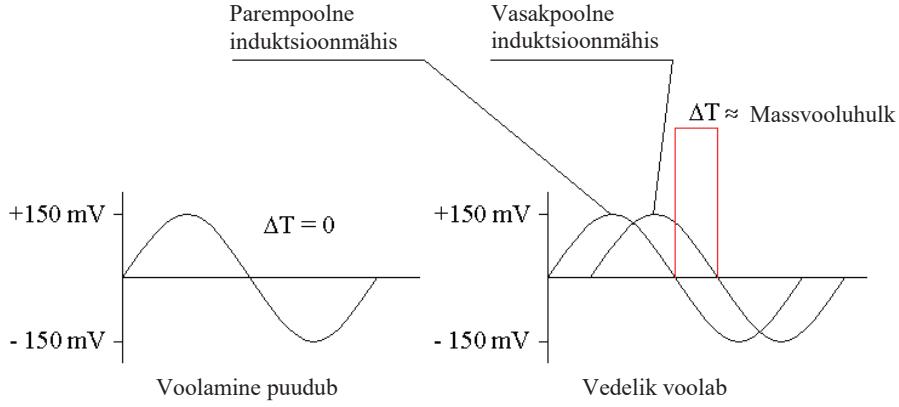


Joonis 7.12 Coriolisi tüüpi vooluhulgaanduri konstruktsioon

Torudes voolamise puudumise korral ei põhjusta nende elektromagnetajami tekitatud vibreerimine kahe anduri näitudes erinevusi. Kui torudes on voolamine ja need pannakse vibreerima, tekitab Coriolisi jõud torusid painutava sekundaarse vibratsiooni, mis avaldub torude vastavate liikumiste faaside väikeses erinevuses. Need tuvastatakse mõlemas punktis olevate anduritega. Torudes Coriolisi jõu tekitatud hälbed esinevad üksnes siis, kui torudes on korraga nii voolav vedelik kui ka vibratsioon.
Joonis 7.13 on kujutatud toru deformatsiooni voolamisel tekkiva Coriolisi jõu mõjul. Sisse- ja väljavoolu juures hargnevad torud eri suundadesse.
Joonis 7.14 on kujutatud mõlemast andurist pärit siinussignaalid. Kui torus voolamist ei ole, langevad need ühte. Kui kahe anduri vahel esineb voolamine, tekib massvooluhulgaga võrdeline faasinihe.



Joonis 7.13 Toru deformatsioon voolamisel tekkiva Coriolisi jõu mõjul



Joonis 7.14 Coriolisi tüüpi vooluhulgaanduri kahest andurist tulevad signaalid

Coriolisi tüüpi vooluhulgaandurite eelised on järgmised: suur töökindlus, suur täpsus, tundetus vibratsiooni, temperatuurimuutuste ja voolava aine rõhu suhtes, suure viskoossusega vedelike vooluhulga mõõtmise võimalus, voolusuund ei mõjuta anduri tööd.
Coriolisi tüüpi vooluhulgaandurite peamine puudus on nende suhteliselt kõrge hind.
Joonis 7.15 on kujutatud Coriolisi tüüpi vooluhulgaandureid (tooteseeria Motion ELITE ja Micro Motion D, tootja Emerson).

Joonis 7.15 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandurid (tooteseeria Motion ELITE ja Micro Motion D, tootja Emerson)

Joonis 7.16 on kujutatud Coriolisi tüüpi vooluhulgaandurit SITRANS FCS400 (tootja SIEMENS).

Joonis 7.16 Coriolisi tüüpi vooluhulgaandur SITRANS FCS400 (tootja SIEMENS)

7.9 Teadmiste kontroll

1. Mis mõõtühikut kasutatakse vedeliku ja ja gaasi vooluhulga mõõtmistel?
a) kg;
b) N;
c) N/m;
d) m^3/s.

2. Millised loetletud anduritest on pöördelemendiga?
a) propelleriga vooluhulga andur;
b) turbiiniga vooluhulga andur;
c) kalibreeritud mõõtediafragmaga (avaga) vooluhulga andur;
d) düüsiga vooluhulga andur.

3. Millist tööpõhimõtet kasutab düüsiga vooluhulga andur?
a) kasutab ultraheli;
b) mõõdetakse turbiini tehtud pöörete hulka;
c) tekitatakse keeris;
d) mõõdetakse rõhkude erinevust.

4. Millist tööpõhimõtet kasutatakse ultraheliga anduris?
a) genereeritakse ultraheli impulsse vedeliku voolu suunale vastupidises suunas ja mõõdetakse impulsside vastuvõtmise aega;
b) genereeritakse ultraheli impulsse vedeliku voolu suunale vastupidises suunas ja mõõdetakse impulsside vastuvõtmise aegade erinevust;
c) genereeritakse ultraheli impulsse vedeliku voolu suunas ja mõõdetakse impulsside vastuvõtmise aega;
d) genereeritakse ultraheli impulsse vedeliku voolu suunaga ristisuunas ja mõõdetakse impulsside vastuvõtmise aega.

5. Kalorimeetrilistel vooluhulga anduritel on järgmised elemendid:
a) küttekeha ja kaks temperatuuri andurit;
b) küttekeha ja nihke andurid;
c) andurid temperatuuri ja nurknihke määramiseks;
d) rõhu andurid ja valguse andurid.

6. Millistel järgmistel juhtudel kasutatakse mõõtmisel Coriolise vooluhulga andurit?
a) voolamise esinemise korral torus kuid puudub anduri torude vibratsioon;
b) Voolamise esinemise korral torus mille puhul esineb ka anduri torude vibratsioon;
c) juhul kui esineb anduri torude vibratsioon;
d) juhul kui puudub anduri torude vibratsioon.

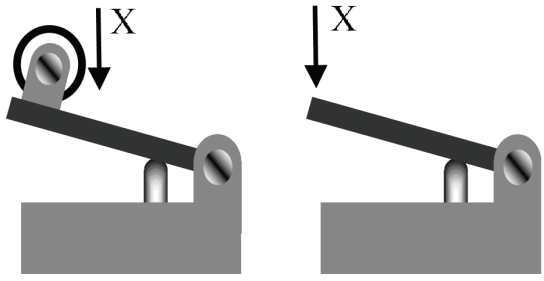
8 LÄHEDUSANDURID, OBJEKTIDE TUVASTUSANDURID JA TASEMEANDURID

8.1 Objektide tuvastamise kontaktandurid

Objektide tuvastamise kontaktanduritena saab kasutada mehaanilisi lüliteid. Mehaanilisel kokkupuutel esemega tekitavad need sees/väljas-tüüpi signaale. Eseme tekitatud surve kadumise korral taastab lüliti algasendi.

Lüliteid on kahte tüüpi: normaalselt avatud (NO) ja normaalselt suletud (NC). NO-lüliti kontaktid on avatud ning mehaanilise jõu rakendamise korral need sulguvad ja ühendavad elektriahela. NC-lüliti kontaktid on suletud ning mehaanilise jõu rakendamise korral need avanevad ja katkestavad elektriahela.

Lüliteid saab kasutada mööduvate objektide tuvastamiseks. Seda saab teha rulliku (Joonis 8.1a) või hoova (Joonis 8.1b) abil.



Joonis 8.1 Lülitid

Kontaktandureid kasutatakse laialdaselt peamiselt tänu nende soodsale hinnale ja sellepärast, et neid ei mõjuta objekti kuju, värvus ega materjal.

8.2 Lähedusandurid

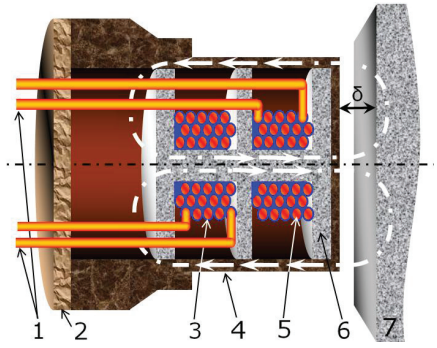
Nendel anduritel puudub kontakt liikuva objektiga. Nende väljundsignaal oleneb anduri ja objekti suhtelisest asendist. Füüsikalise tööpõhimõtte järgi jaotatakse need järgmiselt:

- induktiivandurid
- pöörisvooluandurid
- mahtuvuslikud andurid
- Halli efektil põhinevad andurid.

Need andurid saavad töötada analoog- või digitaalrežiimil. Analoogrežiimil on väljundsignaal anduri ja objekti vahelise kauguse pidev funktsioon. Digitaalrežiimil on kaks diskreetset taset: kõrge ja madal. Kõrge väljundtase vastab objekti olemasolule andurist kindlal kaugusel. Madal tase vastab objekti puudumisele (või on see andurist liiga kaugel). Tavaliselt töötavad lähedusandurid digitaalrežiimil.

8.2.1 Muutuva magnettakistusega induktiivandurid

Seda andurit (Joonis 8.2) võib ette kujutada kui trafot, mille primaarmähis on magneetimismähis ja sekundaarmähis on anduri mõõtemähis. Selle trafo magnetahel hõlmab liikuvat objekti, mis peab olema ferromagnetiline või ferromagnetilise kattega.



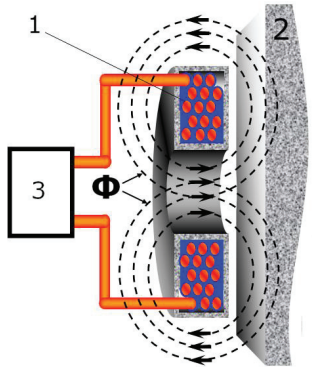
1 – mõlema mähise ühendusjuhtmed, 2– kaas, 3 – magneetimismähis, 4 – mittemagnetilisest materjalist korpus, 5 – mõõtemähis, 6 – karkass, 7 – ferromagnetiline objekt

Joonis 8.2 Muutuva magnettakistusega induktiiv-lähedusandur

Objekti ja anduri vaheline kaugus δ määrab magnetahela takistuse ja järelikult ka magnetvoo läbi sekundaarmähise ja pinge selle klemmide vahel.
Mida lähemal on objekt andurile, seda kõrgem on mõõtemähise pinge.

8.2.2 Pöörisvooluandurid

Pöörisvooluandurite (Joonis 8.3) tööpõhimõte seisneb mähise aktiivtakistuse ja induktiivsuse muutumises, kui sellele läheneb elektrivoolu juhtiv objekt.



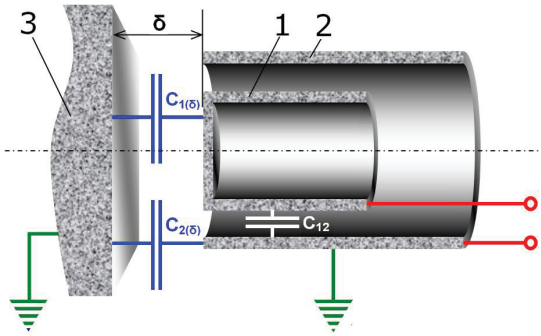
1 – mähis, 2 – voolujuhtivast materjalist objekt, 3 – kõrgsagedusgeneraator

Joonis 8.3 Pöörisvoolu-lähedusandur

Mähist läbiv vahelduvpinge tekitab objektiga lõikuva magnetvälja, mis tekitab selles pööris-voolud. Need tekitavad magnetvälja, mis on vastupidine selle tekkepõhjusele, st mähise magnetväli väheneb. Mähise elektrilised parameetrid muutuvad: aktiivtakistus suureneb kadude suurenemise tõttu juhtivas keskkonnas ja mähise induktiivsus väheneb.

8.2.3 Mahtuvuslikud lähedusandurid

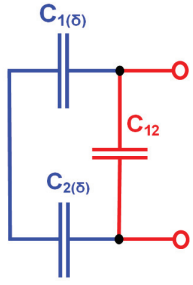
Objektide tuvastamise mahtuvuslikes andurites (Joonis 8.4) kasutatakse omadust, et lähenev keha muudab anduri mõõdetavat mahtuvust.



1 – silindriline osa, 2 – toru koaksiaalkate, 3 – objekt

Joonis 8.4 Mahtuvuslik lähedusandur

Ekvivalentelektriahelat on kujutatud Joonis 8.5.

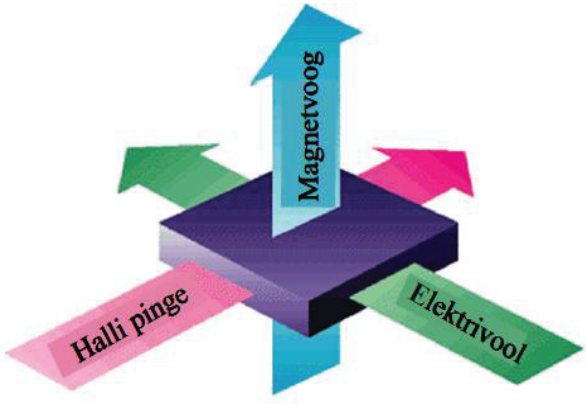


Joonis 8.5 Mahtuvusliku lähedusanduri ekvivalentahel

Punkt 2 ja objekt 3 on maandatud. Tavaliselt on andur ühendatud vahelduvpinge sillaga.

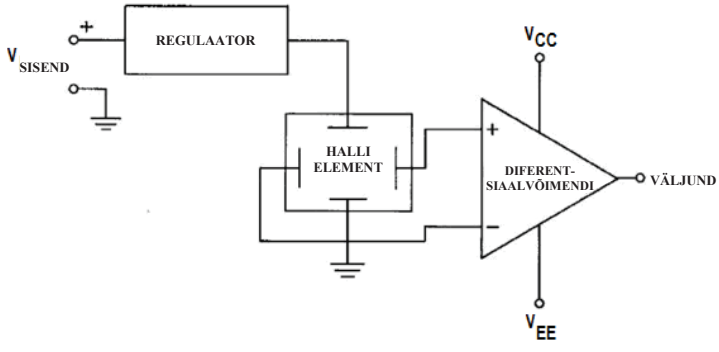
8.2.4 Halli efektil põhinevad lähedusandurid

Halli efekt on galvano-magnetiline. Galvano-magnetilised nähtused tekivad elektri- ja magnetvälja samaaegsest mõjust. Halli efekti olemus on järgmine: kui pooljuhtplaat, mida läbib elektrivool, paikneb plaadi tasandiga risti oleva magnetinduktsiooniga magnetvälja, tekib juhti läbiva voolu suunaga ja magnetväljaga risti olevas suunas magnetväli (potent-siaalide vahe) (Joonis 8.6).



Joonis 8.6 Halli efekti skeem

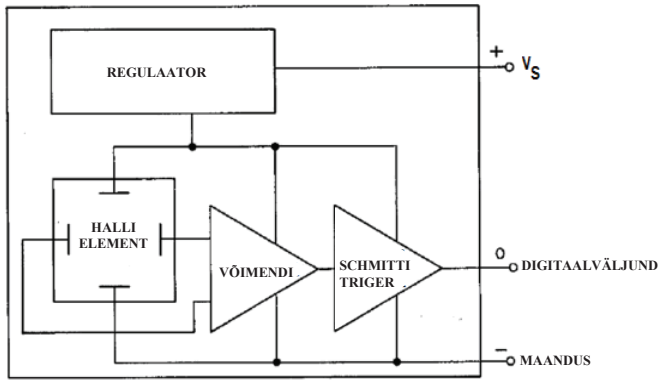
Galvano-magnetiline efekt avaldub tugevasti omajuhtivusega (üksnes *n*- või üksnes *p*-tüüpi) pooljuhtides, nagu germaanium, räni, indiumarseniid, galliumarseniid, indiumantimoniid jne. Nendest elementidest valmistatakse ka Halli andureid.
P-tüüpi pooljuhtides, kus vool ja magnetväli on samasuunalised, on Halli pinge polaarsus *n*-tüüpi juhtivusega pooljuhi polaarsusele.
Halli andurid võivad olla analoogsed ja digitaalsed. Halli analoogandureid (Joonis 8.7) iseloomustab see, et operatsioonvõimendi on ühendatud otse Halli elemendi väljundisse. Operatsioonvõimendi peab olema diferentsiaalne, nii et see suurendab vaid potentsiaalide vahet. Väljundpinget saab käsitleda voolu ja magnetinduktsiooni funktsioonina. Regulaatori ülesanne on hoida voolutugevus konstantsena, nii et Halli andur reageerib vaid magnetvälja muutustele.



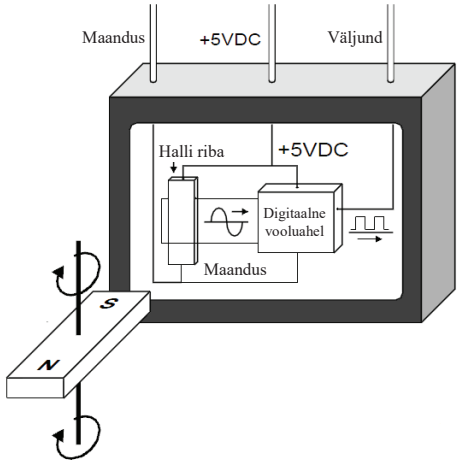
Joonis 8.7 Halli efektil analoogandur

Halli digitaalandurite väljund on diskreetne (sel saab olla ainult kaks väärtust: 1 või 0). Konstruktsiooni poolest ei erine need oluliselt analoganduritest (Joonis 8.8). Peale selle järgneb operatsioonvõimendile Schmitti triger. Kui võimendi väljundpinge ületab referent-

spinget, läheb Schmitti triger seisundist 0 seisundisse 1, ning sarnaselt lülitub välja, kui operatsioonvõimendi väljundpinge langeb referentspingest madalamale.
Halli anduri tööpõhimõtet on kujutatud Joonis 8.9. Andurit läbib konstantse tugevusega elektrivool. Anduri vahetus läheduses on pöörlev magnet. Muutuv magnetväli tekitab Halli vahelduvpinge.



Joonis 8.8 Halli efektil digitaalandur

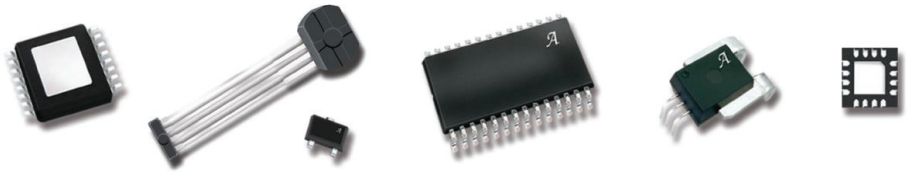


Joonis 8.9 Halli anduri tööpõhimõte

Halli andurite peamised tootjad on:

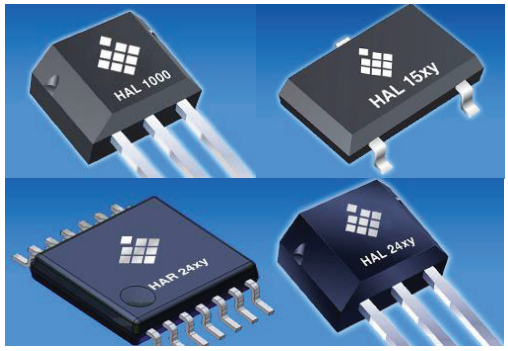
- TDK-Micronas GmbH (http://www.micronas.com/);
- Allegro MicroSystems LLC (http://www.allegromicro.com/);
- Infineon Technologies AG (http://www.infineon.com/).

Joonis 8.10 on kujutatud Allegro MicroSystems LLC toodetud mitmesugusteks rakendusteks ettenähtud Halli andureid ja Halli anduritega mikroskeeme.



Joonis 8.10 Allegro MicroSystems LLC toodetud Halli andurid

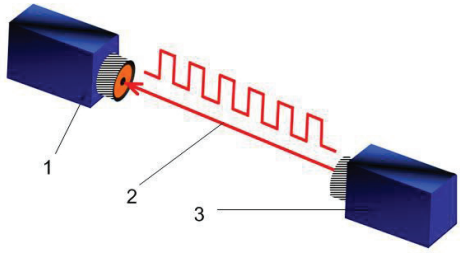
Joonis 8.11 on kujutatud TDK-Micronas GmbH toodetud mitmesugusteks rakendusteks ettenähtud Halli andureid ja Halli anduritega mikroskeeme.



Joonis 8.11 TDK-Micronas GmbH toodetud Halli andurid

8.3 Optilised andurid objektide tuvastamiseks

Optoelektroonilistes andurites on kaks elementi: kiirgur ja valguse vastuvõtja. Andur reageerib vastuvõtjasse jõudva valguse intensiivsuse muutusele.
Enamikus optoelektroonilistes andurites on valgusallikaks valgusdioodid (LED).
Tavaliselt on optoelektroonilises vastuvõtjas üks kolmest valgustundlikust elektroonilisest elemendist: fototakisti, fotodiood või fototransistor.
Valgusdioode saab suure kiirusega (tavaliselt mitme kHz sagedusega) sisse ja välja lülitada (ehk moduleerida) (Joonis 8.12). Moduleerimine tähendab, et fototransistor-vastuvõtja võimendi saab häälestada moduleerimissagedusele ja võimendada üksnes selle sagedusega pulseerivaid valgussignaale.



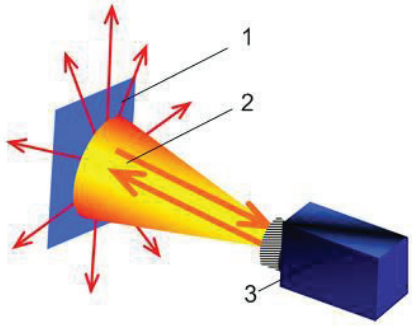
1 – vastuvõtja, 2 – moduleeritud signaal, 3 – saatja

Joonis 8.12 Optiline andur

Vastuvõtja eirab ümbritsevast keskkonnast tulevat valgust ja reageerib üksnes moduleeritud valgusele. Seega saab moduleeritud valgust vastuvõtjas võimendada väga kõrge tasemeni. Sellest hoolimata võivad väga eredad valgusallikad segada anduri tavapärast tööd.
Kõige enam kasutatakse optiliste andurite valgusallikana infrapuna-valgusdioode, kuid kui on vaja tuvastada värvust, kasutatakse nähtavas spektriosas töötavaid valgusdioode.
Objektide tuvastamiseks optiliste anduritega kasutatakse kolme põhimeetodit: difusioon-, tõkestus- ja peegeldusmeetodit.

- *Difusioonmeetod*

Seda meetodit kasutavates andurites (Joonis 8.13) tuvastatakse objekt siis, kui see anduri eest möödub ja peegeldab kiirgunud valguse tagasi vastuvõtjasse. Selle meetodi korral on objekti värvusel tugev mõju. Mida heledam on objekti värvus, seda kaugemalt saab seda tuvastada. Kiirgur ja vastuvõtja paiknevad tavaliselt (kuid mitte alati) ühes ja samas korpuses.



1 – objekt, 2 – valguskiir, 3 – andur

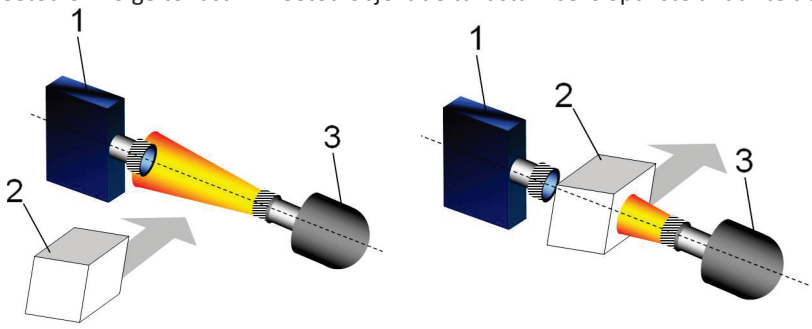
Joonis 8.13 Difusioonmeetod objektide tuvastamiseks

Difusioonmeetodi korral langeb kiirgunud valgus objekti pinnale kindla nurga all. Sel hetkel hajub valgus objekti pinnalt erinevatesse suundadesse. Vastuvõtja võib olla teistsuguse nurga all ja sellesse jõuab vaid väike osa hajunud valgusest. Seetõttu on difusioonmeetod suhteliselt ebatõhus tuvastamismeetod. Peale selle on difusioonmeetodi kasutamise korral äärmiselt oluline registreeritava objekti pinna peegeldamisvõime. Heledaid valgeid pindu tuvastatakse palju kaugemalt kui matte musti pindu. Suur objekt, mis haarab kogu andurist tuleva valguse, tagastab vastuvõtjasse rohkem energiat kui vaid osa valgusvoost haarav väike

objekt. Enamuse difusioonandurite korral kasutatakse kiiratud valguskiire ja ka peegeldunud valguse paremaks fokuseerimiseks läätsi. Need võimaldavad suuremat tuvastamiskaugust ning suurendavad oluliselt läikivaid ja siledaid pindu tuvastavate rakenduste töönurka.

- Tõkestusmeetod

Tõkestusmeetodi korral (Joonis 8.14) paiknevad vastuvõtja ja kiirgur eri korpustes.
Need paigutatakse vastakuti ja nende vahel on valgusvoog. Objekt tuvastatakse, kui see tõkestab kiirguri ja vastuvõtja vahelt möödumisel kiirgurist vastuvõtjasse saadetud valguse. Tõkestusmeetod on kõige tõhusam meetod objektide tuvastamiseks optiliste andurite abil.

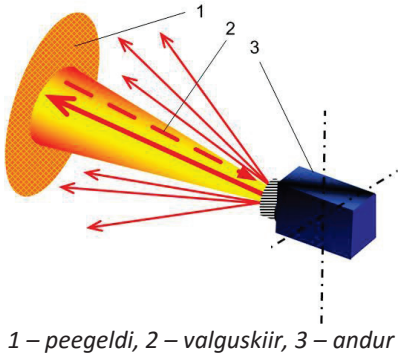


1 – vastuvõtja, 2 – objekt, 3 – saatja

Joonis 8.14 Tõkestusmeetod objektide tuvastamiseks

- Peegeldusmeetod

Peegeldusmeetodi (Joonis 8.15) korral kasutatakse peegeldit, mis peegeldab sellele langenud valguse tagasi. Kiirguri, peegeldi ja vastuvõtja vahele tekib valgusvoog. See võib olla infra-punavalgus või nähtav punane valgus. Kui objekt läbib valgusvoo, väheneb andurisse tagasi peegeldunud valguse intensiivsus ja objekt tuvastatakse.



1 – peegeldi, 2 – valguskiir, 3 – andur

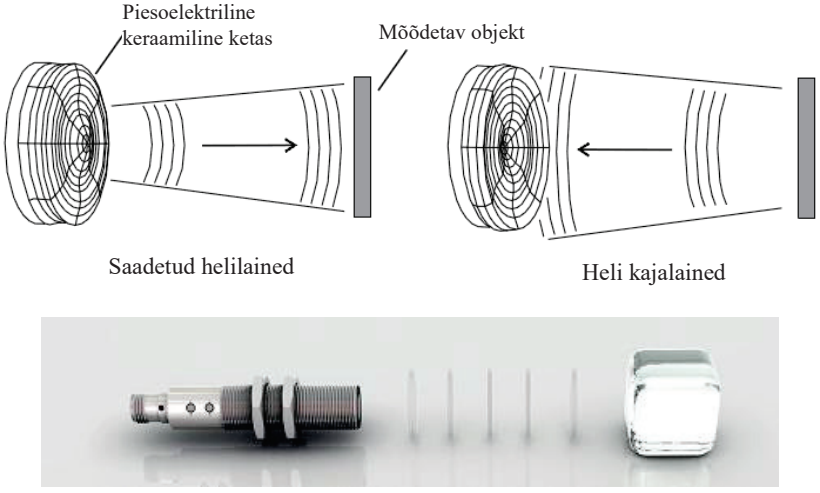
Joonis 8.15 Peegeldusmeetod objektide tuvastamiseks

Läikivate objektide tuvastamiseks tuleb andur paigaldada selliselt, et valgusvoo langemisnurk ei ole 90□. Nii väheneb peegeldunud valguse intensiivsus.

Teine meetod läikivate objektide tuvastamiseks on polarisatsioonifiltrite kasutamine. Filtrid paigutatakse kiirguri ja vastuvõtja ette ning nende polarisatsioonitasandid keeratakse 90° nurga alla. Peegeldi peegeldab kiirgurist tulnud polariseeritud valguse ja ühtlasi muudab selle polarisatsioonitasandit, nii et valgus saab läbida vastuvõtja filtri. Kui kiirgurist tulnud valgus peegeldub objektilt, siis selle polarisatsioonitasand ei muutu, vastuvõtja filter tõkestab selle valguse ja objekt tuvastatakse.

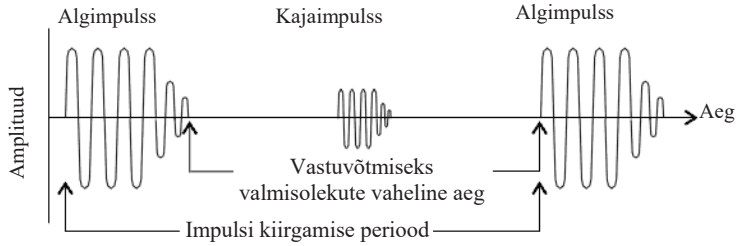
8.4 Ultraheliandurid

Ultraheliandureid kasutatakse objektide tuvastamiseks olenemata nende materjalist ja värvist, samuti nivoo mõõtmiseks. Neid andureid kasutatakse põhiliselt väga tolmuses keskkonnas ja siis, kui optilisi andureid ei saa suure saastetaseme tõttu kasutada.
Enamik ultraheliandureid töötab sagedusvahemikus 30–250 kHz. Ultrahelilaineid saab fokuseerida sarnaselt valgusega. Valguse peegeldumise seadused kehtivad ka ultraheli jaoks ja ultraheliandurite liigid langevad kokku optiliste andurite liikidega (kinnikatmise, peegeldamise ja hajutamise tööpõhimõte).
Ultrahelivõnkumiste tekitamiseks saab kasutada magnetostriktiivset ja piesoefekti. Enamasti kasutatakse ultraheliandurites piesoefekti. Ultrahelikiirgurid muundavad elektrisignaali mehaanilisteks võngeteks ja vastuvõtjad muundavad mehaanilised võnked elektrisignaaliks.
Ultraheliandur võib olla digi- või analoogväljundiga. Esimene esitab objekti olemasolu või puudumist, teine kaugust objektini.
Ultraheliandurite enimlevinud tööpõhimõte on hajupeegeldus. Objektilt peegeldunud ultrahelilaine jõuab andurile tagasi kajana. Ultrahelimõõtmistel on kaks faasi (Joonis 8.16). Esimene faas on ultrahelisignaali kiirgamine andurilt objekti suunas ja teine faas on ultrahelisignaali peegeldumine objektilt anduri suunas.

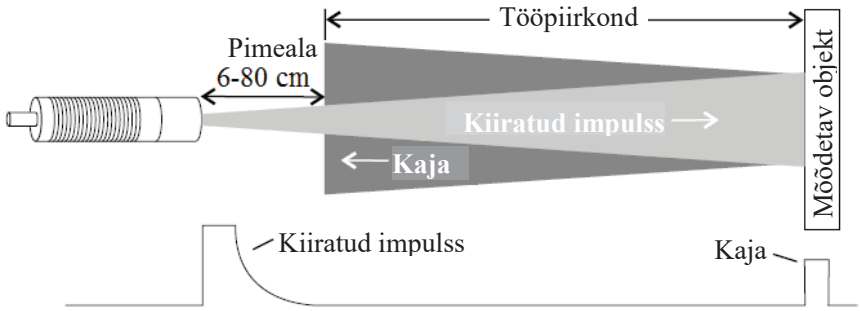


Joonis 8.16 Ultraheliandurи hajupeegeldus

Hajuefektiga andurites täidab sama piesoelektriline muundur kahte funktsiooni. Mida tihedam on objekt, seda tugevam signaal peegeldub tagasi. Suurema tiheduse korral peegeldub tagasi vastavalt suurem osa helilainest.
Hajuefektiga andurites genereeritakse perioodilisi ultraheliimpulsse (Joonis 8.17). Nende impulsside kordussagedus on mõnikümmend hertsi. Tagasipöördunud kajasignaali ooteaeg algab pärast impulsi saatmist ja kestab järgmise impulsi saatmiseni. Kajasignaali tagasijõudmise aja mõõtmisega saab määrata anduri ja objekti vahekauguse. Kajasignaali olemasolu tähendab, et anduri tööpiirkonnas on tuvastatud objekt.
Anduri ees on pimeala, kus objekte ei tuvastata või tuvastamine on ebatõenäoline (Joonis 8.18). Pimeala ulatus oleneb anduri suurusest ja tööpiirkonnast ning on vahemikus 6–80 cm. Pimeala tekib, kui muundur töötab generaatorina ja ei saa lähedaselt objektilt kajasignaali vastu võtta. Muundur ei ole valmis kajasignaali vastu võtma enne, kui on lõpetanud ultraheliimpulsi kiirgamise.

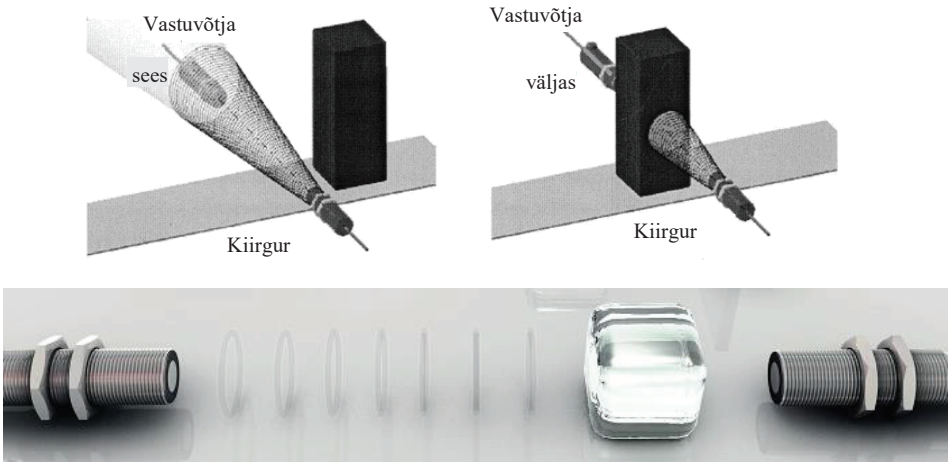


Joonis 8.17 Mõõtmise põhimõte hajuefektiga ultraheliandurist



Joonis 8.18 Ultraheliandur pimeala

Kinnikatmisega anduri korral paiknevad vastuvõtja ja selle suunas ultrahelilaineid genereeriv ultrahelimuundur (kiirgur) eraldi korpustes. Ultrahelilainete teele jääv objekt katkestab ultrahelivoo ja põhjustab vastuvõtjas lülituse (Joonis 8.19).

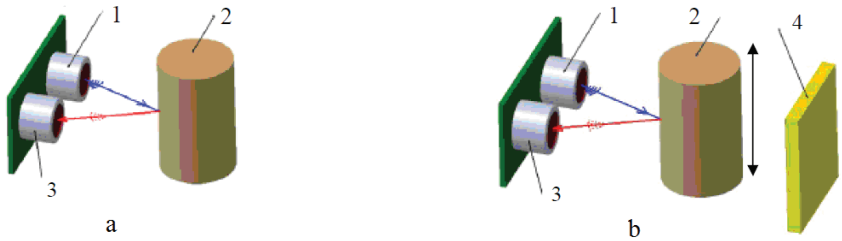


Joonis 8.19 Kinnikatmisega ultraheliandur

Erinevalt hajuefektiga ja peegeldavatest anduritest genereerib kinnikatmisega andur pidevalt ultraheli ja pimeala puudub.
Peegeldava ultraheliandur (Joonis 8.20) tööpõhimõte on objektilt ja peegeldilt tagasi-peegelduva ultrahelilaine saabumisaegade erinevuse määramine. Peegeldina saab kasutada mistahes tasast ja kõva pinda. Objektilt peegeldunud ultraheli peab jõudma andurini varem kui peegeldilt peegeldunud heli. Sellel hetkel lülitatakse anduri väljund ümber.

Joonis 8.20 Peegeldiga ultraheliandur

Need andurid on kõige tõhusamad selliste objektide tuvastamiseks, mis neelavad ultraheli (puuvill, tekstiil jne) või mille pind ei ole anduri teljega risti.
Andurid, millel on ühes korpuses kaks muundurit (Joonis 8.21), saavad töötada hajuefektiga režiimis ja peegeldi olemasolu korral peegeldumisega režiimis. Üks muunduritest töötab ultraheli kiirgurina ja teine vastuvõtjana.



1 – kiirgur, 2 – objekt, 3 – vastuvõtja, 4 – peegeldi

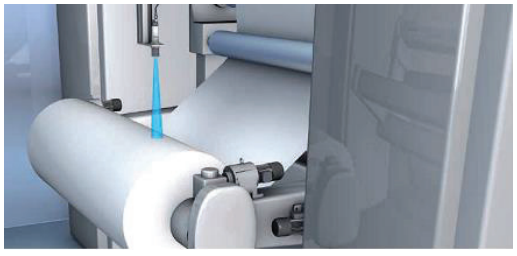
Joonis 8.21 Kahe muunduriga andur: a – hajuefektiga režiim, b – peegeldumisega režiim

See võimaldab tuvastada objekte, mis on andurile väga lähedal, sest vastuvõtjal ei ole vaja oodata, kuni kiirgur genereerib impulssi. Sel juhul peavad kiirgur ja vastuvõtja olema sünkroniseeritud.
Joonis 8.22 on näidatud erinevaid ultraheliandurite tüüpe.

Joonis 8.22 Ultraheliandurid

Ultraheliandurite rakendusnäiteid

Objekti olemasolu tuvastamine



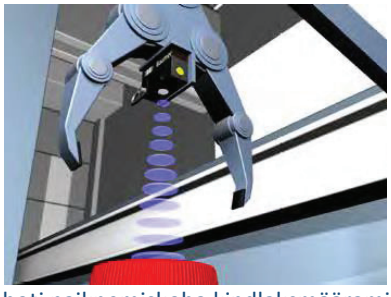
Rulli läbimõõdu määramine

Objektide (nt liinil täidetavate pudelite) äratundmine ja kiire kokkulugemine

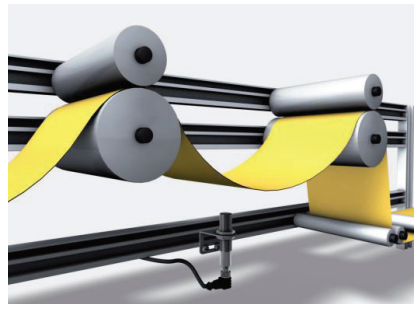
Vedelike ja puistematerjalide nivoo mõõtmine

Mahutite täitenivoo jälgimine

Materjali olemasolu tuvastamine konveierilindil

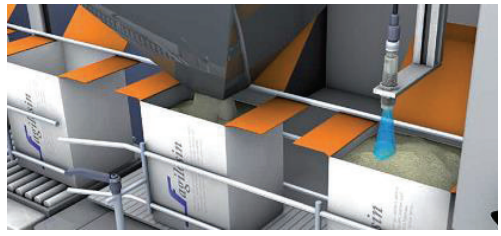


Roboti paiknemiskoha kindlaksmääramine



Lõtvuse kontrollimine

Kvaliteedi kontrollimine



Puistematerjaliga täituvuse jälgimine

8.5 Radarandurid

Radaranduri tööpõhimõte on sarnane ultraheliandurite põhimõttele, kuid elektromagnet-kiirguse sagedus on kõrgem (gigahertsides). See tähendab ultraheliandurite võrreldes palju lühemat mõõteaega. Lained peegelduvad hästi tahketelt, pooltahketelt ja vedelatelt objektidelt, kaugust nendeni saab mõõta.

Lainekiirguse tüübi alusel jaotatakse radarandurid kahte tüüpi. Impulssradarid kiirgavad objekti suunas siinuslainete pakette, mille kestus on alla 1 ns. Teist tüüpi radarandurid on FMCW-sagedusmodulatsiooniga pidevlaineandurid, mis kiirgavad ajas lineaarselt muutuva sagedusega sinusoidaalseid elektromagnetlaineid. Tüüpiliselt töötavad need andurid sagedusvahemikes 9–10 GHz või 24–26 GHz, neil on oluliselt suurem kiirgusvõimsus ja keerukam signaalitöötlemise moodul. Radarandurid mõõdavad kaugust mistahes (kuum, külm, keemiliselt aktiivne) vedelikeni (või nende nivood), vedeldatud gaasideni, pastataoliste aineteni, puistematerjalideni ja tahkete kehadeni.

Vastuvõetud signaali tugevus sõltub olulisel määral peegeldusest objektilt. Üldiselt on juhtivad materjalid ja suure dielektrilise läbitavusega objektid head peegeldid, samas paljud dielektrikud neelavad energiat ja peegeldavad sellest väga vähe. Parim objekt mikrolainetega tuvastamiseks on ühtlane ja tasane juhtiv plaat anduri läheduses.

Madala dielektrilise läbitavusega materjalidel, nt sünteetilistel materjalidel on väiksem kiirguspeegeldus kui suure dielektrilise läbitavusega materjalidel. Prahi- ja tolmuosakeste mõju mõõtmistulemusele on üsna väike.

Joonis 8.23 on näidatud kauguse mõõtmise radarandur RR30.DAMO-UGPR.9VF (tootja: Baumer). Anduri mõõtevahemik on 0,5–40 meetrit.

Joonis 8.23 Kauguse mõõtmise radarandur, Baumer

8.6 Nivooandurid

Nivoo mõõtmist on kahte liiki:

- nivoo pidev mõõtmine
- nivoo piirväärtuste tuvastamine.

Nivoo pidev mõõtmine annab infot tegeliku nivoo kohta konkreetsel ajahetkel. Piirväärtuste tuvastamine annab infot, kas on saavutatud kriitiline nivoo.

Nivooandurid on kontaktidega ja kontaktivabad. Kontaktivaba anduri eelised on, et tundlik element ei ole kontaktis mõõdetava ainega ja võime töötada erinevate ainetega. Kontaktidega andureid ei saa kasutada plahvatusohtlike vedelike ja sageli ka mitte agressiivse keskkonna korral.

8.6.1 Nivoo piirväärtuste tuvastamine

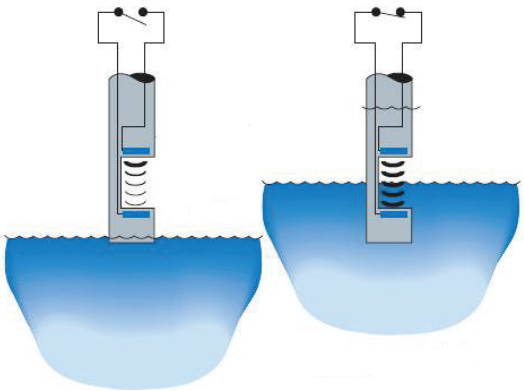
Nivoo piirväärtuste tuvastamise andurid toimivad kui lülitid. Anduri väljundis on loogiline signaal, kui on saavutatud teatud nivoo.

- *Mahtuvuslik nivoolüliti*

Nende andurite tajuriteks on mahtuvuslikud elektroodid. Iga kord, kui vedelik vm aine ulatub kohani, kus paikneb andur, muutub anduri mahtuvus ja rakendub lüliti. Sellist andurit saab kasutada erinevat liiki vedelike ja puisteainete nivoo piirväärtuste mõõtmiseks.

- *Ultrahelilüliti*

Ultrahelilüliti mõõdab peegeldunud signaali vastuvõtmise aega. Kui aeg langeb etteantud piirväärtusega kokku, siis genereeritakse väljundis loogiline signaal.
Joonis 8.24 on näidatud veel üks ultraheliga töötav nivoolüliti. Saatja genereerib ultrahelisignaali ja vastuvõtja võtab selle vastu. Läbi õhu liikuv signaal jõuab vastuvõtjani oluliselt väiksema amplituudiga. Kui aga on tegemist vedelikuga, siis on vastuvõetud ultrahelisignaal suurema amplituudiga. Kui vastuvõtja saab suurema amplituudiga signaali, siis genereerib sellega ühendatud elektroonikaahel signaali, mis näitab vedeliku olemasolu.



Joonis 8.24 Ultraheliga nivoolüliti vedelike jaoks

- *Juhtivusandur*

Juhtivusanduri korral on mahutisse paigutatud elektroodid, mis mõõdavad aine takistust. Kui mahuti on tehtud metallist, siis võib see funktsioneerida ühiselektroodina ja andur sisaldab sel juhul ainult ühte elektroodi.

- *Ujuklüliti*

Vedeliku tihedus on piisavalt suur, et selle pinnale saaks panna ujuki. Ujukis on püsimagnet, mis tekitab piisavalt tugeva magnetvälja, et rakendada keellüliti, mis on paigaldatud tuvastamist vajava nivoo tasemele. Kahte erineva ujuvusega ujuki kasutamise korral on mahutis võimalik mõõta kahe mitteseguneva vedeliku (nt vesi ja õli) taset.

1 *Valguskiud-nivoolülitid*

Nende lülitite tööpõhimõte seisneb selles, et valguskiu omadused muutuvad, kui vastava peegeldusteguriga vedelik ulatub valguskiu otsani.

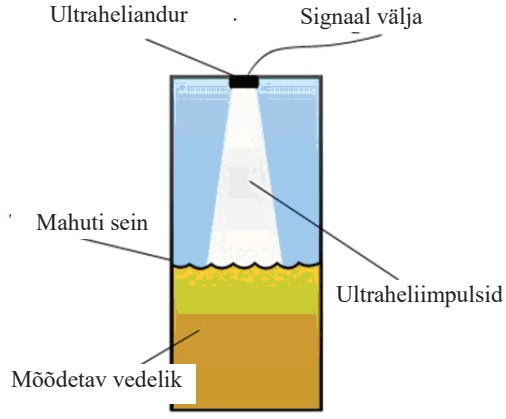
8.6.2 Nivoo pidev mõõtmine

- *Mahtuvuslikud nivooandurid*

Mahtuvuslikud nivooandurid sobivad erinevate vedelike (vee, õli, bensiini, leeliste, hapete jne) nivoo mõõtmiseks. Neid andureid kasutatakse laialdaselt, sest nende hooldus on lihtne, ei ole liikuvaid osi, need on väga töökindlad ja pika kasutuskestusega, primaarmuundurit on lihtne paigaldada, neid saab kasutada laias temperatuuride ja rõhkude vahemikus (kuni 6 MPa).
Üldiselt oleneb mahtuvuslike andurite konstruktsioon sellest, kas vedelik on elektrit juhtiv või mitte. Erinevus seisneb põhiliselt nivooanduri ühe elektroodi isolatsioonis, kui seda kasutatakse elektrit juhtiva vedeliku nivoo mõõtmiseks. Mittejuhtivate vedelike korral aga ei ole elektroodid isoleeritud. Elektroodid võivad olla silindrilised või plaadikujulised. Kui mahuti on metallist, siis võib teise elektroodina kasutada mahutit.
Mahtuvuslikke nivooandureid ei saa kasutada viskoossete, lenduvate, mürgiste, sadestuvate ja kristalliseeruvate vedelike nivoo mõõtmiseks.

- *Ultraheliga nivooandurid*

Seda tüüpi kontaktivabasid andureid kasutatakse vedelike ja puisteainete nivoo piirväärtuse mõõtmiseks (Joonis 8.25). Andurist väljuv ultraheli peegeldub kontrollitavalt ainelt ja nivood hinnatakse signaali saatmise ja peegeldunud signaali vastuvõtmise vahele jääva aja järgi. Ultraheliandurіga saab mõõta tolmuses ja suitsuses keskkonnas, samuti suure müra tingimustes.



Joonis 8.25 Nivoo mõõtmine ultraheliga

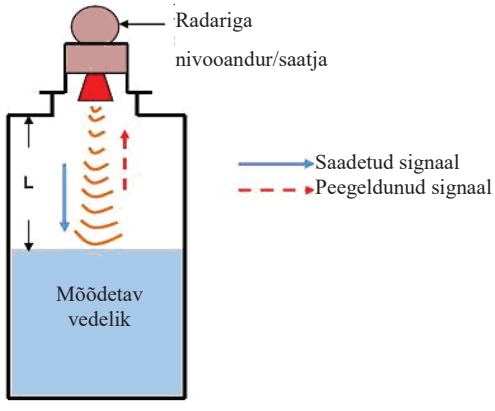
Peale selle võimaldavad need andurid mõõta kaugust mistahes kuju, värvuse ja suurusega mistahes materjalist objektini. Ultraheliandurite töösagedus on umbes 40 kHz. Mõõteulatus on tavaliselt kuni 20 m ja soovitatav ümbritseva keskkonna temperatuur 0–30 °C.
Ultraheliandurite põhiline puudus on, et neid ei saa kasutada rakendustes, kus on suur turbulents või eraldub palju auru, vahtu või esinevad töödeldava aine suured kontsentratsioonimuutused. Turbulents ja vaht tekitavad vigu ultraheli tagasipeegeldamisel andurisse, sest aur ja aurustumine neelavad akustilist signaali.

Ultrahelimeetodiga saab mõõta olenemata vedeliku tiheduse ja dielektriliste omaduste muutumisest. Ultraheliandurid töötavad nii puhaste kui ka kleepuvate ja agressiivsete vedelikega, tahkete osakeste olemasolul, samuti ka teatud suspensioonide ja aereeritud vedelikega. Ultraheliandurid sobivad kasutamiseks ka agressiivsete ja abrasiivsete ainete korral. Neid saab kasutada ka siis, kui aine elektrilised parameetrid muutuvad, samuti plahvatusohtlike ainete nivoo mõõtmiseks mahutites.
Joonis 8.26 on näidatud ultraheliandur Rosemount 3100 (tootja Emerson).

Joonis 8.26 Ultraheliandur Rosemont 3100 (tootja Emerson)

- *Radariga nivooandurid*

Radariga nivooanduri tööpõhimõte kasutab ära mikrolainekiirguse peegeldumist vedeliku või puistematerjali pinnalt (Joonis 8.27).
Mõõdetakse signaali saatmise ja peegeldunud signaali vastuvõtmise vahele jäävat aega. Selle ajavahemiku järgi on võimalik määrata vedelikunivoo kaugus andurist.
Radaranduritel on muude nivooanduritega võrreldes mitmeid eeliseid: suur tööulatus (kümnete meetriteni), vedelikunivoo pidev mõõtmine rasketes tingimustes (kõrge rõhk ja temperatuur), vastupidavus mustusele ning kontrollitava pinna vahutamisele ja aurustumisele, suur mõõtetäpsus (kuni ±1 mm). Seda tüüpi andurite põhiline puudus on nende kõrge hind.



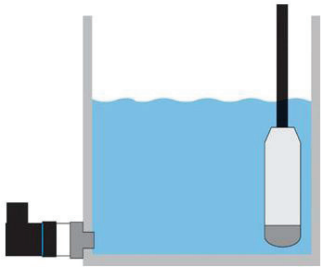
Joonis 8.27 Nivoo mõõtmine radaranduriga

Joonis 8.28 on näidatud radarandur Rosemount 5408 (tootja Emerson). Andurite mõõteulatus on 40 meetrit täpsusega ±2 mm.

Joonis 8.28 Radariga nivooandur Rosemount 5408 (tootja Emerson)

- *Hüdrostaatilised nivooandurid*

Vedeliku või puisteaine rõhk on võrdeline nende kihi paksusega (nivoo). Nende andurite tööpõhimõte seisneb vedeliku hüdrostaatilise rõhu erinevuse tuvastamises mahuti põhjas ja vedeliku pinna kohal.
Hüdrostaatilised nivooandurid mõõdavad vedeliku rõhku mahuti põhjas. Erinevat tüüpi andurid on paigaldatud erinevalt: kinnitatud mahuti põhja või paigaldatud väljastpoolt ääriku abil (Joonis 8.29).



Joonis 8.29 Hüdrostaatiliste andurite paiknemine mahutis

Hüdrostaatilisi andureid on kerge paigaldada ja need on suure töökindlusega. Neid kasutatakse vee, kütuste, määrdeõlide, kemikaalide jms nivoo mõõtmiseks. Neid saab kasutada plahvatusohtlikus keskkonnas. Joonis 8.30 on näidatud hüdrostaatilised nivooandurid (tootja Emerson).

Joonis 8.30 Hüdrostaatilised nivooandurid (tootja Emerson)

8.7 Teadmiste kontroll

1. Mis erinevus on normaalselt avatud ja normaalselt suletud lülitil (kontaktil)?
a) pole erinevust;
b) Normaalselt avatud lüliti, olles mitteaktiivses olekus, hoiab elektriahela katkestatuna, aga normaalselt suletud lüliti, olles mitteaktiivses olekus, hoiab elektriahela suletuna;
c) normaalselt avatud lüliti , olles mitteaktiivses olekus, hoiab elektriahela suletuna, aga normaalselt suletud lüliti, olles mitteaktiivses olekus, hoiab elektriahela katkestatuna.
d) Mõlemat tüüpi lülitid, olles mitteaktiivses olekus, hoiavad elektriahela katkestatuna.

2. Läheduse andurid on:
a) kontaktandurid;
b) kooderid,
c) kontaktivabad andurid.

3. Sõltuvalt füüsilisest tööpõhimõttest võivad läheduse andurid olla:
a) pöörisvooluandurid;
b) mahtuvuslikud andurid;
c) induktiivandurid;
d) tensoandurid;
e) termistorid;
f) ultraheliandurid.

4. Pöörisvooluanduri töö põhineb:
a) mähise elektriliste parameetrite väärtus muutub kui selle lähedal on elektrit juhtiv objekt;
b) mähise mõõtmed muutuvad kui selle lähedal on elektrit juhtiv objekt;

c) infrapunase signaali kasutamisel;
d) objekti vahetul mehhaanilisel mõjul anduri konstruktsioonile.

5. Ultraheli andur sisaldab:
a) ainult kiirgurit;
b) kiirgurit ja vastuvõtjat;
c) magneetimismähist;
d) fototransistorit.

6. Mis efekti kasutatakse objektide tuvastamiseks difusioonmeetodi korral?
a) tuvastatav objekt peegeldab valgust;
b) valgust peegeldatakse spetsiaalse peegliga;
c) kiirgur ei saada välja valgussignaali.

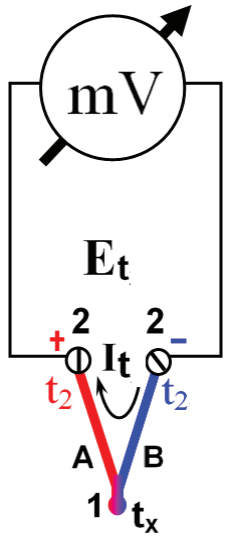
7. Mis vahe on tõkestusmeetodil ja peegeldusmeetodil kui objekte tuvastatakse optiliste anduritega?
a) nendel meetoditel pole erinevust;
b) tõkestusmeetodi korral on kiirgur ja vastuvõtja kõrvuti (külg-külje kõrval), kusjuures peegeldusmeetodi korral on need paigutatud üksteise vastu;
c) peegeldusmeetodi korral on kiirgur ja vastuvõtja kõrvuti (külg-külje kõrval), kusjuures tõkestusmeetodi korral nad on üksteise vastas.

8. Mis tüüpi ultrahelianduril esineb nn. pimetsoon?
a) kinnikatmisega andurite kasutamisel; korral;
b) Hajuefektiga andurite kasutamisel;
c) kinnikatmisega ja hajuefektiga andurite kasutamisel;
d) peegeldavate andurite kasutamisel.

9 TEMPERATUURIANDURID

9.1 Termoelektrilised andurid

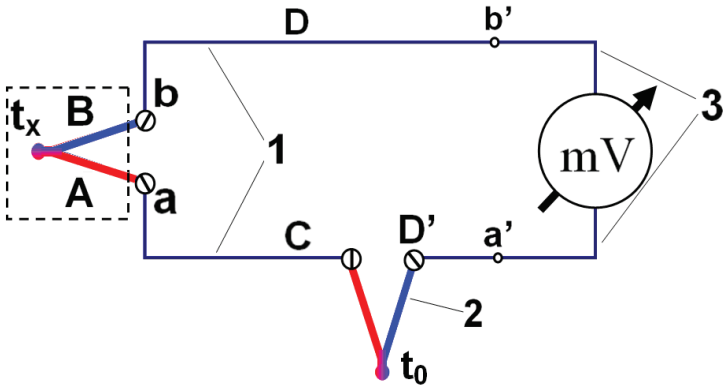
Sellesse rühma kuuluvad termopaarid (Joonis 9.1). Termopaar koosneb kahest erinevast metallist juhist A ja B, mis on ühest otsast kokku keevitatud, moodustades termoelektroodi. On kokku lepitud, et kokku keevitatud otsa nimetatakse kuumaks liiteks ja vaba ehk etalonotsa külmaks liiteks.



1 – kuum liide, 2 – külm liide

Joonis 9.1 Termopaar

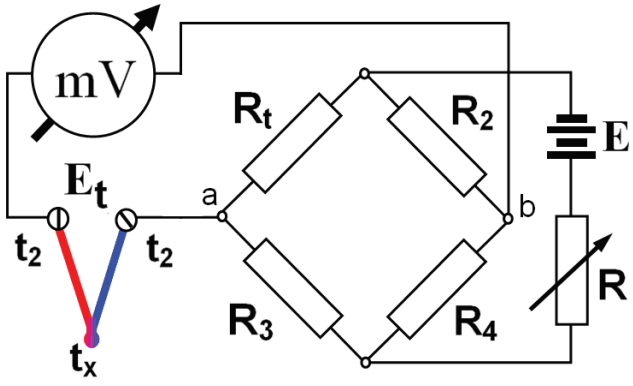
Termopaari töö põhineb Seebecki efektil. Kui kuuma liidet hoitakse temperatuuril $t_1 = t_x$ ja külma liidet temperatuuril t_2 (kusjuures $t_1 > t_2$), siis genereeritakse kahe teise otsa vahel elektromotoorjõud/pinge E_t, mis on kahe temperatuuri erinevuse funktsioon.
Seda efekti nimetatakse ka termoelektriliseks efektiks. Kui hoida t_2 konstantne, on temperatuuri võimalik mõõta.
Parim viis on hoida külmad liited etalontemperatuuril 0 °C või vähendada genereeritud pinget, kuni see saavutab väärtuse, mis vastab 0 °C. Seda nimetatakse külma liite kompenseerimiseks.
Temperatuuri jm mitteelektriliste väärtuste mõõtmiseks ei ole praktikas harilikult võimalik rakendada joonisel 9.1 esitatud lihtsustatud skeemi. Kaugus mõõdetava objektini on üldjuhul suur ja et termilised elektroodid on valmistatud kallist metallist, siis ei ole mõistlik neid traate teha pikkadena. Sel juhul kasutatakse pikendusjuhtmeid C ja D, mis võimaldab hinda oluliselt vähendada (Joonis 9.2).



1 – pikendusjuhtmed, 2 – kompenseeriv termopaar, 3 – vaskjuhtmed

Joonis 9.2 Termopaari ühendamine pikendusjuhtmete abil

Et need need elektroodid ei põhjustaks täiendavat viga, kui ümbritsev temperatuur muutub, peavad need elektroodid olema termiliselt identsed elektroodidega A ja B (A C-ga ja B D-ga ja D'-ga). Metalle, mis teise metalliga ühendatuna ei moodusta temperatuurivahemikus 0–10 °C termopaari, nimetatakse termiliselt identseteks.
Joonis 9.2 näidatud skeemil kasutatakse kompenseerivat termopaari, mis on mõõtva termopaari külma liite temperatuuril.
Külma liite temperatuuri muutusest põhjustatud vea kompenseerimiseks on laialt levinud sellise ahela kasutamine, milles on termotakistiga Rt sild (Joonis 9.3).



Joonis 9.3 Termopaari ühendusskeem külma liite temperatuuri kompenseerimisega termotakisti abil

Kasutatakse ka külma liite temperatuuride mõju tarkvaralist kompenseerimist. Sel juhul mõõdetakse külma liite juures temperatuuri termoanduriga ja saadud info abil tehakse korrektsioon tundmatu temperatuuri väärtuse määramisel.

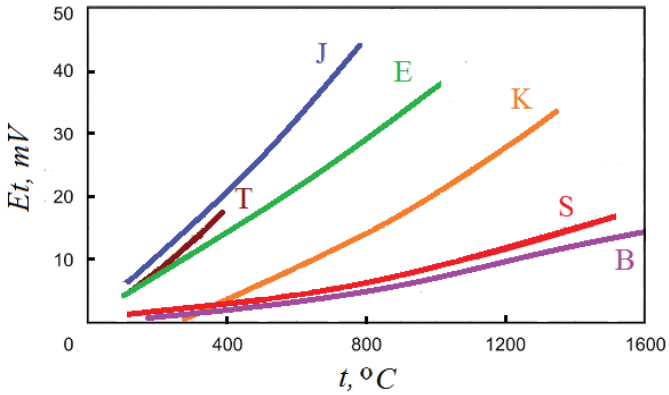
Termopaaride muundusfunktsioon on mittelineaarne. Laiatarbetermopaaride jaoks esitakse andmed tabelina, kus termopinge E_t väärtus on näidatud temperatuuri muutumise sammuga 1 °C, kui $t_2 = t_o = 0$ °C.
Muutuva temperatuuri mõõtmise võimalus termopaariga on piiratud suure soojusliku inertsi tõttu, mis ulatub 10 sekundist 10 minutini.
Tabelis 9.1 on esitatud enamlevinud termopaaritüüpide põhiandmed.
T-tüüpi termopaarid on korrosioonikindlad ja seetõttu saab neid kasutada niiskes keskkonnas. Neid sobib kasutada miinustemperatuuridel. Agressiivses keskkonnas on nende ülemine tööpiir vaskelektroodide oksüdeerumisohu tõttu 370 °C. Neid termopaare saab muudes keskkondades kasutada ka kõrgematel temperatuuridel.
J-tüüpi termopaarid sobivad tööks vaakumis ja inertsgaasides ning oksüdeerivas ja redutseerivas keskkonnas. Nende tööpiirkond on 0–760 °C. Temperatuuril 540 °C on rauast termoelementide oksüdeerumine kiire. Kui termopaarid peavad kõrgel temperatuuril töötama pikka aega, peab kasutama jämedat juhti. Seda tüüpi termopaare ei ole hapruse ja korrosiooniohu tõttu soovitatav kasutada temperatuuril alla 0 °C. Sellistel temperatuuridel on parem kasutada T-tüüpi termopaare.

Tabel 9.1 Enamlevinud termopaaritüüpide põhiandmed

Tüüp	Elektroodide materjal	Tööpiirkond (°C)
T	vask-konstantaan (vase ja nikli sulam)	–200 ... 370 °C
J	raud-konstantaan	0 ... 760 °C
E	konstantaan-kromell (nikli ja kroomi sulam)	–200 ... 900 °C
K	kromell-alumell (nikli, mangaani, alumiiniumi ja räni sulam)	–200 ... 1260 °C
R ja S	plaatina-roodiumi sulam – plaatina	0 ... 1480 °C
B	plaatina-roodiumi sulam (30%) – plaatina-roodiumi sulam (6%)	870 ... 1700 °C

E-tüüpi termopaare on soovitatav kasutada temperatuurivahemikus –200 ... 900 °C oksüdeerivas või inertgaasi keskkonnas. Neid ei tohi kasutada redutseerivas keskkonnas ega vaakumis. E-tüüpi termopaare saab kasutada miinustemperatuuride mõõtmiseks, sest need ei korrodeeru suure niiskusesisaldusega keskkonnas. Need termopaarid annavad muud tüüpi termopaaridega võrreldes kõige kõrgemat termopinget ja seepärast kasutatakse neid kõige sagedamini.
K-tüüpi termopaare kasutatakse oksüdeerivas või täiesti inertses keskkonnas temperatuurivahemikus –200…1260 °C. Need on oksüdeerumisele vastupidavad ja seetõttu kasutatakse neid sageli temperatuuril üle 540 °C. Siiski ei peaks seda tüüpi termopaare kasutama redutseerivas keskkonnas, väävlisisaldusega keskkonnas ega vaakumis.
R- ja S-tüüpi termopaarid on ette nähtud pidevaks kasutamiseks oksüdeerivas või inertses keskkonnas temperatuurivahemikus 0–1480 °C.
B-tüüpi termopaarid sobivad pidevaks kasutamiseks oksüdeerivas või inertses keskkonnas temperatuurivahemikus 870–1700 °C. Võib kasutada ka lühiajalisel mõõtmisel vaakumis. Neid termopaare ei soovitata kasutada redutseerivas keskkonnas, mis sisaldab metalseid või mittemetalseid aurusid. Neid ei tohi kunagi paigutada metalsetesse kaitsekatetesse.

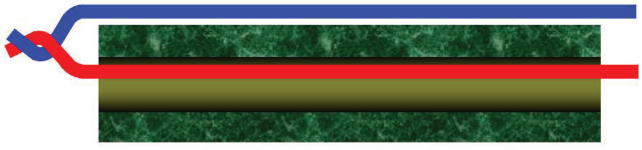
Joonis 9.4 on näidatud erinevat tüüpi termopaaride karakteristikud, kui külma liite temperatuur on 0 °C.



Joonis 9.4 Erinevat tüüpi termopaaride karakteristikud

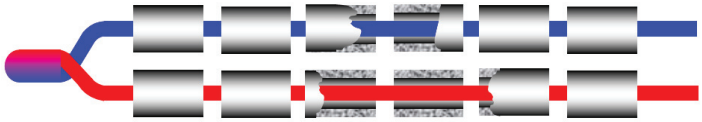
Keemiliselt agressiivse keskkonna mõju eest kaitsmiseks paigutatakse termopaar kaitsekattesse. Kate peab olema gaasitihe, mehaaniliselt tugev ja hea soojusjuhtivusega. Kuumutamise tagajärjel ei tohi katte materjal eritada termopaari elektroodidele kahjulikke gaase ega aurusid. Väärismetallist tehtud termopaaride katted on kvartsist või keraamilisest materjalist, muude tüüpide korral kasutatakse eriterast.
Joonis 9.5 on skemaatiliselt näidatud termopaaride erinevaid isoleerimisviise.

a – keevitatud isoleerimata keerdpaarjuhid



b – plasttorus juhid

c – isoleeritud juhid

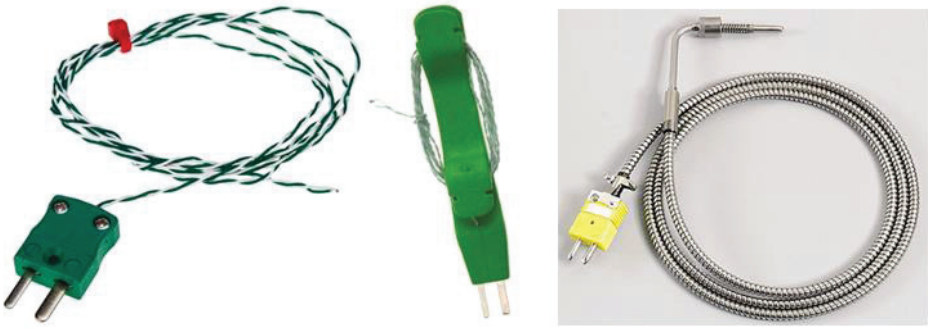


d – kinnitatud ja keevitatud juhid keraamilises isolaatoris

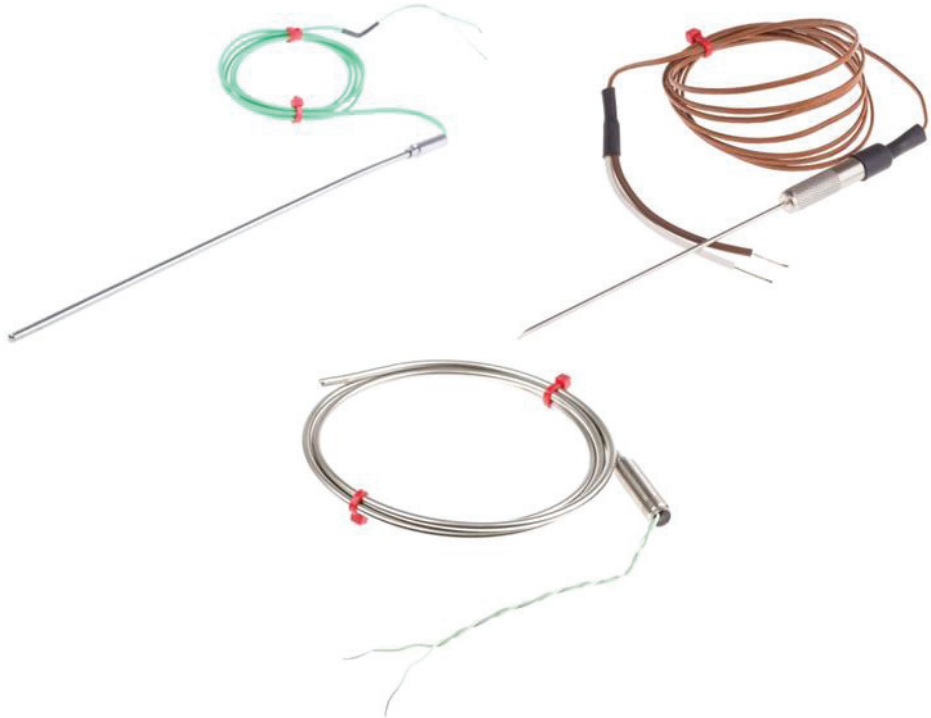
Joonis 9.5 Termopaari juhtide isoleerimise erinevad viisid

Erinevad ettevõtted pakuvad termopaaride laia valikut erinevate rakendusviiside ja kasutuseesmärkide jaoks.
Tootjad pakuvad termopaare, mida saab kasutada eraldi tundlike elementidena või termotundlike sõlmede komponentidena. Termopaare toodetakse erinevat tüüpi kaitsekatete ja isolatsiooniga, samuti termotundliku elemendi erineva konstruktsiooniga (Joonis 9.6 – 9.22).

Joonis 9.6 Erineva kaitstuse ja termotundliku elemendi erineva konstruktsiooniga termopaarid

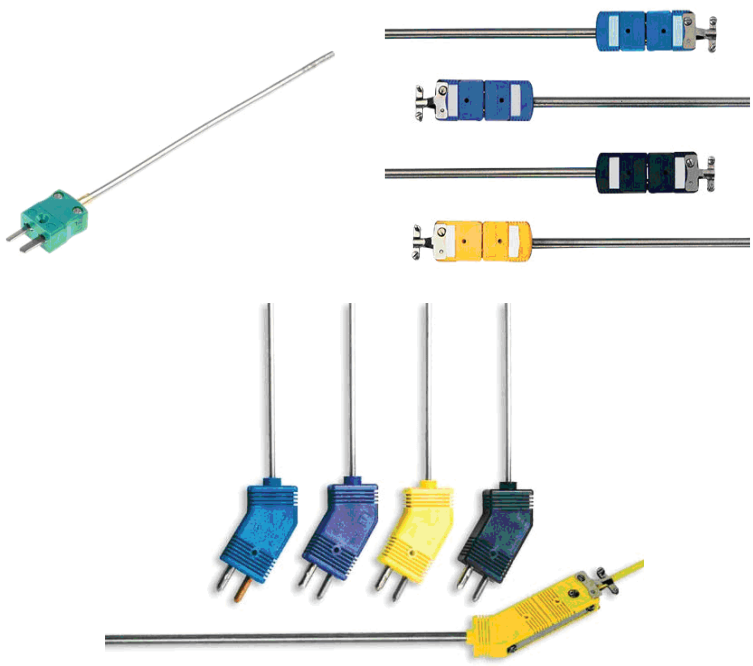


Joonis 9.7 Ühenduspistikuga termopaarid

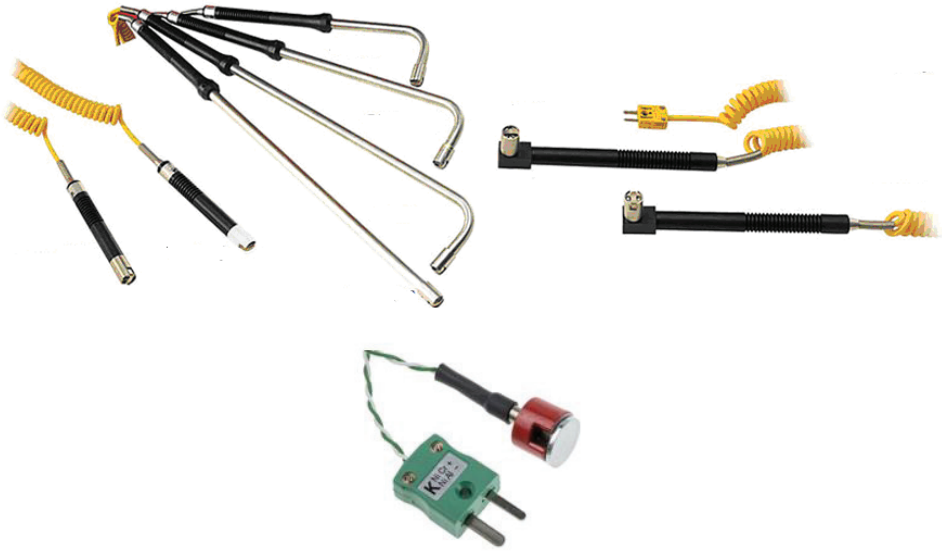


Joonis 9.8 Termopaar-mõõteandurid

Joonis 9.9 Käepidemega termopaar-mõõteandurid



Joonis 9.10 Pistikuga termopaar-mõõteandurid



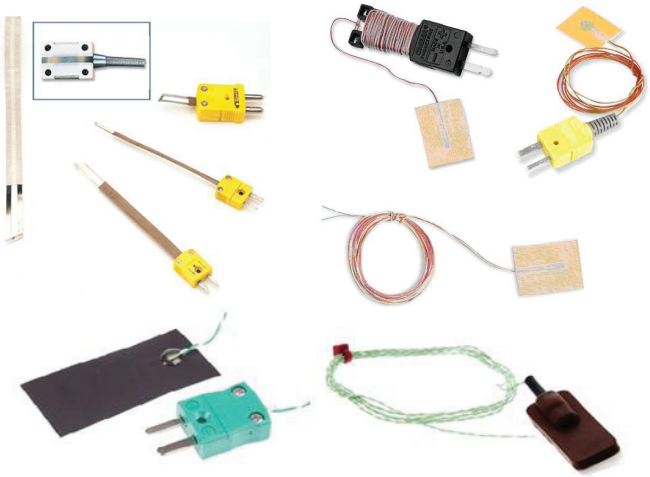
Joonis 9.11 Pinnatemperatuuri termopaar-andurid

Joonis 9.12 Unikaalsed ümarotsaga andurid plaatide, seinte, vormide, matriitside jm püsiobjektide pinnatemperatuuri mõõtmiseks

Joonis 9.13 Unikaalsed plokkotsaga termopaar-andurid, pinna liikumise korral paindumise minimeerimiseks varustatud klambriga

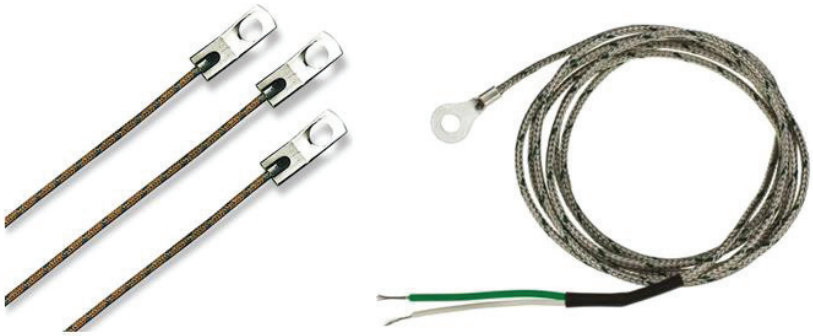
Joonis 9.14 Rullikutega otsaga termopaar-andurid

Joonis 9.15 Magnetpaigaldusega termopaarid



Joonis 9.16 Leht-tüüpi termopaarid ja kleepuva pinnaga termopaarid

Joonis 9.17 Silindriliste objektide pinnatemperatuuri termopaar-andurid

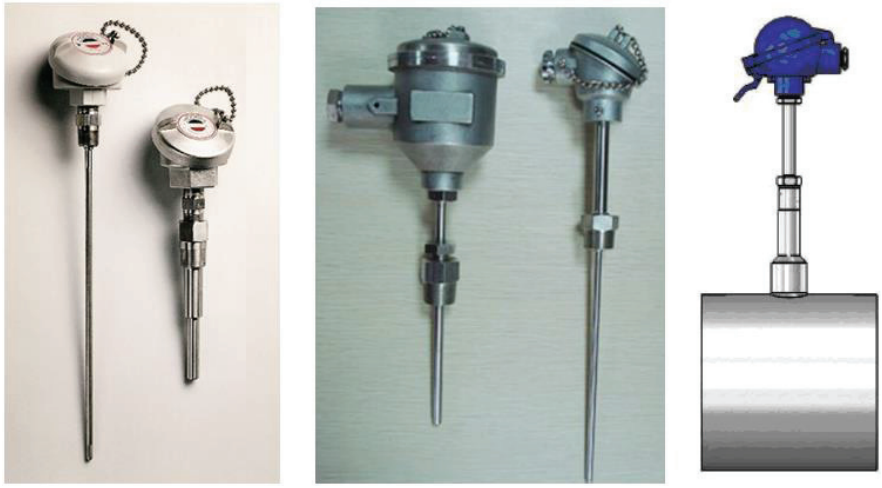


Joonis 9.18 Seib-kinnitusega termopaarid poltühenduste jaoks

Joonis 9.19 Poldikujuline termopaar kaablisukaga

Joonis 9.20 Paigalduskeermega termopaarid

Joonis 9.21 Toruliitmikuga termopaar-andur



Joonis 9.22 Ühenduspeaga termopaar-andurid

9.2 Termotakistuslikud andurid

Termotakistuslikud andurid on juhid või pooljuhid, mille takistus sõltub tugevalt temperatuurist.

Termotakistuslikelt materjalidelt nõutavad põhiomadused:

- suur takistuse temperatuuritegur (TCR)
- kuumakindlus
- suur eritakistus. See on oluline väikeste mõõtmetega andurite valmistamiseks.

9.2.1 Metallilised termotakistid (RTD)

Juhtivuslikud termotakistid (takistuslikud termoandurid, RTD) on enamasti valmistatud puhtast metallist, sest sulamitel on väiksem takistuse temperatuuritegur. Peale selle on puhaste metallide takistuse temperatuurisõltuvus hästi teada ja neid metalle sisaldavate

mõõteseadmete korral saab kasutada standardset kalibreerimist. Praktikas kasutatakse vaske, plaatina ja niklit.
Laialdaselt on kasutusel kolm RTD konstruktsioonitüüpi.

1) Õhukese kelmega RTD – plaatina või klaasmetallsegu on sadestatud väikesele tasasele keraamilisele alusele. See on kolmest konstruktsioonitüübist kõige täpsem ja tugevam.

2) Traatmähisega RTD – keraamilisel või klaassüdamikul on plaatinast jm metallist traadist mähis. Südamik on seejärel kaetud spetsiaalse sulaklaasiga.

3) Osalise mähisega RTD – keraamilises isolaatoris paikneb väike traatmähis.

Vasest termotakistid. Nende termotakistite valmistamiseks kasutatakse elektrolüütilist vaske. Seda saab kuumutada temperatuurini 180 °C. Kõrgemal temperatuuril algab oksüdeerumine. Sellise takisti takistus muutub lineaarselt temperatuurivahemikus 20–180 °C.
Vase kasutamist piirab väike eritakistus. Elektrolüütilisel vasel on ρ = 1,75x10^{-8} Ω m.

Niklist termotakistid. Kuni 280 °C töötava termotakisti valmistamiseks saab kasutada niklit, kui see on ümbritseva keskkonna mõjude eest hästi isoleeritud. Kõrgemal temperatuuril on temperatuurisõltuvus ebamäärane. Temperatuurivahemikus 0–100 °C muutub takistus lineaarselt.
Nikli elektrilised omadused sõltuvad metalli puhtusest ja kuumtöötlusest. Selle materjali peamised eelised on: suur eritakistus ρ = (7,5–8,5) x 10^{-8} Ωm ja suur temperatuuritegur. Need omadused võimaldavad toota väikeste mõõtmetega termotakisteid.

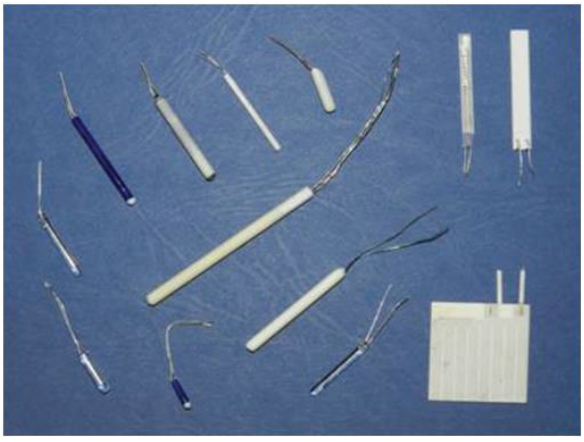
Plaatinast termotakistid (plaatinatakistiga termomeetrid). Plaatina on keemiliselt stabiilne ja väga heade plastiliste omadustega. Seda saab oksüdeerumise või sulamiseta kuumutada temperatuurini 1475 °C. Selle materjali kasutamist piirab takistuse mittelineaarne temperatuurisõltuvus.
Plaatinast takistuslikul termomeetril on palju eeliseid. Need seadmed on väga täpsed, laia tööpiirkonnaga, sobivad täppisrakendustesse ja neil on väike triiv. Standardsed plaatinast takistuslikud termomeetrid on kõige täpsemad RTD-d.
Vasest termotakisteid on näidatud joonisel 9.23.

Joonis 9.23 Vasest termotakistid

Joonisel 9.24 on näidatud õhukese kelmega, suletud korpusega, traatmähisega, kaitsva isolatsiooniga ja ühenduspeaga niklist termotakistid.

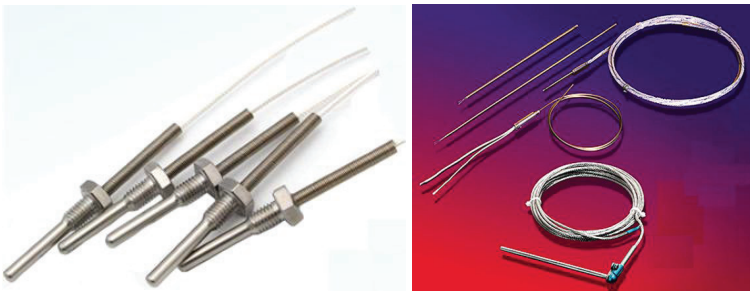
Joonis 9.24 Niklist termotakistid

Joonis 9.25 on näidatud plaatinast termotakisteid, mis sobivad paigaldamiseks terasest kaitsetorusse või tasapinnale.



Joonis 9.25 Plaatinast termotakistid

Joonis 9.26 on kujutatud erinevat tüüpi plaatinast temperatuuriandureid.



Joonis 9.26 Plaatinast temperatuuriandurid

Joonis 9.27 on näidatud plaatinast termotakistitega takistuslikke ühenduspeaga termomeetreid.

Joonis 9.27 Ühenduspeaga plaatinast temperatuuriandurid

On olemas ka temperatuuriandurid Pt100/Pt1000 käsitsi kasutamiseks. Joonis 9.28 on näidatud selliseid andureid.

Joonis 9.28 Temperatuuriandurid Pt100/Pt1000 käsitsi kasutamiseks

9.2.2 Termistorid

Termistorid on pooljuhiga takistuslikud andurid, millel on suur temperatuuritegur laias temperatuurivahemikus. Neid toodetakse tilgakujuliste, lamedate või silindrilistena.

Olenevalt temperatuuriteguri (TCR) märgist on kahte tüüpi termistore: negatiivne temperatuuriteguriga termistorid, mille takistus väheneb temperatuuri tõustes (NTC-termistorid) ja positiivse temperatuuriteguriga termistorid, mille takistus suureneb temperatuuri tõustes (PTC-termistorid).

NTC-termistorid valmistatakse Mn-, Ni-, Co-, Cu- ja Fe-oksiidide segust.

Termistoridel on temperatuurist tugevasti sõltuv negatiivne takistuse temperatuuritegur, mis on 8–10 korda suurem kui metallidel.

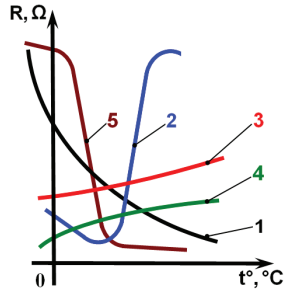
Nende termistoride eritakistus on märgatavalt suurem. See võimaldab toota väikeste mõõtmete ja väiksema inertsusega termistore. Teisest küljest – termistoridel on mittelineaarne karakteristik, mis ei ole ka sama tüüpi termistoridel päris identne. See teeb nende vahetatavuse tülikaks. Need termistorid on tundlikud niiskuse suhtes ja on niiskuse eest kaitsmiseks kaetud lakkisolatsiooniga.

PTC-termistorid ehk posistorid saab pooljuhi materjali tüübi ja omaduste alusel jagada kahte põhimõtteliselt erinevasse rühma.

Esimeses rühmas on väikese plaadi kujulise pooljuhiga (harilikult räni) termistorid, millel on vastaskülgedel kaks ühendust. Nende kasutamine põhineb asjaolul, et nii n- kui ka p-tüüpi legeeritud ränikristallidel on positiivne temperatuuritegur krüogeensest kuni temperatuurini +150 °C ja rohkem. Toatemperatuuril on temperatuuritegur umbes 0,8 %/°C.

Teises rühmas on suure positiivse temperatuuriteguriga (kuni 70 %/°C) termoresistorid, mis töötavad piiratumas temperatuurivahemikus. Selliste elementide materjalina saab kasutada polükristalset pooljuhti baariumtitanaati, sest selle temperatuuritegur muutub faasisiirdetemperatuuri (Curie' punkt) lähedastel temperatuuridel suures ulatuses.

Joonisel 9.29 on graafikul näidatud takistuse muutus olenevalt temperatuurist erinevat tüüpi termistoride ja plaatinast termotakisti korral. Neid termistore, mida iseloomustatakse eriti suure temperatuuriteguriga kriitilise temperatuuri tsoonis, nimetatakse arvukates publikatsioonides *kriitilise temperatuuri takistiteks (CTR-termistorid).* Materjalist olenevalt võib takistus kriitilise temperatuuri tsoonis nii kasvada kui ka kahaneda (Joonis 9.29 nt $BaTiO_3$ baasil – kõver 3 ja VO_2 baasil – kõver 5).



1 – negatiivse TCR-ga termistor, 2 – suure positiivse TCR-ga termistor, 3 – positiivse TCR-ga ränitermistor, 4 – plaatinast termotakisti, 5 – termistor negatiivse TCR-ga ja suure takistuse muutusega konkreetses piirkonnas

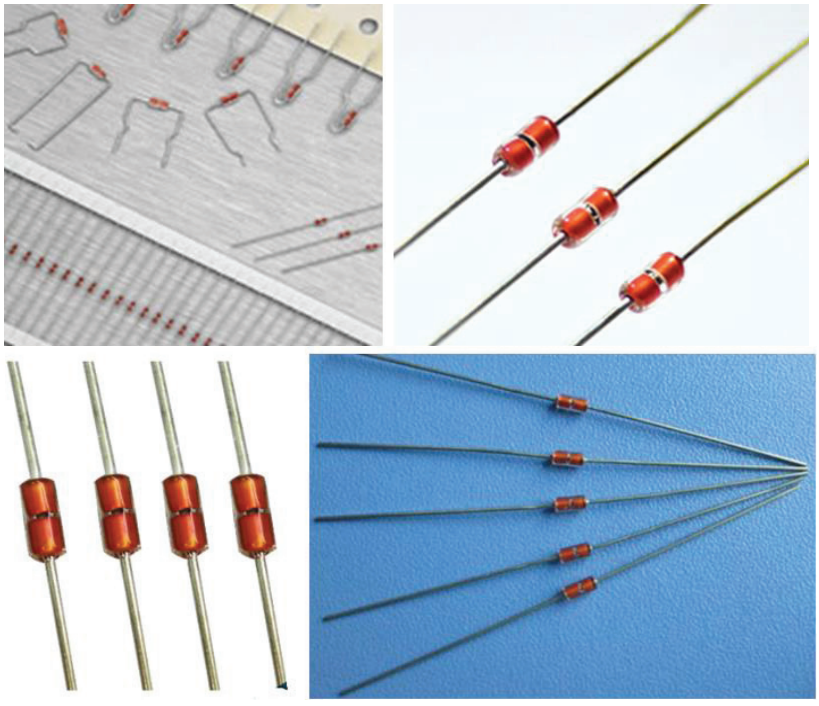
Joonis 9.29 Erinevat tüüpi termistoride ja plaatinast termotakisti karakteristikud

Joonis 9.30 on esitatud erinevate tootjate erinevat tüüpi termistorid.

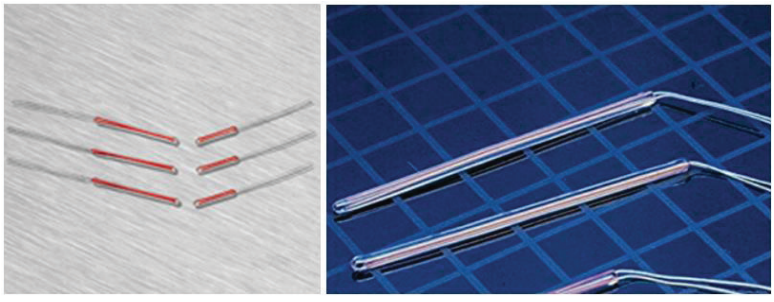
Joonis 9.30 Erinevat tüüpi termistorid

Joonis 9.31 on rühmitatud erinevate tootjate erinevat tüüpi termistorid.

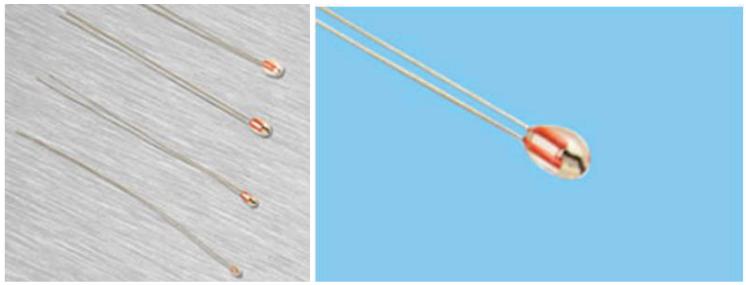
a) Epoksiidvaiguga kaetud termistorid

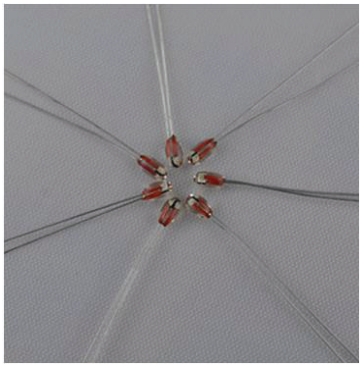


b) Klaasiga kaetud termistorid (viigud teljel)

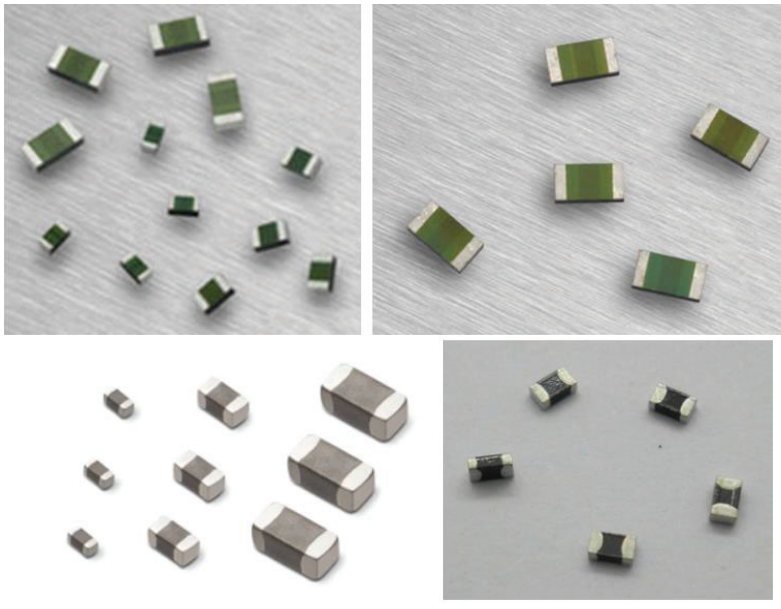


c) Klaasiga kaetud otstermistorid

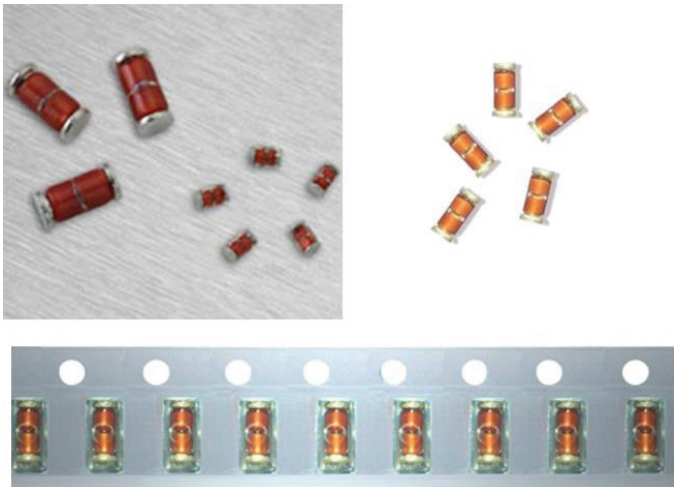




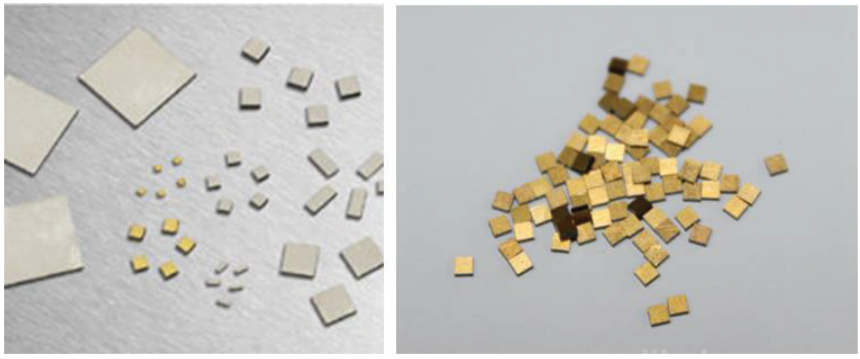
d) Klaasiga kaetud kiiptermistorid



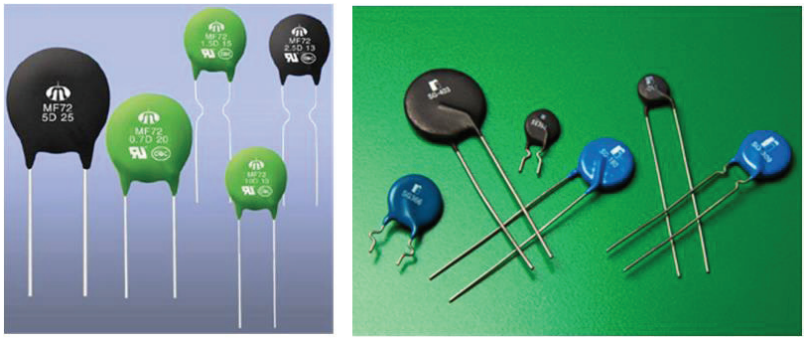
e) Otsakontaktidega kiiptermistorid



f) MELF-termistorid (viiguta metallelektroodotsaga)



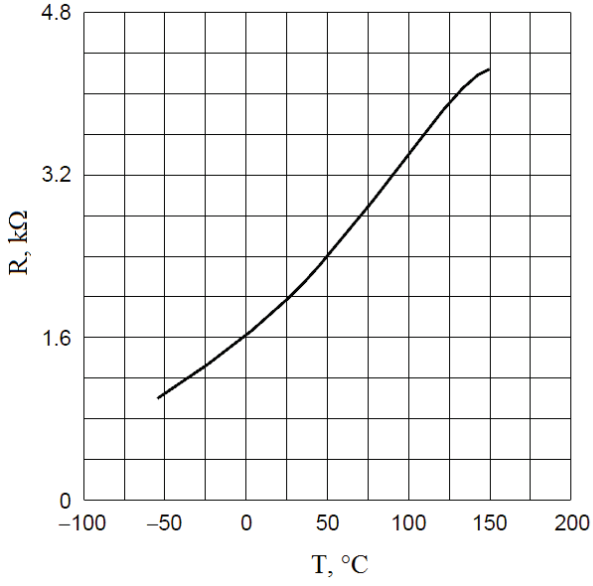
g) Viiguta kiiptermistorid, kontaktid üla- ja alapinnal



h) Termistorid voolupiiramis- ja käivitusahelate jaoks

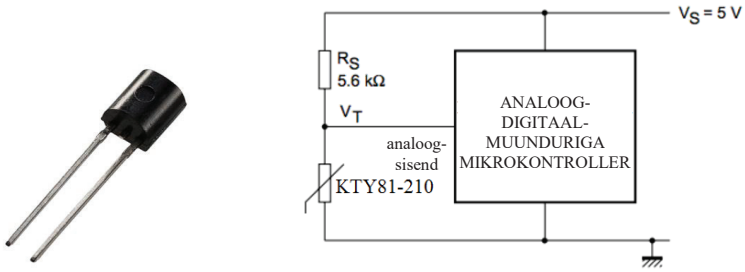
Joonis 9.31 Väliskuju järgi rühmitatud termistorid

Ränist temperatuuriandurid Philips KTY81 sisaldavad n-tüüpi ränikiipi (mõõdud 500x500x240 mikromeetrit), mis on ühelt küljelt metalliseeritud ja teiselt küljelt kontaktiga. Räniandurи tundlikkus positiivse temperatuuriteguri korral on 0,7 %/°C. Joonis 9.32 on esitatud anduri KTY81-210 karakteristik. Karakteristiku saab lähendada teise astme polünoomile, anduri tööpiirkond on vahemikus –50 ... +150 °C.



Joonis 9.32 Anduri KTY81-210 karakteristik

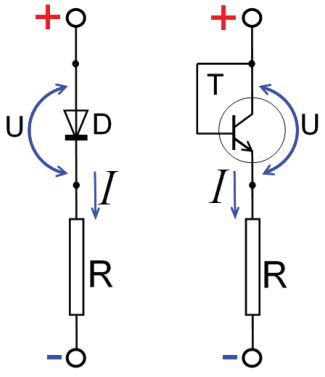
Joonis 9.33 kujutab andurit KTY81-210 ja selle ühendusskeemi mikrokontrolleri analoog-sisendiga.



Joonis 9.33 Ränist temperatuuriandur KTY81-210 ja selle ühendamine mikrokontrolleriga

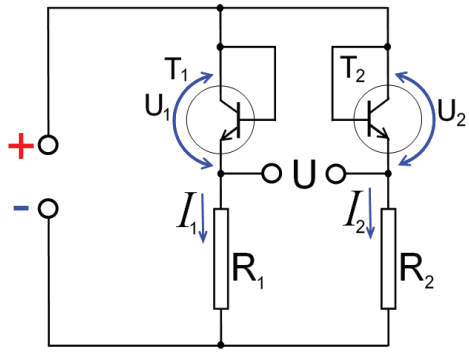
9.3 Termodioodid, termotransistorid ja integreeritud temperatuuriandurid

Need on pooljuhtelemendid temperatuuride mõõtmiseks vahemikus 80–150 °C. Nende tööpõhimõte põhineb pn-siirde takistuse temperatuurisõltuvusel. Dioode kasutatakse päripingega, ka transistorid on päripinge all, kuid dioodiahelas (Joonis 9.34).



Joonis 9.34 Termodiood ja termotransistor

Tundlikkus oleneb pn-siirde vastuvoolust. Dioodide ja transistorite vastuvool on märgatavalt erinev ja seetõttu ei ole need omavahel praktiliselt vahetatavad.
Eeliseks on nende madal hind.
Vastuvoolu mõju saab märgatavalt vähendada ja saavutada parem lineaarsus, kui samas korpuses kasutada kahte transistorit (joonis 9.35).
Sellise transistorite paari saab valmistada ühel kristallil nagu kiibi. Siis on integreeritud transistorite parameetrid paremad ja anduri karakteristik on peaaegu lineaarne. Näitena võib vaadelda lineaarse karakteristikuga kiipi AD390. Väljundsignaaliks on vool. Tööpiirkond on –55 … 150 °C ja tundlikkus $S_T = 1\,\mu A / K$.

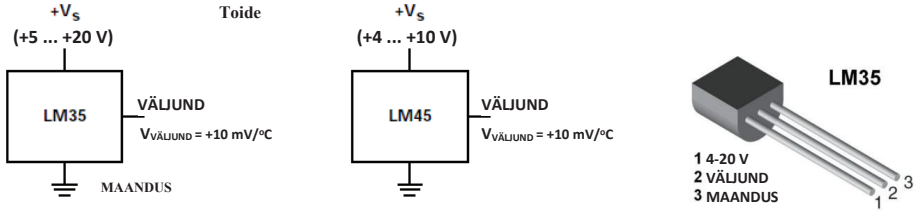


Joonis 9.35 Termotransistorite paar ühes korpuses

Integreeritud temperatuuriandur on koostatud ränikiibile, millel paikneb ka anduri signaali töötlev ahel. Kui süsteemile ei esitata väga erilisi nõudmisi, ei ole temperatuurianduritele vaja lisada kompenseerimis- või lineariseerimisahelaid. Analoogväljundi digikoodiks muundamiseks ei ole vaja eraldi komparaatorit ega analoog-digitaalmuundurit. Need funktsioonid on temperatuurianduri kiipi juba sisse ehitatud. Mõnes integreeritud temperatuurianduris on ka signaalitöötlemise ahelad sisend/väljundliidesega otseühendamiseks mikrokontrolleriga. Kiibid on paigutatud standardsetesse korpustesse, kaasa arvatud sellistesse, mis sobivad pindmontaažiks.
Selliste temperatuuriandurite peamised tootjad on: Analog Devices, National Semiconductor, Texas Instruments, Maxim, Dallas Semiconductor jm. Müügil on järgmist tüüpi integreeritud temperatuuriandureid:

- *Analoog-pingeväljundiga temperatuuriandurid*

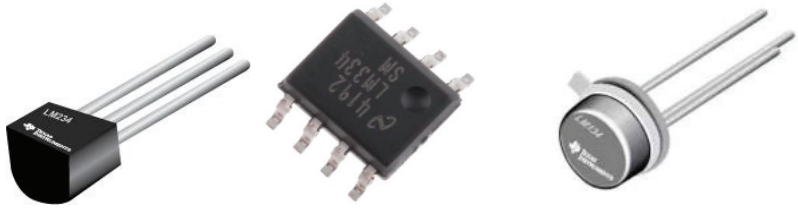
LM35 ja LM45 on temperatuuriandurid, mille väljundil on pinge võrdeline temperatuuriga (10 mV/°C). Nimiväljundpinge on 250 mV temperatuuril 25 °C ja 1000 V temperatuuril 100 °C. LM35 on täpsem kui LM45, vastavalt ±1 °C vahemikus –55 … +150 °C ja ±3 °C vahemikus –20 … +100 °C). LM45 on väikeses korpuses SOT-23 ja LM35 on plastkorpuses TO-92 ja SO-8 ning metallkorpuses TO-46. Joonis 9.36 on näidatud neid kahte pingeväljundiga temperatuuriandurit.



Joonis 9.36 Analoog-pingeväljundiga temperatuuriandurid LM35 ja LM45

- *Analoog-vooluväljundiga temperatuuriandurid*

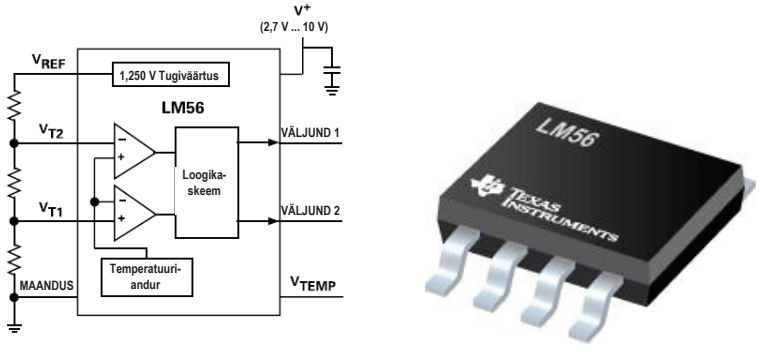
LM134, LM234 ja LM334 on analoog-vooluväljundiga integreeritud temperatuuriandurid. LM134 on temperatuuriandur, millel ka väljundvool on võrdeline absoluutse temperatuuriga. Tundlikkust reguleeritakse välise takisti abil. Tüüpilised tundlikkused on vahemikus 1–3 µA/°C. Välise takisti väärtus muutmisega saab muuta tundlikkust kogu tööpiirkonnas: –55 … +125 °C (LM134), –25 … +100 °C (LM234) ja 0 … +70 °C (LM334). LM134 korral on tavaliselt vaja ainult toitepinget 1,2 V. Selle rühma andurid on plastkorpuses SO-8 ja TO-92 ning metallkorpuses TO-46. Joonisel 9.37 on näidatud analoog-vooluväljundiga andurid.



Joonis 9.37 Analoog-vooluväljundiga temperatuuriandurid

- *Komparaatorväljundiga temperatuuriandurid*

LM56 on komparaatorväljundiga temperatuuriandur. Koosneb 1,25 V tugipingega temperatuuriandurist ja kahest eelseatud hüstereesiga komparaatorist (Joonis 9.38). LM56 toitepinge on 2,7–10 V ja voolutarve kuni 200 µA. Töötemperatuuride vahemik on –40 … +125 °C. Sisemine temperatuuriandur annab väljundpinget 6,2 mV x T (°C) +395 mV. Kolm välist takistit määravad lävipinged kahe komparaatori jaoks.



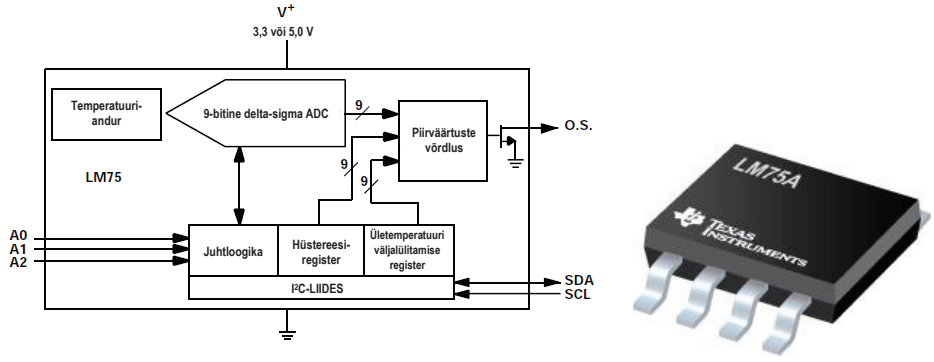
Joonis 9.38 Komparaatorväljundiga temperatuuriandur LM56

- *Digiväljundiga temperatuuriandurid*

LM75 on digitaal-temperatuuriandur kahejuhtmelise liidesega. Seda saab kasutada ka termokaitsmena. LM75 koosneb temperatuuriandurist, delta-sigma analoog-digitaalmuundurist, kahejuhtmelisest liidesest ja juhtregistrite kiibist (Joonis 9.39). Kahejuhtmeline liides kasutab I^2C-protokolli.

Temperatuuri mõõdetakse pidevalt ja lugemit saab võtta igal hetkel. Anduril LM75 on spetsiaalne kõrge temperatuuri väljund (O.S.), millel on programmeeritud piirväärtus ja hüsterees. Andurit LM75 saab kasutada mikroprotsessorsüsteemides (nt personaalarvutites) temperatuuri jälgimise ja reguleerimise alamsüsteemides.

Temperatuuri info esitatakse 9-bitise sõnana (1 märgibitt ja 8 bitti väärtuse jaoks), mille alusel on võimalik resolutsioon 0,5 °C. Täpsus on ±2 °C vahemikus –25 … +100 °C ja ±3 °C vahemikus –55 … +125 °C. Digiväljundiga temperatuuriandurid on saadaval erinevate andmesideliidestega: I²C, SMBus, SPI, PWM jm.



Joonis 9.39 Digiväljundiga temperatuuriandur (I²C)

Tabelis 9.2 on esitatud peamiste tootjate digitaal-temperatuuriandurid.

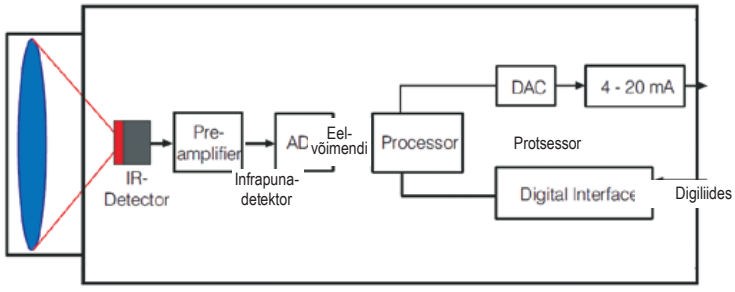
Tabel 9.2 Ettevõtete Analog Devices (AD), National Semiconductor (LM), Maxim (MAX) ja Dallas Semiconductor (DS) digitaal-temperatuuriandurid

Tüüp	Temperatuurivahemik	Väljundsignaal	Viga	Täpsus
AD7416	–55 … +125 °C	10-bitine jada-, I²C/SMBus	±2 °C	±0,25°C
AD7817	–55 … +125 °C	10-bitine jada, I²C/SPI	±1 °C	±0,25°C
MAX6635	–55 … +150 °C	kahejuhtmeline, SMB	±1 °C	±0,0625 °C
MAX6662	–55 … +150 °C	kolmejuhtmeline, SPI	±1 °C	±0,0625 °C
LM74	–55 … +150 °C	12-bitine jada-, + 1 märgibitt, SPI	±0,5 °C	±0,0625 °C
LM92	–55 … +150 °C	12-bitine jada-, + 1 märgibitt, SPI	±0,5 °C	±0,0625 °C
DS1624	–55 … +125 °C	12-bitine jada, + 1 märgibitt, 2-juhtmeline, SMB	±0,5 °C	±0,03125 °C
DS18B20	–55 … +125 °C	9–12-bitine jada, ühejuhtmeline, SPI	±0,5 °C	±0,0625 °C

9.4 Kontaktivaba temperatuuriandur

Iga keha, mille temperatuur on üle absoluutse nulli, kiirgab oma pinnalt elektromagnet-kiirgust, mis on võrdeline keha sisetemperatuuriga. Osa sellest on infrapunakiirgus ja selle põhjal saab mõõta keha temperatuuri. Stefan-Boltzmanni seaduse kohaselt on keha soojus-kiirguse intensiivsus võrdeline keha temperatuuri neljanda astmega. Infrapunatermomeeter ei ole mõõdetava objektiga vahetult kontaktis ja seetõttu saab sellega mõõta väga kõrgeid temperatuure (kuni 3500 °C). Teine oluline eelis on võimalus mõõta madala soojusjuhti-vusega materjalide temperatuuri.

Infrapunatermomeetri lääts koondab infrapunakiirguse energia tajurile (Joonis 9.40). Tajur genereerib kiirguse intensiivsusega võrdelise elektrilise signaali, mida seejärel võimendatakse ja töödeldakse. Pärast digitaalset töötlemist muudetakse signaal objekti temperatuuriga võrdeliseks väljundväärtuseks, mida saab esitada näidikul või analoogsignaalina. Protsessi käigus kompenseeritakse ka ümbritseva keskkonna temperatuuri mõju.
Infrapunatermomeetritel on juhtsüsteemidega lihtsat ühendamist võimaldavad 4–20 mA ja 0–10 V väljundid. Peale selle on infrapunatermomeetritel ka digiliidesed (nt USB, RD485, Ethernet).



Joonis 9.40 Infrapunatermomeetri struktuur

Infrapunatermomeetrite kõige tähtsam komponent on kiirguse vastuvõtja, nimetatakse ka detektoriks. On olemas kahte peamist liiki infrapunadetektoreid: soojuslikul ja kvantpõhimõttel töötavad.
Soojuslike detektorite korral muutub tajuri temperatuur elektromagnetkiirguse neeldumise tulemusena. Temperatuuri muutumine põhjustab detektori parameetrite muutumise, mida kasutatakse neeldunud energia mõõduna.

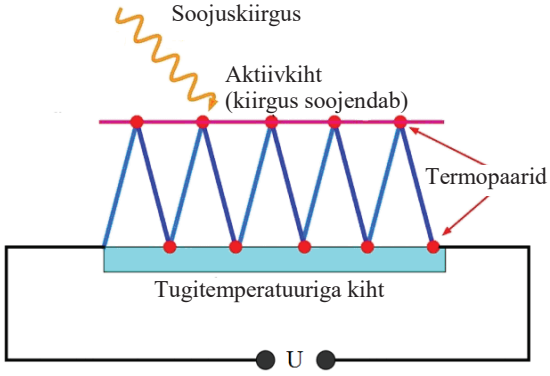
- *Püromeetrid*

On kahte tüüpi püromeetreid – *kiirguslikul* ja *optilisel* põhimõttel töötavaid. Kiirguspüromeetri korral fokuseeritakse kiirgus temperatuuritundlikule tajurile, mida see kiirgus soojendab.
Optilisel püromeetril on hõõgniit, mida elektrivoolu abil kuumutatakse teatud temperatuurini. Optilises püromeetris võrreldakse kuuma hõõgniidi värvust taustal oleva mõõdetava keha värvusega. Hõõgniidi temperatuuri muudetakse seni, kuni seda enam näha ei ole (st hõõgniidil on sama värvus, kui taustal oleval mõõdetaval kehal). Sel momendil on hõõgniidi temperatuur sama kui mõõdetaval kehal.

- *Infrapuna-termopaarid*

Infrapuna-termopaarides kasutatakse tavalisi J-, K-, T- või E-tüüpi termopaare.
Temperatuuri muutust mõõdetakse otseselt termopaariga. Infrapuna-termopaare saab kasutada temperatuurivahemikus –73 … 2800 °C.
Maatriksstruktuuriga infrapunaandur koosneb läätsest, infrapuna-ribafiltrist, termopaaride maatriksist, termistorist ja ASIC-kiibist. Termistori kasutatakse ümbritseva keskkonna temperatuuri mõõtmiseks. Nn termopatarei maatriks koosneb jadaühenduses termopaaridest. Mõõdetakse pinget mõlemas otsas. Seebecki efekti järgi on pinge võrdeline kontakti ja kahe

otsa temperatuuride erinevusega (Joonis 9.41). See võimaldab maatriksiga registreerida laia valgusspektrit ultravioletsest kuni infrapunaseni.



Joonis 9.41 Termopaari maatriksstruktuur (termopatarei maatriks)

Kontaktivabade temperatuuriandurite peamine puudus on, et suure täpsuse tagamiseks on neid vaja täpselt häälestada. Kontrollitava pinna tüübi arvestamiseks kasutatakse parandus-tegureid.
Joonis 9.42 on näidatud Saksa ettevõtte Micro-Epsilon Messtechnik GmbH infrapuna-andureid (seeria thermoMETER CS).

Joonis 9.42 Ettevõtte Micro-Epsilon Messtechnik GmbH toodetud infrapuna-temperatuuri-andurid

Termiliste ja kvantdetektorite peamine erinevus on kvantdetektorite kiirem infrapuna-kiirguse neelamine. Kvantdetektorid on väga kiired (nende ajakonstant on nanosekunditest mikrosekunditeni).
Termilise detektori tajuri temperatuur muutub suhteliselt aeglaselt. Termiliste detektorite ajakonstant (suurusjärk millisekundites) on suurem kui kvantdetektoritel.

9.5 Teadmiste kontroll

1. Termopaarid kuuluvad järgmisse andurite gruppi:
a) takistuslikud temperatuuridetektorid (RTD);
b) termoelektrilised andurid;
c) termistorid;
d) Termodioodid.

2. Milliseid järgmisi metalle ja sulameid kasutatakse termopaaride valmistamisel?
a) vask – konstantaan;
b) kromell- alumell;
c) plaatina-hõbe;
d) plaatina – roodium – plaatina.

3. Põhiline viga, mis tekib termopaaridega mõõtmisel on tingitud:
a) magnetvälja efektist;
b) niiskuse muutusest;
c) külmade otste temperatuuri ebastabiilsest muutusest.

4. Takistuslike temperatuuriandurite (RTD) valmistamisel kasutatakse järgmisi metalle:
a) plaatina;
b) raud;
c) vask;
d) tsink;
e) nikkel.

5. Termistorid võivad olla:
a) PTC;
b) soojustransistorid;
c) CTR (crytesistorid);
d) NTC.

6. Mis temperatuuride vahemikus temperatuuriandurid võivad töötada?
a) alates -200°C kuni +250°C;
b) alates -55°C kuni +150°C;
c) alates 0°C kuni +500°C;
d) alates -55°C kuni +125°C.

TEADMISTE KONTROLLI TULEMUSED

Tabelist leiate õiged vastused enese teadmiste kontrolli küsimustele. Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr.	Küsimuse nr.							
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**
1. Andurite klassifikatsioon	B, C	A, D, E	A, C	A, B, D	A, B, D	-	-	-
2. Andurite karakteristikud	A, B, D	B, D	C	A	B, C	A, C, E	-	-
3. Asendi- ja nihkeandurid	A, B, D	A, B, D	B	A, C, D	B, D	A, C, E	-	-
4. Jõu-, tenso- ja puuteandurid	B	A, C, D	A, C	B	A, B, D	C	-	-
5. Inertsiaalandurid	C	B	B	B	D	C	-	-
6. Rõhuandurid	B	A	A	B, D	A	B	-	-
7. Vooluhulgaandurid	D	A	D	B	A	-	-	-
8. Lähedusandurid, objektide tuvastamise andurid ja tasemeandurid	B	C	A, B, C, F	A	B	CA	B	-
9. Temperatuuriandurid	B	A, B, D	C	A, C, E	A, C, D	B, D	-	-

KIRJANDUSE VIITED

1. T. Nenov, S.Yordanov. CERAMIC SENSORS: Technology and Applications. CRC Press. Boca Raton, 1996.
2. J. Fraden. Handbook of modern sensors: Physics, designs and application. Fifth Edition. Spriner-Verlag Inc., New York, 2016.
3. Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. Edited by John G. Webster and Halit Eren. Second Edition. CRC Press. Boca Raton, 2014.
4. Sensor Technology Handbook. Edited by J. Wilson, Elsevier Inc., Oxford, 2005.
5. Fundamentals of instrumentation and measurement/Edited by D. Placko. ISTE Ltd, London, 2007.
6. S. Solomon. Sensors Handbook. McGraw-Hill Inc., New York, 2010.
7. R. M. White. A Sensor Classification Scheme. IEEE TRAN. ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL, VOL. UFFC-34, NO. 2, 1987, pp. 124-126.
8. G. Ash. Les capteurs en instrumentation industrielle. Bordas, Paris, 1991.
9. G. Rakočević. Sensors. In "Application and Multidisciplinary Aspects of Wireless Sensor Networks. Concepts, Integration, and Case Studies". Gavrilovska, L., Krco, S., Milutinovic, V., Stojmenovic, I.,Trobec, R. (Eds.). Springer-Verlag London, 2011, pp.13-31.
10. K. Kalantar-zadeh. Sensors. An Introductory Course. Springer Science+Business Media New York. 2013.
11. W. C. Dunn. Introduction to instrumentation, sensors, and process control. ARTECH HOUSE, INC., Norwood, 2006.
12. S. N. David. Linear Position Sensors. Theory and Applications. A John Wiley&Sons, Inc., Publ., New Jersey, 2004.
13. Modern Sensors Handbook. Edited by Pavel Ripka, Alois Tipek. ISTE Ltd, London, 2007.
14. Sensor Technology Handbook. Edited by J. Wilson, Elsevier Inc., Oxford, 2005.
15. The mechatronics handbook. Edited by R.H. Bishop. CRC Press. Boca Raton, 2002.
16. Sensors, Focus on Tactile, Force and Stress Sensors. Edited by Jose Gerardo Rocha and Senentxu Lanceros-Mendez. In-teh, Vienna, 2008.
17. S. Luo, J. Bimbo, R. Dahiya, H. Liu. Robotic Tactile Perception of Object Properties: A Review. (https://arxiv.org/pdf/1711.03810.pdf).
18. S. Liu, R. Zhu. Micromachined Fluid Inertial Sensors. Sensors 2017, 17, 367; doi:10.3390/s17020367
19. Dao, R. Mechanical Shock Test Report: Accelerometer Model MXR7202ML. MEMSIC Application Note. 2003. (http://www.memsic.com).
20. MXR9500G/M Datasheet. (www.memsic.com).
21. V. M. N. Passaro, A. Cuccovillo, L. Vaiani , M. De Carlo, C. E. Campanella. Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective. Sensors 2017, 17, 2284; doi:10.3390/s17102284
22. C. D. Johnson. Process Control Instrumentation Technology. Eighth Edition. Pearson Education Limited, Essex, 2014.
23. T. R. Kuphaldt. Lessons in Industrial Instrumentation. Creative Commons, San Francisco 2017.

24. W. C. Dunn. Fundamentals of Industrial Instrumentation and Process Control. McGraw-Hill, Inc., New York, 2005.
25. Solomon, S. Sensors and Control Systems in Manufacturing, McGraw-Hill Inc., New York, 2010.
26. M. Scott. Industrial process sensors. CRC Press, Boca Raton, 2008.
27. D. G. Alciatore. Introduction to mechatronics and measurement systems. Fourth Edition. McGraw-Hill, New York, 2012.
28. Thermal Sensors. Principles and Applications for Semiconductor Industries. Ch. Jha (Ed.), Springer-Verlag New York, 2015.
29. Temperature Sensor Handbook. National Semiconductors Corp., 1995.
30. S. C. Mukhopadhyay. Intelligent Sensing, Instrumentation and Measurements. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2013.

Strateegiline partnerlus mehhatroonika valdkonnas Euroopa väikeste ja keskmise suurusega tootmisettevõtete innovatiivseks ja nutikaks kasvuks (MechMate)

ÕPPEAINE 10: TÄITURID MEHHATROONIKAS [M010ET]

ÕPIK

KAASAUTORID

PROF. TÕNU LEHTLA, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)
PROF. ELMO PETTAI, TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL (TALTECH)

2018

Info selle dokumendi kohta

Õpik (sisuline tekst) on mõeldud kasutamiseks õppeaines **Täiturid mehhatroonikas**.

SISUKORD

Info selle dokumendi kohta 3
Jooniste loetelu 6
Tabelite Loetelu 8
1 SISSEJUHATUS 9
1.1 Ülevaade elektromehaanilistest energiamuundusprotsessidest 9
1.2 Lüliti kui energiamuundur 13
1.3 Ülevaade jõuelektroonika arengust 14
1.4 Elektriajamite arengusuunad 15
1.5 Teadmiste kontroll 16
2 ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE 18
2.1 Üldised põhimõtted 18
2.2 Alalisvoolumasin 20
2.3 Asünkroonmasin 22
2.4 Sünkroonmootorid ja sammmootorid 25
2.5 Kolmefaasiline pöördmagnetväli 26
2.6 Elektrimasinate kiiruse ja momendi reguleerimine 28
2.7 Elektrimasinate dünaamikamudelid 31
2.8 Elektrimasinate piduri- ja generaatoritalitlus 33
2.9 Teadmiste kontroll 34
3 JÕUPOOLJUHTMUUNDURID 39
3.1 Jõupooljuhtlülitid 39
3.2 Toitevõrguga sünkroniseeritud reguleeritavad alaldid ja vaheldid 41
3.3 Vahelduvpingeregulaatorid 47
3.4 Alalispinge muundurid ja regulaatorid 48
3.5 Elektriajamites kasutatavad alalispingemuundurid 50
3.6 Vaheldid 52
3.7 Sagedusmuundurid 57
3.8 Teadmiste kontroll 60
4 ELEKTRIAJAMID 62
4.1 Üldkirjeldus 62
4.2 Alalisvoolumasinatega elektriajamid 64
4.3 Asünkroonmootorite sujuvkäivitid 65
4.4 Sagedusjuhtimisega ajamid 68
4.5 Poojuhtmuunduri elektromagnetiline ühilduvus 72
4.6 Teadmiste kontroll 76
5 PNEUMAATILISED JA HÜDRAULILISED TÄITURID 78
5.1 Pneumaatilised täiturid 78
5.1.1 Ühepoolse toimega silindrid. 78
5.1.2 Kahepoolse toimega silindrid. 79
5.1.3 Silindri amortisaatorid. 80
5.1.4 Kolvivarreta silindrid. 80
5.1.5 Magnetilise ülekandega silinder 81
5.1.6 Pöördsilindrid 82
5.1.7 Pneumosilindrite karakteristike jõudude määramine. 83
5.2 Hüdraulilised täiturid 83
5.2.1 Hüdrosilindrid 83
5.2.2 Hüdromootorid. 84
5.3 Kokkuvõte 85
5.4 Teadmiste kontroll 85
Teadmiste kontroll - Tulemused 87
KIRJANDUS 88

JOONISTE LOETELU

Joonis 1.1 Elektrienergia muundamise võimalused 11
Joonis 1.2 Lüliti talitlus 14
Joonis 2.1 Indutseeritud elektromotoorjõu parema käe reegli (*a*) ja jõu suuna määramine vasaku käe reegli põhjal (*b*) 18
Joonis 2.2 Alalisvoolumasina tööpõhimõte 20
Joonis 2.3 Koormatud alalisvoolumootori aseskeem 21
Joonis 2.4 Asünkroonmootori staatori magnetväli sõltuvalt staatorimähise pooluste arvust 23
Joonis 2.5 Asünkroonmootori lihtsustatud ühefaasiline (T-kujuline) aseskeem 24
Joonis 2.6 Sünkroonmootori tööpõhimõte 26
Joonis 2.7 Kolmefaasiline toitepingete süsteem 27
Joonis 2.8 Vahelduvvoolumasina staatorimähiste täht- ja kolmnurklülitused 27
Joonis 2.9 Alalisvoolumasina kiiruse reguleerimine ja mehaanilised tunnusjooned 28
Joonis 2.10 Vahelduvvoolumasinate kiiruse reguleerimine a) asünkroonmootori kiiruse reguleerimine lineaarse pinge sagedussõltuvuse (U/f = const.) järgi; b) sünkroonmootori kiiruse sagedusreguleerimine 29
Joonis 2.11 Sagedusreguleerimisega asünkroonmootori pinge-sagedus-tunnusjooned 30
Joonis 2.12 Alalisvoolumootori kommutaatori tööpõhimõte 31
Joonis 2.13 Alalisvoolumasina käivitusprotsess. Voolu väärtuse muutumine staatori ja rootori mähistes 32
Joonis 2.14 Asünkroonmootori dünaamikamudeli järgi arvutatud käivitusprotsess 32
Joonis 2.15 Asünkroonmootori mehaanilised tunnusjooned mootori-, generaatori- ja pidurdustalitluses 33
Joonis 3.1 Koormuse pinge ja voolu reguleerimine: a) reostaadiga, b) lülitiga 39
Joonis 3.2 Pulsilaiusmodulatsiooni põhimõte 40
Joonis 3.3 Kommutatsiooni siirdeprotsessid 40
Joonis 3.4 Jõupooljuhtide pingete ühtlustamine jadalülituse puhul 41
Joonis 3.5 Ühefaasiline poolperioodalaldi 42
Joonis 3.6 Ühefaasilise tüüritava poolperioodaladi M1 pingete ja voolude diagrammid aktiivkoormusel (L_d = 0) tüürnurga □□= 45° korral 42
Joonis 3.7 Ühefaasiline keskväljavõttega alaldi (M2) 43
Joonis 3.8 Kolmefaasiline keskväljavõttega alaldi (M3) 43
Joonis 3.9 Kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi M3 pingete ja voolude diagrammid aktiiv-induktiivkoormusel ideaalsel voolusilumisel, kui α =45º , μ =15º 44
Joonis 3.10 Ühefaasiline sildalaldi (B2) 45
Joonis 3.11 Ühefaasilise sildalaldi B2 pingete ja voolude diagrammid ideaalsel voolusilumisel, kui tüürnurk □=30° ja kommutatsiooninurk □=15° 45
Joonis 3.12 Kolmefaasiline sildalaldi (B6) 46
Joonis 3.13 Vahelduvpingeregulaatorid: a) ühefaasiline, b) kolmefaasiline 48
Joonis 3.14 Ühekvadrandiline alalispinge pulsilaiusmuundur (PL + VD) koos toite- ja koormusahelatega 48
Joonis 3.15 Pinget vähendava alalispingemuunduri väljundtunnusjooned 49
Joonis 3.16 Pinget suurendav alalispingemuundur 50
Joonis 3.17 Muudetava voolusuunaga kahekvadrandiline alalispingemuundur 51
Joonis 3.18 Muudetava polaarsusega kahekvadrandiline alalispingemuundur 51

Joonis 3.19 Neljakvadrandiline alalispingemuundur 52
Joonis 3.20 Vaheldid: a) kahe sümmeetrilise toiteallikaga, b) tehiskeskpunktiga..... 53
Joonis 3.21 Jõutüristoride ja vastudioodidega poolsildlülituses autonoomne vaheldi 53
Joonis 3.22 Sildlülituses autonoomne vaheldi 54
Joonis 3.23 Plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinge ja -vool 54
Joonis 3.24 Kolmefaasiline autonoomne pingevaheldi..... 55
Joonis 3.25 Kuuepulsilise kolmefaasilise plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinged:..... 56
Joonis 3.26 Pingevektori juhtimisega vaheldi töö: a) vektori polügoon, b) vektori reguleerimine 57
Joonis 3.27 Ühesuunalise energiavooga sagedusmuundur 57
Joonis 3.28 Pulsilaiusmodulatsiooniga alaldiga ja kahesuunalise energiavooga sagedusmuunduriga vahelduvvooluajami jõuahel 59
Joonis 3.29 Ühefaasiline tsüklokonverter 59
Joonis 3.30 Ühefaasilise tsüklokonverteri väljundpinge diagramm 60
Joonis 4.1 Elektriajami üldine struktuur..... 62
Joonis 4.2 Alalisvooluajam 64
Joonis 4.3 Neljakvadrandilise pulsilaiusmuunduri pinge reguleerimine ja polaarsuse muutmine a) ühe või kahe lülitiga, b) nelja lülitiga..... 65
Joonis 4.4 Sujuvkäiviti jõuahela põhimõtteskeem ja välised juhtahelad..... 68
Joonis 4.5 Sagedusmuunduri jõuahelate põhimõtteskeem..... 71
Joonis 4.6 Muunduri toiteahelasse on lülitatud voolupiirav drossel 75
Joonis 5.1 Pneumaatiliste täiturite liigitus 78
Joonis 5.2 Ühepoolse silindri tööpõhimõte ja tingmärk 79
Joonis 5.3 Kahepoolse silindri tööpõhimõte tingmärk..... 79
Joonis 5.4 Kahepoolse toimega amortisaatoritega silindri tööpõhimõte..... 80
Joonis 5.5 Kolvivarreta silindri tööpõhimõte ja ehitus..... 80
Joonis 5.6 Kolvivarreta juhikutega silinder. 81
Joonis 5.7 Magnetilise ülekandega silindri ehitus..... 81
Joonis 5.8 Magnetilise ülekandega silinder..... 81
Joonis 5.9 Pöördsilindri ehitus 82
Joonis 5.10 Hammaslatt pöördtäituri ehitus (a) ja toote ülevaade (b)..... 82
Joonis 5.11 Ühepoolse toimega silinder. (1 otsakork, 2 sisend, 3 kolb, 4 korpus, 5 laager, 6 tihend, 7 pühkija) 83
Joonis 5.12 Kahepoolse toimega silinder(1 kolb, 2 kolvivars, 3 laager, 4 tihend, 5 tihendikate) 84
Joonis 5.13 Hüdromootorite klassifikatsioon..... 85

TABELITE LOETELU

Table 4.1 Valemid ajami kiirenduse ja aeglustuse aja väärtuse arvutamiseks 72

1 SISSEJUHATUS

Saateks

Mehhatroonika, jõuelektroonika ja elektriajamid on üksteisega tihedalt seotud mõisted. Jõuelektroonikaseadmed on ette nähtud suure võimsusega elektriahelate kommuteerimiseks. Enamikel juhtudel kommuteeritakse aga elektrimasinate jõuahelaid. Elektrimasinad koos toitemuundurite ja juhtseadmetega moodustavad süsteemi, mida tuntakse elektriajamina. Niisugune süsteem on ühtlasi ka mehhatrooniline süsteem, mootor koos juhtimiselementidega aga mehhatrooniline täitur.

Jõupooljuhttehnika ja mikroprotsessortehnika tormiline areng viimastel aastakümnetel on loonud eeldused elektrimootorite kiiruse ja momendi paindlikuks juhtimiseks. Koos sellega on muutunud aktuaalseks tehnoloogiliste masinate liikumise optimaaljuhtimine ning sellest tulenev energiasääst ja tootlikkuse suurenemine. Käesolev raamat on mõeldud kõrgkoolis elektroonikat, mehhatroonikat või mehaanikat õppivatele üliõpilastele, et avardada nende silmaringi elektroonika (jõupooljuhttehnika) energeetilise rakenduse suunal.

Jõuahela kommuteerimist ei saa vaadelda üksnes ahela sulgemise või avamisena. Igat jõuahela lülitusprotsessi tuleb käsitleda ennekõike energiamuundusprotsessina. Seepärast võib ka väita, et jõuelektroonika tegeleb energiavoogude juhtimisega. See mõte peaks kanduma läbi raamatu kõikide peatükkide. Jõuelektroonikasse pühendunu peab alati meeles pidama, et energiavoo väär ohjamine võib põhjustada avarii või isegi katastroofi. Märkigem, et jõupooljuhtmuundurite võimsused ulatuvad tänapäeval sadade megavattideni.

Üheks jõuelektroonikaga seotud probleemiks on kindlasti muundurite elektromagenetilise ühilduvuse tagamine. Kõik, kes puutuvad kokku energia tarbimisega, peaksid endale teadvustama, et energia paindlik muundamine ja otstarbekas salvestamine võimaldavad oluliselt säästa energiat ning meid ümbritsevat keskkonda.

1.1 Ülevaade elektromehaanilistest energiamuundusprotsessidest

Elektriajam on mitmesuguste töömasina või mingi abimehhanismi käitamiseks ettenähtud elektromehaaniline (mehhatrooniline) süsteem, mis koosneb elektrimootorist, jõuülekandest, toitemuundurist ja juhtseadmetest. Lisagem, et mõnikord võib ajamis olla ka mitu mootorit, jõuülekannet ja toitemuundurit.

Arengulugu. Elektromehaanilistele energiamuunduritele pani aluse inglise füüsik ja keemik M. Faraday, kes 1821. aastal formuleeris elektrienergia mehaaniliseks energiaks muundamise põhimõtte. Kümme aastat hiljem (1831) avastas ja sõnastas M. Faraday elektromagnetilise induktsiooni põhiseaduse – juhtivas kontuuris indutseeritud elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega. Need avastused panid aluse energia elektromehaanilisele muundamisele ning selleks otstarbeks kasutatavatele elektrimasinatele ning trafodele.

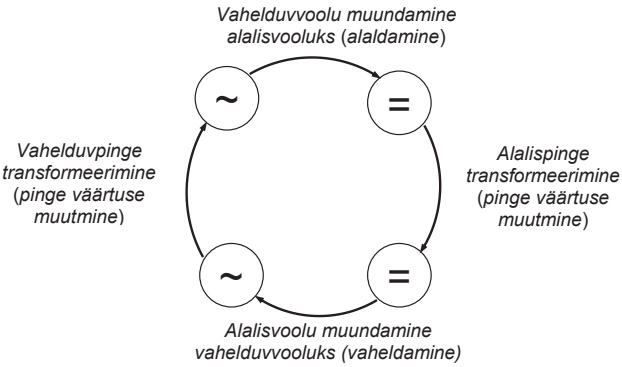
Esimene elektriajam loodi peagi pärast elektrimasina leiutamist. Juba 19. sajandi keskel arendati maailmas välja mitmed elektrimasinate tüübid, kusjuures elektrimasinate ja -ajamite sünni juures oli ka mõnda aega (1835...1837) Tartu Ülikoolis arhitektuuri õpetanud Moritz Hermann Jacobi. Tartust kolis Jacobi Peterburgi, kus temast sai Peterburi Teaduste

Akadeemia akadeemik ja maailmas tuntud elektrotehnikateadlane. Jacobi paigutas 1839. a. oma leiutatud elektrimasina paadile ja toitis seda galvaanielementidest. Elektrimootoriga paadi katsetus toimus Neeva jõel, kus paat liikus vastuvoolu kiirusega 4,8 km/h. Teadaolevalt on Jacobi elektriajam üks esimesi kasulikku tööd teinud elektriajameid kogu maailmas. Järgmisel aastal leiutas M. H. Jacobi ka voolutugevuse regulaatori – reostaadi, millega sai reguleerida elektrimootori pöörlemiskiirust.

On huvitav märkida, et esimesed elektrimasinad olid valdavalt alalisvoolumasinad. Koos elektrimasinate kasutuselevõtuga arendati 19. sajandi viimastel kümnenditel maailmas välja alalisvooluülekandel põhinev elektrienergia jaotussüsteem. Ameerikas andis väga suure panuse alalisvoolu energiajaotussüsteemi ning selle vajalike komponentide arendamisse Thomas Alva Edison. Samal ajajärgul alustati mitmel pool maailmas intensiivsed uuringuid vahelduvvoolumasinate alal. Selle ala pioneeride hulka kuulusid kindlasti serblane Nikola Tesla ja Poola päritolu, kuid Saksamaal AEG firmas töötanud M. Dolivo-Dobrowolski. Kui Tesla oli üks esimestest vahelduvvoolumasina loojatest, siis Dolivo-Dobrowolskile omistatakse kolmefaasiliste elektrimasinate kasutuselevõtja au. Nimelt, just tema tõestas 1888. a. esimesena kolmefaasilise süsteemi eelised teiste vahelduvvoolusüsteemide ees. Kolmefaasiline elektrisüsteem ning sellega hästi kokku sobivad kolmefaasilised mootorid ja generaatorid osutusid üliedukaks ja elektrotehnika arengut vähemalt sajandiks ette määranud tehniliseks lahenduseks. Juba elektrienergia rakendamise algaastatel tõrjus vahelduvvoolusüsteem kiiresti välja hoogsalt levima hakanud ning juba edukalt töötanud alalisvoolusüsteemi. Peamiseks mõjuriks osutus edastatava elektrienergia võimsuse kasv ning vajadus rakendada kadude vähendamiseks elektriliinides kõrgemat pinget (et vähendada liinide voolu). Viimane omakorda tingis vajaduse hõlpsasti muundada pinget. Kui vahelduvpinge pooldajad leidsid pinge muundamisele kiiresti lahenduse trafo näol, siis alalisvoolu puhul on olnud pinge muundamine tõsiseks probleemiks kuni viimase ajani.
Vaatamata sellele, et 20. sajandi alguseks oli vahelduvvoolusüsteem elektrienergia jaotamisel kindlalt võitnud alalisvoolusüsteemi, ei suudetud siis veel hõlpsalt lahendada mitmeid elektromehaanilise energiamuundamisega seotud probleeme. Tööstuse ja tehnoloogiliste masinate seisukohalt oli kindlasti üheks taoliseks ülesandeks elektrimootorite kiiruse reguleerimine. Kui kolmejuhilise liini ja trafode abil kokku ühendatud vahelduvvoolu sünkroongeneraator ja asünkroonmootor lahendasid põhimõtteliselt elektromehaanilise energiamuundamise ning energia kaugülekande probleemid, siis töömasina kiiruse ja momendi reguleerimine osutus vahelduvvoolumasina abil väga keerukaks ülesandeks. Kuigi põhimõtteliselt oli teada, et vahelduvvoolumasina kiirust saab reguleerida toitevoolu sageduse muutmisega, osutusid selle põhimõtte realiseerimiseks vajalikud tehnilised lahendused väga keerukaks ja kalliks. Samas olid alalisvoolumasinate jaoks olemas lihtsad kiiruse reguleerimismeetodid ja -vahendid. Kõige tavalisem reguleeritav (muudetava suurusega) aktiivtakistus ehk reostaat alalisvoolumootori ankruahelas võimaldab reguleerida nii ankru voolu kui ka pinget ning koos sellega ka masina kiirust ja momenti. Tekkis olukord, kus elektrienergia tootmiseks ja jaotamiseks sobis paremini vahelduvvoolusüsteem, energia kasutamiseks aga alalisvoolusüsteem. Sellest tulenes ka põhimõtteline vastuolu elektrienergia lihtsa, töökindla ja odava tootmise ja jaotamise ning paindliku kasutamise vahel. Selle vastuolu ületamisele ning sobivate tehniliste lahenduste otsingutele kulus peaaegu kogu 20. sajand. Peamisteks probleemideks olid:

- alalisvoolumasinate toitmine vahelduvvooluvõrgust ja vastavate muundurite loomine
- vahelduvvoolumasina kiiruse reguleerimismeetodite ja -seadmed väljaarendamine
- elektrimasinate kiiruse reguleerimiskadude vähendamine ning energiamuundamise kasuteguri suurendamine

Joonis 1.1 esitab kõige üldisemalt on elektrienergia muundusprotsessid. Elektrienergia paindlikuks kasutamiseks oli vaja seadmeid nende muundusprotsesside teostamiseks. Joonisel näidatud neljast muundusprotsessist kõige hõlpsam oli vahelduvpinge muundamine, milleks sobis hästi 1876. a. (P. Jablotškov) valmistatud vahelduvvoolu jõutransformaator ehk trafo. Märkigem, et impulsstrafo leiutas M. Faraday juba 1831. a. Tänu trafole lahendati edukalt elektrienergia edastamine kõrgepingeliinide abil pikkade vahemaade taha. Vahelduv- ja alalisvoolu vastastikuse muundamise ning alalispinge muundamise probleemidele on otsitud uusi lahendusi kuni tänaseni.



Joonis 1.1 Elektrienergia muundamise võimalused

Elektrienergia muundamiseks on leiutatud tuhandeid seadmeid ja süsteeme. Kui osutus, et energia vahetu muundamine pole võimalik või otstarbekas, rakendati mitmesuguseid kaudseid muundamisviise, nt. keerukaid vahemuunduritega süsteeme. Niisuguste süsteemide hulka kuuluvad nt. elektromehaanilised mootor-generaator süsteemid (alalisvoolu puhul Ward-Leonard süsteemid). Reguleeritava alalispinge saamiseks sobib vahelduvvoolu asünkroonmootorist ja alalisvoolugeneraatorist koosnev süsteem, kusjuures generaatori pinget reguleeritakse ergutusvoolu muutmisega reostaadi abil. Muutuva pinge ja sagedusega vahelduvvoolu saab samuti mootor-generaator süsteemist. Sel juhul kasutatakse sünkroongeneraatori käitamiseks reguleeritava kiirusega alalisvoolumootorit. Generaatori kiiruse reguleerimisel muutub ka selle väljundpinge amplituud ning sagedus. Niisugune agregaat sobib omakorda reguleeritava kiirusega vahelduvvoolumasina toiteks.
Elektromehaanilised muundurid olid reguleeritava kiirusega elektriajamite toiteallikatena valdavateks seadmeteks 20. sajandi esimesel poolel. Sellel perioodil loodi palju erinevaid elektrimasinate konstruktsioone, mille eesmärgiks oli ühelt poolt suurendada elektrienergia muundamise kasutegurit, teiselt poolt aga asendada mitmest eraldiseisvast elektrimasinast koosnevad elektromehaanilised süsteemid teatud kindlat tüüpi integreeritud elektrimasinmuunduritega, nt. elektrimasinvõimenditega.

20. sajandi teisel poolel algas elektroonika, sh. jõuelektroonika võidukäik elektriajamites. Lähemalt on jõuelektroonika arengulugu vaadeldud p. 1.3. Veel enne elektroonika ulatusliku kasutuselevõtu algust jõuti aga selgusele, et väga olulist osa jõuahelate energiamuundusprotsessides etendab lüliti. Lülitit kui energiamuundurit tutvustatakse p. 1.2. Elektrienergia tootmise, jaotamise ja tarbimise arenguloos on tänapäeval üks oluline arenguetapp lõppemas ja uus etapp algamas. Nimelt, elektrienergia tsentraliseeritud tootmine on asendumas hajutatud ehk detsentraliseeritud tootmisega. Elektrienergia paindlikult juhitavad pooljuhtmuundurid võimaldavad taas kasutusele võtta alalisvoolu jaotusvõrgud nagu seda tehti elektrienergia rakendamise algusaastail. On tekkimas uued vajadused ja koos nende ka uued probleemid.

21. sajandi jõuelektroonika. Elektrienergia muundamise vajadused sõltuvad sellest, milliseid generaatoreid kasutatakse elektrienergia tootmisel ning missugust pinget ja voolu kasutatakse energia jaotamisel ja tarbimisel. Energia tootmise seisukohast on kolmefaasilised vahelduvvoolugeneraatorid väga otstarbekad võimsates soojus-, hüdro- ja tuulejaamades. Vahelduvvoolu kasutamine elektrienergia jaotussüsteemis on ühelt poolt traditsiooniline lahendus. Teiselt poolt on see lahendus tingitud energia tsentraliseeritud tootmisest ja pinge tranformeerimise vajadusest. Vahelduvvoolu edastamisel pikkade vahemaade taha tuleb kokku puutuda vahelduvvoolu omapärast tingitud lisakadude ning reaktiivenergia kompenseerimise probleemidega. Lisakaod tekivad läbi juhtide isolatsiooni kulgeva mahtuvusliku voolu tõttu. Reaktiivenergia on oma olemuselt induktiivsustesse või mahtuvustesse salvestatud energia, mis vahelduvvoolu perioodilise iseloomu tõttu jaotusvõrgus pidevalt pulseerib energiaallika ja -tarbija vahel. Reaktiivenergia olemasolu koormab täiendavalt jaotusvõrku ning tekitab omakorda lisakadusid. Lahendusena nähakse ette reaktiivenergia lokaalset kompenseerimist (induktiivse energia kompenseerimist mahtuvusliku energiaga ja vastupidi) või resonantsmuundurite kasutamist tarbijate toitmiseks. Märkigem, et resonantsi korral kompenseerivad induktiivsused ja mahtuvused teineteist automaatselt.

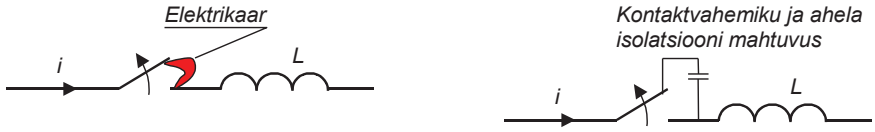
Vahelduvvooluenergia tarbimisel on tänapäeval tekkimas vastuoluline olukord. Tööstuses rakendatakse üha enam sagedusjuhtimisega ajameid, mille puhul asünkroonmootorit toidetakse alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundurist. Viimane koosneb omakorda alaldist, kondensaatori ja juhitava summutustakistiga vahelülist ning reguleeritavast vaheldist. Seega toidetakse vahelduvvoolumootorit läbi energiasalvestit sisaldava alalisvoolulüli. Paratamatult tekib küsimus, milleks on siis vaja kasutada probleemset vahelduvvoolu jaotusvõrku ja suurt hulka alaldeid, kui selle asemel võiks kasutada hoopis alalisvoolu jaotusvõrku. Energiasalvestus alalisvooluvõrgus, nt. ülikondensaatoris või ülijuhtivas induktiivsuses, omandaks aga uue tähenduse. Niisugused salvestid koos juhitavate muunduritega hakkavad täitma energiasüsteemi võimsuse regulaatori ülesannet ning sobitavad genereeritavat ja tarbitavat võimsust. Selle ülesande lahendamine on väga oluline juhusliku väljundvõimsusega alternatiivsete energiaallikaste (nt. tuule- ja päikesejaamade) ning oma olemuselt muutliku tarbimisvõimsuse sobitamiseks. Energia hajutatud tootmise ja paindliku salvestamise probleemid tõotavad kujuneda 21. sajandi põhiprobleemideks energeetikas. Kas sellega kaasneb ka osaline tagasipöördumine alalisvoolu jaotusvõrkude juurde, seda peaks näitama alternatiivsete energiaallikate kasutuselevõtuga seonduvad tehnilised lahendused. Igal juhul etendab muundustehnika selles protsessis määravat osa.

1.2 Lüliti kui energiamuundur

Koos elektrienergia kasutuselevõtuga võeti kasutusele ka lüliti elektriahela sisse-, välja- või ümberlülitamiseks. Seejuures on lülitatavate ahelate võimsus, koormuse iseloom, pinge ja voolu väärtused ning lülitussagedus väga erinevad. Näiteks, tänavavalgustuse puhul kasutatakse lülitit 2 või 4 korda ööpäevas, autotrafo mähiste või reostaadiviikude ümberlülitamine toimub sõltuvalt konkreetsest reguleerimisvajadusest, alalisvoolumasina kommutaator lülitab ümber (kommuteerib) ankrumähiste voolu tuhandeid kordi minutis. Koos elektroenergeetika arenguga on lülitile leitud üha uusi funktsioone.

- Lüliti tagab elektriahelas inimeste ohutuseks vajaliku isoleervahemiku
- Lüliti peab tõrgeteta juhtima suurt koormusvoolu ning taluma ahela kommuteerimisega kaasnevaid pinge ja voolu siirdeprotsesse.
- Lüliti peab vajadusel hajutama ahelasse salvestunud energia soojusena või suunama selle mõnda teise energiasalvestisse.
- Lüliti peab vältima elektriahelate riketest tulenevat kahju ning katkestama automaatselt toite lühisvooluga elektriahelates
- Kiiretoimelise ümberlülitiga saab muundada alalisvoolu vahelduvvooluks ja vastupidi
- Kiiretoimelise lülitiga saab reguleerida pinge või voolu keskväärtust.

Põhiprobleem lüliti kasutamisel elektriahelate kommuteerimiseks on seotud **ahelasse salvestunud energia** muundamisega. Nimelt, induktiivsust sisaldavasse elektriahelasse salvestatud energia $W_L = Li^2/2$. Ahela sisselülitamisel alustatakse elektrienergia edastamist koormusele, kuid lisaks toimub energia laadimine ahela induktiivsusesse. Ahela katkestamisel toimub vastupidine energiamuundusprotsess, mille vältel induktiivsuse energia väheneb koos teda läbiva vooluga nullini. Vastavalt energia jäävuse seadusele tuleb see energia juhtida mujale (energia ei kao). Induktiivsuse energia võib ahela katkestamisel tekitada lüliti kontaktide vahel elektrikaare ning hajuda seal soojusena või tõsta pinget ahela mahtuvustel. Märkigem, et mahtuvuslik energia arvutatakse valemiga $W_C = Cu^2/2$. Mõlemad nähtused võivad olla ohtlikud nii lülitile endale kui kommuteeritavale ahelale (Joonis 1.2). **Elektrikaar** võib soojuslikult rikkuda lüliti. Kaare tekkimise ja kustumise tingimusi kommutatsiooniaparaatides on uuritud ja põhjalikult käsitletud elektriaparaatide teoorias. Nende uuringute tulemusena on välja töötatud kümned eritüübilised jõuahelate kontaktlülitid. Elektrikaare kustutamiseks rakendatakse mitmesugused põhimõtteid, nagu suurendatud rõhku kaare ümbruses, kaare puhumist nii jahutamise kui liikumapanemise eesmärgil, gaasi või õli keskkonda, vaakumit või tugevat magnetvälja. Spetsiaalsesse kaarekustutuskambrisse surutud elektrikaar peab alluma kindlatele reeglitele, s.t. ta peab hajutama piisava hulga energiat, et ahela **kommutatsioonipinged** ei ületaks isolatsioonile lubatud väärtust, kuid samas ei tohi kaare poolt eraldatud soojus rikkuda lülitusaparaati ennast. Vooluga ahela **kaarevaba** kommutatsioon (nt. kiiretoimelise vaakumlülitiga) võib aga omakorda põhjustada ahela liigpingeid ja rikkuda juhtide isolatsiooni.



Joonis 1.2 Lüliti talitlus

Asjaolu, et võimsate elektriahelate sisse- ja väljalülitamine on keerukas probleem, sai teadlastele selgeks juba 19. sajandi lõpul, mil leiutati esimesed spetsiaalsed jõuahelate lülitid. Nende täiustamine on jätkunud enam kui saja aasta kestel tänaseni. Alates 20. sajandi keskpaigast hakati jõuahelate kommuteerimiseks peale kontaktaparaatide rakendama ka nn **kontaktivabu kommutatsiooniaparaate**. Seejuures võeti kasutusele mitmesuguse tööpõhimõttega aparaadid. **1933. a** võeti Saksamaal esmakordselt mootori voolu juhtimiseks kasutusele küllastuv magnetahel (*saturable core magnetic amplifiers*); **1943. a** tehti Rootsi firmas *ASEA* uurimus küllastuvate magnetahelate alal, mille tulemusena töötati välja juhitavad magnetmuundurid ehk **magnetvõimendid** (*transductors*). Magnetiliste lülitite ehk magnetvõimendite puhul kasutatakse ahela lülitamiseks ferromagnetilise südamikuga induktiivpooli omadusi. Eraldi juhtimismähiste ning sisemise positiivse tagasiside abil saab ferromagnetilise südamiku hõlpsasti viia küllastamata olekust küllastusolekusse või vastupidi ning koos sellega muuta mitme suurusjärgu võrra jõuahelasse lülitatud induktiivpooli reaktiivtakistust. Magnetvõimendeid kasutati põhiliselt madalpingeahelates (alla 1000 V) ning nende väljundvoolud ulatusid sadadesse ampritesse. Magnetvõimendi võimendustegur on suhteliselt väike (alla 100), mistõttu võimendusteguri suurendamiseks tuli kasutada magnetvõimendite kaskaadlülitusi. Magnetvõimendi suurimaks puuduseks oli suurtest induktiivsustest tingitud väike toimekiirus, mistõttu magnetvõimenditega juhitavad elektriajamid sobisid vaid aeglaste protsessidega seadmetele. Esimesed magnetvõimendid leiutati 1930. aastatel ning neid kasutati edukalt veel 60. ja 70. aastatel.

Vahelduvvooluahelate kommuteerimisel hakati lülitusprobleemide lihtsustamiseks kasutama **sünkroonlüliteid**. Kuna vahelduvvool muudab perioodiliselt oma suunda ning selle hetkväärtus on kindla perioodi järel võrdne nulliga, siis saab lülitushetke valikuga viia lülitis muundatava energiahulga miinimumini. Selle põhimõtte realiseerimine osutus kontaktlülitite puhul ülimalt keerukaks, sest kontaktide mehaaniline liigutamine vahelduvvoolu nullhetkel u 1 ms kestel polnud kontaktiajami toimekiirust arvestades võimalik. Ajami ennetav rakendamine ei taganud aga lülitushetke piisavat täpsust. Sünkroonlülitamise põhimõte leidis tõelist rakendamist alles pärast jõupooljuhtseadiste kasutuselevõttu.

1.3 Ülevaade jõuelektroonika arengust

Elektriajamite ja mehhatroonika arengust rääkides võiks eraldi vaadelda elektrimasinate arengut, muundurite ja andurite arengut ning juhtseadmete ja juhtimispõhimõtete arengut. Elektrimasinate tehnoloogia uueneb suhteliselt aeglaselt. Seepärast pole suuremaid muudatusi lähiaastatel oodata. Peamiseks tööstuses kasutatavaks mootoriks jääb asünkroonmootor. Traditsiooniliste alalisvoolumasinate tootmine väheneb pidevalt. Mehaanilistele kommutaatoritele eelistatakse üha enam pooljuhtkommutaatoreid. Vaatamata suurele algmaksumusele on püsimagnetitega vahelduvvoolu sünkroonmasinad (*permanent magnet*

alternating current machines, PMAC) väga heade tehniliste näitajatega ning majanduslikult kasulikud. Ergutusmähisega sünkroonmasinad on kasulikud väga suurtel võimsustel, mil püsimagnetite hind võib osutuda põhjendamatult suureks. Ajamites on uuesti hakatud kasutama ammu tuntud reaktiivseid sünkroonmasinaid ehk reluktantsmasinaid, mida traditsioonilised õpikud on hinnanud kui kõlbmatuid nende madala kasuteguri (u. 50 %) tõttu. Need masinad on leidmas omale kohta vektorjuhtimisega ajamites, kus nende kasutegur on võrreldava asünkroonmasinate kasuteguriga. 21. sajandil kasutatakse üha enam jõupooljuhtmuunduritest toidetavaid mootoreid. Huvitav on märkida, et muundurite paindliku juhtimise tulemusena pole tänapäeval enam põhimõttelist erinevust mootoritüüpide vahel. Vektorjuhtimise abil saab luua vahelduvvooluajami, millel on samasugused tehnilised omadused kui alalisvooluajamil. Paljudel juhtudel on muunduri mõõtmeid suudetud sedavõrd vähendada, et muunduri saab paigaldada otse mootori kerele. Sel juhul on nii mootoril kui ka muunduri ühine jahutussüsteem ning pole vaja muretseda muunduri enda ning muunduri ja mootori vaheliste ühendusjuhtmete paigaldamise eest.

Paremate automaatprojekteerimise (*computer-aided design, CAD*) programmide ja paremate materjalide kasutamise tulemusena suureneb masinate kasutegur ja töökindlus ning väheneb masina mass võimsusühiku kohta; temperatuuri-, elektri- ja magnetvälja ning konstruktsiooni mehaaniliste pingete arvutusteks kasutatakse lõplike elementide meetodil (*finite element method, FEM*) põhinevaid arvutiprogramme. Seoses energia hinna suurenemisega tuleb mootori valikul eelistada väiksele alghinnale suuremat kasutegurit ja töökindlust.

Tööstuses rakendatakse peamiselt sagedusjuhtimisega asünkroonajameid: nii etteantud pinge-sagedussõltuvusega skalaarjuhtimisega ajameid kui ka väga heade tehniliste näitajatega vektorjuhtimisega ajameid. Tööpinkides, robotites ning teistes tööstusseadmetes kasutatakse üha enam nii tagasisidega kui ka anduriteta, mudelitel põhinevaid, püsimagnetsünkroonmootoritega (*permanent magnet synchronous motor, PMSM*) ajamisüsteeme. Mootori mudeli ja parameetrite etteandmine ei taga juhtimisel mitte alati soovitud tulemusi, seepärast muutub otstarbekaks parameetrite määramine ja juhtseadme häälestamine talitluse ajal ehk sidusseadistamine. Ajamite ja tehnoloogiaseadmete töökindlust hakkavad suurendama talitluse ajal tegutsevad sidusad diagnostikasüsteemid (*on-line diagnostics*). Ajami juhtimiseks kasutatakse üha enam hägusloogikat ning tehisnärvivõrke.

1.4 Elektriajamite arengusuunad

Elektriajamite ja mehhatroonika arengust rääkides võiks eraldi vaadelda elektrimasinate arengut, muundurite ja andurite arengut ning juhtseadmete ja juhtimispõhimõtete arengut. Elektrimasinate tehnoloogia uueneb suhteliselt aeglaselt. Seepärast pole suuremaid muudatusi lähiaastatel oodata. Peamiseks tööstuses kasutatavaks mootoriks jääb asünkroonmootor. Traditsiooniliste alalisvoolumasinate tootmine väheneb pidevalt. Mehaanilistele kommutaatoritele eelistatakse üha enam pooljuhtkommutaatoreid. Vaatamata suurele algmaksumusele on püsimagnetitega vahelduvvoolu sünkroonmasinad (*permanent magnet alternating current machines, PMAC*) väga heade tehniliste näitajatega ning majanduslikult kasulikud. Ergutusmähisega sünkroonmasinad on kasulikud väga suurtel võimsustel, mil püsimagnetite hind võib osutuda põhjendamatult suureks. Ajamites on uuesti hakatud

kasutama ammu tuntud reaktiivseid sünkroonmasinaid ehk reluktantsmasinaid, mida traditsioonilised õpikud on hinnanud kui kõlbmatuid nende madala kasuteguri (u. 50 %) tõttu. Need masinad on leidmas omale kohta vektorjuhtimisega ajamites, kus nende kasutegur on võrreldava asünkroonmasinate kasuteguriga. 21. sajandil kasutatakse üha enam jõupooljuhtmuunduritest toidetavaid mootoreid. Huvitav on märkida, et muundurite paindliku juhtimise tulemusena pole tänapäeval enam põhimõttelist erinevust mootoritüüpide vahel. Vektorjuhtimise abil saab luua vahelduvvooluajami, millel on samasugused tehnilised omadused kui alalisvooluajamil. Paljudel juhtudel on muunduri mõõtmeid suudetud sedavõrd vähendada, et muunduri saab paigaldada otse mootori kerele. Sel juhul on nii mootoril kui ka muunduri ühine jahutussüsteem ning pole vaja muretseda muunduri enda ning muunduri ja mootori vaheliste ühendusjuhtmete paigaldamise eest.

Paremate automaatprojekteerimise (*computer-aided design, CAD*) programmide ja paremate materjalide kasutamise tulemusena suureneb masinate kasutegur ja töökindlus ning väheneb masina mass võimsusühiku kohta; temperatuuri-, elektri- ja magnetvälja ning konstruktsiooni mehaaniliste pingete arvutusteks kasutatakse lõplike elementide meetodil (*finite element method, FEM*) põhinevaid arvutiprogramme. Seoses energia hinna suurenemisega tuleb mootori valikul eelistada väiksele alghinnale suuremat kasutegurit ja töökindlust.

Tööstuses rakendatakse peamiselt sagedusjuhtimisega asünkroonajameid: nii etteantud pinge-sagedussõltuvusega skalaarjuhtimisega ajameid kui ka väga heade tehniliste näitajatega vektorjuhtimisega ajameid. Tööpinkides, robotites ning teistes tööstusseadmetes kasutatakse üha enam nii tagasisidega kui ka anduriteta, mudelitel põhinevaid, püsimagnetsünkroonmootoritega (*permanent magnet synchronous motor, PMSM*) ajamisüsteeme. Mootori mudeli ja parameetrite etteandmine ei taga juhtimisel mitte alati soovitud tulemusi, seepärast muutub otstarbekaks parameetrite määramine ja juhtseadme häälestamine talitluse ajal ehk sidusseadistamine. Ajamite ja tehnoloogiaseadmete töökindlust hakkavad suurendama talitluse ajal tegutsevad sidusad diagnostikasüsteemid (*on-line diagnostics*). Ajami juhtimiseks kasutatakse üha enam hägusloogikat ning tehisnärvivõrke.

1.5 Teadmiste kontroll

Peatükk 1. Teema 1: Täiturelementide ja süsteemide liigitus

1. Mis on elektriajam?
    a. elektrimootor koos toite- ja juhtimissüsteemiga;
    b. moodne elektriauto;
    c. käitatav mehhaaniline masin;
    d. elektro-mehhaaniline süsteem;
    e. elektrienergia generaator.
2. Mis on täitur?
    a. elektriline seade;
    b. elektriliselt, pneumaatiliselt või hüdrauliliselt käitatav mehhanism;
    c. elektrimehaaniline süsteem;
    d. pneumaatiline süsteem.
3. Kuidas liigitatakse täitureid?

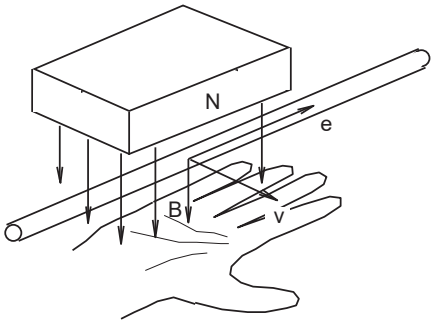
   a. konstruktsiooni järgi;
   b. energiavarustuse järgi;
   c. suuruse, võimsuse ja massi järgi;
   d. juhtimissignaali järgi.
4. Mis on pingeallikas ja mis on vooluallikas?
   a. konstantse pinge või konstantse vooluga elektriallikas;
   b. reguleeritava pinge või reguleeritava vooluga elektriallikas;
   c. elektriseade, millega saab hoida fikseeritud pinge või fikseeritud voolu väärtust;
   d. elektriallikas, milles on täiendava näivtakistusega elemendid: kondensaatorid ja induktiivsused.
5. Mis on elektrimootori sujuvkäivitus ja mis on sujuvkäiviti?
   a. meetod ja seade asünkroonmootori sujuvaks käivitamiseks pinge reguleerimise abil;
   b. meetod ja seade asünkroonmootori sujuvaks käivitamiseks sageduse reguleerimiseks;
   c. meetod ja seade mitmesuguste elektrimootorite sujuvaks käivitamiseks.

2 ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE

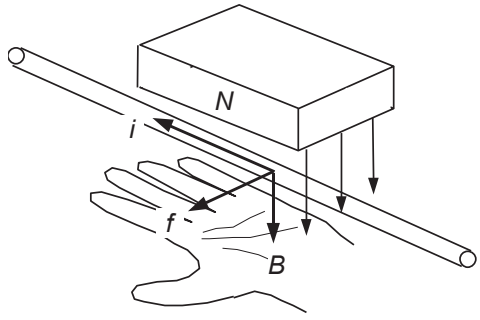
2.1 Üldised põhimõtted

Elektromehaaniline energiamuundusprotsess põhineb inglise füüsiku M. Faraday poolt 1831. a. avastatud elektromagnetilise induktsiooni nähtusel. **Elektromagnetiliseks induktsiooniks** nimetatakse nähtust, mille korral magnetvälja toimel indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud. Seejuures eristatakse kolme võimalust: a) juhe liigub paigalseisva magnetvälja suhtes, b) magnetväli liigub paigalseisva juhtme suhtes või 3) juhe ja magnetväli püsivad paigal kuid voolutugevus ja sellest tulenevalt ka magnetvoo tihedus muutuvad ajas. Indutseeritud elektromotoorjõu suund määratakse **parema käe reegliga** (Joonis 2.1 a).

Kui magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa ja pöial näitab juhtme liikumise suunda, siis väljasirutatud sõrmed näitavad indutseeritud elektromotoorjõu suunda.



Indutseeritud elektromotoorjõu suunamääramine



Juhile toimiva jõu suuna määramine

Joonis 2.1 Indutseeritud elektromotoorjõu parema käe reegli (*a*) ja jõu suuna määramine vasaku käe reegli põhjal (*b*)

Indutseeritav elektromotoorjõud on seda suurem, mida suurem on magnetvoo tihedus ja mida kiiremini juhe magnetväljas liigub, s.t.

$$E = B\,l\,v\sin\alpha, \tag{2.1}$$

kus E on indutseeritud elektromotoorjõud voltides (V), B on magnetvoo tihedus ehk induktsioon teslades (T), l on magnetväljas liikuva juhtme pikkus meetrites (m), v on juhtme liikumiskiirus (m/s) ja α on juhtme liikumissuuna ja magnetvälja jõujoonte vaheline nurk. Kui juhe liigub magnetvälja jõujoonte sihis, on α = 0 ja elektromotoorjõudu juhtmes ei indutseerita. Elektromotoorjõud on maksimaalne kui juhtme liikumissuund on risti magnetvälja jõujoonte sihiga. arvestades, et keha kiirus iseloomustab tema asendi muutumist ajas ning $v = ds/dt$, kus ds/dt on asendi tuletis aja järgi. Seepärast võib indutseeritud elektromotoorjõu valemi esitada ka kujul

$$E = B\,l\,\frac{ds}{dt}\sin\alpha. \tag{2.2}$$

Arvestades, et magnetvoo tiheduse *B* ja pindala *ls* korrutis kujutab endast magnetvoogu, saab elektromotoorjõu avaldise esitada ka magnetvoo tuletise kaudu

$$E = \frac{d\Phi}{dt}\sin\alpha \,, \qquad (2.3)$$

s.t. indutseeritud elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega.
Kui indutseeritud elektromotoorjõuga juhe moodustab suletud elektriahela, siis tekib suletud ahelas elektrivool *i*. Voolu suuruse saab aktiivtakistusega elektriahelas arvutada Ohmi seaduse põhjal *i = E / R*, kus *i* on vool amprites (A) ja *R* on elektriahela takistus oomides (Ω). Voolu suuna saab määrata **Lenzi reegli** põhjal.
Indutseeritava elektromotoorjõu poolt tekitatud voolu suund on alati niisugune, et ta töötab vastu voolu tekitavale nähtusele (s.t. juhtme või magnetvälja liikumisele või magnetvälja muutumisele).
Järelikult tekitab magnetväljas asuv vooluga juhe jõu, mille suund sõltub nii magnetvälja jõujoonte suunast kui ka voolu suunast. Jõu suund määratakse **vasaku käe reegliga** (Joonis 2.1 b).
Kui magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa ja väljasirutatud sõrmed näitavad voolu suunda, siis pöial näitab juhtmele mõjuva jõu suunda.
Juhtmele mõjuv jõud on seda suurem, mida pikem on juhe ning mida suuremad on magnetvoo tihedus ja juhet läbiv vool, s.t.

$$F = B\,i\,l\sin\alpha \qquad (2.4)$$

Jõu suund võib olla liikumisele, s.t. kiiruse suunale vastu, või kiirusega samasuunaline. Esiteks, kui juhet liigutada mingi välise jõu toimel, indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud, mida saab kasutada voolu tekitamiseks suletud elektriahelas. Sel juhul on tegemist **elektrienergia generaatoriga**, milles mehaaniline sisendenergia muundatakse elektriliseks väljundenergiaks.

$$P_{meh} = F\,v = B\,i\,l\,v\sin\alpha = E\,i = i^2 R = P_{el} \qquad (2.5)$$

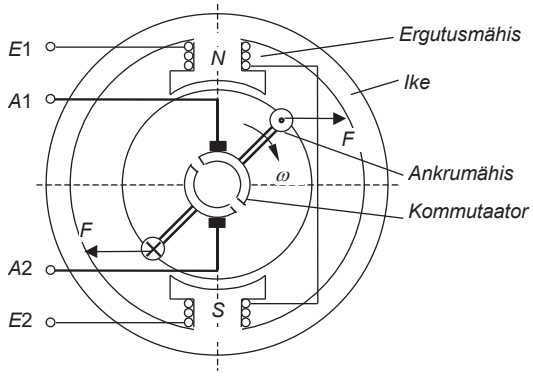
Teiseks, kui tekitada välise elektromotoorjõu alliga juhtmes vool *i* ning asetada vooluga juhe magnetvälja, siis mõjub juhtmele jõud, mis paneb selle liikuma jõu suunas. Sel juhul on tegemist **elektrimootoriga**, mis muundab elektrienergia mehaaniliseks liikumiseks.
Elektrimasin võib töötada nii elektrienergia generaatorina kui ka energia tarbijana. Elektrimootorina töötavat elektrimasinat kasutatakse mitmesuguste töömasinate (ventilaatorite, pumpade, kompressorite jms.) või mehhanismide käitamiseks. Nüüdisaegste töömasinate ja paindliku tehnoloogia puhul vajatakse suure kasuteguriga elektrimootoreid, mille kiirust ja momenti saab sujuvalt juhtida. Masinate potentsiaalse ja kineetilise energia saab samuti ära kasutada tehnoloogilises protsessis, kui rakendada neid käitavate elektrimasinate paindlikku juhtimist ning vastavalt vajadusele viia elektrimasin mootoritalitlusest generaatoritalitlusse või vastupidi. Näiteks saab koormuse langetamisel ülestõstetud massi potentsiaalse energia muundada elektrienergiaks. Samuti saab elekterveoki või suure hoomassiga mehhanismi pidurdamisel muundada liikuva massi kineetilise energia elektrienergiaks. Elektrimasinate paindlikuks juhtimiseks vajatakse omakorda mitmesuguseid muundureid elektrivoolu polaarsuse, pinge, vahelduvvoolu sageduse, impulssvoolu kuju jms. reguleerimiseks. Niisuguseid muundureid saab tänapäeval kõige paremini realiseerida mitmesuguste jõupooljuhtkomponentide abil.

Elektrimasinaid liigitatakse sõltuvalt vooluallikast alalis- ja vahelduvvoolumasinateks, viimaseid omakorda tööpõhimõtte järgi asünkroon- ja sünkroonmasinateks.
Elektrimasinad koosnevad magnetahelast ja elektriahelatest. Suurema kasuteguri saamiseks peab magnetahelal olema hea magnetiline juhtivus ning elektriahelal hea elektrijuhtivus. Seepärast valmistatakse magnetahelad ferromagnetilisest materjalist ja masina mähised vasktraadist. Vahelduvmagnetväljade puhul kasutatakse elektrimasina magnetahelas pöörisvoolukadude vähendamiseks elektrotehnilist lehtterast. Alalismagnetväljade tekitamiseks kasutatakse nii elektromagneteid kui ka püsimagneteid. Kuna magnetahelasse kuulub ka masina staatori ja rootori vaheline mittemagnetiline õhupilu, siis püütakse masina kasuteguri suurendamiseks teha õhupilu võimalikult väikeseks.
Energia muundamine elektrimasinas on paratamatult seotud kadudega. Kaod tekivad:

- voolu kulgemisel läbi masina mähiste. See kadu on tingitud mähise aktiivtakistusest ning kuna tegemist on vaskjuhtidega, nimetatakse vastavat kadu elektrimasina **vaseskaoks**;
- magnetsüdamikus ajaliselt muutuva magnetvälja toimel hüstereesist ja pöörisvooludest. Seda kadu tuntakse masina **teraseskaona** (ka rauaskaona). Teraseskadu on seda suurem, mida suurem ja massiivsem on magnetahel ning mida laiem on magnetmaterjali hüstereesisilmus ja suurem ümbermagneetimise sagedus;
- masinaosade ja õhu vahelisest hõõrdest, mis põhjustab **ventilatsioonikao**;
- masina laagrite hõõrdest, mis põhjustab **hõõrdekao**.

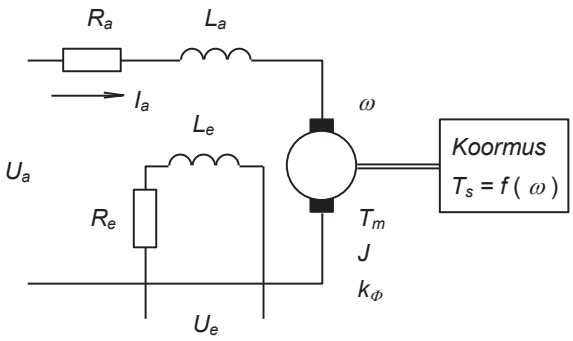
2.2 Alalisvoolumasin

Alalisvoolumasina pooluste magnetväli tekitatakse ergutusmähise elektrivooluga või püsimagnetite abil (Joonis 2.2). Poolused on kinnitatud masina terasest ikke külge. Viimane on ühtlasi masina kereks ja magnetahela osaks. Masinaosa, milles luuakse magnetväli, nimetatakse induktoriks. Induktori magnetväljas liiguvad vooluga juhtmed. Et saavutada masina pidevat pöörlemist, tuleb juhtme liikumisel ühe pooluse (N) alt teise (S) alla muuta voolu suunda juhtmes. Voolu suuna muutmiseks kasutatakse traditsioonilistes alalisvoolumasinates mehaanilist kommutaatorit. Masinaosa, mis koosneb vooluga juhtmetest ja kommutaatorist, nimetatakse alalisvoolumasina ankruks.



Joonis 2.2 Alalisvoolumasina tööpõhimõte

Tavaliselt on induktor masina paigalseisev osa ja ankur pöörlev osa. Vool juhitakse ankrumähisesse harjadega, mis libisevad ankrumähisega ühendatud kommutaatori lestadel (lamellidel). Ankru pöörlemisel liiguvad harjad ühelt lestalt teisele muutes sellega masina neutraaljoonel voolu suunda ankrumähises.
Alalisvoolumasina tööd on otstarbekas kirjeldada lähtudes tema füüsikalisest tööpõhimõttest, võttes aluseks Joonis 2.3 esitatud aseskeemi.



Joonis 2.3 Koormatud alalisvoolumootori aseskeem

Eeldusel, et ergutusvoog on konstantne, kirjeldavad masina tööd järgmised võrrandid:

$$\left.\begin{aligned} U_a &= i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + E; \\ E &= k\Phi \cdot \omega; \\ J\frac{d\omega}{dt} &= T_m - T_s; \\ T_m &= k \cdot \Phi \cdot i_a; \\ T_s &= f(\omega); \\ \omega &= \frac{d\varphi}{dt}, \end{aligned}\right\} \qquad (2.6)$$

kus U – ankrupinge, i – ankruvool, R – ankruahela takistus, L – ankruahela induktiivsus, E – vastuelektromotoorne jõud, k – masina konstant, Φ ergutusmähise või püsimagnetite poolt tekitatud magnetvoog, J – mootori võllile taandatud intertsimoment, ω – pöörlemiskiirus, Tm – mootori moment, Ts – koormusmoment, φ – võlli pöördenurk.
Võrranditest on näha, et ankruvool sõltub nii pingest kui ka vastuelektromotoorjõust, viimane omakorda aga pöörlemiskiirusest. Vool määrab mootori poolt arendatava pöördemomendi, millest sõltub võlli liikumise iseloom ja järelikult ka pöörlemiskiirus. Nii on kõik suurused vastastikuses seoses ning alalisvoolumasina näol on tegemist mitmelisidusa dünaamilise juhtimisobjektiga.
Masina talitluse uurimiseks tuleb lahendada teda kirjeldav diferentsiaalvõrrandite süsteem. Kõige hõlpsam on seda teha numbriliste meetoditega, millest omakorda võib valida lihtsaima, s.o. Euleri meetodi. Alljärgnevalt kirjeldatud Euleri meetodil põhineva algoritmi kohaselt saab arvutada alalisvoolumasina voolu, kiiruse ja asendi siirdeprotsesse.
Näiteks võib eeldada, et mingi lühikese ajavahemiku Δt jooksul on mootori pöörlemisest tingitud vastuelektromotoorjõu muutus sedavõrd väike, et ei avalda olulist mõju mootori

ankruvoolule. Kui ajaintervall Δt on küllalt väike, siis selle kestel toimunud voolu juurdekasv on voolu endaga võrreldes väike (Δi << i) ja avaldub võrrandist:

$$\Delta i_i = \frac{U - k\Phi \cdot \omega_i - i_i \cdot R}{L} \cdot \Delta t_i, \tag{2.7}$$

kus ωi - pöörlemiskiirus ajaintervalli Δti algul. Pärast Δti möödumist on vool ii kasvanud Δii võrra ning uus voolu väärtus leitakse võrrandist: $i_{i+1} = i_i + \Delta i_i$. Analoogiliselt saab arvutada pöörlemiskiiruse ωi juurdekasvu $\Delta\omega i$ eeldusel, et vool ii ning järelikult ka sellest tingitud mootori moment muutuvad ajavahemiku Δti jooksul vähe.

$$\Delta\omega_i = \frac{k\Phi i_i - T_S(\omega_i)}{J} \Delta t_i, \tag{2.8}$$

kus $k\Phi i = TMi$ - mootori moment ja $Ts(\omega i)$ - koormusmoment ajaintervalli Δti algul. Pärast Δti möödumist on pöörlemiskiirus ωi suurenenud juurdekasvu $\Delta\omega i$ võrra.

$$\omega_{i+1} = \omega_i + \Delta\omega_i. \tag{2.9}$$

Võlli pöördenurga juurdekasv leitakse võrrandist:

$$\Delta\varphi_i = \omega_i \cdot \Delta t_i \tag{2.10}$$

ning pöördenurk pärast ajaintervalli Δti möödumist

$$\varphi_{i+1} = \varphi_i + \Delta\varphi_i. \tag{2.11}$$

Eeldusel, et Δt on küllalt väike, saab alalisvoolumootori tööd kirjeldava mitmelisidusa võrrandsüsteemi tasandada diskreetsele järjestikulisele arvutuseeskirjale e algoritmile ning leida sel teel mootori tööd iseloomustavad suurused.

2.3 Asünkroonmasin

Masin võib töötada nii mootorina kui ka generaatorina. Asünkroonmootor on maailmas enimkasutatav elektrimootor. Mootori põhiosadeks on paigalseisev staator ja pöörlev rootor. Mootori puhul on staatorimähise ülesandeks pöörleva magnetvälja tekitamine. Mootori kiirus sõltub magnetvälja pöörlemise kiirusest ja viimane omakorda staatorimähise pooluste arvust ja toitevoolu sagedusest. Magnetvälja pöörlemiskiirust nimetatakse mootori sünkroonnurkkiiruseks ω_0 ehk ka lihtsalt sünkroonkiiruseks n_0. Nende vahel kehtib alljärgnev seos

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi n_0}{60} \tag{2.12}$$

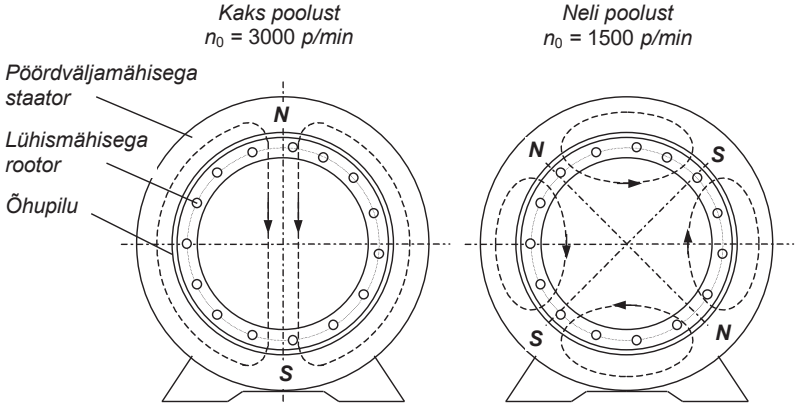
kus ω_0 – mootori sünkroonnurkkiirus (rad/s), f – toitevoolu sagedus, p – mootori pooluste arv ja n_0 – mootori sünkroonkiirus (p/min).

Kahepooluselises ehk ühe pooluspaariga mootoris luuakse Joonis 2.4, a näidatud magnetväli, mille pöörlemiskiirus toitevõrgu vahelduvvoolu 50 Hz sageduse korral on 3000 p/min ehk 314 rad/s. Neljapooluselises ehk kahe pooluspaariga masina sünkroonkiirus on kaks korda väiksem, s.o. 1500 p/min ehk 157 rad/s. Kuuepooluselise masina sünkroonkiirus on vastavalt 1000 p/min ehk 105 rad/s.

Rootori pöörlema panemiseks on vaja peale staatorimähiste poolt tekitatud pöörleva magnetvälja tekitada vool rootorimähises. Asünkroonmootori puhul tekitatakse see vool elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel. Nimetatud põhimõttest tuleneb ka asünkroonmootori ingliskeelne nimetus - *induction motor*, s.t. induktsioonmootor. Staatori ja rootori mähised on omavahel magnetahela kaudu elektromagnetilises sidestuses. Elektromagnetilise induktsiooni põhimõtte kohaselt indutseeritakse juhtmes elektromotoorjõud kui juhe magnetväljas liigub või kui juhet ümbritsev magnetväli muutub. Järelikult, elektromotoorjõu ja voolu tekitamiseks rootorimähises, peavad staatori magnetvälja ja rootori pöörlemiskiirused teineteisest erinema. Seda kiiruste erinevust nimetatakse rootori **libistuseks** (*slip*) ja tähistatakse tähega *s*. Libistus arvutatakse sünkroonkiiruse ω_0 ja rootori tegeliku pöörlemiskiiruse ω suhtelise vahena.

$$s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} = \frac{n_0 - n}{n_0} \tag{2.13}$$

Kuna rootori pöörlemiskiirus erineb magnetvälja pöörlemiskiirusest, s.t. sünkroonkiirusest, nimetatakse seda tüüpi mootorit asünkroonmootoriks. Standardse asünkroonmootori nimilibistus on mõni protsent, kusjuures suurema nimilibistusega on väiksemad mootorid.



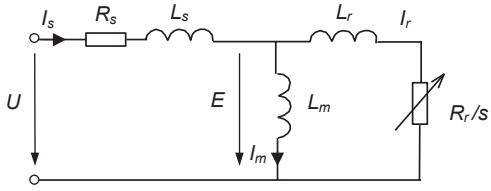
Joonis 2.4 Asünkroonmootori staatori magnetväli sõltuvalt staatorimähise pooluste arvust

Asünkroonmasina staatikamudel koostatakse mootori ühefaasilise aseskeemi alusel. Kasutusel on mitmed erinevad aseskeemid, millest kõige enam kasutatakse T-kujulisi aseskeeme (Joonis 2.5). Aseskeem võimaldab arvutada mootori staatori- ja rootorivoolud, mille põhja omakorda saab arvutada masina elektrilise võimsuse ning mootori pöördemomendi. Joonisel on näidatud mootori elektriahela järgmised parameetrid: R_s – staatorimähise aktiivtakistus,

L_s – staatorimähise puistevoost tingitud puisteinduktiivsus, L_m – mootori põhiinduktiivsus, L_r – rootorimähise puistevoost tingitud puisteinduktiivsus, R_r – rootorimähise aktiivtakistus, L_r', R_r' – rootoriahela ekvivalentne induktiivsus ja takistus, L_{sr} – staatori- ja rootoriahela summaarne ekvivalentne puisteinduktiivsus, E – õhupilu elektromotoorjõud, s – rootori libistus staatorivälja suhtes.

Aseskeemi (Joonis 2.5) põhjal kirjutatakse välja järgmised asünkroonmasina staatika-võrrandid:

$$U_1 = I_s \cdot R_s + j\omega_1(I_s \cdot L_s + I_m \cdot L_m),$$
$$0 = I_r \cdot \frac{R_r}{s} + j\omega_1(I_r \cdot L_r + I_m \cdot L_m). \quad (2.14)$$



Joonis 2.5 Asünkroonmootori lihtsustatud ühefaasiline (T-kujuline) aseskeem

Rootorivoolu arvutatakse õhupilu elektromotoorjõu E kaudu

$$I_r = \frac{E}{(R_r / s) + j\omega_1 L_r}. \quad (2.15)$$

Aseskeemi kohaselt on rootoris eralduv energia võrdeline võimsusega takistusel R_r/s. Tegelik rootori energiakadu võrdub aga võimsusega takistil R_r. Nende kahe suuruse vahe iseloomustab mootori ekvivalentset mehaanilist võimsust.

$$P_{meh} = mI_r^2\left(\frac{R_r}{s} - R_r\right) = mI_r^2 R_r\left(\frac{1-s}{s}\right), \quad (2.16)$$

kus m on staatorimähise faaside arv (tavaliselt m = 3).

Kui oletada, et ω on rootori nurkkiirus, siis saab mootori pöördemomendi arvutada valemiga:

$$T = \frac{P_{meh}}{\omega} = mI_r^2 R_r\left(\frac{1-s}{s}\right)/\omega. \quad (2.17)$$

Kuna rootori nurkkiirus on arvutatav valemiga:

$$\omega = \omega_s(1-s) = 2\pi \cdot f(1-s)/p, \quad (2.18)$$

kus ω_s on rootori sünkroonkiirus ja p pooluste arv, võib mootori pöördemomendi avaldada kujul:

$$T = \frac{pm}{2\pi f} \cdot I_r^2 \cdot \frac{R_r}{s}. \quad (2.19)$$

Mootori kiiruse saab arvutada ajami põhivõrrandist

$$J\frac{d\omega}{dt} = T - T_s, \tag{2.20}$$

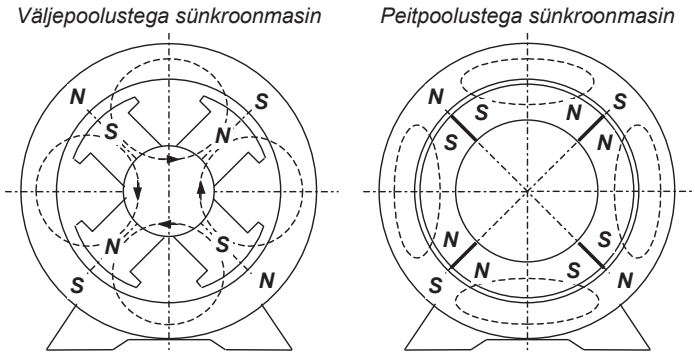
kus J on ajami taandatud inertsimoment ja T_s koormusmoment. Märkigem, et mooori võllile taandatud inertsimomendi kineetiline energia on võrdne kõigi pöörlevate osade summaarse kineetilise energiaga.

Võrrandite 2.14 kuni 2.19 põhjal saab arvutada mootori mehaanilise tunnusjoone (kiiruse ja momendi sõltuvuse) (vt. p. 2.6). Ühefaasiliste aseskeemide puuduseks on asjaolu, et need põhinevad pingete ja voolude keskväärtustel ja ei võimalda kirjeldada magnetvälja pöörlemist ning sellest tulenevalt ka kõiki mootori dünaamikaga seotud protsesse. Peale selle on joonisel näidatud aseskeemi puuduseks see, et aseskeem ei kajasta lühisrootori mähises toimuvat voolude pinnaefekti, mis mõjutab oluliselt asünkroonmootori tööd suurematel libistustel. Pinnaefektist sõltub suurel määral asünkroonmasina mehaanilise tunnusjoone kuju.
Rootorimähiste varraste vahelduvvoolusagedus on võrdeline toitesageduse ja libistuse korrutisega. Suurema libistuse puhul, nt. mootori käivituse algetapil, on rootorivoolu sagedus võrdne toitepinge sagedusega s = 1, s.t. tunduvalt suurem kui nimilibistuse puhul. Käivitusprotsessi jooksul muutub libistus alates s = 1 kuni nimilibistuseni s_n. Pinnaefekt avaldub massiivses vahelduvvoolu juhis nii, et juhi pinnal on voolutihedus suurem kui juhi sees. Voolu ebaühtlase jagunemise tõttu juhi efektiivne ristlõikepind väheneb ja aktiivtakistus suureneb. Rootoriahela aktiivtakistuse muutumine kajastub aga otseselt mootori elektromehaaniliste omaduste ja mehaanilise tunnusjoone kuju muutumises.

2.4 Sünkroonmootorid ja sammmootorid

Sünkroonmootori staatorimähis tekitab samuti nagu asünkroonmasina puhul pöörleva magnetvälja (Joonis 2.6). Erinevalt asünkroonmootorist tekitatakse aga sünkroonmootori rootoris elektromagnet- või püsimagnetergutusega veel teine magnetvoog (ergutusvoog), mis magnetahela kaudu aheldub staatorimähise magnetvooga. Selle tulemusena haarab staatori pöörlev magnetväli rootori endaga kaasa (s.t. staatorivälja N poolused tõmbuvad rootori S poolustega ja vastupidi) ning rootor hakkab pöörlema staatorivälja sünkroon-kiirusel. Rootori ergutamiseks elektromagnetite abil tuleb ergutusvool juhtida pöörlevasse rootorisse läbi rootoril asuvate kontaktrõngaste. Püsimagnetite kasutamisel sellist vajadust pole.

Sõltuvalt sünkroonmasina rootori kujust ja pooluste asetusest eristatakse väljepoolustega (*salient pole*) ja peitpoolustega masinaid. Esimesel juhul on rootori poolused selgesti eristatavad ning õhupilu on minimaalne pooluse kohal. Teisel juhul on rootori pind sile ning õhupilu on ühtlane kogu ulatuses. Väljepoolustega masin töötab ka ilma ergutusväljata, s.t ilma ergutuseks kasutatavate püsi- või elektromagnetiteta. Sel juhul on tegemist nn reaktiivse sünkroonmootoriga ehk reluktantsmootoriga (*reluctance motor*), mille töö põhineb õhupilu magnetilise takistuse (e. reluktantsi) muutumisel sõltuvalt rootori asendist.



Joonis 2.6 Sünkroonmootori tööpõhimõte

Sünkroonmootor arendab momenti ainult sünkroontalitluses. Seepärast on omaette probleemiks sünkroonmootori käivitamine otsevõrkulülituse puhul, milleks kasutatakse asünkroonkäivitusmähist. Sünkroonmasina kiiruse reguleerimine toimub samuti nagu asünkroonmasina puhul toitepinge sageduse reguleerimisega.

Samm-mootorid erinevad sünkroonmootoritest vaid selle poolest, et pöörlev magnetväli tekitatakse neis mitte kolmefaasilise siinuspingega, vaid järjestikuliste impulsside jaotamisega masina mähistele. Seetõttu võib olla impulsside väikese sageduse puhul samm-mootori liikumine katkendlik. Samm-mootorid sobivad kasutamiseks väikese võimsusega positsioonjuhtimisega ajamites, mil mootorile antud impulsside arv on võrdeline rootori pöördenurga (ehk asendi) muutusega ning ajami positsioonimiseks pole vaja kasutada täiendavat asendiandurit. Sammu vähendamiseks ja positsioonimistäpsuse suurendamiseks valmistatakse samm-mootorid suure pooluste arvuga. Suurema võimsuse korral pole samm-mootorite kasutamine otstarbekas nende väikese kasuteguri tõttu. Oma tööpõhimõttelt jagunevad samm-mootorid püsimagnetergutusega mootoriteks, väljepoolustega mootoriteks ning nende mõlema kombinatsiooniga hübriidmootoriteks.

2.5 Kolmefaasiline pöördmagnetväli

Vahelduvvoolumasinate **pöördmagnetväli** ehk lihtsalt pöördväli tekitatakse staatorimähiste kolmefaasilise süsteemiga. Kolme faasi mähised on staatorisse paigaldatud üksteise suhtes ruumiliselt nihutatult ning neid toidetakse ajaliselt 1/3 perioodi võrra nihutatud siinuspingetega (vt. Joonis 2.7). Mähiste ruumiliselt ja ajaliselt nihutatud voolude süsteem tekitab liikuva (pöörleva) magnetvälja. Pöörlevat magnetvälja saab tekitada ka muude toitepingesüsteemidega, mille faaside arv on kolmest erinev. Väikesevõimsuseliste elektrimasinate puhul on kasutusel nii kahefaasiline süsteem kui ka ühefaasilise toitepinge poolt genereeritud kahe nihutatud magnetvooga süsteem. Võimsate masinate puhul on mõeldav ka viiefaasilise süsteemi kasutamine.

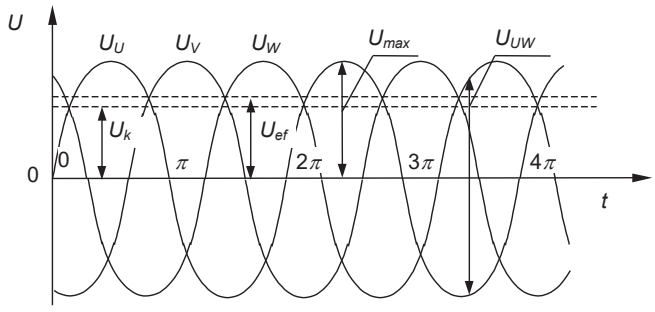
Elektrivõrkudes on üldlevinud kolmefaasiline toitepingete süsteem. Sellest tulenevalt on üldlevinud ka kolmefaasilised elektrimasinad. Neid masinaid saab kasutada nii võrgust kui ka pooljuhtmuunduritest toitmisel. Võrgutoitel vahelduvvoolumasinate otsevõrkulülituse puhul tekib suur käivitusvoolu tõuge, mille leevendamiseks rakendatakse mitmesuguseid käivituslülitusi või sujuvkäiviteid. Elektrimasina staatorimähised võivad olla ühendatud kas

täht- või kolmnurklülitusse, kusjuures kolmnurklülituses mähiste vool on sama toitepinge juures $\sqrt{3}$ korda suurem kui tähtlülituse puhul. Et vältida masina riknemist, tuleb mootori kasutamisel hoolega jälgida tema mähiste lülitust ning sellele vastavat nimipinget.

Märkigem, et vahelduvpingete ja -voolude puhul eristatakse amplituud-, efektiiv- ja keskväärtusi. Efektiivväärtus on ühtlasi ruutkeskmine väärtus, mis iseloomustab pinge või voolu töövõimet (võimsust); vrd. $P = i^2R$ või $P = U^2/R$. Siinuspinge kesk- ja efektiivväärtuste seos amplituudväärtusega avaldub valemitega.

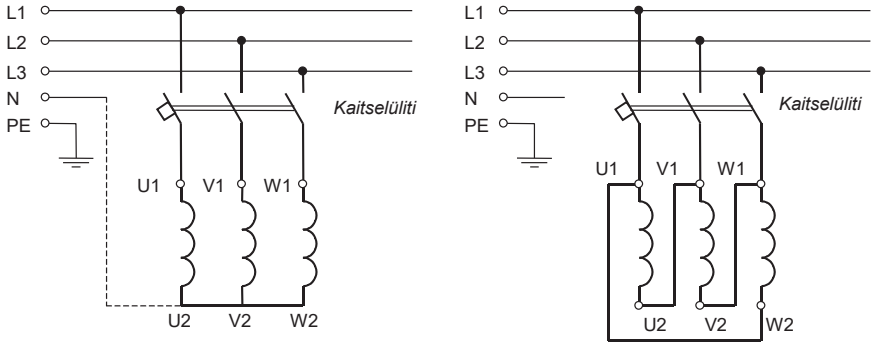
$$U_k = 2\,U_{\max}/\pi = 0{,}63\,U_{\max} \qquad (2.21)$$
$$U_{ef} = U_{\max}/\sqrt{2} = 0{,}71\,U_{\max}$$

Efektiiv- ja keskväärtuse suhet nimetatakse pinge kujuteguriks. Siinuspinge kujutegur on K_f = 1,11.



Joonis 2.7 Kolmefaasiline toitepingete süsteem

Toitevõrkudes kasutatakse ühefaasilise süsteemi puhul kolmejuhilist ja kolmefaasilise süsteemi puhul 5-juhilist juhistikusüsteemi, milles peale liinijuhtide L1, L2, L3 on kasutusel neutraaljuht N ja maandusjuht PE (*protection earth*) (Joonis 2.8). Tähtühenduse puhul ühendatakse neutraaljuht mõnikord tähe keskpunktiga (nt. pingete sümmeetria tagamiseks). Maandusjuht ühendatakse inimeste ohutuse tagamiseks elektrimasina või muu elektriseadme kerega.

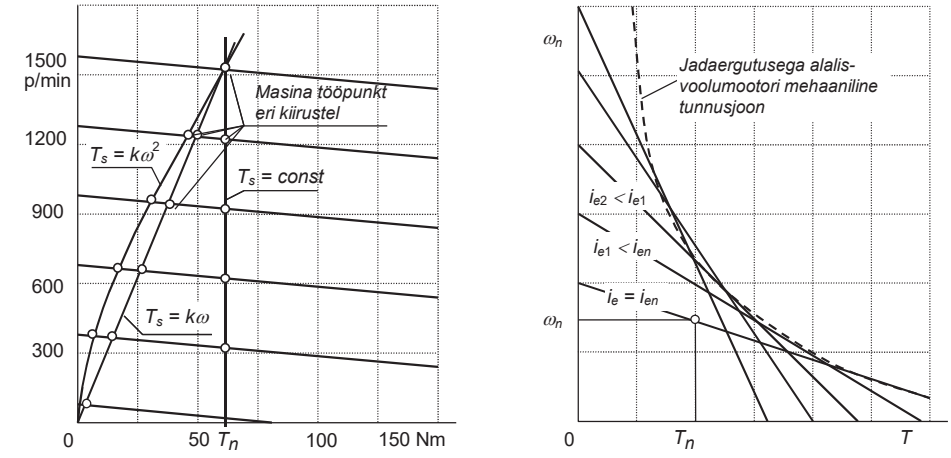


Joonis 2.8 Vahelduvvoolumasina staatorimähiste täht- ja kolmnurklülitused

2.6 Elektrimasinate kiiruse ja momendi reguleerimine

Elektrimootori kasutamise seisukohalt on mootori kõige olulisemateks tehnilisteks näitajateks mehaanilised tunnusjooned ehk pöörlemiskiiruse sõltuvus koormusmomendist. **Alalisvoolumootori** puhul arvutatakse mehaanilised tunnusjooned valemite 2.6 põhjal. Mootori tööpunkt kiiruse-momendi tasandil leitakse mootori ja koormusmasina mehaanilise tunnusjoonte lõikumiskohast. Sõltuvalt mootorit koormava töömasina iseärasustest võib koormusmoment olla kiirusest sõltumatu, s.t. konstantne, võrdeline kiirusega või kiiruse ruuduga (nt. ventilaatorite, pumpade ja kompressorite puhul (Joonis 2.9, a). Mootori pöörlemiskiirust saab reguleerida nii ergutus- kui ka ankrupinge muutmisega. Valdavalt reguleeritakse ajamites ankrupinget, kuid erijuhul, nt. suure kiiruse või suure momendi saavutamiseks on otstarbekas reguleerida ka ergutuspinget (Joonis 2.9, b).

Traditsiooniliselt saab alalisvoolumootorite puhul eristada sõltumatu ehk rööpergutusega ja jadaergutusega masinaid. Neist esimesi kasutatakse konstantse momendiga või momendist sõltumatult reguleeritava kiirusega ajamites, teisi aga konstantse võimsusega ajamites. Jadaergutusega alalisvoolumootori puhul on ergutusmähis ühendatud ankrumähisega jadamisi ning seda läbib sama vool, mis ankrumähistki. Seega toimub koormusmomendi ja koormusvoolu suurenemisel ka ergutusvoolu ja ergutusvoo automaatne suurenemine, mis omakorda suurendab mootori poolt arendatavat momenti. Koormusmomendi vähenemisel väheneb automaatselt ka mootori poolt arendatav moment ning suureneb mootori kiirus. Niisugused mehaanilised omadused on kõige sobivamad veoajamite korral. Seepärast kasutatakse jadaergutusega alalisvoolumootoreid peamiselt elekterveokites (trammidel, trollibussidel, elektrivedurites, elektrikärudel jm). Tänu jõupooljuhttehnika ja mikroprotsessortehnika hoogsale arengule saab tänapäeval alalisvoolumootori ankru- ja ergutusvoolu reguleerida üheaegselt eraldi muunduritega ning vastavalt konkreetse ajami vajadustele. Niisuguselt ajamilt saadakse täpselt soovitud kujuga mehaanilised tunnusjooned, mis koormusega kõige paremini sobivad. Seepärast pole jadaergutusega mootorite kasutamine enam nii vajalik kui varem.

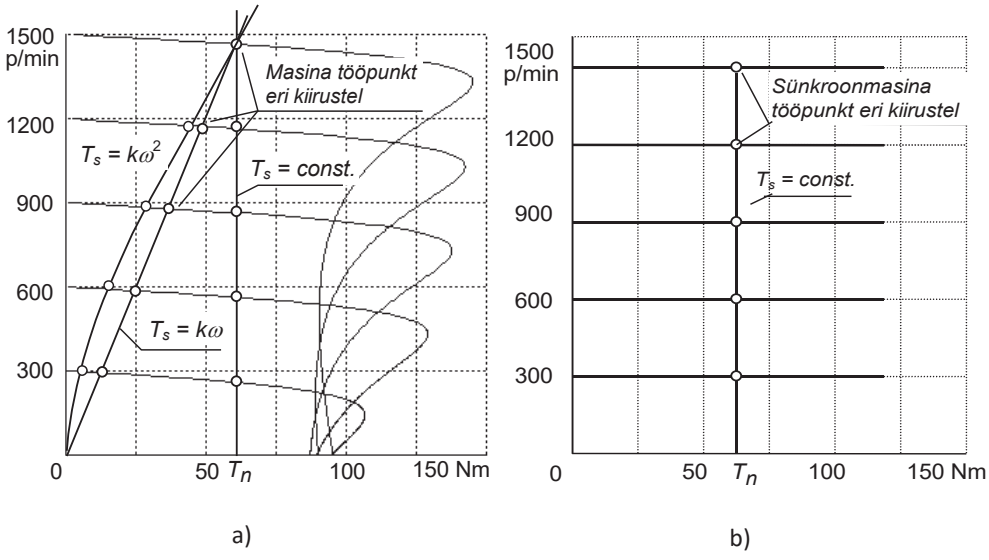


a) b)

Joonis 2.9 Alalisvoolumasina kiiruse reguleerimine ja mehaanilised tunnusjooned

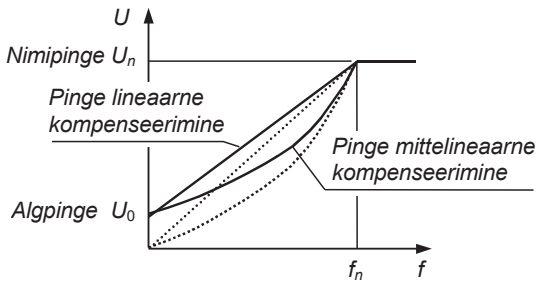
Vahelduvvoolumasinate kiiruse sujuvaks reguleerimiseks on tänapäeval valdavalt kasutusel sagedusreguleerimise põhimõte. Mootori toitepinge sageduse muutmisel tuleb arvestada, et masina mähiste induktiivtakistused sõltuvad võrdeliselt sagedusest. Takistused omakorda mõjutavad mähiste voolu ning sellest tulenevalt ka magnetahela väljatugevust ja magnetvoogu. Liiga suure magnetväljatugevuse korral ferromagnetilisest materjalist magnetahel küllastub. Suurte voolude korral suurenevad nii mootori vases- kui ka rauaskaod. Seepärast on väga oluline valida igal kiirusel mootori toitepinge nii, et mootori kasutegur oleks võimalikult suur ja kaod väikesed.

Asünkroonmootori kiiruse reguleerimise viisidest kasutatakse kõige enam etteantud pinge sagedussõltuvuse järgi juhtimist, mil mootori pinge antakse ette sageduse funktsioonina $U = f\,(f)$. Kõige lihtsamal juhul hoitakse pinge ja sageduse suhe konstantsena U / f = const. Sageduse vähendamisel hakkab siis väikestel kiirustel vähenema ka mootori maksimaalne moment ning suureneb libistus. Joonis 2.10, a on näidatud asünkroonmootori mehaanilised karakteristikud, juhul kui kiirust reguleeritakse seaduspärasuse U / f = const. järgi. Sel juhul väheneb väikestel kiirustel mootori maksimaalne moment kuni kolmandiku võrra. Mootori tööpunktid on näidatud konstantse momendi $T = const$, lineaarse momendi $T = k\,\omega$ puhul, ja koormusmomendi ruutsõltuvuse (ventilaatorkarakteristiku) puhul.



Joonis 2.10 Vahelduvvoolumasinate kiiruse reguleerimine a) asünkroonmootori kiiruse reguleerimine lineaarse pinge sagedussõltuvuse (U / f = const.) järgi; b) sünkroonmootori kiiruse sagedusreguleerimine

Järelikult on *U / f = const* järgi kiiruse reguleerimist otstarbekas kasutada juhul, kui mootori koormus väikestel kiirustel veidi väheneb. Samuti on ilmne, et pinge reguleerimise seaduspärasus mootori sagedusjuhtimisel sõltub otseselt koormuskarakteristiku kujust. Konstantse koormusmomendi puhul püütakse tavaliselt konstantsena hoida ka mootori maksimaalset momenti. Sobiva pinge reguleerimise seaduspärasuse valikuga saavutatakse maksimaalse momendi konstantsus kogu reguleerimispiirkonnas. Ühtlasi tagatakse ka ligikaudu ühesugune lühiajaline ülekoormatavus mootori eri kiirustel. Eri koormuste puhul tuleb mootori optimaalseks tööks rakendada ka erinevat pinge-sageduse reguleerimise seaduspärasust. Märkigem, et kui sageduse reguleerimisega tagatakse mootori vajalik pöörlemiskiirus, siis pinge reguleerimisega tagatakse mootori optimaalsed energeetilised näitajad. Sagedusmuundurites on võetud konstantse koormusmomendi puhul kasutusele algpingega (*U*0) kompenseeritud lineaarne seaduspärasus ventilaatorkoormuse ($Tk = k\omega 2$) puhul aga mittelineaarne ruutsõltuvusega pinge reguleerimise seaduspärasus, (Joonis 2.11). Sõltuvalt koormustunnusjoone kujust võib mõlemaid võtteid rakendada kombineeritult. Samuti saab algpinget (*U*0) reguleerida automaatselt sagedusmuunduri töö käigus.



Joonis 2.11 Sagedusreguleerimisega asünkroonmootori pinge-sagedus-tunnusjooned

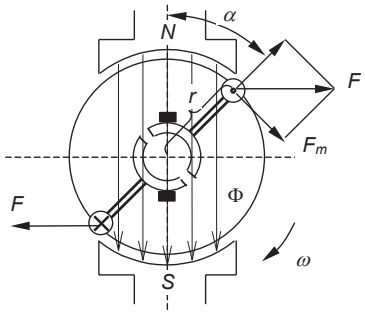
Sünkroonmootorite kiirust reguleeritakse samuti sagedusjuhtimise põhimõttel. Kuna sünkroonmootori rootor pöörleb sünkroonselt (s.t. sama kiirusega) staatori magnetväljaga, siis on tema mehaanilised tunnusjooned rõhtsalt asetsevad sirged (Joonis 2.10, b). Sageduse vähendamisel mootori tunnusjoon langeb, suurenemisel aga tõuseb.

Huvitav on märkida, et sünkroonmootoriga ajamilt võib nüüdisaegsete juhtimismeetoditega hõlpsasti saada ka alalisvoolumasinale iseloomulikke tunnusjooni. Nimelt, kui staatorimähiste toiteks kasutada pooljuhtmuundurit ja kommuteerida mähiste voolu mitte konstantse sagedusega (nagu otsevõrkulülituse puhul), vaid sõltuvalt rootori pöördenurgast, muutub sünkroonmasina tööpõhimõte sarnaseks alalisvoolumasina omaga. Erinevuseks on vaid see, et mehaanilise kommutaatori asemel kasutatakse pooljuhtkommutaatorit ning rootori pöördenurka määratakse eraldi anduriga. Niisugusel juhul on tegemist elektrooniliselt kommuteeritava mootoriga (*electronically commutated motor*) või harjadeta alalisvoolumootoriga (*brush-less DC motor*). Seda tüüpi mootoreid kasutatakse tänapäeval laialdaselt tööstusrobotite ja tööpinkide servoajamites.

2.7 Elektrimasinate dünaamikamudelid

Elektrimootori dünaamikamudel. Alalisvoolumootori üldlevinud mudel on oma olemuselt ühe lõpmata pika poolusega masina mudel, mis ei arvesta, et tegelikult liigub rootorimähis pooluse alt välja ning voolu suunda tuleb muuta. See tähendab, et eespool vaadeldud mudel ei kirjelda mootori kommutaatori ja harjade või pooljuhtkommutaatori tööd. Mudelist ei selgu, miks mootori rootor ja võll pöörlevad. Rääkides alalisvoolumootorist unustatakse ka ära, et selle ankrumähises on tegelikult vahelduvvool.

Kui mootori ergutusvoog Φ haarab vooluga ankrumähist, tekitatakse mähisele mõjuv jõud F. Jõu puutujasuunaline komponent F_m põhjustab mootori pöördemomendi $T_m = F_m\, r$. Kuna jõud $F_m = F \cos \alpha$ sõltub ankru pöördenurgast, siis $\alpha = 90°$ korral on jõud $F_m = 0$ ning seejärel muutub negatiivseks. Et pöörlemine saaks jätkuda, tuleb muuta ankrumähise voolu suunda. Tavalises alalisvoolumootoris täidab seda ülesannet kommutaator, mis koosneb ankrumähisega ühendatud lamellidest ning neil libisevatest harjadest. Sama ülesannet võib täita ka pooljuhtkommutaator, mille pooljuhtlülitid kommuteerivad voolu suunda sõltuvalt ankru pöördenurgast. Ankru asendi määramiseks kasutatakse sel juhul pöördenurga andurit.



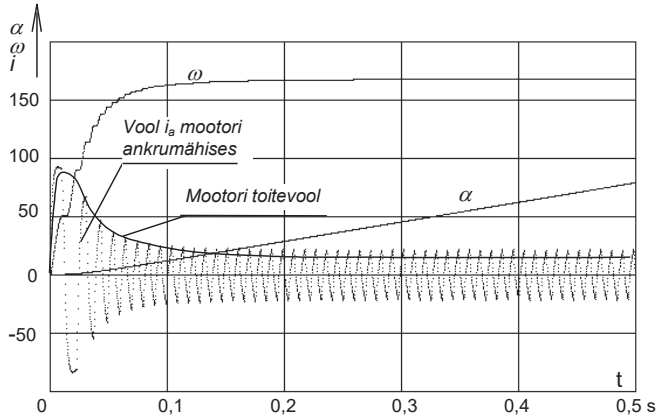
Joonis 2.12 Alalisvoolumootori kommutaatori tööpõhimõte

Alalisvoolumootori dünaamikat kirjeldab alljärgnev diferentsiaalvõrrandite süsteem (2.22).

$$\left.\begin{aligned} u &= (U_m - k_m \Phi \omega) \cdot \operatorname{sgn}\left(\cos(\alpha + \alpha_h)\right) \\ \frac{di}{dt} &= \frac{1}{L}\left(u - iR\right) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J}\left(k_m \Phi i \cdot \cos\alpha\right) \\ \frac{d\alpha}{dt} &= \omega \end{aligned}\right\} \qquad (2.22)$$

Võrrandites tähistab U_m mootori toitepinget (alalispinget), u mootori mähistele antavat pinget (vahelduvpinget), α ankru pöördenurka, α_h kommutaatori harjade nihet neutraal-joone suhtes, k_m mootori ehitust (pooluste arvu, mähise harude arvu jms) iseloomustavat tegurit, R ankrumähise aktiivtakistust, L ankrumähise induktiivtakistust, J pöörlevate osade

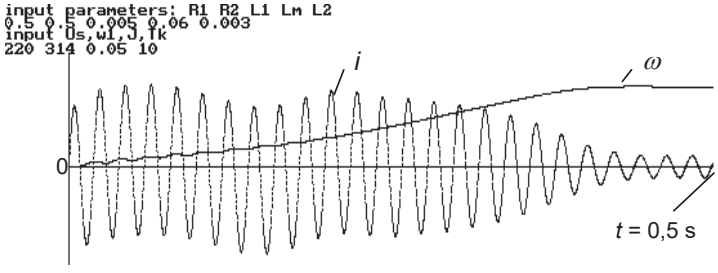
inertsimomenti, ω pöörlemiskiirust ja Φ ergutusvoogu. Võrrandsüsteemi 2.22 põhjal saab arvutada mootori voolu ja kiiruse muutumise käivitusprotsessis (Joonis 2.13).



Joonis 2.13 Alalisvoolumasina käivitusprotsess. Voolu väärtuse muutumine staatori ja rootori mähistes

Asünkroonmasina dünaamikamudelit kasutatakse nüüdisaegsetes vektorjuhtimisega ajamites. See mudel on küllaltki keerukas ja siinkohal seda lähemalt ei vaadelda. Selle kirjelduse võib leida raamatust *Asünkroonajamite sagedusjuhtimine*. Mudeli põhjal arvutatud asünkroonmootori käivitusprotsess on esitatud Joonis 2.14. Võrreldes seda alalisvoolumootori käivitusprotsessiga võib tõdeda, et mõlemad protsessid on üllatavalt sarnased. Sellest järeldub, et eri tüüpi elektrimasinate tööpõhimõte on väga sarnane.

Väikese ja keskmise võimsusega elektrimasinate käivitamine on lühiajaline protsess, mille kestus on sekundi murdosast kuni mõne sekundini. Seepärast lubatakse masinate käivitamisel lühiajaliselt ka nimivoolust tunduvalt suuremat voolu $I_{käiv}$ = 3...6 I_{nimi}. Keskmisest suurema võimsusega (kümnetest kilovattidest kuni megavattideni) mootorite käivitamine põhjustab suure voolutõuke tõttu pingelangu toitevõrgus. Seepärast on niisuguste mootorite puhul väga oluline mitmesuguste pooljuhtmuundurite rakendamine nii sujuvkäivituseks kui ka mootori kiiruse reguleerimiseks.

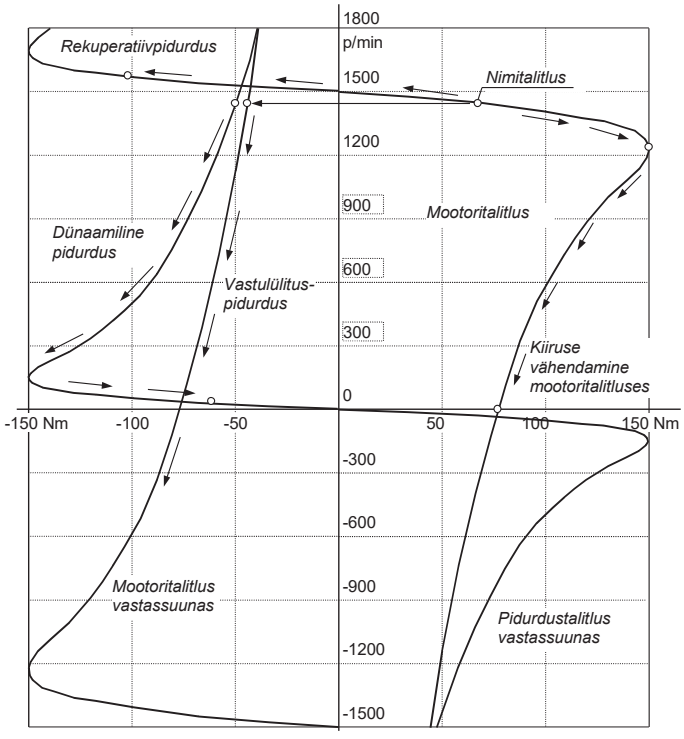


Joonis 2.14 Asünkroonmootori dünaamikamudeli järgi arvutatud käivitusprotsess

2.8 Elektrimasinate piduri- ja generaatoritalitlus

Asünkroonmootori **vastulülituspidurdus** seisneb mootori staatorimähise faasijärjestuse ümberlülitamises. Mootori libistus suureneb hetkega mõnelt protsendilt kuni 200 protsendini
(s = 2). Mootori pöördemoment muutub pöörlemissuunale vastupidiseks ehk pidurdavaks ning mootori kiirus hakkab vähenema. Vastulülituspidurdusega kaasneb suur voolutõuge (I_p > 6 I_n). Kui kiiruse vähenemisel nullini ei rakendata mootori automaatset väljalülitamist, toimub mootori käivitus algsele vastupidises suunas. Seepärast kasutatakse vastulülituspidurdust peamiselt väikese võimsusega ajami reverseerimiseks või koos nullkiirusanduritega ka kiireks pidurdamiseks.

Enam levinud on asünkroonmootorite **dünaamiline pidurdus**. Klassikalise dünaamilise pidurduse korral lülitatakse mootori staatorimähis võrgust välja ning kommuteeritakse mähised alalisvoolutoitele. Tekib olukord kus inertsimomendi tõttu pöörleva rootoriga masina staatori magnetväli seisab paigal. Liikuvas rootorimähises indutseeritakse endiselt vool. Seisva staatorivälja ja rootorivoolude vastastoime põhjustab mootoris pidurdusmomendi tekke. Alalisvoolu toiteallika tõttu nimetatakse seda ka alalisvoolupidurduseks. Pidurduse füüsikalised protsessid sarnanevad aga sünkroongeneraatoris toimuvatele protsessidele. Asünkroonmootori dünaamilise pidurduse mehaanilised tunnusjooned on Joonis 2.15.



Joonis 2.15 Asünkroonmootori mehaanilised tunnusjooned mootori-, generaatori- ja pidurdustalitluses

Märkigem, et suurtel kiirustel on dünaamilise pidurduse moment suhteliselt väike ning see suureneb järsult alles vahetult enne peatumist. Seepärast rakendatakse dünaamilist pidurdust tavaliselt pärast seda kui kiirus pärast mootori väljalülitamist või sageduse vähendamist on langenud allapoole teatud piir- ehk pidurduskiirust 0,2…0,5 ωn. Dünaamilise pidurduse erijuhtumiks on staatorimähiste mittesümmeetriline lühistamine või nende ühendamine läbi pooljuhtdioodide. Dünaamilise pidurduse nimetus tuleneb sellest, et pidurdusmomenti arendab masin ainult pöörlemise ajal. Rootori seiskumisel väheneb pidurdusmoment nullini.

Kui mootori kiirus suureneb üle sünkroonkiiruse (tühijooksukiiruse), s.t. kui töömasin veab elektrimasinat, läheb elektrimasin **rekuperatiivpidurdusse**. Sel juhul töötab masin generaaltorina ning momendi ja voolu suund on vastupidine mootoritalitluse momendi ja voolu suunale.

Alalisvoolumasina mootori- ja pidurdustalitlus on üldjuhul, vaatamata mehaaniliste tunnusjoonte erinevusele, sarnane asünkroonmasinale. Dünaamilise pidurduse korral lühistatakse alalisvoolumasina ankruahel läbi pidurdustakisti. Eraldi pidurdusvoolu allikat või alaldusdioodi kasutada pole vaja.

2.9 Teadmiste kontroll

Peatükk 2. Teema 2: Elektriajamiga täiturite tööpõhimõtted

1. Mis on elektromehaaniline süsteem?
    a. elektrilisi ja mehaanilisi komponente sisaldav süsteem;
    b. elektriliselt käitatav mehaaniline süsteem;
    c. elektromagnetiline seade;
    d. elektriajam.
2. Mis on vasaku käe reegel?
    a. reegel voolu suuna määramiseks;
    b. reegel kiiruse määramiseks;
    c. reegel liikumissuuna määramiseks;
    d. reegel elektromotoorjõu suuna määramiseks.
3. Mis on parema käe reegel?
    a. a reegel voolu suuna määramiseks;
    b. reegel kiiruse määramiseks
    c. reegel liikumissuuna määramiseks;
    d. reegel elektromotoorjõu suuna määramiseks.
4. Mis on näivtaksitus?
    a. elektriline takistus;
    b. pinge ja voolu kompleksväärtuste suhe;
    c. elektriahela elektrivooluga pöördvõrdeline suurus;
    d. elektriühik.
5. Mis on pinnaefekt?
    a. efekt, et vahelduvvooluga juhi pinnal on voolutihedus suurem kui juhi sees;
    b. efekt, et juhis see on voolutihedus suurem kui juhi pinnal;

c. efekt, et lapikjuhis on voolutihedus suurem kui ümarjuhis;
d. efekt, et ümarjuhis on voolutihedus suurem kui lapikjuhis.

Peatükk 2. Teema 3: Samm-mootorid

1. Mis on samm-mootor?
   a. mootor, mis pöörleb sammu kaupa;
   b. harjadeta alalisvoolumasin, mille täispööre moodustub kindlast arvust võrdse ulatusega sammudest;
   c. suure pooluste arvuga elektrimasin;
   d. sünkroonmasina eritüüp.
2. Mis on reluktantsmootor?
   a. elektrimasin, mille ferromagnetilisest materjalist rootoril puuduvad püsimagnetergutusega poolused;
   b. elektrimootor, mille rootoril on püsimagnetergutusega poolused;
   c. elektrimasin, mille rootoril on elektromagnetergutusega poolused;
   d. elektrimasin, mille rootoril puuduvad poolused.
3. Mis on elektrimasina käivitus-, nimi- ja maksimaalne moment?
   a. momendi väärtused elektrimasina käivitamisel, nominaalkiirusel ja maksimaalkiirusel;
   b. momendi väärtused elektrimasina käivitamisel, nominaalkiirusel ja vääratuspunktis;
   c. kiiruse-momendikõverat iseloomustavate momentide väärtused;
   d. momendi väärtus nullkiirusel nimikiirusel ja vääratuspunktis.
4. Mis on rauaskadu?
   a. võimsuskadu mootori ferromagnetilistes komponentides;
   b. pöörisvooludest ja hüstereesist tingitud kadude summa;
   c. võimsuskadu mootori magnetahelas;
   d. võimsuskadu mootori metallilistes komponentides.
5. Missuguse mootori puhul kasutatakse libistuse mõistet?
   a. Induktsioonmootori;
   b. Asünkroonmootori;
   c. muudetava kiirusega mootori;
   d. püsikiirusega mootori puhul.

Peatükk 2. Teema 4: Harjadega alalisvoolumootorid

1. Mis on rööp-ergutusmähis?
   a. paljude mähistega elektrimasina ergutus;
   b. ergutus ankrumähisega rööbiti lülitatud ergutusmähisega;
   c. ergutus eraldi allikast toidetava ergutusmähisega;
   d. ergutus paljude jadamisi lülitatud ergutusmähistega.
2. Mis on jada-ergutusmähis?
   a. paljude mähistega elektrimasina ergutus,
   b. ergutus ankrumähisega jadamisi lülitatud ergutusmähisega;
   c. ergutus eraldi allikast toidetava ergutusmähisega;
   d. ergutus paljude jadamisi lülitatud ergutusmähistega
3. Mis on kompaund- ehk sega-ergutus?
   a. paljude mähistega elektrimasina ergutus;
   b. ergutus ankrumähisega rööbiti ja jadamisi lülitatud kahe ergutusmähisega;

c. ergutus eraldi allikast toidetava ergutusmähisega;
d. ergutus paljude jadamisi lülitatud ergutusmähistega.

4. Mis on kiiruse-momendidiagramm?
   a. ühes või kahes tasapinna kvadrandis graafiliselt esitatud mootori või ajami kiiruse funktsioon momendist;
   b. suurima momendi sõltuvus kiirusest;
   c. neljas tasapinna kvadrandis graafiliselt esitatud mootori või ajami kiiruse funktsioon momendist;
   d. diagramm mootorite ja ajamite omavaheliseks võrdlemiseks.
5. Mis on mehaanilised kaod?
   a. hõõrdekaod laagrites ja ülekannetes ning aerodünaamilisest takistusest tingitud ventilatsioonikaod;
   b. kõik muud elektrimasina võimsuskaod, mis pole rauaskaod;
   c. kõik muud elektrimasina võimsuskaod, mis pole elektrilised kaod;
   d. võimsuskaod laagrites.

Peatükk 2. Teema 5: Harjadeta alalisvoolumootorid

1. Mis on elektrimasina kommutaator?
   a. seade, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks;
   b. mehaaniline voolu ümberlülitav seade;
   c. vooluvaheldi;
   d. lüliti, mis lülitab voolu ühelt mähiselt teisele.
2. Mille poolest erinevad alalisvoolu ja vahelduvvoolu elektrimasinad?
   a. neil on erinevad toiteallikad;
   b. neil on erinevad ergutusmähised;
   c. neil on erinev konstruktsioon;
   d. vahelduvvool tekitatakse kas mootoris endas või väljapool mootorit.
3. Mis on harjadeta alalisvoolumootor?
   a. elektrooniliselt kommuteeritavate mähistega alalisvoolumootor;
   b. mehaaniliselt kommuteeritavate mähistega alalisvoolumootor;
   c. alalisvoolu mootor ilma kommutaatorita;
   d. alalisvoolumootor, mis töötab sarnaselt vahelduvvoolumootorile.
4. Mis on pulsilaiusmodulatsioon?
   a. meetod pinge impulssreguleerimiseks;
   b. meetod pinge sujuvaks reguleerimiseks;
   c. meetod pinge või voolu reguleerimiseks kõrgsagedusliku lülitamisega;
   d. meetod võimsuse reguleerimiseks pinge kõrgsagedusliku lülitamise abil.
5. Mis on PID-juhtimine?
   a. suletud süsteemi juhtimine proportsionaalse, diferentsiaalse ja integraalse regulaatori abil;
   b. tagasisidega süsteemi juhtimine digitaalse PID-kontrolleri abil;
   c. tagasisidega süsteemi juhtimine ilma staatilise kiiruse ja asendiveata;
   d. tagasisidega süsteemi juhtimine parimate dünaamiliste omadustega.

Peatükk 2. Teema 6: Püsimagnetitega sünkroonmootorid

1. Mis on püsimagnetergutus?
   a. püsimagnetite kasutamine elektrimasinas;

b. püsimagnetite asutamine elektrimasina rootoril;
c. püsimagnetite kasutamine elektrimasina staatoris;
d. püsimagnetitega mähiste kasutamine.

2. Mis on elektromagnetergutus?
   a. ferromagnetsüdamikuga vooluga mähiste kasutamine;
   b. püsimagnetsüdamikuga vooluga mähiste kasutamine;
   c. püsimagnetitega ferromagnetsüdamiku kasutamine;
   d. südamikuta mähiste kasutamine.
3. Mis on sünkroonmootor?
   a. püsikiirusega mootor;
   b. väljapoolustega rootoriga mootor;
   c. toitevõrgu sagedusega sünkroonselt pöörlev elektrimootor;
   d. väljepoolusteta rootoriga mootor.
4. Mis on püsimagnetitega alalisvoolumootor?
   a. alalisvoolumootor, mille staatoris on püsimagnetid;
   b. alalisvoolumootor, mille rootoris on püsimagnetid;
   c. püsimagnetitega ergutatav alalisvoolumootor;
   d. alalisvoolumootor, mille staatoris ja rootoris on püsimagnetid.
5. Mis on mootori vektorjuhtimine?
   a. meetod vahelduvvoolumootori aheldusvoo juhtimiseks muutuva koormuse ja pinge korral;
   b. meetod mootori juhtimiseks selle matemaatilise mudeli abil;
   c. meetod mootori tagasisidestatud juhtimiseks andurite abil;
   d. meetod mootori anduriteta juhtimiseks.

Peatükk 2. Teema 7: Asünkroonmootorid

1. Mis on asünkroonmootor?
   a. Induktsioonmootor;
   b. libistusega mootor;
   c. muutuva kiirusega mootor;
   d. püsikiirusega mootor.
2. Mis on induktsioonmootor?
   a. libistusega elektrimootor;
   b. sama mis asünkroonmootor;
   c. muutuva kiirusega elektrimootor;
   d. püsikiirusega elektrimootor.
3. Mis on elektrimasina kolmnurkühendus?
   a. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus ilma nulljuhtmeta;
   b. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus koos nulljuhtmega;
   c. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus mille korral kõikide mähiste lõpud on ühendatud kokku ja algused faasijuhtidega;
   d. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus, mille puhul iga mähise lõpp on ühendatud teise mähise algusega .
4. Mis on elektrimasina tähtühendus?
   a. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus ilma nulljuhtmeta;

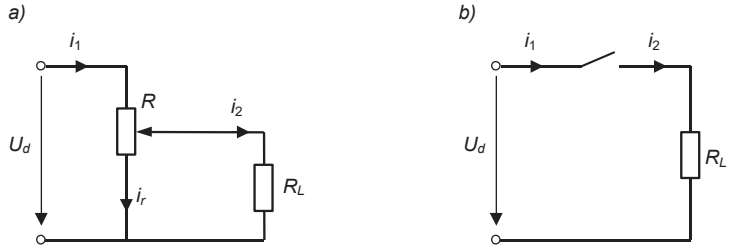
b. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus koos nulljuhtmega;
c. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus mille korral kõikide mähiste lõpud on ühendatud kokku ja algused faasijuhtidega;
d. mootori mähiste kolmefaasiline elektriline ühendus, mille puhul iga mähise lõpp on ühendatud teise mähise algusega.

5. Mis on mootori aseskeem?
   a. mootori mähiste ühendusskeem;
   b. skeem mootori võimsuse arvutamiseks;
   c. skeem mootori elektriliste omaduste simuleerimiseks;
   d. skeem mootori kiiruse arvutamiseks.

3 JÕUPOOLJUHTMUUNDURID

3.1 Jõupooljuhtlülitid

Koormuse pinge ja voolu reguleerimiseks kasutatakse lülititalitluses pooljuhtseadiseid. Lüliti eeliseks võrreldes pidevatoimelise regulaatoriga, nt. reguleeritava takisti või võimendi-talitluses transistoriga, on väiksem energiakadu (Joonis 3.1).



Joonis 3.1 Koormuse pinge ja voolu reguleerimine: a) reostaadiga, b) lülitiga

Koormuse R_L pinge ja voolu reguleerimisel reostaadiga R jaguneb toiteallikast tarbitav vool regulaatori ja koormusvooluks $i_1 = i_r + i_2$. Kui reguleerida koormuse pinget pooleni (q = 0,5) toiteallika pingest, on regulaatori poolt tarbitav võimsus võrdne koormusele langeva võimsusega, s.t. pool tarbitavast energiast läheb kaduma regulaatoris.

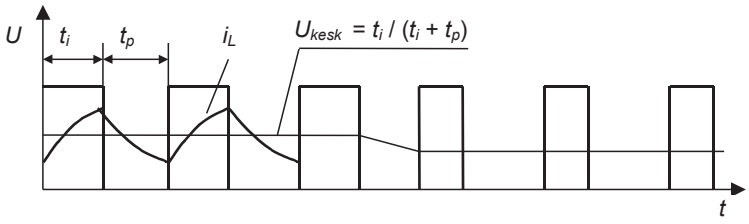
$$P_{reg} = q\,R\,i_1^2 + (1-q)\,R\,i_r^2 = q\,R\,(i_r + i_2)^2 + (1-q)\,R\,i_r^2 = R_L\,i_2^2 . \qquad (3.1)$$

Sama võimsusbilanss kehtib ka siis, kui regulaatorina kasutatakse pidevtalitluses transistori. Järelikult, võimsuse (s.t. pinge ja voolu) pidevatoimeline reguleerimine sobib vaid juhul kui tarbitav võimsus on väike ning sellest tulenevalt pole ka kadude suurus oluline. Jõuseadmete puhul tekivad pidevatoimelisel reguleerimisel alati suured kaod, mistõttu pidevreguleerimist püütakse vältida. Niisugune reguleerimisviis on jäänud kasutusele vaid üksikjuhtudel, nt. vanemat tüüpi alalisvooluajamites, kus mootori ankruahelasse on lülitatud reostaadid.

Tänapäeval on energiasäästu saavutamiseks peaaegu kõikides jõuseadmetes hakatud rakendama koormuspinge ja -voolu impulssreguleerimist lüliti abil. Levinum impulssreguleerimise viis on **pulsilaiusmodulatsioon** (*pulse width modulation*, *PWM*), mille puhul on konstantse sisendpinge korral regulaatori väljundpinge keskväärtus võrdeline impulsside laiusega (joonis 3.2). Sujuva reguleerimise saavutamiseks peab lüliti kommutatsioonisagedus olema küllalt suur. Niisugusteks lülititeks sobivad kõige paremine suure toimekiirusega jõupooljuhtseadised.

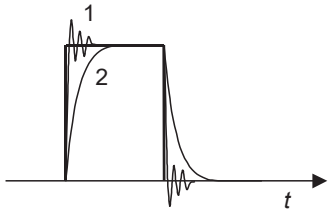
Aktiivkoormuse sisse- ja väljalülitamisel probleeme ei teki, sest ahela pinged ja voolud on võrdelised ahela aktiivtakistusega. Hoopis tülikam on sisse- ja väljalülitada ahelaid, mis sisaldavad reaktiivkomponente, nt. energiat salvestavaid kondensaatoreid ja/või induktiivsusi. Sel juhul peab lüliti taluma suuri voolutõukeid mahtuvusliku koormuse sisselülitamisel või suuri pingeimpulsse induktiivkoormuse väljalülitamisel. Tuleb arvestada ka seda, et ideaalset aktiivkoormust pole tegelikult olemas ja igas reaalses elektiahelas on alati olemas teatud

mahtuvused (nt. isolatsioonimahtuvus) ja induktiivsused (nt. juhtide puisteinduktiivsus). Lüliti kommutatsiooniprotsess on vaadeldav energiamuundusprotsessina, mil kommutatsiooni kestel toimub energia ümberpaigutumine ahela ühest komponendist teise. Induktiivkoormuse puhul erineb voolukõver i_L oluliselt pingekõverast (Joonis 3.2)



Joonis 3.2 Pulsilaiusmodulatsiooni põhimõte

Näiteks, induktiivse ahela sisselülitamisel salvestatakse ahela induktiivsusesse energia $W_L = Li^2/2$ ja mahtuvusse energia $W_C = Cu^2/2$. Ahela katkestamisel toimub nende energiate ümberjaotumine ning soojusena hajumine aktiivkomponentides. Neid nähtusi tuntakse kommutatsiooni siirdeprotsessidena (Joonis 3.3). Need protsessid võivad olla nii võnkelise (1) kui ka aperioodilise (2) iseloomuga sõltuvalt ahela RLC parameetritest. Niisuguste siirdeprotsesside tulemusena moondub nelinurkimpulsside kuju ning tekivad muundurites kommutatsioonikaod. Kuna võnkeliste protsesside puhul võib pinge kahekordistuda, tekib pooljuhtmuundurites kommutatsioonist põhjustatud liigpingete oht. Seepärast on jõupooljuhtlülitid varustatud mitmesuguste (liigpinge)kaitseahelatega (*snubber circuit*), mille ülesandeks on kommutatsioonienergia summutamine või ümberjaotamine ahela teistele komponentidele.



Joonis 3.3 Kommutatsiooni siirdeprotsessid

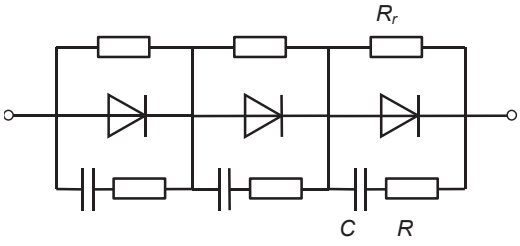
Kommutatsiooniprotsesside iseloom ja jõupooljuhtlülitite ehitus sõltuvad suurel määral kasutatavast toitepingest (kas alalis- või vahelduvpinge), koormusest (aktiiv-, induktiiv-, mahtuvus- või elektromotoorjõu generaatorkoormus), toite- ja koormusahela faaside arvust (ühe- või kolmefaasiline toide), kasutatavate jõupooljuhtseadiste liigist, aga samuti nende kaitse- ja juhtimisahelatest. Võimalike variantide mitmekesisuse tõttu on kasutusel väga erinevad jõupooljuhtidel põhinevad jõuahelate lülitusseadmed.

Jada ja rööpühendus

Jada- või rööpühendust kasutatakse juhul kui muunduris jõupooljuhile langevad pinged või neid läbivad voolud ületavad tööstuslikult toodetavatele või kasutatavatele jõupooljuhtseadistele lubatud maksimaalseid pingeid või voolusid, s.t. kui üksikventiilidega pole võimalik luua nõutavate tehniliste omadustega muundurit.

Jõupooljuhtide **jadaühenduse** puhul on suurimaks probleemiks pingete võrdse jagunemise tagamine jõupooljuhtide ahelas nii nende suletud olekus kui ka kommutatsiooniprotsessi kestel. Seepäras tuleb pinged ühtlustada nii staatilistes kui ka dünaamilistes režiimides. Suletud jõupooljuhtide pingeid saab ühtlustada rööptakistite ahelaga (Joonis 3.4). Kommutatsiooniprotsessi kestel saab pingeid ühtlustada RC lülituste ahelaga, mis ühtlasi piiravad pinge kasvamise kiirust jõupooljuhtidel.

Jõupooljuhtide **rööpühenduse** puhul tuleb valida ühesuguste päritunnusjoontega jõupooljuhid



Joonis 3.4 Jõupooljuhtide pingete ühtlustamine jadalülituse puhul

Jõutüristoride jada- ja rööpühendusel on probleemid üldiselt samasugused nagu jõudioodide jada- ja rööpühenduste puhul. Peale selle on tarvis tagada mitme türistori samaaegne avanemine ja sulgumine, et üksik türistor ei peaks taluma kogu ahela pinget või voolu. Jadaühenduse puhul vähendatakse ühele türistorile langevat arvutuslikku vastupinget u. 10 % võrra. Rööpühendusel tuleb üksiku türistori arvutuslikku voolu väärtust vähendada 20 kuni 30 % võrra.

3.2 Toitevõrguga sünkroniseeritud reguleeritavad alaldid ja vaheldid

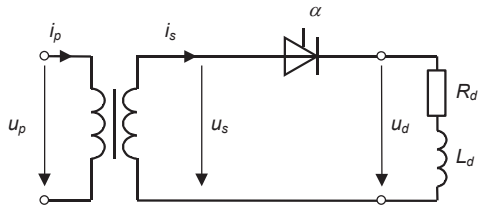
Alaldi abil muundatakse siinuseline vahelduvpinge pulseerivaks alalispingeks. Alaldid võivad olla tüüritavad või mittetüüritavad. Mittetüüritav alaldi koosneb dioodidest, tüüritav alaldi türistoridest või transistoridest. Kasutatakse ka osaliselt tüüritavaid alaldeid, milles osa ventiilidest on dioodid, osa türistorid. Pooljuhtmuundurite põhilülitused, sealhulgas alaldid ja vaheldid, on standardiseeritud ning neile on omistatud vastavad tähised, nt. poolperioodalaldi puhul M1.

Tüüritavate alaldite väljundpinget juhitakse türistoride sisselülitamishetke ehk tüürnurga muutmisega. Vahelduvpingega toitmisel saab türistor avaneda positiivse anoodpinge olemasolu korral, s.t. pinge positiivse poollaine ajal. Türistor sulgub pärast seda kui vool türistoris on vähenenud allapoole hoidevoolu väärtust. Vahelduvvooluvõrgus toimub see pinge negatiivse poollaine ajal, mil ka vool väheneb nullini ja muudab seejärel suunda. Türistori tüürnurka määratakse siinuskõveral alates hetkest, mil antud türistoril tekib positiivne anoodpinge. Ühefaasiliste alaldite korral on selleks siinuspinge nullhetk. Kolmefaasiliste alaldite puhul sõltub faasinurga alghetk ja reguleerimisvahemik alaldi skeemist. Voolukõvera kuju, nullhetk ja sellest tulenev türistori sulgumishetk sõltuvad koormuse iseloomust. Aktiivkoormuse korral langeb voolukõver kokku pingekõveraga. Reaktiivkoormuse, nt. induktiivsuse olemasolu korral tekib pinge ja voolu vaheline faasinihe,

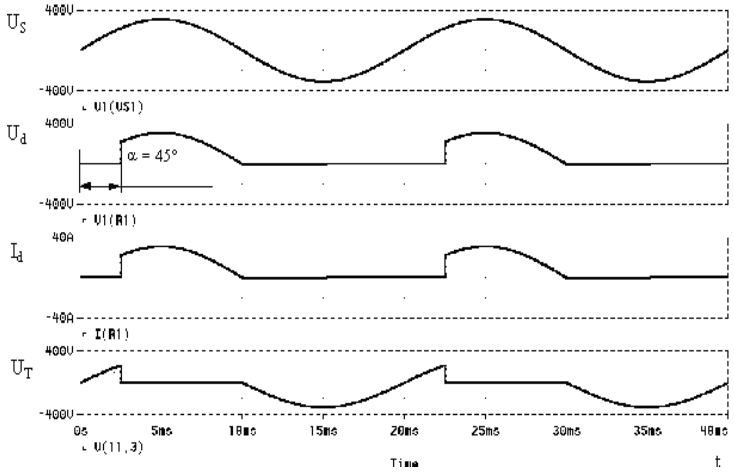
türistorlülitiga ahelas moondub voolukõvera kuju ning voolukõvera nullhetk saabub pingekõvera nullhetkest hiljem.

Ühefaasiline poolperioodalaldi (M1) koosneb ainult ühest dioodist või türistorist (Joonis 3.5). Seda kasutatakse praktikas harva, sest tema väljundpinge pulsatsioon on väga suur (Joonis 3.6).
Alaldatud pinge u_d keskväärtus aktiivkoormusel sõltub tüürnurgast α vastavalt avaldisele

$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{2\pi}(1+\cos\alpha) \qquad (3.2)$$



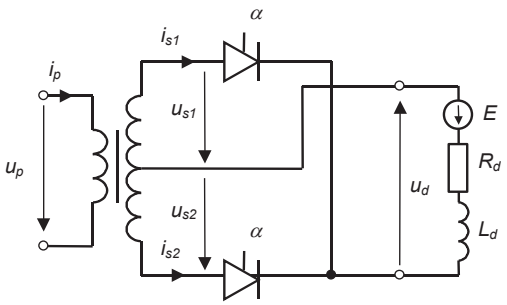
Joonis 3.5 Ühefaasiline poolperioodalaldi



Joonis 3.6 Ühefaasilise tüüritava poolperioodalaldi M1 pingete ja voolude diagrammid aktiivkoormusel (L_d = 0) tüürnurga ⍰⍰= 45° korral

Induktiivkoormusel jääb türistor avatuks ka negatiivse anoodpinge korral niikauaks, kuni vool muutub nulliks. Seega pääsevad alaldi väljundisse ka pinge negatiivse poollaine lõigud.

Ühefaasiline keskväljavõttega alaldi (M2). kujutab endast põhimõtteliselt kahe poolperiood-alaldi M1 rööpühendust(joonis 3.7), kusjuures nende sisendpinged on vastufaasis. Alaldi väljundpinge pulseerib toitepinge kahekordse sagedusega. Tüüritav M2C tüüpi lülitus võib töötada nii reguleeritava alaldina kui ka võrguga sünkroniseeritud vaheldina.



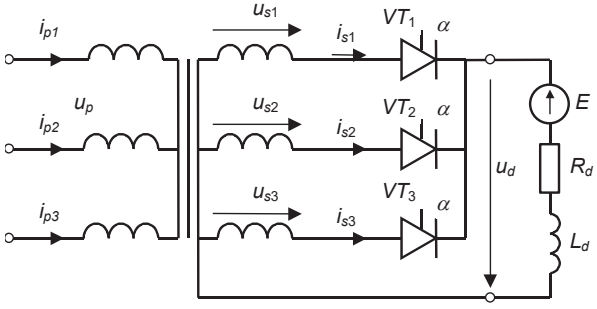
Joonis 3.7 Ühefaasiline keskväljavõttega alaldi (M2)

Alaldatud pinge u_d keskväärtus aktiivkoormusel sõltub tüürnurgast α vastavalt avaldisele

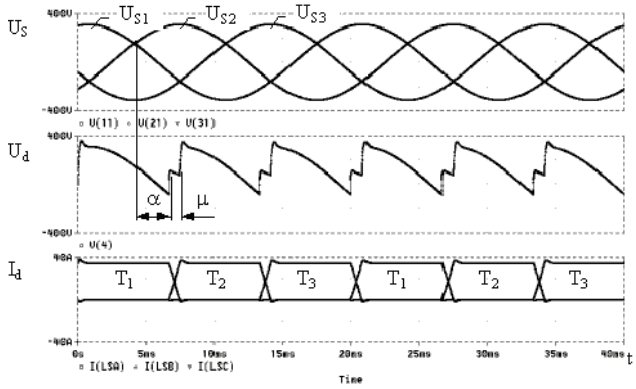
$$U_d = \frac{\sqrt{2}U_s}{\pi}(1+\cos\alpha) \qquad (3.3)$$

Induktiivkoormusel sõltub alaldatud pinge keskväärtus koormusvoolu iseloomust. Eristatakse katkevvoolutalitlust ja pidevvoolutalitlust. Katkevvoolutalitluse puhul koosnevad nii pinge- kui ka voolukõver üksikutest impulssidest, mille kestus sõltub koormusahela induktiivsusest. Pidevvoolutalitluse korral silub koormusahela induktiivsus voolu sedavõrd, et voolukõver osutub pidevaks. Väljundpinge keskväärtus aktiiv-induktiivkoormusel ja pidevvoolutalitluses arvutatakse eeltoodud valemiga. Väljundpinge ja voolu kuju mõjutab ka koormusahelas olev vastuelektromotoorjõu allikas, nt. pöörleva mootori vastuelektromotoorjõud.

Kolmefaasiline keskväljavõttega alaldi (M3) kujutab endast kolme ühefaasilisi alaldi rööplülitust (Joonis 3.8), kusjuures neid alaldeid toidetakse kolmefaasilise toitevõrgu eri faasidest. Märkigem, et kolmefaasilise süsteemi faasipinged on üksteise suhtes 120° võrra nihutatud.



Joonis 3.8 Kolmefaasiline keskväljavõttega alaldi (M3)



Joonis 3.9 Kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi M3 pingete ja voolude diagrammid aktiiv-induktiivkoormusel ideaalsel voolusilumisel, kui α =45º , μ =15º

Induktiivse koormuse korral jätkub vool türistoris ka pärast seda kui pinge türistoril on muutnud oma märki. Seetõttu ei sulgu türistor pinge nullhetkel, vaid jääb avatuks ka pärast seda. Näiteks Joonis 3.9 jääb türistor T_1 avatuks ka pärast seda kui järgmine türistor T_2 sisse lülitatakse. Voolu üleminekut ühest türistorist teise nimetatakse **alaldi kommutatasiooni-protsessiks**. Kuna kahe faasi türistorid on korraga avatud, on sisuliselt tegemist kahe faasi lühisega ning väljundpingeks on kahe faasipinge aritmeetiline keskmine väärtus. Kommutatsiooniprotsessi kestus sõltub ahela induktiivsusest ning voolu suurusest. Protsessi tulemusena väheneb ka alaldi väljundpinge keskväärtus. Alljärgnevalt on esitatud mõned olulised kolmefaasilise keskväljavõttega alaldi tehniliste näitajate arvutusvalemid.

Ventiili voolu kesk- ja efektiivväärtus

$$I_{Vkesk} = \frac{I_d}{3}; \qquad I_{Vef} = I_s = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \tag{3.4}$$

Vastupinge suurim väärtus ventiili suletud olekus võrdub liinipinge amplituudväärtusega. Ventiili vastupinge sõltuvalt dioodalaldi väljundpingest

$$U_{Vvp} = 2\frac{\pi}{3}U_{di} \tag{3.5}$$

Toitetrafo sekundaarpinge

$$U_p = \frac{2\pi}{3\sqrt{6}}U_{di} \tag{3.6}$$

Toitetrafo primaarpinge ja primaarvool ideaalse trafo korral

$$U_p = wU_s = w\frac{2\pi}{3\sqrt{6}}U_{di}; \qquad I_p = \frac{\sqrt{2}}{3}\frac{I_d}{w} \tag{3.7}$$

Toitetrafo sekundaarvõimsus

$$S_s = 3\frac{2\pi}{3\sqrt{6}}U_{di}\frac{I_d}{\sqrt{3}} \approx 1{,}48\,U_{di}\,I_d \tag{3.8}$$

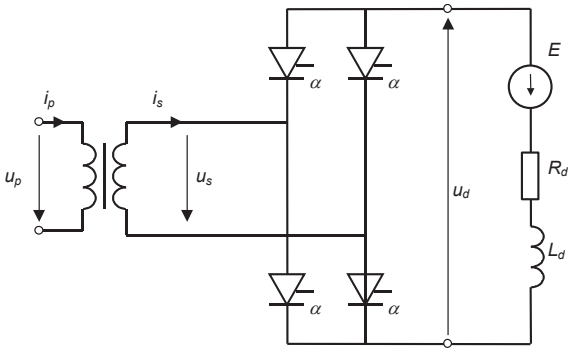
Toitetrafo primaarmähise näivvõimsus

$$S_p = 3w\frac{2\pi}{3\sqrt{6}}U_{di}\frac{\sqrt{2}I_d}{w} \approx 1{,}21\,U_{di}\,I_d \qquad (3.9)$$

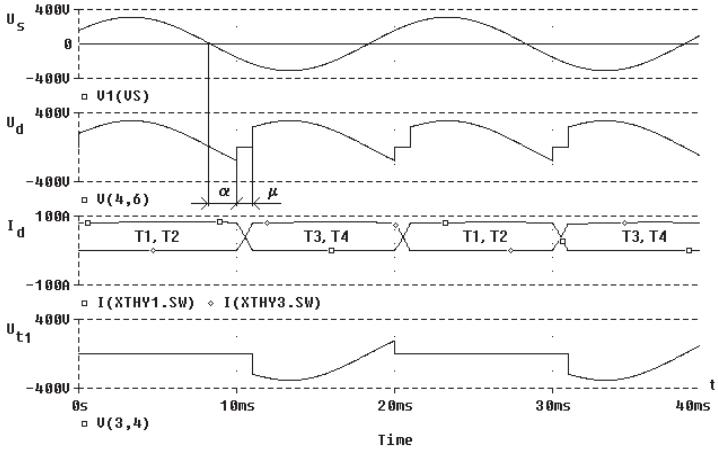
Trafo nimivõimsus on sekundaar- ja primaarvõimsuse aritmeetiline keskmine. Alaldi M3 võimsustegur

$$\cos\varphi = \frac{U_{di}I_d}{S_p} = \frac{1}{1{,}21} = 0{,}83 \qquad (3.10)$$

Ühefaasiline sildalaldi (B2) on vaadeldav kahe ühefaasilise keskväljavõttega alaldi jadalülitusena (Joonis 3.10), kusjuures kaks ventiili on ühise katoodiga ja ülejäänud kaks ühise anoodiga lülituses.



Joonis 3.10 Ühefaasiline sildalaldi (B2)



Joonis 3.11 Ühefaasilise sildalaldi B2 pingete ja voolude diagrammid ideaalsel voolusilumisel, kui tüürnurk ⍰=30° ja kommutatsiooninurk ⍰=15°

Ühefaasilise sildalaldi ventiili vastupinge on alaldiga M2 võrreldes 2 korda väiksem sest ventiilid töötavad paarikaupa jadamisi. Ventiili voolu kesk- ja efektiivväärtus

$$I_{Vkesk} = \frac{I_d}{2}; \qquad I_{Vef} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}. \qquad (3.11)$$

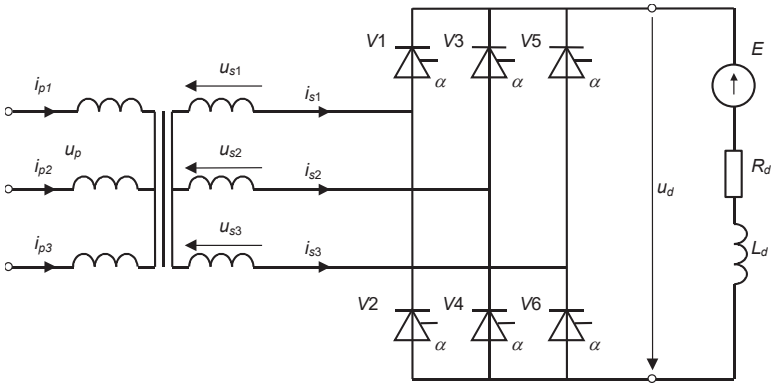
Trafo võimsus

$$S_p = S_s = 1{,}11 U_{di} I_d \frac{\sqrt{2} U_s}{\pi} (1 + \cos\alpha) \tag{3.12}$$

Alaldi B2 võimsustegur

$$\cos\varphi = \frac{U_{di} I_d}{S_p} = \frac{1}{1{,}11} = 0{,}9 \tag{3.13}$$

Kolmefaasilist sildalaldit (B6) saab vaadelda kahe keskväljavõttega aladi M3 jadalülitusena, kusjuures kolm ventiili on ühise katoodiga ja ülejäänud kolm ühise anoodiga lülituses. Järelikult on alaldi B6 väljundpinge 2 korda suurem kui keskväljavõttega alaldil M3. Väljundpinge pulsatsioon on samuti väiksem kui M3 alaldil, sest B6 alaldi väljundpinge perioodis on 6 pulssi (pulsilisus p = 6). Ventiilide tööjärjekord joonisel antud tähistuse korral on V1 - V6 - V3 - V2 -V5 - V4. Seejuures on korraga avatud vähemalt kaks ventiili. Koormusahela suure induktiivsuse korral jätkub ventiili pärivool ka negatiivse anoodpinge puhul ning ventiili sulgumine viivitub. Kuna järgnevate ventiilide avanedes pole eelnevalt töötanud ventiilid jõudnud veel sulguda, on võimalik, et korraga on alaldis kommutatsiooniprotsessi kestel avatud kolm või isegi neli ventiili. See tähendab, et katoodi- või anoodirühma ventiilidest on korraga avatud enam kui üks ning toimub voolu ümberlülitumine ühest faasist teise.



Joonis 3.12 Kolmefaasiline sildalaldi (B6)

Kolmefaasilise sildalaldi ventiili vastupinge on alaldiga M3 võrreldes 2 korda väiksem sest ventiilid töötavad paarikaupa jadamisi. Ventiili voolu kesk- ja efektiivväärtus

$$I_{Vkesk} = \frac{I_d}{3}; \qquad I_{Vef} = I_s = \frac{I_d}{\sqrt{3}}. \tag{3.14}$$

Trafo nimivõimsus

$$S_p = S_s = 1{,}05\, U_{di}\, I_d \tag{3.15}$$

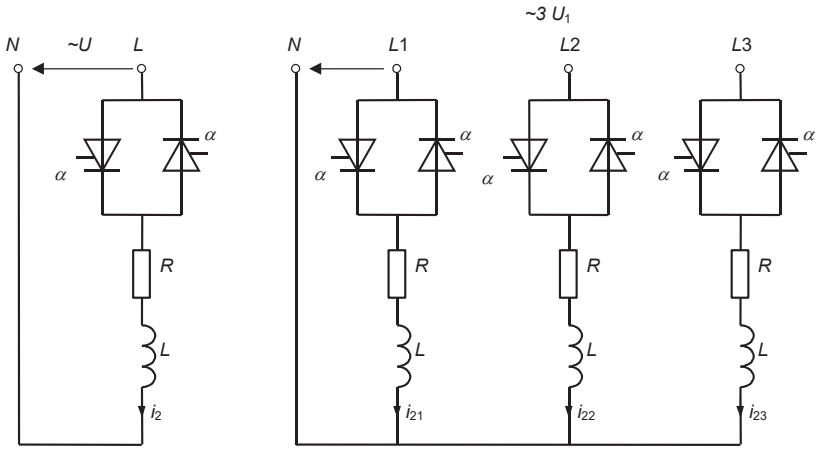
Alaldi B6 võimsustegur

$$\cos\varphi = \frac{U_{di} I_d}{S_p} = \frac{1}{1{,}05} = 0{,}95 \tag{3.16}$$

Kolmefaasilisi sildalaldeid kasutatakse nende heade tehniliste omaduste (väike pulsatsioon, suur võimsustegur) tõttu kõige enam. Tänapäeval kasutatakse türistoridel põhinevaid sildalaldeid eelkõige väga võimsate alalisvooluajamite toiteks. Väiksema võimsusega ajamites kasutatakse mittejuhitavaid dioodalaldeid ning pinge reguleerimiseks eraldi pulsilaiusmuundureid. Mittetüüritavad dioodidel põhinevad sildalaldid on kasutusel ka alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundurites. Dioodalaldite eeliseks on kindlasti nende lihtne ehitus ja väike hind, kuid puuduseks asjaolu, et need ei võimalda energiat võrku tagastada (nt. ajami generaatoritalitluse puhul).
Tüüritavad alaldid võimaldavad energiat võrku tagastada, kui nende juhtimisel valida selleks sobiv tüürnurga väärtus. Väärib märkimist, et kolmefaasiline sildlülitus on kasutusel ka vaheldite põhilülitusena, kusjuures kommutatsioonielementideks sobivad nii türistorid kui ka transistorid. Seepärast võib väita, et sildlülituse näol on tegemist jõupooljuhttehnikas väga levinud universaalse muundusskeemiga, mida saab rakendada nii vahelduvpinge alaldamiseks kui ka alalispinge vaheldamiseks.

3.3 Vahelduvpingeregulaatorid

Vahelduvpingeregulaator muundab pooljuhtlüliti abil võrgupinge efektiivväärtust. Selleks, et juhtida vahelduvvoolu, kasutatakse vahelduvpinge regulaatoris kahesuunalisi (nt. sümistore) või vastuparalleelselt ühendatud pooljuhtventiile, (tavaliselt türistore). Ühefaasilisi vahelduvpingeregulaatoreid kasutatakse laialdaselt kodumasinate, nt. elektritrellide, pesumasinate, tolmuimejate jms. universaalmootoritega ajamite kiiruse reguleerimiseks. Samuti kasutatakse vahelduvpingeregulaatoreid valgustuse reguleerimiseks.
Ühefaasiline vahelduvpingeregulaator (Joonis 3.13, a) koosneb kahest vastuparalleelselt ühendatud türistorist. Pinge väärtust koormusel muudetakse türistoride avamishetke reguleerimisega faasijuhtimise põhimõttel. Suletavate pooljuhtventiilide puhul saab vahelduvpingeregulaatori juhtimiseks kasutada pulsilaiusmodulatsiooni põhimõtet.
Kolmefaasiline vahelduvpingeregulaator (Joonis 3.13, b) koosneb kolmest ühefaasilisest regulaatorist. Kasutatavatest skeemidest on enam levinud W3C regulaatori skeem. Kui koormuse keskpunkt on ühendatud neutraaljuhiga N, on kolmefaasilise pingeregulaatori reguleerimiskarakteristik identne ühefaasilise vahelduvpingeregulaatori omaga. Kui ühendust neutraaljuhiga pole, peavad türistorid voolu tekitamiseks sisse lülituma paarikaupa, mis tunduvalt halvendab reguleerimisomadusi.
Kolmefaasiliste pingeregulaatorite põhiliseks kasutusalaks on kontaktivabad lülitid (kontaktorid) ja asünkroonmootorite sujuvkäivitid. Kontaktivabade lülitite peamiseks eeliseks võrreldes tavaliste kontaktoritega on suur lülitussagedus ning sädemevaba (kaarevaba) kommutatsiooniprotsess. Viimane on eriti oluline tuleohtlikus keskkonnas paigaldatavate elektriseadme puhul.

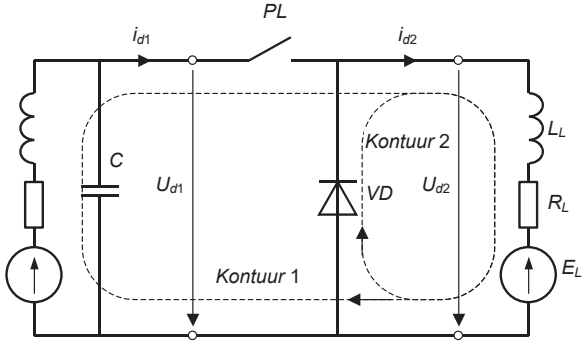


Joonis 3.13 Vahelduvpingeregulaatorid: a) ühefaasiline, b) kolmefaasiline

3.4 Alalispinge muundurid ja regulaatorid

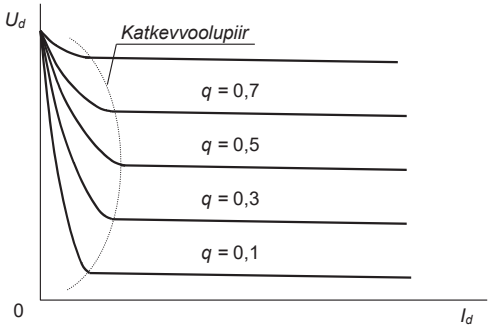
Alalispinge regulaatoreid (muundureid) liigitatakse sõltuvalt väljundvoolu ja -pinge polaarsusest (märgist) ning volt-amper-tunnusjoonte kujust kas ühe-, kahe- või neljakvadrandilisteks muunduriteks. See tähendab, et nende volt-amper-tunnusjooned hõlmavad vastavalt üks-, kaks- või neli *U-I* tasandi kvadranti.

Ühesuunalise voolu ja ühepolaarse pingega (emj-ga) ehk ühekvadrandiline pulsilaiusmuundur võimaldab reguleerida pinget toitepingest allapoole. Seetõttu nimetatakse seda muundurit **pinget vähendavaks muunduriks** (*buck-converter, step-down converter*). Muundurit kasutatakse ühesuunaliselt pöörleva mootoritalitluses töötava alalisvoolumasina toiteks. Märkigem, et alalisvoolumootorit võib aseskeemil kujutada aktiiv-induktiivtakistuse *R-L* ja vastuelektromotoorjõu allika E_L jadalülitusena.



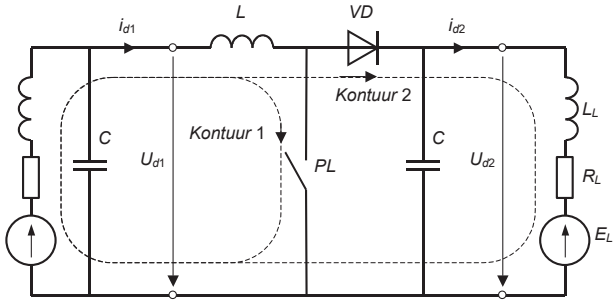
Joonis 3.14 Ühekvadrandiline alalispinge pulsilaiusmuundur (PL + VD) koos toite- ja koormusahelatega

Ühekvadrandiline pulsilaiusmuundur koosneb pooljuhtlülitist PL ja vabavooludioodist VD. Seejuures tähistab pooljuhtlüliti täielikult juhitavat jõupooljuhtlülitit, nt. transistori, GTO türistori või SCR türistori koos sulgeahelatega. Lihtsuse huvides võib lugeda pooljuhtlüliti takistuse sisselülitatud olekus nulliks ja väljalülitatud olekus lõpmatu suureks. Samuti on dioodi takistus pärisuunas null ja tõkkesuunas lõpmatu suur. Pooljuhtlüliti oleku muutumine toimub hetkeliselt. Nii toite- kui ka koormusahel koosnevad aktiiv-induktiivtakistustest ja elektromotoorjõu allikatest. Lüliti ahelasse, toite ja koormuse vahele lülitatakse tavaliselt ka *LC*-filter, mis vähendab lüliti poolt tekitatud kõrgsagedusliku pulsatsiooni mõju toiteahelale (toitevõrgule). Pooljuhtlülitit juhitakse pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel (vt. p. 3.1).
Kui PL on sisse lülitatud ja toiteallika emj on suurem kui koormuse vastu emj. (mis oli ühekvadrandilise muunduri talitluse puhul eelduseks), siis tekib koormuses positiivne vool (kontuur 1) $i_{d2} = i_{d1}$, sest dioodil VD on vastupinge ja diood voolu ei juhi. Voolu kasvamise kiirus on määratud pinge ja ahela aktiiv-induktiivtakistustega. Ahela väljalülitamisel vool läbi PL katkeb. Samas ei saa induktiivsust sisaldava koormusahela vool muutuda hetkeliselt nulliks, sest induktiivsuses salvestatud energia ei kao ja see tuleb muundada. Koormusvool lülitub ümber vabavooludioodi ahelasse (kontuur 2) ning induktiivsuse energia muundub koormuse aktiivtakistuses soojuseks. Kui 2. kontuuri vool sumbub nulliks enne kui lüliti PL taas sulgub, tekib ahelas **katkevvoolutalitlus**. Piir pidev- ja katkevvoolutalitluse vahel sõltub toite- ja koormusahela parameetritest ning lüliti suhtelisest lülituskestusest.
Pinget vähendava alalispingemuunduri väljundtunnusjooned sõltuvalt impulsi suhtelisest kestusest *q* on näidatud Joonis 3.15. Koormusvoolu vähenemisel läheb muundur pidevvoolutalitlusest katkevvoolutalitlusse ning pinge hakkab järsult suurenema. Põhjuseks on asjaolu, et pärast voolu katkemist ja dioodi sulgumist sõltub sekundaarahela pinge koormuse vastuelektromotoorjõust.



Joonis 3.15 Pinget vähendava alalispingemuunduri väljundtunnusjooned

Pinget suurendav pulsilaiusmuundur (*boost converter*) võimaldab saada muunduri väljundis toitepingest suuremat pinget (joonis 3.16). Niisuguseid muundureid kasutatakse nt. aktiivfiltrites ja reaktiivvõimsuse kompensaatorites. Pinget suurendava alalispingemuunduri skeem on näitena esitatud Joonis 3.16 .



Joonis 3.16 Pinget suurendav alalispingemuundur

Kui pooljuhtlüluiti Pl juhib voolu (kontuur 1), siis salvestub osa toiteallika energiast induktiivsuse L magnetväljas. Kui pooljuhtlüliti katkestab ahela, siis kommuteerub induktiivsuse vool läbi dioodi VD koormusele ja kondensaatorile C (kontuur 2) ning induktiivsuse magnetväljas salvestunud energia $W_L = Li^2/2$ muundatakse mahtuvuse elektrivälja energiaks $W_C = Cu^2/2$. Muunduri väljundpinge sõltub pooljuhtlüliti suhtelisest lülituskestusest. Väljundpinge võrdub sisendpingega, kui PL on pidevalt välja lülitatud (ei juhi voolu). PL kommuteerimisel saab väljundis oleva kondensaatori pinget tõsta induktiivsusest saadava lisaenergia arvelt. Lüliti PL sulgemisel vool induktiivsuses L kasvab. Pärast lüliti avamist laetakse kondensaatorit suurema vooluga ning pinge sellel kasvab.

Vajalik induktiivsus ja kondensaatori mahtuvus

$$L = (U_{d2a} - U_{d1})\frac{U_{d1}^2}{U_{d2a}^2}\frac{T}{2\,I_{d2\min}}; \quad C \geq \frac{T\,I_{d2\max}}{\Delta U_{d2a}^2} \tag{3.17}$$

Vool I_{d2} ei tohi olla väiksem minimaalsest voolust

$$I_{d2\min} = (U_{d2a} - U_{d1})\frac{U_{d1}^2}{U_{d2a}^2}\frac{T}{2\,L} \tag{3.18}$$

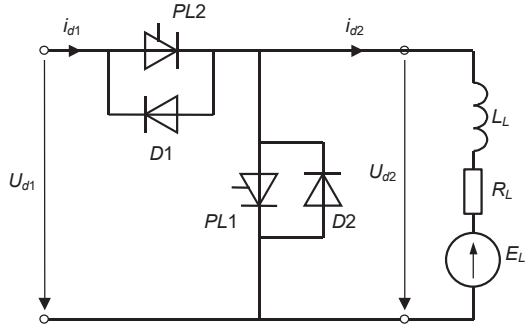
Kui ühendada pinget vähendav alalispingemuundur jadamisi pinget suurendava muunduriga, saadakse alalispingemuundur, mis võib pinget nii vähendada kui ka suurendada (*buck-boost converter*). Niisuguse universaalmuunduri üheks variandiks on ka pinge polaarsust pöörav muundur (*cuk converter*).

3.5 Elektriajamites kasutatavad alalispingemuundurid

Muudetava voolusuunaga kahekvadrandiline pulsilaiusmuundur. Eespool kirjeldatud alalispingemuundureid saab kasutada ainult ühes suunas pöörleva ja mootoritalitluses töötava ajami puhul. Selleks, et tagastada toiteahelasse mootori elektrilisel pidurdamisel genereeritavat energiat, tuleb muuta voolu suunda pooljuhtlülitis.

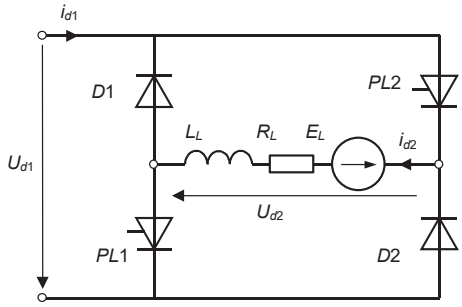
Kahekvadrandiline muundur (Joonis 3.17)koosneb kahest eraldi muundurist: pinget vähendavast muundurist PL2 ja D2 ning pinget suurendavast muundurist PL1, D1. Mootoritalitluses töötab pinget vähendav muundur PL2, D2. Pooljuhtlüliti PL1 pidevalt välja lülitatud (ei juhi

voolu). Samuti on suletud vastupingestatud diood D1. Generaatoritalitluses töötab pinget suurendav muundur (PL1, D1), mis võimaldab suunata energiat tagasi toiteallikasse.



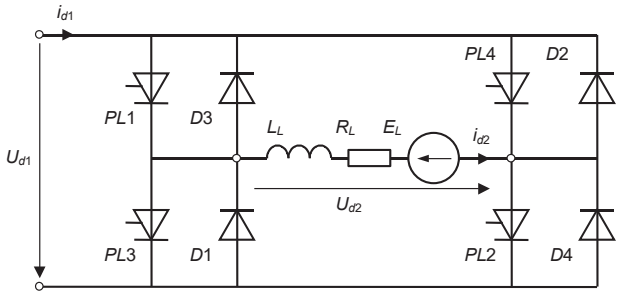
Joonis 3.17 Muudetava voolusuunaga kahekvadrandiline alalispingemuundur

Muudetava pingepolaarsusega kahekvadrandilise muunduri skeem on näidatud Joonis 3.18. Pooljuhtlülitid PL1 ja PL2 lülitatakse koos sisse ja välja. Vool koormuses on alati ühesuunaline. Masina pöörlemissuuna muutumisel, muutub ka elektromotoorjõu märk ja pinge polaarsus masina klemmidel, kuid voolu suund jääb endiseks.



Joonis 3.18 Muudetava polaarsusega kahekvadrandiline alalispingemuundur

Neljakvadrandiline pulsilaiusmuundur on muudetava voolusuuna ja kahepolaarse reguleeritava väljundpingega. Sisuliselt kujutab neljakvadrandiline muundur endast kahe kahekvadrandilise alalispingemuunduri ühislülitust. Neljakvadrandilist muundurit nimetatakse ka reversiivseks (pööratavaks) alalispingemuunduriks. Seda kasutatakse muudetava pöörlemissuunaga ehk reversiivsetes elektriajamites. Mootoritalitluses töötamisel on mootori elektromotoorjõud toiteallika pingest väiksem $E_L < U_d$. Muunduri pinget ja mootori kiirust reguleeritakse pooljuhtlülititega PL1, PL2. Pooljuhtlülitid PL3, PL4 on pidevalt väljalülitatud. Sisselülitatud lülitite PL1, PL2 korral läbib mootorit kasvav positiivne vool. Kui neist üks lüliti välja lülitada jätkub mootoris samasuunaline kahanev vool läbi dioodi D1 või D2.
Mootori pöörlemissuuna muutmiseks tuleb muuta pinge ja voolu suunda. Selleks lülitatakse pooljuhtlülitid PL1 ja PL2 välja ning lülitid PL3 ja PL4 sisse.

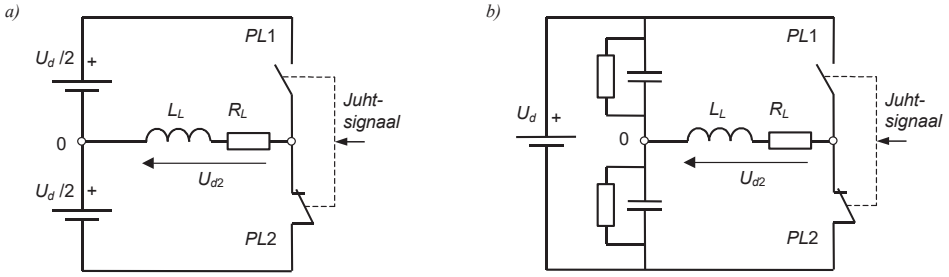


Joonis 3.19 Neljakvadrandiline alalispingemuundur

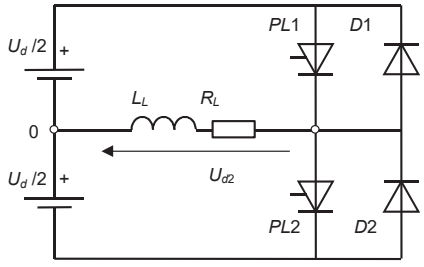
Generaatoritalitluses jääb pinge suund samaks, kuid muutub voolu suund mootoritalitlusega võrreldes. Joonisel näidatud pinge suuna puhul avanevad dioodid D3 ja D4 ja voolude i_{d1} ja i_{d2} suund muutub joonisel näidatuga vastupidiseks (Joonis 3.19). Neljakvadrandilise muunduri talitlust, mil korraga töötavad ainult kaks pooljuhtlülitit (ülejäänud kaks on välja lülitatud) nimetatakse **ühepolaarseks talitluseks**. Neljakvadrandilist muundurit saab kasutada ka nii, et pooljuhtlüliteid kommuteeritakse paarikaupa (PL1, PL2) ja (PL3, PL4). Sel juhul moodustub väljundis nelinurkne vahelduvpinge, mille keskväärtust saab reguleerida pooljuhtide suhtelise lülituskestusega. Pinge positiivse ja negatiive poolperioodi võrdse kestuse korral on väljundpinge keskväärtus null.

3.6 Vaheldid

Vaheldi muundab alalispinge vahelduvpingeks või alalisvoolu vahelduvvooluks. Vastavalt sellele eristatakse pinge- ja vooluvaheldeid. **Pingevaheldi** toiteallikaks on väikese sisetakistusega pingeallikas, mille tunnuseks on tavaliselt allikaga rööbiti lülitatud suure mahtuvusega kondensaator (hoiab pinge konstantsena). Pingevaheldi väljundvool kujuneb vastavalt pinge väärtusele ja koormustakistusele. **Vooluvaheldi** toiteallikaks on konstantse vooluga alalisvooluallikas, mille tunnuseks on jadamisi lülitatud suur induktiivsus (hoiab voolu konstantsena). Vool juhitakse pooljuhtlülitite kaudu vaheldi väljundisse. Vooluvaheldi väljundpinge on määratud väljundvoolu poolt põhjustatud pingelanguga koormusel. Joonis 3.20 on näidatud keskpunktiga sümmeetrilise toiteallikaga ja kahe pooljuhtlülitiga (poolsillaga) vaheldi skeem. Märkigem, et sümmeetrilise kaksiktoiteallika asemel saab kasutada ka ühte keskpunktita allikat, kui lisada skeemi tehiskeskpunkti lülitus. Niisugune lülitus kujutab endast pingejagurit, mis koosneb kahest jadamisi lülitatud kondensaatorist ja takistustest. Pooljuhtkommutaatoriga autonoomse vaheldi skeem on näidatud Joonis 3.21.



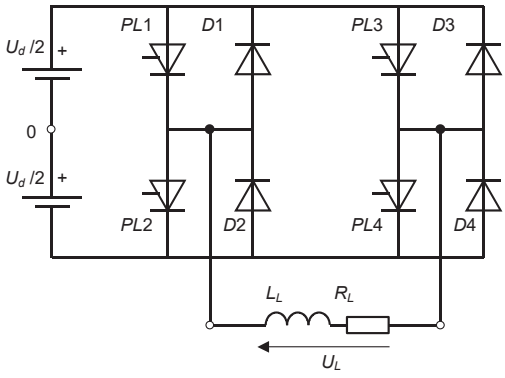
Joonis 3.20 Vaheldid: a) kahe sümmeetrilise toiteallikaga, b) tehiskeskpunktiga



Joonis 3.21 Jõutüristoride ja vastudioodidega poolsildlülituses autonoomne vaheldi

Vaheldeid juhitakse plokk- või pulssjuhtimise põhimõttel. **Plokkjuhtimisel** moodustatakse vahelduvpinge negatiivne või positiivne poolperiood pooljuhtlüliti ühekordse avamise ja sulgemisega. Selle tulemusena tekivad väljundis nelinurksed (ristkülikukujulised) pingeplokid. Siinuselist vahelduvpinget pole plokkjuhtimisega võimalik saavutada. Plokkjuhtimisega pingevaheldi väljundvoolu ajadiagramm on tükati eksponentsiaalse joon, mis erineb oluliselt siinuskõverast. Joonisel näidatud lihtsa vaheldi plokkjuhtimisel lülitatakse pooljuhtlüliteid PL1 ja PL2 kordamööda sisse ja välja. Lülitite samaaegset sisselülitamist tuleb vältida, sest sel juhul tekib ahelas lühis. Lülitite üheaegse sisselülitumise vältimiseks kasutatakse vastavaid blokeeringulülitusi (vrd. lülitite kontaktide mehaaniline blokeering). **Pulssjuhtimisel** (Joonis 3.23) lülitatakse pooljuhtlüliteid vahelduvpinge poolperioodi vältel korduvalt sisse ja välja, kusjuures lülituskestus muudetakse vastavalt väljundpinge soovitud kujule. Teisiti öeldes, väljundpinge moodustatakse pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel. Kui moduleerimine toimub siinuslaine järgi, saadakse väljundist impulsspinge, mille keskväärtus muutub siinuseliselt. Pulssjuhtimisel on pooljuhtlülitite kommuteerimise sagedus kümneid kordi suurem kui plokkjuhtimisel.

Ühefaasiline sildlülituses vaheldi. Ühefaasilise vahelduvpinge saamiseks kasutatakse praktikas sageli Joonis 3.22 näidatud sildlülituses vaheldit. Väljundpinge amplituudväärtus on sel juhul 2 korda suurem kui eelnevalt vaadeldud poolsillaga vaheldil (Joonis 3.21). Et paremini selgitada vaheldi tööpõhimõtet, on toiteallikaks valitud sümmeetriline keskpunktiga pingeallikas. Kuna toiteallika neutraalpunkti vaheldi talitluse ajal koormusega ei ühendata, siis pole praktikas (sildlülituse ja ühefaasilise koormuse puhul) sümmeetrilist keskpunktiga allikat vaja kasutada.

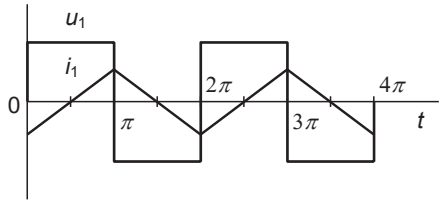


Joonis 3.22 Sildlülituses autonoomne vaheldi

Sildlülituses ühefaasilist vaheldit saab samuti juhtida nii plokk-kui ka pulssjuhtimise põhimõttel. Plokkjuhtimise puhul kommuteeritakse silla harusid nii, et nende väljundpinged on teineteise suhtes nihutatud nurga β võrra. Kui faasinurk mõlema haru pingete vahel $\beta = 0$, on pinged samas faasis ja väljundpinge võrdub nulliga. Kui faasinurk pingete vahel $\beta = \pi$, siis on pinged vastasfaasis ning väljundpinge on maksimaalne $U_L = U_d$. Seega sõltub väljundpinge faasinurgast β. Plokkjuhtimisega ühefaasilise sildlülituses vaheldi pinge ja vooludiagrammid induktiivse iseloomuga koormuse puhul kui β =180°, on näidatud Joonis 3.23. Koormuse pinge efektiivväärtus

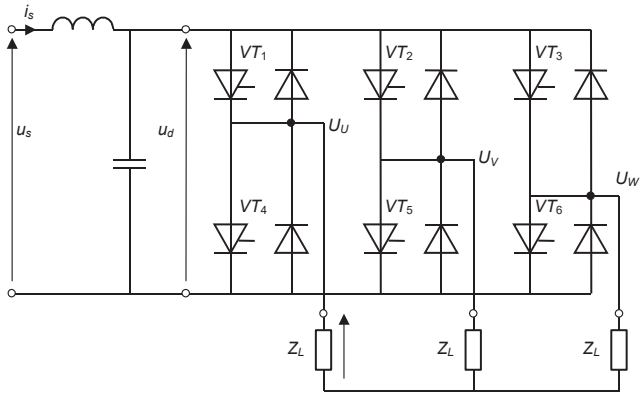
$$U_L = \sqrt{\frac{1}{2\pi} 2 \int_0^{\beta} U_d^2 \, d\omega t} = U_d \sqrt{\frac{\beta}{\pi}} \tag{3.19}$$

Kuna väljundpinge kõver erineb oluliselt siinuskõverast, sisaldab pinge peale põhiharmoonilise ka kõrgemaid harmoonilisi komponente. Nurga β väärtustel $\pi/2 < \beta < \pi$, on põhiharmoonilise osakaal siiski küllalt suur 80...90 %. Seetõttu saab plokkjuhtimissel koos sageduse reguleerimisega reguleerida ka väljundpinge põhiharmoonilise efektiivväärtust.
Pulssjuhtimise korral juhitakse silla mõlema haru pinget pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel. Siinuskõvera järgi moduleerimisel saadakse väljundist impulsspinge, mille keskväärtus muudub siinuseliselt. Pulssjuhtimine võimaldab väga paindlikult juhtida nii faasi pinget ja sagedust kui ka silla harude ehk faaside vahelist faasinurka β. Joonis 3.24 näidatud skeem sobib ka kahefaasilise asünkroonmootori juhtimiseks. Sel juhul tuleb moodustada β = 90° võrra nihutatud faasipinged ning ühendada mootori mähiste keskpunkt sümmeetrilise toiteallika keskpunktiga (tehiskeskpunktiga).



Joonis 3.23 Plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinge ja -vool

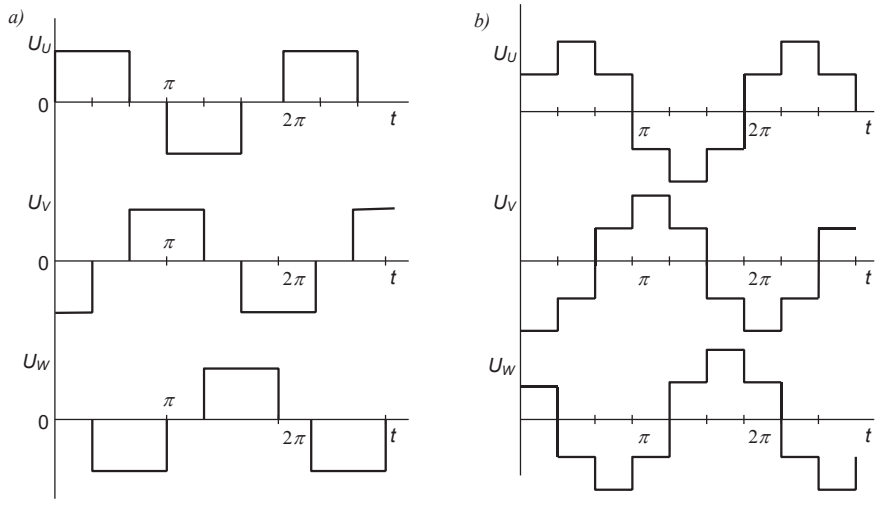
Kolmefaasiline pingevaheldi. Kolmefaasilist sildlülituses autonoomset pingevaheldit (Joonis 3.24) saab kasutada kolmefaasilise koormuse toiteks reguleeritava sageduse ja amplituudiga komefaasilise pingega. Peamiselt kasutatakse niisugust lülitust vahelduvvooluajamite sagedusjuhtimisel ning see moodustab ühe osa sagedusmuunduri jõuahelatest. Sümeetriliste faasipingete puhul on need omavahel 120° võrra nihutatud, kusjuures eri faaside pingekõverate kuju ja amplituudid on ühesugused. Nii nagu eespool vaadeldud skeemide puhul, saab ka kolmefaasilise vaheldi puhul rakendada nii plokk- kui ka pulssjuhtimise põhimõtet. Seoses sagedusjuhtimise üha laiema levikuga elektriajamites ning kolmefaasiliste elektrimasinate tööpõhimõttega (kolmefaasiline toitepinge tekitab ruumiliselt sümmeetrilises staatorimähiste süsteemis pöörleva magnetvälja), on rakendatakse ajamites **vektorjuhtimise põhimõtet**. Sisuliselt tähendab see seda, et vaheldi juhtimise eesmärgiks pole mitte kolme sümmeetrilise faasipinge tekitamine, vaid niisuguse pingesüsteemi loomine, mille pinge kompleksvektor pöörleb ühtlaselt komplekstasandil. Vaheldi niisugust juhtimist nimetatakse **pingevektori juhtimiseks**. Kolmefaasiline sümmeetriline siinuspingete süsteem, mille faasid on komplekstasandil 120° võrra nihutatud (Joonis 3.25), tagab pingevektori ühtlase pöörlemise. Vaheldi puhul jõutakse sama tulemuseni kahel viisil.
Esiteks, tekitatakse kolmes faasis omavahel sümmeetriliselt nihutatud, sama kuju ja võrdse amplituudiga faasipingete süsteem ning toidetakse selle pingega kolmefaasilist elektrimasinat. Teiseks, valitakse vaheldi pooljuhtlülitite kommuteerimise niisugune järjekord, mis tekitab komefaasilise elekrimasina mähistes pöörleva magnetvälja. Viimast variant nimetataksegi pingevektori juhtimiseks (Joonis 3.26). Sobivate pooljuhtlülitite valikuga ning nende juhtimisega pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel saab komplekstasandil tekitada mistahes pingevektori. Muutes kindla seaduspärasuse järgi pooljuhtlülitite valikut ja pulsilaiusmodulatsiooni tegurit saab pingevektorit soovikohaselt komplekstasandil pöörata.



Joonis 3.24 Kolmefaasiline autonoomne pingevaheldi

Võrreldes pulssjuhtimisega võimaldab pingevektori juhtimine suuremat faasipinget ja seega ka suuremat väljundvõimsust. Maksimaalne väljundpinge amplituud pulssjuhtimisel on U_d /2. Pingevektori juhtimisel on maksimaalne amplituud kuusnurgale moodustatud siseringjoone raadiusega, s.o. $U_d / \sqrt{3}$. Järelikult on pingevektori juhtimisel maksimaalne pinge 15,5 % võrra suurem.

Märkigem, et kolmefaasilise sildalaldiga saadakse 220 V faasipingega võrgupinge alaldamisel u. 540 V alalispinge, s.t. U_d = 540 V.. Juhul kui vaheldi töötab kuuetaktilises plokk-juhtimistalitkluses ning selle väljundpinge on astmeline, siis on selle maksimaalseks amplituudväärtuseks $U_m = 2 \cdot U_d / 3$ = 360 V. Pinge keskväärtuseks kujuneb sel juhul 240 V, mis on ca 18 % võrra suurem kui võrgupinge korral (198 V). Järelikult on toitemuunduril niisugusel juhul teatud pingevaru ning mootor võib kõrgematel sagedustel arendada suuremat maksimaalset pöördemomenti. See saavutatakse aga siinuspingest loobumise hinnaga ning ka kõrgematest harmoonilistest tingitud kadude mõningase suurenemise arvel.

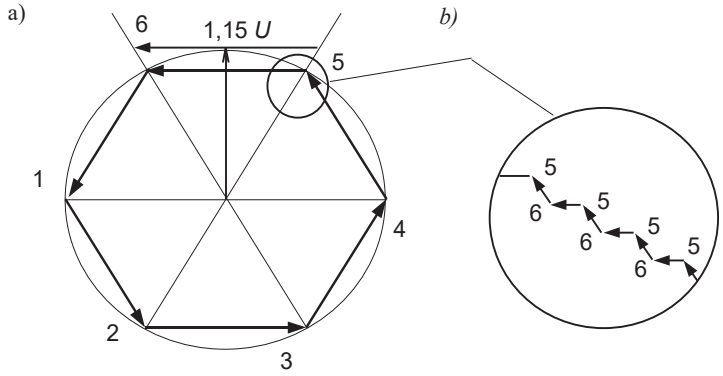


Joonis 3.25 Kuuepulsilise kolmefaasilise plokkjuhtimisega vaheldi väljundpinged: a) kahe üheaegselt avatud ventiili korral, b) kolme üheaegselt avatud ventiili korral

Vooluvaheldid omavad tähtsust niisuguse elektritarviti (nt. kaarleekahju, induktsioon-kuumuti vms.) toiteallikana, mille puhul on oluline juhtida voolu (mitte pinge) väärtust. Võrreldes pingevahelditega on vooluvaheldite osatähtsus väiksem, sest vajadusel saab ka pingevaheldit voolu tagasiside kasutamisega kohaldada vooluallikana. Tavatüritoridega vaheldite puhul omasid vooluvaheldid pingevaheldite ees mõningaid eeliseid türistoride lihtsama kommutatsiooni tõttu. Tänapäeval, seoses hästi juhitavate IGBT transistoride kasutamisega, on need eelised minetanud oma tähtsuse.

Resonantsvaheldid koosnevad kommutaatorist ja *LC* võnkrringist, mille väljundist saadakse koormuse vahelduvpinge. Pooljuhtlüliteid kommuteeritakse nii, et *LC*-võnkering töötaks resonants läheduses, s.t. võnkeringi omavõnkesagedus on lähedane pooljuhtide kommutatsioonisagedusele. Türistorlülitite puhul on võimalik saavutada olukord kus türistorid sulguvad väljundpinge mõjul loomuliku kommutatsiooniga nii nagu võrguga sünkroniseeritud muundurites. Erinevalt viimastest on aga resonantsvaheldite väljundpinge sagedus määratud võnkeringi omavõnkesagedusega. Erinevalt autonoomsetest vahelditest ei saa resonants-vaheldite sagedust reguleerida juhtimissüsteemi seadesignaaliga. Resonantsvaheldite puhul

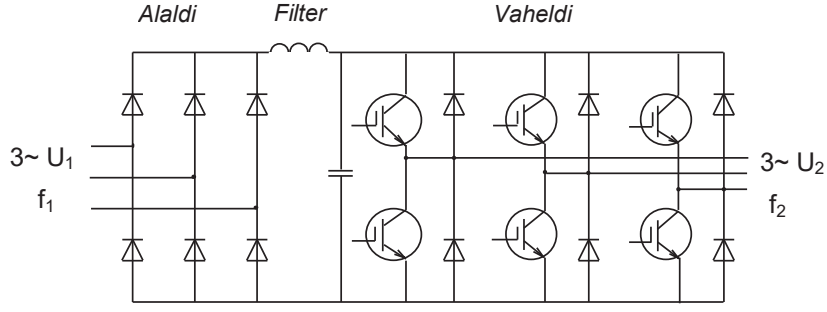
kasutatakse rööp- ja jadaresonantsil põhinevaid lülitusi, samuti ka nende kombineerimisel saadud segaresonantslülitusi.
Resonantsvaheldite peamine rakendusala on elektrotermia, kus neid kasutatakse induktsioonkuumutusseadmete toiteks. Samuti sobivad nad mikrolaineahjude ja ultraheliseadmete toiteks, kus vajatakse kõrgsageduslikke, kuid mittereguleeritavaid toiteallikaid. Kui resonantsvaheldi väljundisse lülitada alaldi, siis saadakse alalispinge resonantsmuundur.



Joonis 3.26 Pingevektori juhtimisega vaheldi töö: a) vektori polügoon, b) vektori reguleerimine

3.7 Sagedusmuundurid

Sagedusmuundurid jagunevad kahte liiki: 1) alalisvoolu vahelüliga muunduriteks ja 2) vahetuteks sagedusmuunduriteks. **Alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundurid** koosnevad alaldist, silumisfiltrist ja vaheldist. Vahelduvvool alaldatakse ja muundatakse seejärel uuesti muudetava pinge amplituudi ja sagedusega vahelduvvooluks. Pinge amplituudi ja sageduse muutmine võimaldab juhtida vahelduvvoolumootorite kiirust ja momenti suurtes piirides alates seisuolekust kuni nimikiiruseni ja isegi üle selle. Sagedusmuunduri lihtsustatud skeem on näidatud Joonis 3.27. Niisugust muundurit nimetatakse ka ühesuunalise energiavooga muunduriks, sest mittejuhitava alaldi korral ei saa energiat paindlikult väljundist sisendisse tagasi juhtida.



Joonis 3.27 Ühesuunalise energiavooga sagedusmuundur

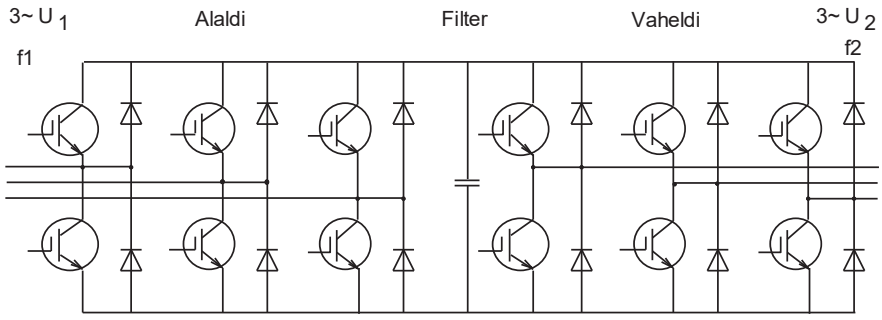
Alaldina kasutatakse üldjuhul mittejuhitavat kolmefaasilist dioodidega sildalaldit. Mõnikord kasutatakse alaldis ka võrguga sünkroniseeritud juhitavaid türistor või transistoralaldeid. Need võimaldavad energiat võrku tagasi anda. **Alalisvoolu vahelüliks** on filter, mis silub alaldi pingekõvera pulsatsiooni. Filtris kasutatakse piisavalt suure induktiivsusega pooli ja piisava mahtuvusega kondensaatorit. Suure induktiivsuse korral on tegemist vooluallikaga ja vastavat vaheldit saab nimetada ka vooluvaheldiks. Alalisvoolu vahelülis võib kasutada ka eraldi pingemuundurit, mis võimaldab reguleerida võimsustegurit.
Alalisvoolu vahelüli sisaldab üldjuhul ka pidurdustakistit, mis on vajalik selleks, et mootori pidurdamise korral vabanevat liigset energiat soojusena hajutada. Sellega saab vältida vahelüli pinge kasvamist üle lubatud piirväärtuse ja kaitsta seadmeid liigpinge ohu eest. See on eriti oluline juhul kui alaldi ei võimalda pidurdamisel vabanevat energiat võrku tagasi juhtida.

Vaheldi muundab alalisvoolu uuesti soovitud sageduse ja pingega vahelduvvooluks. Pinge ja sageduse juhtimiseks kasutatakse transistorlüliteid ja pulsilaiusmodulatsiooni ning vektorjuhtimise korral pingevektori või vooluvektori modulatsiooni. Pinget on võimalik juhtida ka muunduri sisendis oleva juhitava alaldiga ja sel juhul võime rääkida pinge amplituudmodulatsioonist.

Sageduse vahetu muundamise korral reeglina puudub energia salvestamise võimalus alalisvoolu vahelülis. Sageduse vahetu muundamine on võimalik topelt pulsilaiusmuundurite, tsüklokonverterite ja maatrikmuunduritega.

Topelt pulsilaiusmuundur (*double PWM converter*) koosneb kahest ühetaolisest vastakuti kokku ühendatud pulsimodulatsiooniga vaheldist, millega sisendpinge muundatakse vahetult muudetud sageduse ja pingega väljundpingeks (Joonis 3.28). Niisugune sagedusmuundur võimaldab energia paindlikku kahesuunalist edastamist nii võrgust elektrimootorile kui ka generaatoritalitluses töötavalt masinalt tagasi elektrivõrku.

Pulsilaiusmodulatsiooniga alaldi skeem on sarnaneb autonoomse vaheldi skeemile, kuid see töötab nagu võrguga sünkroniseeritud alaldi. Alaldi väljundpinge madalsageduslik pulsatsioon on väike ja seetõttu puudub vajadus tõhusa filtri ning energia salvestamise järele.
Niisugused sagedusmuundurid on eriti kasulikud suurematel võimsusetl ja konkureerivad tsüklokonverteritega. Erinevalt viimastest on topelt pulsilaiusmodulatsiooniga muunduri väljundsagedus suures ulatuses juhitav nii üles kui ka allapoole toitesagedust. Heaks omaduseks on ka see, et energiavoo suuna muutmine on sümmeetrilise skeemi tõttu lihtne.

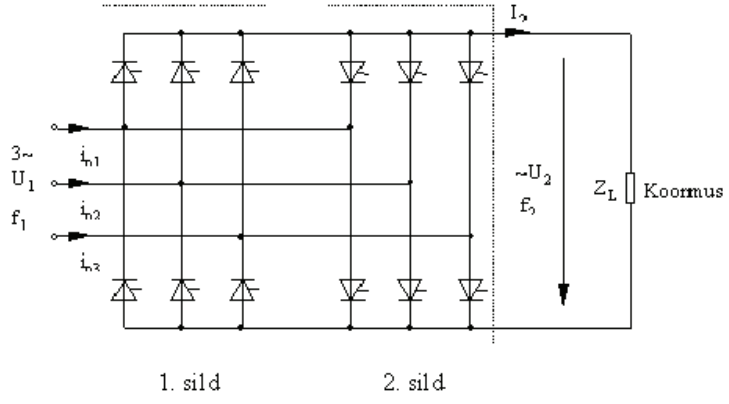


Joonis 3.28 Pulsilaiusmodulatsiooniga alaldiga ja kahesuunalise energiavooga sagedusmuunduriga vahelduvvooluajami jõuahel

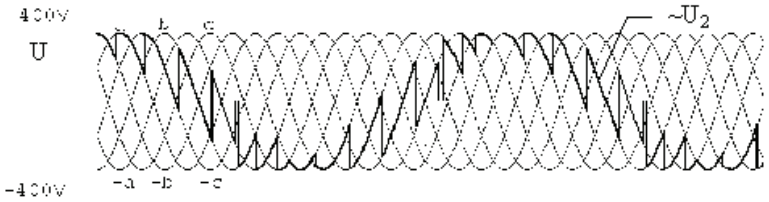
Tsüklokonverterid on toitevõrguga sünkroniseeritud vahetud sagedusmuundurid, kus lülituselementidena kasutatakse türistore. Märkigem, et teistes vahetutes sagedusmuundurites kasutatakse täielikult juhitavaid pooljuhte (suletavaid türistore või transistore). Tsüklokonvertereid kasutatakse suurtel võimsustel ja toitesagedusest madalamatel sagedustel. Muunduri iseärasuseks on see, et türistoride sulgemine toimub loomuliku kommutatsiooniga. Tuntakse 6-, 12- ja 24-pulsilisi tsüklokonvertereid. Lihtsa 6-pulsilise tsüklokonverteri üks võimalik skeem on Joonis 3.29.

Sagedusmuundur koosneb kahest vastuparalleelselt ühendatud sildalaldist, mills vahelduvpinge positiivse poolperioodi jooksul juhivad 1. silla ja negatiivse poolperioodi puhul 2. silla ventiilid. Ventiilide tüürnurki juhitakse enamasti nii, et väljundpinge U_2 muutuks ligikaudu siinuselaselt.

Tsüklokonverteri juhtimiseks on mitu moodust. Lihtsaim on kolmnurkjuhtimine, mille korral aktiivse silla tüürnurki muudetakse lineaarselt. Väljundpinge U_2 muutub sel juhul ligikaudu siinuseliselt. Väljundpinge diagramm kolmnurkjuhtimise korral on näidatud Joonis 3.30. Üheoperatsiooniliste türistoride kasutamisel toimub kommutatsioon võrgupinge mõjul ja väljundpinge sagedus ei saa olla suurem toitepinge sagedusest, vaid on sellest tavaliselt 2 korda väiksem.



Joonis 3.29 Ühefaasiline tsüklokonverter



Joonis 3.30 Ühefaasilise tsüklokonverteri väljundpinge diagramm

Maatriksmuundurid ehk sundkommutatsiooniga tsüklokonverterid on vahetud sagedusmuundurid, kus alalisvoolu vahelüli puudub. Maatriksmuunduri iseloomulikuks omaduseks on see, et väljundpinge moodustatakse vahetult kolmefaasilisest sisendpingest, lülitades selleks sobival ajahetkel kordamööda väljundisse sisendpingete lainekatkeid. Väljundpinge amplituudi ja sageduse sujuvaks reguleerimiseks laias diapasoonis tuleb kasutada keerukaid ventiilide kommuteerimise seaduspärasusi. Nende kasutamise võimalused on piiratud põhiliselt pooljuhtide tehniliste parameetrite väärtustega. Näiteks kolmefaasiline matriks-konverter sisaldab üheksa paari transistoreid mis võimaldab juhtida koormusvoolu mõlemas suunas. Juhtimisel kasutatakse pulsilaiuse-, amplituud- ja vektormodulatsiooni meetodeid.

3.8 Teadmiste kontroll

Peatükk 3, 4. Teema 8: Erinevate mootoritega elektriajamid (servoajamid)

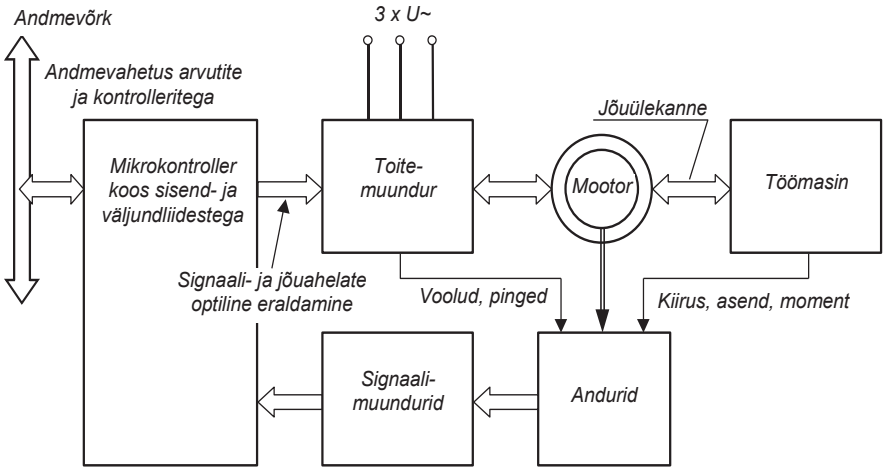
1. Mis on inverter?
    a. muundur, mis muundab vahelduvvoolu alalisvooluks;
    b. seade, mis genereerib siinuselist vahelduvvoolu;
    c. elektrooniline energiamuundur;
    d. muundur, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks;
2. Mis on alaldi?
    a. muundur, mis muundab vahelduvvoolu alalisvooluks,
    b. seade, mis genereerib siinuselist vahelduvvoolu;
    c. elektrooniline energiamuundur;
    d. muundur, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks.
3. Mis on alalisvoolu vahelüliga sagedusmuundur?
    a. alaldit, silufiltrit ja vaheldit sisaldav sagedusmuundur
    b. muundur, mis muundab sisendsagedusega vahelduvvoolu alalisvooluks ja selle omakorda väljundsagedusega vahelduvvooluks;
    c. ühe või kahesuunalise energiavooga muutuva sagedusega vahelduvvoolu energiamuundur;
    d. muutuva sagedusega voolu- või pingeallikas;
4. Mis on tsüklokonverter?
    a. vahetu sagedusmuundur, millel pole alalisvoolu vahelüli;
    b. mitmefaasiline sagedusmuundur;
    c. mittetäielikult juhitavate türistoridega sagedusmuundur;
    d. muundur, mis muundab kõrgema sisendsagedusega voolu madalama väljundsagedusega vooluks.

5. Mis on maatriksmuundur?
    a. vahetu sagedusmuundur, millel pole alalisvoolu vahelüli;
    b. mitmefaasiline sagedusmuundur, mille lülitid on ühendatud maatriksskeemi;
    c. mittetäielikult juhitavate türistoridega sagedusmuundur;
    d. muundur, mis muundab kõrgema sisendsagedusega voolu madalama väljundsagedusega vooluks.

4 ELEKTRIAJAMID

4.1 Üldkirjeldus

Elektriajam (*electric drive*) on masinate või tehnoloogiaseadmete käitamiseks ettenähtud elektromehaaniline süsteem (mehhatroonikasüsteem), mis koosneb elektrimootorist, jõuülekandest, toitemuundurist ja juhtseadmetest. Juhtseadmete hulka kuuluvad mikrokontroller koos andmeside liidestega, andmekanalid (andmevõrk) andurid ja täiturid. Elektriajami üldine struktuur on näidatud Joonis 4.1. Üldisemalt võttes on elektriajami ülesandeks masinate ja mehhanismide liikumise juhtimine (*motion control*). Juhtimise seisukohalt kujutab elektriajam endast mitmesuguste tagasisidedega varustatud automaatjuhtimissüsteemi (*control system*), milles rakendatakse väga mitmesuguseid automaatjuhtimise põhimõtteid nagu tagasisidega väljundi vea järgi juhtimist (*error driven feedback control*), mootori mudeli järgi juhtimist (*model based control*), loogilist binaarjuhtimist (*logic binary control*) või hägusloogilist juhtimist (*fuzzy logic control*). Sõltuvalt konkreetsest tehnilisest lahendusest ja valitud juhtimispõhimõttest kasutatakse ajamis eri tüüpi andureid voolude, pingete, asendi, kiiruse, kiirenduse, pöördemomendi vms. mõõtmiseks. Sageli vajatakse töömasina kiiruse juhtimiseks veel muudki infot, nt. pumpade või kompressorite juhtimisel rõhusignaali, ventilaatori juhtimisel õhuniiskuse või temperatuurisignaali jne. Seepärast peab ajamikontroller töötlema väga mitmesugust informatsiooni.



Joonis 4.1 Elektriajami üldine struktuur

Mikroprotsessortehnika kasutuselevõtt on võimaldanud tänapäeva juhtimissüsteemides, sh ka elektriajamite juhtimisel rakendada kõige erinevamaid juhtimismeetodeid. Ajamikontrolleris kasutatakse tavaliselt signaaliprotsessoreid millesse on sisseehitatud analoog-digitaalmuundurid, taimerid, pulsilaiusmodulaatorid ja muud ajami juhtimist lihtsustavad seadmed.

Seadmete ja funktsioonide süvenev integreerumine. Mikroprotsessorjuhtimine võimaldab tarkvaraliselt lahendada kõiki juhtimisülesandeid, sh. nii muunduri kui ka ajami energiavahetuse ja kaitse ning isegi tehnoloogiaprotsesside järjendloogikaga seotud ülesandeid. Seepärast võib ajami mikrokontrollerit vaadelda komplektse juhtseadmena, mis täidab nii arvjuhtimisseadme, programmeeritava kontrolleri kui ka talitlusjärelevalveseadme ülesandeid. Ajamikontrollerite programmeerimine ja juhtimine toimub menüüdest valitavate käskude ja erifunktsioonide täitmiseks ettenähtud alamprogrammidega. Ajamikontrollerite tarkvara täiendatakse pidevalt mitmete lisafunktsioonidega, mis varasematel muunduritel puudusid. Kuna nüüdisaja tööstussüsteemid põhinevad andmesidevõrkudel, on uuemad kontrollerid ettenähtud talitluseks tööväljasiinidega. Lisaks paindlikule kiiruse reguleerimisele tagab kontroller ka mootori tõhusa kaitse.

Kõik ideed tarkvara kaudu praktikasse. On saabunud aeg, mil õpikute ja monograafiate kaante vahele kogutud teooriad leiavad üha enam praktilist rakendamist ja teadusideed realiseeritakse seadmete tarkvaras. Juba täna võib väita, et ajamikontrollerid on valmis lahendama kõiki neid ülesandeid, mida kirjeldatakse elektriajameid käsitlevates õpikutes ja tehnikakirjanduses. Kontrollerite tarkvaras rakendatakse üha laiemalt mitmeid automaatjuhtimise nüüdisteooria saavutusi nagu hägusloogilist juhtimist, isekohastuvat ehk adaptiivjuhtimist, objekti mudelitel põhinevat juhtimist jne. Vahelduvvooluajamite vektorjuhtimine, mis veel 90-ndate aastate alguses oli tehniline uudissaavutus, on tänastes muundurites juba laialt kasutusel.

Kontrolleri kasutajaliidese poolt loodud mugavused maksavad. Ajamikontrolleri funktsionaalsed omadused ja tema kasutajaliidese täiuslikkus ei pruugi olla omavahel kooskõlas. Turg sunnib tootjaid alandama ajami hinda ja sageli tehakse seda kasutajaliidese arvel. Seejuures vähendatakse juhtnuppude ja täht-numbernäidiku kohtade arvu (3…5-ni). Harvad pole juhtumid, kus kasutajaliidese näidiku 7-segmendilise numbri igale segmendile on omistatud mingi kindel väljundfunktsioon, nt. kindla signaali olemasolu, vastav rikketunnus vms. Mingist mugavusest ei saa sel juhul juttugi olla, sest nende “kriipsukeste” ja “konksukestega” suhtlemine nõuab pikka õppimist või kasutusjuhendi pidevat lappamist. Omaette küsimus on muidugi ka see, kas kasutajal on muundurit üldse tihti vaja ümber programmeerida ja piisab, kui sellega tegeleb mõni muundurite paigaldamisele ja hooldamisele pühendunud firma. Täiuslikuma ja kallima kasutajaliidese puhul vahetatakse infot kuvarile ilmuvate üldarusaadavate tekstidega, kusjuures suhtlemiskeel on valitav. Veelgi paindlikumat suhtlemist muunduriga võimaldavad aga arvutiliides ja vastav kasutajatarkvara, mille rakendamisel saab arvuti ekraanile tuua kogu muunduri, ajami või tehnoloogiaprotsessi tööd puudutava info, sh. tarbitud energia maksumuse, võimsuse, pinged, voolud, töötsüklite (toodete) arvu jne. Kuigi muundureid tootvad firmad tarnivad kasutaja soovi korral vastava tarkvara, võib niisuguse tarkvara hind olla mõnikord suurem kui muunduril.

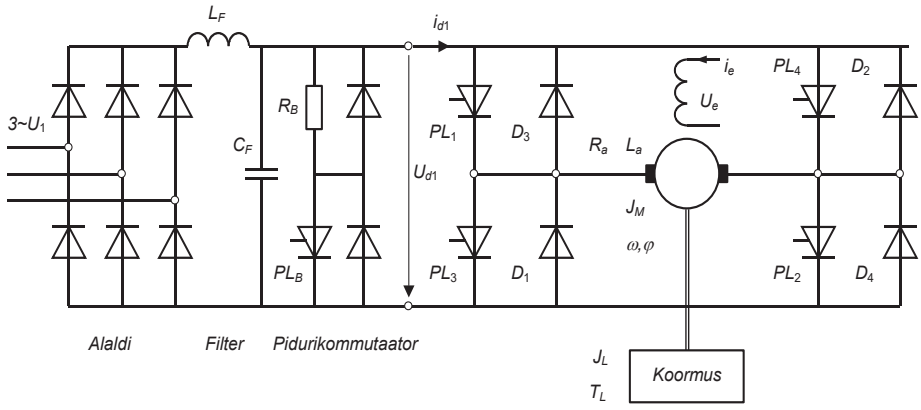
Uued andurid ja optiline andmeside. Ajamite arvjuhtimine on tinginud vajaduse rakendada traditsiooniliste pidevatoimeliste andurite asemel uusi diskreetseid impulssandureid kiiruse ja siirde mõõtmiseks ning koodandureid asendi mõõtmiseks. Omaette probleemiks on kõrgemate harmooniliste komponentidega pingete- ja voolude mõõtmine eriti seetõttu, et ajami juhtimiseks vajatakse infot väga kiiresti, mistõttu signaalide filtreerimine on

raskendatud. Voolutrafod moonutavad signaale ning pole piisavalt kiired. Vooluahelatesse lülitatud šundid võimaldavad saada küll täpse voolusignaali, kuid jõuahelaga galvaaniliselt (juhtivuslikult) seotud anduri signaali ei saa edastada mikrokontrollerisse. Seepärast on ajamites kasutusele võetud Halli anduritel põhinevad voolu magnetelektrilised muundurid, mis tagavad piisava toimekiiruse ning jõu- ja juhtahelate galvaanilise eraldamise. Kontrolleri väljundsignaalid edastatakse muundurile läbi kiudoptiliste andmekanalite.

4.2 Alalisvoolumasinatega elektriajamid

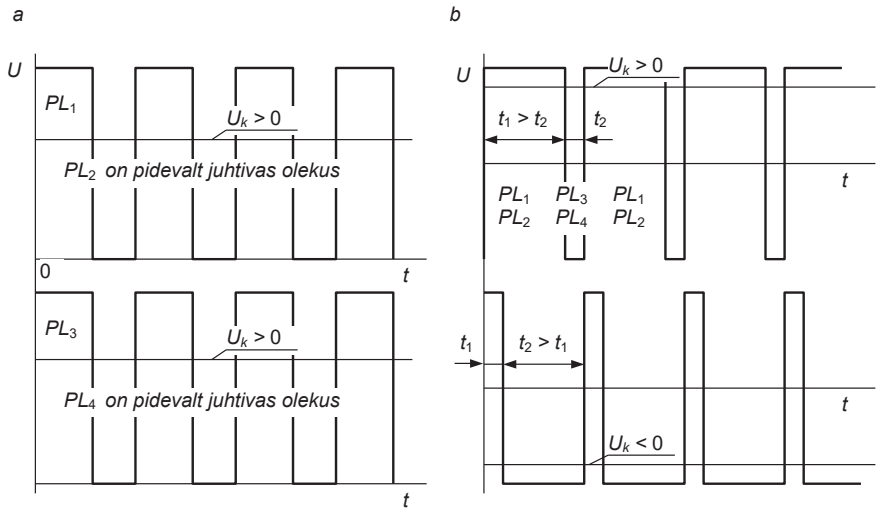
Mõisted *alalisvoolumasin* ja *alalisvooluajam* (*DC drive*) on tänapäeval hägustumas mitmel põhjusel. Esiteks, elektrimasina tööpõhimõte eeldab, et tema mähiste voolu tuleb perioodiliselt kommuteerida, mistõttu kõikide elektrimasinate mähistes on tegelikult vahelduvvool. Teiseks, traditsioonilist mehaanilise kollektoriga alalisvoolumasinat kasutatakse tänapäeval üha harvemini ning selle asemele on tulnud nn. harjadeta (*brush-less DC motors*) ehk pooljuhtkommutaatoriga mootorid. Oma ehituselt on niisugune mootor võrreldav sagedusmuundurist toidetava vahelduvvoolu sünkroonmasinaga. Lisagem, et mõlemal masina puhul tekitatakse vooluahelatest eraldi ergutusväli kas püsimagnetite või ergutusmähise abil. Kolmandaks, elektriajamite toitevõrguna kasutatakse vahelduvvooluvõrku, mille pinge mootorite toitemuundurites alaldatakse. Alaldid kuuluvad tüüpilise komponendina nii vahelduvvooluajamite kui ka alalisvooluajamite toitemuundurite koosseisu. Alalisvoolumootori ainsaks ja teda teistest masinatest eristavaks iseärasuseks on põhimõte, et tema mähiseid kommuteeritakse sõltuvalt ankru (rootori) pöördenurgast. Sama põhimõtet saab aga raskusteta kasutada ka sünkroonmasina juhtimiseks.

Alalisvooluajami üks võimalikest lülitustest on esitatud Joonis 4.2. Ajami jõuahel koosneb mittejuhitavast alaldist, filtrist, pidurikommutaatorist ja neljakvadrandilisest pulsilaiusmuundurist. Joonisel on näidatud juhitavate pooljuhtlülititena GTO türistorid, mida põhiliselt kasutatakse suurtel võimsustel. Väiksematel võimsustel kasutatakse pooljuhtlülititena IGBT transistore. Kuna mittejuhitav alaldi ei võimalda energiavahetust toitevõrguga, siis on vaja juhtida mootori generaatoritalitluse puhul genereeritav energia kas filtri kondensaatorisse C_F, mille pinge sel juhul kasvab, või hajutada see pidurdustakistis R_B soojusena. Selleks lülitatakse sisse **pidurikommutaator** (*break chopper*) PL_B.



Joonis 4.2 Alalisvooluajam

Neljakvadrandiline pulsilaiusmuundur võimaldab alalisvoolumasina talitlust momendi-kiirustasandi kõigis neljas kvadrandis, s.t. ajami talitluse ajal võib sõltuvalt tööprotsessist muutuda nii kiiruse kui ka momendi märk ning alalisvoolumasin võib töötada nii mootorina kui ka generaatorina. Pulsilaiusmuundurit saab juhtida kahel eri viisil. Esiteks, mootori pöörlemissuuna võib valida pooljuhtlülitite paariga PL1 ja PL2 või PL3 ja PL4. Kui üks paar on valitud, jääb teine lülitipaar pidevalt väljalülitatuks, kui mootori pöörlemissuund ei muutu.
Muunduri pinget ja mootori kiirust reguleeritakse sisselülitatud pooljuhtlülititega (nt. PL1, PL2) pulsilaiusmodulatsiooni põhimõttel. Pinge ja kiiruse reguleerimiseks piisab sel juhul ka ühe pooljuhtlüliti (nt. PL1) pulsilaiusjuhtimisest. Mootori pöörlemissuuna muutmiseks tuleb muuta pinge ja voolu suunda. Selleks lülitatakse pooljuhtlülitite paar (nt. PL1 ja PL2) välja ning teine lülitipaar (nt. PL3 ja PL4) sisse ja muudetakse mootori kiirust reguleeritakse pooljuhtlülitiga PL3 (Joonis 4.3).
Neljakvadrandilist muundurit saab kasutada ka nii, et pooljuhtlüliteid kommuteeritakse paarikaupa (PL1, PL2) ja (PL3, PL4). Sel juhul moodustub väljundis nelinurkne vahelduvpinge, mille keskväärtust saab reguleerida pooljuhtide suhtelise lülituskestusega. Pinge positiivse ja negatiive poolperioodi võrdse kestuse korral on väljundpinge keskväärtus null.



Joonis 4.3 Neljakvadrandilise pulsilaiusmuunduri pinge reguleerimine ja polaarsuse muutmine a) ühe või kahe lülitiga, b) nelja lülitiga

4.3 Asünkroonmootorite sujuvkäivitid

Tänapäeval on asünkroonmootor enim kasutatav elektrimootor. Teiste elektrimasinatega võrreldes on ta töökindel, rasketes talitlusoludes vastupidav ja vajab vähe jooksvat hooldust. Seetõttu on asünkroonmootorite kasutamine majanduslikult otstarbekas ja tõhus. Kaua aega tunti neid kui raskesti juhitavaid elektrimasinaid, mida sai kasutada vaid püsikiirusega töötavates ajamites. Kõige enam on asünkroonmootoreid kasutatud mitmesuguste üldotstarbeliste masinate nagu ventilaatorite, kompressorite, pumpade aga ka ketassaagide, puiduhöövelpinkide ja muude masinate käitamiseks. Valdavalt töötavad need masinad püsitalitluses, kuid protsesside optimeerimise ja energiasäästu seisukohalt on sageli

otstarbekas reguleerida nende tootlikkust ja kiirust. Kuna asünkroonmootori kiiruse sujuv reguleerimine oli veel kümmekond aastat tagasi väga tülikas, lepiti odava hinna ja lihtsuse nimel enamikel juhtudel ka masinate ebatõhusa töö, madalama kasuteguri või toodangu halvema kvaliteediga. Edusammud jõupooljuhttehnikas, mikroelektroonikas, arvutustehnikas ja muudes tehnikaharudes on tänaseks võimaldanud luua asünkroonmootorite juhtimiseks töökindlad pooljuhtmuundurid, sh. nii **sujuvkäivitid** kui ka **sagedusmuundurid**.

Varasematel aastatel põhjustas asünkroonmootori kasutamine mitmeid probleeme. Näiteks, suurematel võimsustel oli problemaatiline **asünkroonmootori käivitus**. Mootori staatorivool ulatub käivituse ajal kuni 7-kordse nimivooluni ja seepärast põhjustab võimsate asünkroonmootorite otsevõrkukäivitus suuri voolutõukeid elektriliinides. Lisagem, et mootori käivitusvoolu tugevus ei sõltu koormusest ning on igal mootoril kindel suurus. See on antud mootori sildil nimi-käivitusvoolukordsusena $I_{käiv}/I_n$, mis on tavaliselt 4...7. Pikkade liinide ja suure sisetakistusega võrkude korral põhjustab võimsa mootori käivitus ajutiselt teiste elektritarvitite pinge olulist vähenemist. Seejuures on asünkroonmootori käivitusmoment võrreldes alalisvoolumootoriga suhteliselt väike, mistõttu suure koormuse ja inertsimomendi, s. o. *raske käivituse* puhul, venib käivitusprotsess pikaks. See asjaolu põhjustab omakorda mootori mähiste olulist kuumenemist käivitusprotsessis ning sobiva kaitse puudumisel tekib oht mähise isolatsioonile. Erinevalt alalisvoolumootorist, mille pöördemoment koormuse suurenemisel võrdeliselt kasvab, on **asünkroonmootori mehaaniline tunnusjoon** (pöördemomendi sõltuvus kiirusest) mittelineaarne, mida iseloomustab nn. maksimaalne ehk **vääratusmoment**. Vääratuspunkti ületamisel mootori pöördemoment väheneb ning koormuse säilimisel mootor seiskub. Seepärast on otsevõrkulülituses asünkroonmootori kasutamine muutlikul koormusel raskendatud või mittesoovitav.

Asünkroonmootori pidurdamiseks on traditsiooniliselt kasutatud kas vastulülituspidurdust koos automaatse peatamisega nullkiirusrelee abil või dünaamilist alalisvoolupidurdust. Vastulülituspidurduse puuduseks on suur, käivitusvoolutõukega võrreldav voolutõuge ja peatamiseks vajalik automaatikalülituse olemasolu. Dünaamilise pidurduse muudab tülikaks vajadus kasutada täiendavat alalispingeallikat. Dünaamilise pidurduse puuduseks on ka kiirusest mittelineaarselt sõltuv pidurdusmoment.

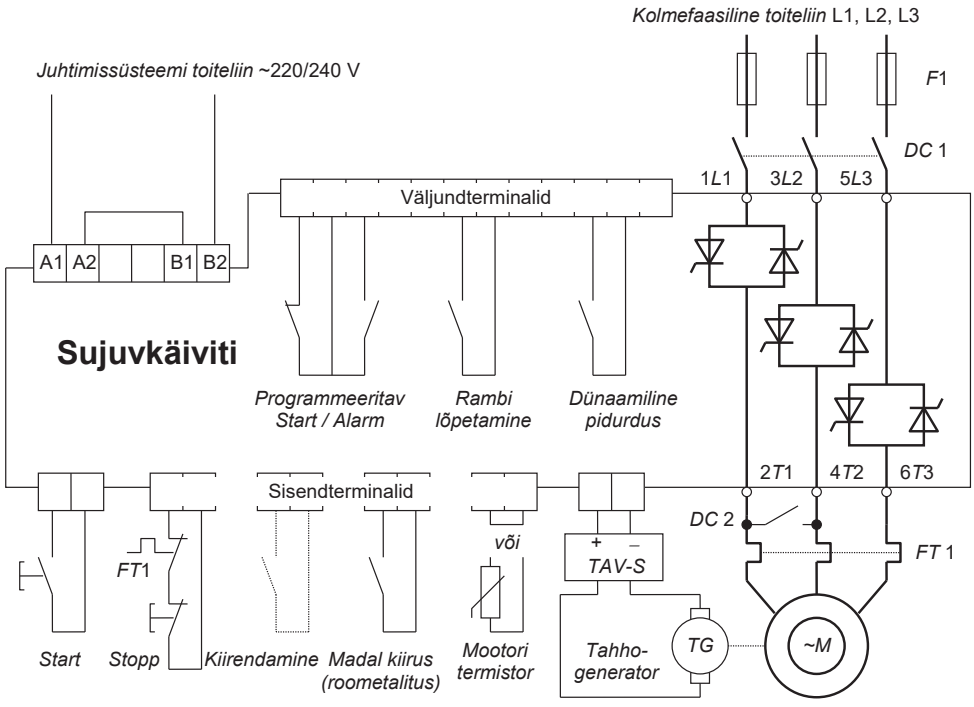
Võrdlemisi keerukaks on osutunud **asünkroonmootori kaitse**. Kui alalisvoolumootori ankruvool on võrdeline mootori koormusega ja järelikult iseloomustab piisava täpsusega ka mootori soojenemist, siis asünkroonmootori puhul niisugune otsene sõltuvus puudub. Mootoris toimuvad füüsikalised protsessid on matemaatiliselt raskesti kirjeldatavad. Nende kulgemise kohta on raske saada objektiivset informatsiooni ka elektriliste suuruste vahetu mõõtmise teel, sest staatorivool ja -pinge iseloomustavad mootori talitlust vaid osaliselt.

Asünkroonmootori käivituse, pidurduse ja kaitse probleeme saab tänapäeval edukalt lahendada jõuelektroonika ja mikroprotsessortehnika abil komplekssselt, kasutades selleks otstarbeks loodud sujuvkäiviteid. **Sujuvkäivitid** kujutavad endast peamiselt türistoridel vahelduvpingeregulaatoreid, kus türistoride juhtimiseks kasutatakse mikroprotsessorkontrollerit. Tänu viimasele saab juhtimissüsteemi integreerida mitmeid mootori käivitus-, pidurdus-, kaitse- ja sammtalitluse (nt. positsioonitava mehhanismi asendi seadistamiseks) funktsioone. Pinge reguleerimisega saab vähendada käivitusvoolu tõuget, valida kiirendus- ja

pidurdusrambi kestust, ning **optimeerida mootori energiatarvet** (ka võimsustegurit) muutliku koormuse puhul. Mikroprotsessorsüsteem võimaldab realiseerida mootori liigkoormuskaitse sobiva sekund-amper tunnusjoone. Türistoride kommuteerimisega saab 50 Hz vahelduvpinge poolperioode valikuliselt sisse ja välja lülitada ning kasutada ajami lühiajalisel talitlusel väikestel pöörlemiskiirustel odavat pseudosagedusjuhtimist.

Sujuvkäivitid on ette nähtud asünkroonmootorite sujuvaks (voolutõuketa ja sätestatud kiirendusega) käivitamiseks või peatamiseks ning energiasäästu saamiseks muutlikul (nimi-koormusest väiksemal) koormusel. Sujuvkäivititega saab juhtida ka asünkroonmootorite pidurdust. Mõned sujuvkäivitid võimaldavad dünaamilist alalisvoolupidurdust (*DC-brake*), lühiajalist väikekiirusel pöörlemist ehk roomamistalitlust ja tahhogeneraatoriga juhitavat lineaarse rambiga pidurdust. Raske käivitustalitluse puhul (näiteks töömasina seisuhõõrde ületamiseks) saab rakendada lühiajalist löökkäivitusimpulssi (*kick start*).
Sujuvkäivitite juhtimissüsteem täidab mitmeid mootori ja käivitusseadme **kaitsefunktsioone**. Nendeks funktsioonideks on eelnevalt sätestatav maksimaalvoolupiirang, sisend- või väljund-faasi katkestus, türistori lühis, jahutusradiaatori liigkuumenemine, toitepinge väär sagedus või juhtseadme protsessori rike. Mõnede sujuvkäivitite puhul lisanduvad veel mootori liigkuumenemis- ehk (termistor-)kaitse, seiskunud rootori, koormuse ootamatu kadumise, juhtseadme mäluvigade, pikaleveninud käivituse ja liigkestva väikekiirusel talitlusaja funktsioonid.

Sujuvkäivitite ehitus ja tööpõhimõte. Sujuvkäivitite jõuahelate põhimõtteskeemid ja välised juhtahelad on näidatud Joonis 4.4. Sujuvkäiviti lülitid *Start* ja *Stopp* ühendatakse juhtahela sisendklemmidega. Seejuures võib kasutada kas kahte impulsskontaktidega nupplülitit või üht sulguva kontaktiga tumblerlülitit. Mootori kaitseks ettenähtud termorelee *FT* tuleb valida vastavalt mootori voolule. Sujuvkäiviti toiteahelad on kaitstud sulavkaitsmetega *F*1. Mootori liigkuumenemise kaitseks ettenähtud termistor, kiiruse automaatreguleerimiseks ja lineaarse käivitusrambi saamiseks mõeldud tagasisidesignaal tahhogeneraatorilt ühenda-takse sisendklemmidele. Mootori raskekäivitusel rakendada staatorimähisele lühiajaliselt nimipinge, tagamaks sellega mootori piisavalt kiire ülesjooksu. Eraldi lüliti võimaldab valida mootori väike- ehk roomekiiruse nt. mootori või töömasina võlli aeglaseks pööramiseks soovitud asendisse. Sujuvkäivitil on ka rida väljundklemme, mis võimaldavad juhtida pingeallikaga jadamisi ühendatud releed või kontaktorit. Väljundkontaktide võimalik otstarve on samuti näidatud joonisel.



Joonis 4.4 Sujuvkäiviti jõuahela põhimõtteskeem ja välised juhtahelad

4.4 Sagedusjuhtimisega ajamid

Palju probleeme on tekitanud **asünkroon- ja sünkroonmootori kiiruse reguleerimine**, millele otsiti sobivaid lahendusi peaaegu terve sajandi kestel. Kasutust on leidnud kiiruse astmeline reguleerimine staatorimähiste ümberlülitamise ja masina pooluspaaride arvu muutmisega. Osaliselt rahuldas reguleerimisvajadusi kontaktrõngastega ja faasirootoriga asünkroonmootor, mille rootori libistus ja järelikult ka pöörlemiskiirus sõltusid peaaegu võrdeliselt rootoriahela takistusest. Seega sai takistuse lisamisel rootoriahelasse muuta ka masina pöörlemiskiirust. Samas tekkisid kiiruse reguleerimisel suured kaod reostaadis. Ainus mõistlik viis nii lühisrootoriga asünkroonmootori kui ka sünkroonmootori kiiruse sujuvaks reguleerimiseks on aga nende toitepinge **sageduse reguleerimine**.

Tänapäeval on vahelduvvoolumasinate kiiruse sagedusreguleerimine muutunud valdavaks reguleerimisviisiks ning sagedusmuundurid nende ajamite põhikomponendiks. Traditsiooniliselt oli sagedusmuundur ette nähtud vaid mootori toitepinge ja sageduse sujuvaks reguleerimiseks. Tänapäeva sagedusmuunduritel on palju enam funktsioone. Sisuliselt kujutab **sagedusmuundur koos mootoriga** endast **komplektelektriajamit**. Ta sisaldab nii toitemuundurit, andureid kui ka juhtseadet ja võimaldab ohjata nii elektriajami kui ka sellega käitatava töömasina või tehnoloogiaprotsessi keerukat automaattalitlust. Muunduri võrguliides abil saab ajamit rakendada keerukates hierarhilistes või hajusjuhtimisega automaatikasüsteemides.

Sagedusmuunduri kasutuselevõtt elektriajamites on olnud päevakorral juba asünkroonmootori leiutamisest alates. Esialgu kasutati sel otstarbel mitmesuguseid masinmuundureid, mis sisuliselt kujutasid endast ühise võlliga reguleeritava kiirusega alalisvoolumootorist ja sünkroongeneraatorist koosnevat agregaati. Reguleeritava kiirusega ajami toiteallikana oli selline muundur väga kallis ja majandusliku tasuvuse mõttes küsitava väärtusega. Pärast türistori leiutamist (1956) kerkis tõsiselt päevakorda staatiliste, s. t. pöörlevate masinateta, sagedusmuundurite loomise idee. Juba 60-ndate aastate algul ehitati esimesed tüsistor-sagedusmuundurid. Võib lisada, et veel samal aastakümnel valmis türistor-sagedusmuunduri katsemudel ka TTÜ elektriajami ja jõuelektroonika instituudi laboratooriumis. Sagedusmuundurite praktiline rakendamine tööstuslikes ajamites edenes aga kaua aega väga visalt. Põhjuseks oli nii muundurite kõrge hind kui ka väike töökindlus. Märkigem, et muunduri ehituse muutsid keerukaks türistoride sundkommutatsiooni ahelad, mille väike töökindlus põhjustas omakorda muundurite ootamatuid lühiseid. Alles võimsate jõutransistoride, täpsemalt isoleeritud baasiga bipolaarsete ehk **IGBT transistoride** ilmumine muutis järsult olukorda sagedusmuundurite valmistamisel ja kasutamisel. Tänapäeval on sagedusjuhtimisega vahelduvvooluajam leidnud kasutust peaaegu kõigil aladel, kus traditsiooniliselt rakendati alalisvooluajamit. Sagedusmuundurite turg on järsult kasvanud ning tõenäoliselt kasvab edaspidi veelgi.

Sagedusjuhtimine on traditsiooniliselt ette nähtud mootori momendi, kiiruse või võlli pöördenurga (asendi) juhtimiseks avatud või suletud juhtimisahelaga süsteemides tingimusel, et väljundsuurust reguleeritakse suhteliselt aeglaselt ning mootor töötab peamiselt püsitalitluses. Suletud juhtimisahelaga süsteemid võimaldavad võrreldes avatud süsteemidega suurendada oluliselt väljundsuuruste reguleerimise täpsust ning parandada mõnevõrra ajami dünaamilisi näitajaid, nõnda et ajamit saab kasutada ka toitepinge märgatavate fluktuatsioonide ning muutliku koormuse korral. Sageduse muutumise kiirus ehk **kiirendus- ja aeglustusrampide kestus** on tavalise sagedusjuhtimise puhul aga rangelt piiratud.

Dünaamilised protsessid võivad kergesti põhjustada mootori vääratumise, s. t. tööpunkti nihkumise üle vääratuspunkti, mootori seiskumise või tema talitluse väikesel nn "roomamiskiirusel" koos suurte kadude ja mähiste temperatuuri järsu tõusuga. Nendel põhjustel kasutatakse tavalist sagedusjuhtimist peamiselt püsikiirusel töötavate või "aeglast" kiiruse reguleerimist nõudvate masinate nagu pumpade, ventilaatorite ja kompressorite, käitamiseks.
Tänapäeva elektriajamite puhul tähendab mootori mudeli järgi juhtimine eelkõige **vahelduvvoolumasinate vektorjuhtimist**. Nimetus "vektorjuhtimine" tuleneb sellest, et juhtimiseks vajalikku informatsiooni mootori oleku kohta saadakse tema mudeli järgi leitud vahelduvvoolu, -pinge ja magnetvoo hetkväärtustest, mis mitmefaasilises süsteemis kirjeldavad vastavaid pöörlevaid vektoreid. Seepärast tähendab nimetus vektorjuhtimine eelkõige juhtimist magnetvälja pöörleva suunavektori järgi. Siit tuleneb ka mõiste – juhtimine väljasuunistuse järgi (*field orientation control*). Võrdluseks võib tavalist sagedusjuhtimist nimetada ka skalaarjuhtimiseks, sest sel juhul toimub juhtimine sageduse ja pinge efektiivväärtuse järgi, mis mõlemad on ajas mõõdetavad keskmised suurused.

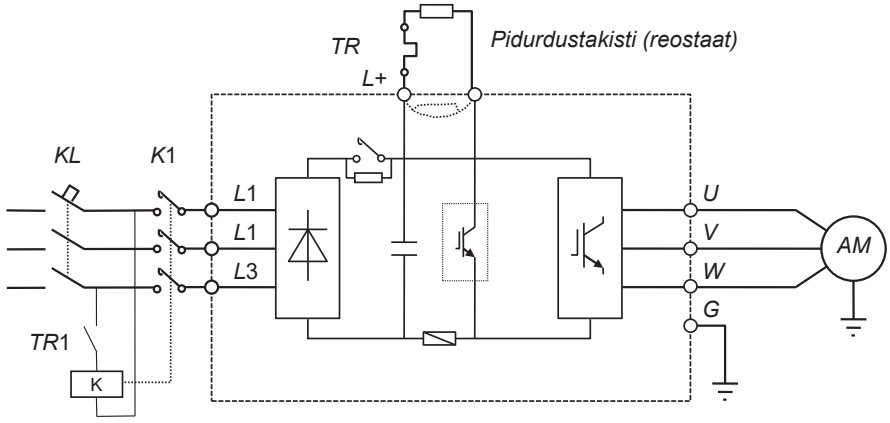
Asünkroonmootorite vektorjuhtimiseks kasutatakse samuti sagedusmuundureid, kuid nende muundurite juhtimisalgoritm erineb oluliselt tavalise sagedusjuhtimise algoritmist. Mudelite keerukuse ja vektorjuhtimiseks vajaliku suure toimekiiruse tõttu kasutatakse vastavates muundurites suure jõudlusega mikrokontrollereid. Vektorjuhtimine võimaldab luua asünkroonajami jaoks niisuguse juhtimisalgoritmi, mis muudab selle tehniliste näitajate poolest võrreldavaks kõige suurema toimekiirusega alalisvooluajamitega. Seepärast saab vektorjuhtimisega asünkroonajameid kasutada elektertranspordivahendite, liftide, tööpinkide, robotite jt. dünaamilise koormusega ja pidevalt muutuva kiirusega masinate käitamiseks.

Sagedusmuunduri jõuahelad on näidatud Joonis 4.5. Sagedusmuundurit juhitakse programmjuhtimise põhimõttel, kusjuures muunduri standardtarkvara koosnema teatud hulgast tüüpsetest makroprogrammidest, mille valikuga ning parameetrite sättimisega määratakse ära ajami talitlus. **Sagedusmuunduri sätteparameetrid** jaotatakse tavaliselt mitmesse rühma. Enamasti võib sõltuvalt parameetrite muutmise sagedusest eristada kolme rühma (nt. A, B ja C rühma) parameetreid:

- sagedasti sätitavad parameetrid
- harva sätitavad parameetrid
- tootja poolt sätitavad parameetrid.

Neist esimese kahe rühma parameetreid saab sättida muunduri kasutaja. Kolmanda rühma parameetrid võivad olla küll kasutajale tarkvaraliselt ligipääsetavad, kui vajalik informatsioon nende sättimiseks kasutajal tavaliselt puudub. Seepärast võib nimetatud parameetrite sättimine muuta muunduri kasutuskõlbmatuks või tingida vajaduse muunduri häälestamiseks tehase oludes. Alljärgnevalt on kirjeldatud ainult kasutaja poolt sätitavaid parameetreid.
Sagedusmuunduri parameetrid sätitakse digitaalselt. Sagedamini muudetavate (A-rühma) parameetrite hulka kuuluvad, sagedussäte (*frequency setting*), roomamissageduse (*frequency setting for jogging*), kiirendus- ja aeglustusrambi kestuse (*acceleration/deceleration time*), mootori momendikompensatsiooni (*torque boost*), dünaamilise pidurduse (*DC brake setting*) ja vahel ka sisendsignaalide otstarve.

Sagedussäte antakse muunduri juhtpuldilt kohttalitluses. Juhtpuldilt sisestatav sagedussäte mõjutab vahetult ajami tööd. Sageduse valik toimub enamasti inkrement ja dekrement klahvidega. Sagedussätet saab ette anda ka muunduriga ühendatud potentsiomeetrilt, alalispinge või -vooluallikast ning kaugjuhtimistalituses (*remote operation mode*) juhtraali vahendusel.



Joonis 4.5 Sagedusmuunduri jõuahelate põhimõtteskeem

Sageduse digitaalne seadistus sisaldab tavaliselt **jäme- ja peenhäälestuse** võimalusi. Jämehäälestus võimaldab muuta sageduse seadeväärtusi ühe (1) Hz sammuga ja täppisseadistust sammuga 0,01 Hz.

Kiirenduse ja aeglustuse aja seadeväärtused on muudetavad suurtes piirides. Stardi alguseks määratud muunduri sagedust nimetatakse algsageduseks. Pidurdussagedus on muunduri sageduse väärtus mille korral lülitatakse sisse dünaamilise pidurduse režiim. Vahelduvpinge seadeväärtus mida kasutatakse pidurdamisel sõltub muunduri võimsusest. Suurema võimsuse korral määratakse madalam pinge väärtus. Ka dünaamilise pidurduse aeg on seadistatav.

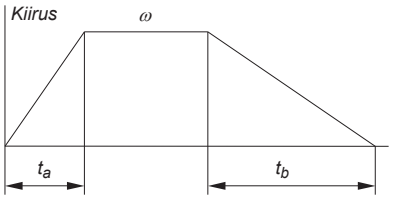
Kiirenduse ja pidurduse ajad peavad sobima elektriajami parameetrite väärtustega. Suurema inertsiga ajamite korral ei ole võimalik määrata väga väikesi kiirenduse ja aeglustuse väärtusi, kuna selleks on tegelikkuses vaja rakendada suuri momendi ja ja võimsuse väärtusi. Lühikeste kiirendus- ja aeglustusaja määramisel rakendub kaitse ja motor peatatakse. Kiirenduse ja aeglustuse ajalised kestused määratakse valemitega, mis on esitatud Tabelis 4.1.

Roometalitus seadistatakse enne ajami käivitamist. Seda madala kiirusega töörežiimi kasutatakse lühiajaliselt masina mehhanismide positsioneerimiseks.

Mootori arendatava **momendi kompenseerimisel** kasutatakse muunduris pinge-sageduse funktsioni $U = f(f)$. Selleks peab eelnevalt olema kindlaks tehtud (teada) mootori koormuse iseloom. Näiteks kui moment on sõltumatu kiirusest (T = const.) või moment on proportsionaalne kiirusega (ventilaatorid, pumbad). Konstantse koormuse korral valitakse lineaarne kiiruse-sageduse funktsioon. Mittelineaarne pinge-sageduse funktsioon seadistatakse (valitakse menüüs) ventilaatorite rakendamisel. Mootori momendi vähenemine madalal pöörlemissagedusel kompenseeritakse toitepinge väärtuse suurendamisega. Mootori nimisagedus on tavaliselt 50 Hz.

Libistuse kompenseerimine on mõeldud mootori pöörlemiskiiruse stabiliseerimiseks kui koormus kasvab. Seadistuse ulatus on 0 … 5%.

Table 4.1 Valemid ajami kiirenduse ja aeglustuse aja väärtuse arvutamiseks



$$t_a = \frac{J \cdot \omega}{(T_{MA} - T_L)};$$

$$t_b = \frac{J \cdot \omega}{(T_{MB} + T_L)}$$

$$T_{MA} = \frac{P}{\omega};$$

$$T_{MB} = T_{MA} \frac{Dynamical\ breaking\ power}{Motor\ power} \cdot \frac{1}{0{,}8}$$

230 V system

$$Dynamical\ breaking\ power = \frac{148{,}2}{Breaking\ resist}[kW]$$

400 V system

$$Dynamical\ breaking\ power = \frac{593}{Breaking\ resist}[kW]$$

4.5 Poojuhtmuunduri elektromagnetiline ühilduvus

Muundurite juhtivus- ja kiirgushäired. Pooljuhtmuundurite talitlusega kaasnevad nii elektriahelate juhtivushäired kui ka elektromagnetväljas levivad kiirgushäired. Sagedusmuunduri mittejuhitav alaldi ja pinge- või impulssvaheldi tarbivad võrgust energiat vaid juhul kui toitevõrgu alaldatud pinge on kõrgem kui muunduri vahelüli alalispinge, s. t. võrgupinge tippväärtuste lähedases ajavahemikus. Selle tulemusena **tarbitav vool on katkendlik** ja omab suuri hetktippväärtusi. Vool sisaldab peale põhiharmoonilise komponendi veel terve mitmeid kõrgemaid harmoonilisi komponente. Sagedusmuunduri poolt tarbitav vool sisaldab kolmefaasilise võrgu puhul peamiselt 5., 7., 11. ja 13. harmoonilisi komponente. **Kõrgemad harmoonilised, voolukomponendid** põhjustavad:

- võrgupinge häireid, mille tulemusena pinge kuju erineb siinuselisest ja mõjutab sellega teisi, muunduriga samast võrgust toidetavaid seadmeid; läbi sagedusmuunduri toitekaabli võivad elektrivõrku levida juhtivuse teel ka raadiosageduslikud häired,
- võimsusteguri kompensatsiooniahelate võnkeprotsesse, mis teatud kriitiliste olude puhul võivad tekitada suuri liigpingeimpulsse.

Suure võimsusega tarbija lülitamisel toitevõrku järgnevad siirdeprotsessi jooksul esialgsele pingelangule võrgusagedusest kõrgema sagedusega võnkumised, mis sumbuvad mõne poolperioodi jooksul. Need võnkumised võivad olla põhjustatud nt. 7. harmoonilise komponedi poolt (350 Hz). Probleemiks on pingevõnkumiste suur amplituud *Umax*. Näiteks, 400 V toitepinge puhul on mõõdetud pinge amplituudväärtuseks enam kui 1200 V, mis ohustab toitevõrku lülitatud seadmeid.

Sagedusmuunduri pulsilaiusmodulatsiooni (PWM) põhjustab muunduri töötamisel suhteliselt suure sageduse ja kiirete kommutatsiooniprotsesside tõttu mitmeid lisaprobleeme. Ühelt poolt võimaldab kiiretoimeline kommutatsioon vähendada transistoride kommutat-

sioonikadusid ning genereerida pulsilaiusmoduleeritud siinuspinget. Teiselt poolt, kiiretoimelised transistorid põhjustavad:

- laia harmooniliste spektriga signaale, mis vaheldit ja mootorit ühendava kaabli kaudu toimib ümbritsevatele seadmetele; genereerivad kõrgsageduslikud häirepinged tekitavad varjestamata kaabli puhul raadiohäireid,
- modulatsioonist tingitud magnetilist müra mootoris. Pulsilaiusmodulatsioonist tingitud pidev magnetilise induktsiooni muutus põhjustab magnetahela elementide pikkuse muutumist (magnetostriktsiooni efekt) ja viimane omakorda müra.

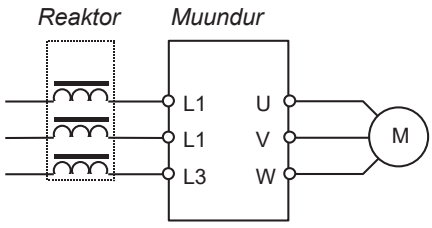
Akustilist müra saab vähendada ka pulsilaiusmodulatsiooni modifitseerimise teel. Näiteks, pulsilaiusmodulatsiooni sagedust võib muuta nii, et see ei muutuks sünkroonselt väljundpinge sagedusega (poleks väljundsageduse *fvälj* kordne). Peale selle on kasulik muuta pulsilaiusmodulatsiooni sagedust isegi konstantse väljundsageduse puhul, et vältida konstantse sagedusega akustilist resonantsi (nt. **juhusliku sagedusega pulsilaiusmodulatsioon**).
Vaheldi kiiretoimelised kommutatsiooniprotsessid põhjustavad vaheldit ja mootorit ühendavas kaablis **pingelainete peegeldumisnähtusi**. Transistori lülitusaja, pulsi levikukiiruse ja kaabli pikkuse kriitiliste väärtuste puhul võib pinge kulgevlaine liituda kaablis mootorilt peegeldunud lainega. Mootori klemmidele langev impulsspinge võib selle tulemusena isegi püsitalitluses kasvada võrreldes muunduri vahelüli alalispingega kuni 2 korda. Kui laiusmoduleeritud impulss rakendatakse dünaamiliste võnkumiste korral, siis tekkib lainete liitumine ning võimalike pingete tippväärtused võivad enam kui kaks korda ületada muunduri vahelüli alalispinget *UDC*.
Jõu- ja juhtimisahelate vastastoime võib tekitada häireid muunduri juhtseadme töös. Niisuguste häirete vältimiseks esitatakse firmade poolt muundurite ja ühenduskaablite paigaldamiseks kindlad nõuded. Kui mitme sagedusmuunduri väljundkaablid asuvad nt. kaabliredelil rööbiti üksteise ligidal, võib see põhjustada eri sagedusmuundurite mittesoovitavaid vastastoimeid. Selle vältimiseks tuleb kasutada väljundfiltreid või varjestatud kaableid. Samuti tuleks kaablid paigutada mitteparalleelselt ja üksteisest piisavalt kaugele.
Selleks, et vältida sagedusmuundurite kahjulikku mõju nende lähedal töötavatele seadmetele ja inimestele ning tagada seadmete töökindel talitlus peavad sagedusmuundurid rahuldama üldotstarbelistele reguleeritava kiirusega vahelduvvooluajamitele esitatavaid **elektromagnetilise ühildatavuse** (*EMC, electromagnetic compatibility*) nõudeid. Neid nõudeid tuleb järgida nii ajamite paigaldamisel kui ka talitluse ajal. Enamik sagedusmuundureid on projekteeritud nii, et nõuetekohase paigalduse puhul saab neid rakendada nii tööstuses, olmes kui ka äriasutustes.
Muunduri elektromagnetiline ühilduvus. Sagedusmuundurite talitlusega kaasnevate ja eespool kirjeldatud **juhtivushäirete** mõju vähendamiseks rakendatakse ajamis mitmesuguseid **drosseleid ja filtreid**, mis lülitatakse nii sagedusmuundurit ja toitevõrku kui ka vaheldit ja mootorit ühendavasse ahelasse. Üldjuhul kasutatakse ajami elektromagenetilise ühilduvuse tagamiseks muunduri toiteahelasse lülitatud reaktoreid ja kõrgsagedusfiltreid ning muunduri ja mootori vahelisse ahelasse lülitatud ferriitdrosseleid ja filtreid. Filtrite, reaktorite ja drosselite ehitus ja lülitusskeem võivad olla erinevad. Reaktori kasutamine muunduri toiteahelas aitab ka vähendada muunduri alalispinge vahelüli poolt kondensaatori laadimisel tarbitavat voolu ning kaitseb sellega muunduri alaldit.

Kiirgushäirete vähendamise esmaseks meetmeks on **varjestatud kaablite** kasutamine. Kui samal ajal on vaja kasutada ka pikemat kaablit ja/või tagada mootori müra vähenemine, tuleb muunduri juures kasutada väljundfiltreid. Filtri kasutamine annab maksimaalse efekti, kui filter asub muundurile võimalikult lähedal. Häirete vähendamise eeltingimuseks on ka filtri kere tõhus ulatuslik maandamine värvimata metallkäppade kaudu. Kuna mootori filtreeritud toitepinge on siinuseline ja ei sisalda siirdepingete kõrgemaid harmoonilisi komponente, siis pole varjestatud kaabli kasutamine filtri ja mootori vahel oluline, kui ajam talitleb väljaspool elurajooni (*residental area*) (elumaju).
Vastavalt standardite EN 50081 ja EN 50082 nõuetele saavutatakse piisav **elektromagnetiline ühildatavus elamutes** (*residental level*) kui ajam on paigaldatud varjestatud elektriaparaadikoostesse ja kasutatakse sobivat EMC filtrit. Peale selle tuleb kiirguse vähendamiseks paigaldada väljuva jõukaabli ahelatesse ferriitdrosselid.
Sagedusmuudurite puhul kasutatakse nii lapikuid alusfiltreid (*foot-print filters*), mis paigaldatakse elektriaparaadikooste seinale muunduri alla või eraldi asetsevaid filtreid (*stand alone filters*). Lapikfiltrite kasutamisega saab ruumi kokku hoida ja teha filtri ja ajami vahelised ühendused võimalikult lühikesed. Juhul kui kooste kesta sügavus pole piisav võib filtri paigaldada ka muunduri kõrvale.
Toiteahela drosselid. Sagedusmuunduri toiteahelasse lülitatakse lühisvoolu piiravad drosselid, mis valitakse vastavalt muunduri nimivoolule (Joonis 4.6). Drosselite ülesandeks on muunduri poolt tarbitava voolu silumine, suure tugevusega vooluimpulsside (lühisvoolude) ja voolu kõrgemate harmooniliste komponentide piiramine. Need eesmärgid saavutatakse ahela induktiivsuse suurendamisega. Drossel suurendab ka sagedusmuunduri liigpingetaluvust.
Drosseli näivtakistus moodustab koos sagedusmuunduri näivtakistusega liigpingeimpulsside jaoks pingejaguri ning takistuste suhtest sõltub liigpinge vähenemine muunduri klemmidel. Liigpingetaluvuse suurenemise tõttu saab sagedusmuundurit paremini kaitsta tavapäraste liigpingekaitseseadmetega nt. varistoride, gaaslahendite, ja kondensaatoritega, sest küllastamata magnetahelaga drossel piirab ahela voolu. Seepärast kasutatakse drosseleid eelkõige kõrgema toitepingega muundurite puhul.
Toiteahela drosseleid tuleks sobitada iga sagedusmuunduriga eraldi nii et sagedusmuundurid oleks üksteisest eraldatud. Kindlasti peaks vältima ühe suure drosseli kasutamist mitme väikese võimsusega sagedusmuunduri jaoks.
Toiteahela filtrid. Sagedusmuunduri vaheldi transistoride suure töökiiruse tõttu tekivad mitmesugused elektromagnetilise ühilduvuse (*EMC*) probleemid. Kõrgsageduslikud häired levivad peale elektromagnetilise kiirguse ka otseselt toiteahela kaudu (juhtivustoime). Toiteahelasse lülitatud filtritega tuleb piirata häiringuid sageduspiirkonnas 0,15...30 MHz. Vastavalt standardile EN 55011 liigitatakse seadmeid sõltuvalt kasutuskohast ja kõrgsageduslikku häirepinge iseloomust alljärgnevalt.

Talitluskoha järgi eristatakse kahte seadmete klassi.
Klass A: Seadmed, mis võivad töötada kõikjal elurajoonidest eemal asuvates piirkondades
Klass B: Seadmed, mis on kohaldatud tööks elurajoonides.

Genereeritava kõrgsagedusvoolu iseloomu järgi eristatakse:

- madalsageduslikke sagedusmuundureid, mille talitlusega kaasneb ka kõrgsagedusliku energia edastamine peamiselt juhtivuse teel (nt. sagedusmuunduri pulsilaiusmodulatsioon), s. o. **1. rühma** muundureid
- kõrgsageduslikke sagedusmuundureid, mis tekitavad kõrgsageduslikku kiirgusenergiat materjalide töötlemiseks (nt. mikrolaineseadmed ja induktsioonkuumutid), s. o. **2. rühma** muundureid



Joonis 4.6 Muunduri toiteahelasse on lülitatud voolupiirav drossel

Toiteahela filtrid sisaldavad **kondensaatoreid**, mis põhjustavad ahelas **lekkevoolu**, mille suurus võib küündida kuni 200 mA. Mahtuvuslik lekkevool tekib ka sagedusmuunduri koormuspoolel (peamiselt muundurit ja mootorit ühendavas kaablis). Seepärast pole sagedusmuunduri kasutamisel võimalik inimeste kaitseks rakendada tüüpseid rikkevoolukaitselüliteid. Inimeste kaitseks sobiv pingetundlik kaitse ühendatakse sel juhul muunduri maaühendusklemmi ja maanduselektroodi vahele.

Väljundfiltrid. Sagedusmuunduri väljundpinge pulsilaiusmodulatsioon, mis võimaldab genereerida mootoris siinuselisi voolusid ja pidevat magnetvoogu ning ühtlaselt pöörlevat magnetvälja, tekitab ka mitmeid ebasoovitavaid järelmõjusid. Eristatakse:

- Mootori täiendavat müra,
- Mahtuvuslikke voolusid mootori kaablis,
- Liigpingeimpulsse mootori klemmidel,
- Kõrgsageduslikke kiirgushäireid ümbritsevas keskkonnas.

Eebasoovitavaid kõrvaltoimeid saab oluliselt vähendada väljundfiltrite abil. Tuleb siiski arvestada, et väljundfiltri kasutamine põhjustab täiendava pingelangu tõttu mootori magnetvälja nõrgenemise, vähendab omakorda mootori võimalikku momenti. Sel põhjusel pole tõstemehhanismide ajamis, kus on oluline ajami lühiajaline ülekoormatavus, väljundfiltri kasutamine lubatud. Filtri asemel kasutatakse sel juhul spetsiaalset elektromagnetilise ühilduvuse moodulit või väljunddrosselit. Enam kui 50 m pikkuste kaablite kasutamisel tuleb jälgida, et aktiivtakistusel tekkiv pingelang ei ületaks 2 % nimipingest. Mootori ühendukaabli maksimaalselt lubatava pikkuse kohta võib leida teavet kataloogidest.
Elektromagnetilise ühilduvuse edasine parandamine on võimalik spetsiaalsete **EMC moodulite** abil. EMC moodulite sisendis on toiteahela filter ja väljundis ferriitsüdamikuga drossel.

Väljund-drosselid kujutavad endast ferriitsüdamikku millele on mähitud 3 kuni 5 keerdu muunduri ja mootori ühenduskaablit. Drossel vähendab oluliselt varjestamata kaabli kõrgsageduslikku elektromagnetilist kiirgust. Väljund-drosselid ei tekita täiendavat pingelangu.
Muunduri paigaldussoovitusi. Elektromagnetilise ühilduvuse nõuete tätimiseks tuleb sagedusmuunduriga ajamite paigaldamisel järgida alljärgnevaid soovitusi.

1. Paigaldage ajam koos juhtimiskaablite ja mootori varjestatud toitekaabliga metallkestaga elektriaparaadikoostesse ning maandage see korrektselt. Rakendage sobivaid filtreid ja drosseleid.
2. Kontrollige kas filtri ja sagedusmuunduri tootenumbrid vastavad tellimusele ja seadmed on omavahel sobivad.
3. Tagage filtri parim võimalik maandus, eemaldades ühenduskohalt värvi.
4. Kinnitage filter ja sagedusmuundur võimalikult kindlalt oma kohale. Toiteahela filter tuleb paigaldada sagedusmuundurile nii lähedale, et filtri ja muunduri klemmide vaheliste juhtide pikkus poleks enam kui 0,5 m. Kui see pole erandjuhul võimalik, tuleb muunduri ja filtri vahelised juhid varjestada ja varje maandada selle **mõlemast otsast**. Kaabli varje tuleb kindlalt maandada. Eelistatavalt tuleb kaabli varje ühendada otse aparaadikooste metallkestaga kaablikinga abil. Kaabli varje tõhus maandamine on vajalik maaühenduse väikese induktiivtakistuse saavutamiseks. Häirete vähendamise puhul on kaabli varje maandamine külgejoodetud juhi kaudu või maandamine PE juhi kaudu väheefektiivne ja ei anna vajalikku tulemust. Seepärast peab varjestusel olema väga hea ühendus aparaadikooste metallkestaga. Samal eesmärgil peavad ka nii filtri kui ka sagedusmuunduri kerede metallist ühenduskäpad olema kinnitatud aparaadikooste metallist värvimata alusplaadiga (kooste-alusega).
5. Ühendage sisenev kaabel filtri klemmidega (tähis *Line*); ühendage kõik maandusjuhid maandusklemmiga; ühendage filtri koormusahela klemmid (tähis *Load*), sagedusmuunduri peaahela toiteklemmidega kasutades selleks võimalikult lühikest ja soonte sobiva ristlõikega kaablit.
6. Ühendage mootor ja paigaldage väljunddrossel võimalikult sagedusmuunduri lähedale. Varjestatud kolmefaasilise kaabli korral peaks see läbima drosseli magnetahelat üldjuhul vaid kahel korral. Maandusjuht peaks olema kindlalt ühendatud nii mootori kui ka sagedusmuunduri maandusklemmidega. Varje peaks olema ühendatud aparaadikooste kestaga.
7. Juhtimishäirete vähendamiseks on oluline, et muundurisse sisenev kaabel ja väljuv mootori toitekaabel oleks teineteisest eraldatud.

4.6 Teadmiste kontroll

Peatükk 4. Teema 9: Lineaarliikumisega elektrilised täiturid

1. Mis on kruvimehhanism?
    a. mehaaniline seade pöördliikumise muundamiseks lineaarliikumiseks;
    b. mehaaniline seade lineaarliikumise muundamiseks pöördliikumiseks ja vastupidi;
    c. mehaaniline energiaedastussüsteem;
    d. kruvist ja mutrist koosnev mehaaniline seade.

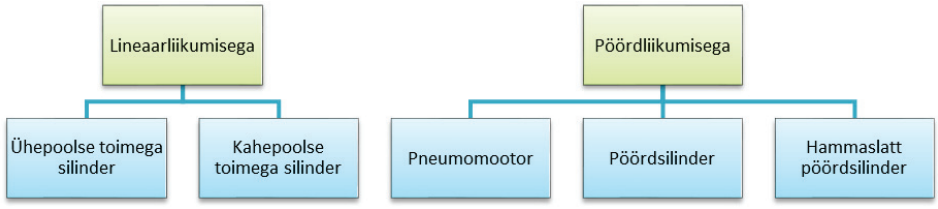
2. Missuguseid parameetreid tuleb arvestada täituri valikul?
    a. Jõudu;
    b. Rõhku;
    c. Konstruktsiooni;
    d. Pinget.
3. Mis on servoajam?
    a. ajam, milles kasutatakse servomootorit;
    b. teenindamiseks ette nähtud ajam;
    c. positsioonjuhtimisega ajam;
    d. elektroonilise juhtimissüsteemiga eriajam;
    e. süsteem, mida kasutatakse servomehhanismide käitamiseks (ehk täpsemalt öeldes põhitöö jaoks vajalike tegevuste teostamiseks kasutatavate teenindavate mehhanismide käivitamiseks).
4. Mis on positsioonjuhtimine?
    a. mehhanismi asendi juhtimise meetod muutuva koormuse oludes;
    b. tagasisidestatud juhtimissüsteem, milles on asendi regulaator;
    c. servoajami asendi juhtimismeetod;
    d. servoajami asendi juhtimismeetod.
5. Mis on kiiruse juhtimine?
    a. meetod kiiruse stabiliseerimiseks muutuva koormuse oludes;
    b. tagasisidestatud juhtimissüsteem, milles on kiiruse regulaator;
    c. meetod kiiruse reguleerimiseks muutuva kiirusega ajamites;
    d. meetod ajami kiiruse piiramiseks.

5 PNEUMAATILISED JA HÜDRAULILISED TÄITURID

5.1 Pneumaatilised täiturid

Pneumaatilises täituris toimub pneumaatilise energia muundamine ja edastamine valmistustööks kasutatava masina mehhaanilise liikumise energiaks (füüsikaliseks tööks), mille tulemusena võib muutuda valmiva toote ja valmistusseadmete sisu või vorm. Pneumaatilised täiturid jagunevad lineaar- ja pöördliikumisega täituriteks. (Joonis 5.1):

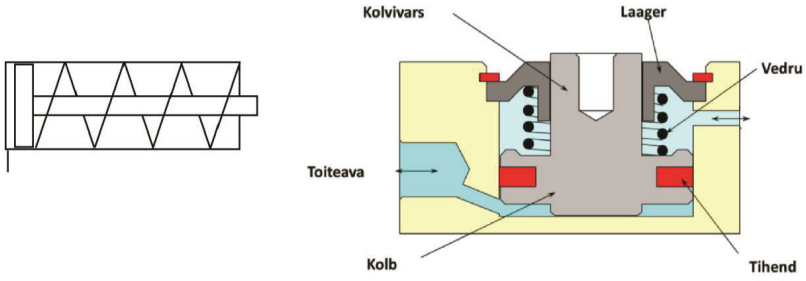
- Lineaarliikumine:
  - Ühepoolse toimega silindrid,
  - Kahepoolse toimega silindrid.
- Pöördliikumine:
  - Pneumomootor,
  - Pöördsilindrid,
  - Hammaslatt pöördsilinder.



Joonis 5.1 Pneumaatiliste täiturite liigitus

5.1.1 Ühepoolse toimega silindrid.

Lineaarliikumisega täiturid (pneumosilindrid) Kasutatakse lineaarliikumise saamiseks mehaanilistes süsteemides. Ühepoolse toimega silindri puhul juhitakse suruõhku ainult ühele poole kolbi. Sellised silindrid on kasutusel juhtudel, kui on tarvis sooritada tööliikumist ainult ühes suunas. Kolvi tagasiliikumine toimub silindrisse sisseehitatud vedru mõjul (Joonis 5.2).



Joonis 5.2 Ühepoolse silindri tööpõhimõte ja tingmärk

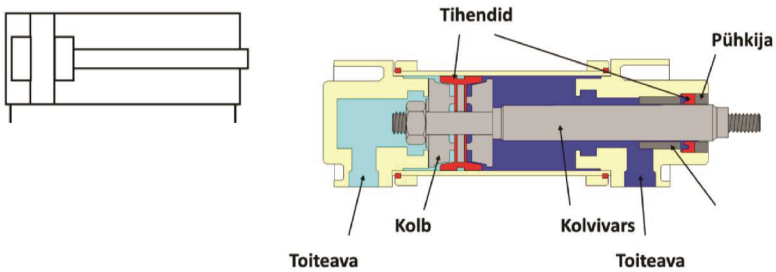
Tagastusvedru jõud on arvestatud selliselt, et tagada piisavalt kiire kolvi tagasiliikumine. Ühepoolse toimega silindritel on kolvi liikumisulatus piiratud tagastusvedru pikkusega ja ei ole üldjuhul suurem kui 100 mm. Seda tüüpi silindreid kasutatakse lukustamiseks, kinnitamiseks, kokkusurumiseks, tõukamiseks, tõstmiseks, detailide etteandmiseks, jne.
Kasutusel on kahte tüüpi ühepoolse toimega silindreid:

- tööliikumine toimub suruõhu mõjul, kolvi tagasiviimine lähteasendisse toimub aga vedru mõjul,
- tööliikumine toimub vedru mõjul, kolvi tagasiviimine lähteasendisse toimub aga suruõhu mõjul Selliseid silindreid kasutatakse siis, kui on olemas suruõhu kadumise oht (autode- ja rongide suruõhuga töötavad pidurid).

Ühepoolse toimega silindrite konstruktsiooniline eritüüp on membraansilindrid. Membraansilindrites asendab kolbi kas kummi-, plastik- või terasmembraan. Kolvivars on kinnitatud membraani keskele. Sellistes silindrites puudub hõõrdejõud, tekib ainult membraani deformatsioonist tekkiv elastsusjõud.

5.1.2 Kahepoolse toimega silindrid.

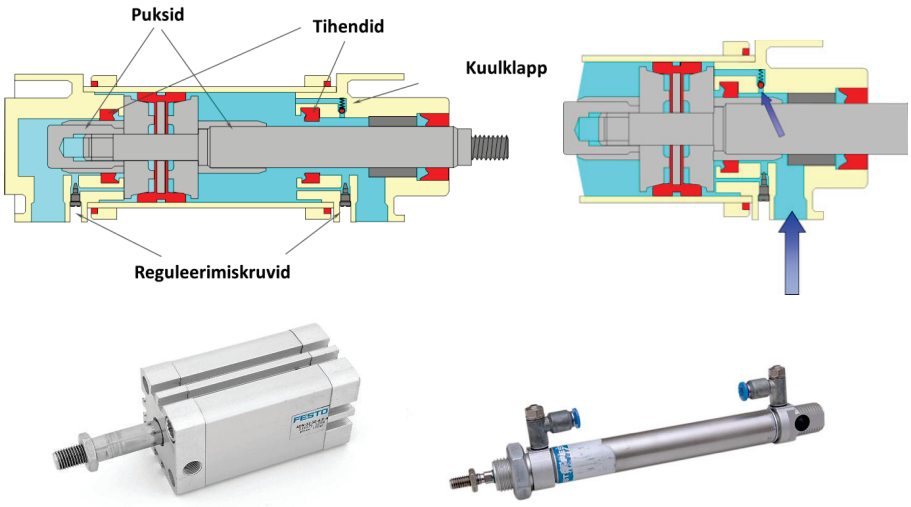
Kolvi liikumine silindris toimub suruõhuga mõlemas suunas, nii miinus- kui ka plusssuunas. Kahepoolse toimega silindrid on kasutusel juhul kui on vajalik sooritada kasulikku tööd mõlemas suunas. Kolvi liikumisulatus on kahetoimelisel silindril praktiliselt piiramatu, kuid see peab olema selline, et silinder säilitaks jäikuse (Joonis 5.3).



Joonis 5.3 Kahepoolse silindri tööpõhimõte tingmärk

5.1.3 Silindri amortisaatorid.

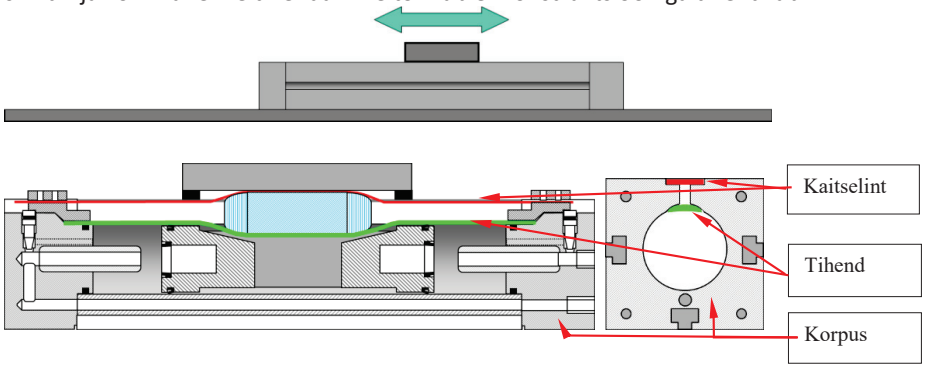
Kui silindrit kasutatakse suurte masside liigutamiseks, siis kasutatakse löökide ja purunemiste vältimiseks silindrisse sisseehitatud amortisaatoreid. Kui kolb on jõudnud piirasendi lähedale, sulgeb amortisaatori kolb väljavoolavale õhule otseväljavoolu ning õhk pääseb välja läbi drosseli. Seetõttu liigub kolb piirasendisse aeglustusega. Enamikel juhtudel on aeglustus reguleeritav. Silindri teisesuunalisel liikumisel pääseb õhk kolvi taha otse läbi möödavooluklapi (Joonis 5.4).



Joonis 5.4 Kahepoolse toimega amortisaatoritega silindri tööpõhimõte

5.1.4 Kolvivarreta silindrid.

Traditsiooniline kahepoolse toimega silinder vajab ruumi korpuse jaoks ja pluss ruumi töökäiguks (Joonis 5.5.) Ruumi on võimalik efektiivsemalt ära kasutada kolvivarreta silindriga. Kasutusel on kolvivarreta silindrid, kus kolb ja liugur on omavahel mehaaniliselt seotud, silindri ja kolvi vaheline tihendamine toimub erikonstruktsiooniga tihendi abil.



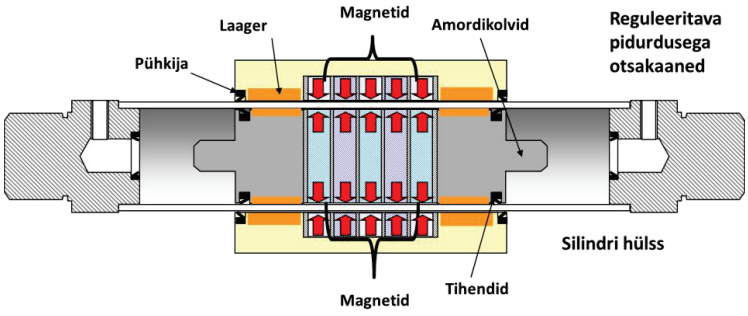
Joonis 5.5 Kolvivarreta silindri tööpõhimõte ja ehitus

Juhikutega kolvivarreta silinder on esitatud Joonis 5.6. See välistab silindri kinnikiilumise. Sellised silindrid võivad olla kuni 10 meetri pikkused.

Joonis 5.6 Kolvivarreta juhikutega silinder.

5.1.5 Magnetilise ülekandega silinder.

Kolvivarreta silindrites kasutatakse kolvi ja tööorgani sidumiseks ka magnetvälja, mis tekitatakse kasutades püsimagneteid (Joonis 5.7 and Joonis 5.8).



Joonis 5.7 Magnetilise ülekandega silindri ehitus

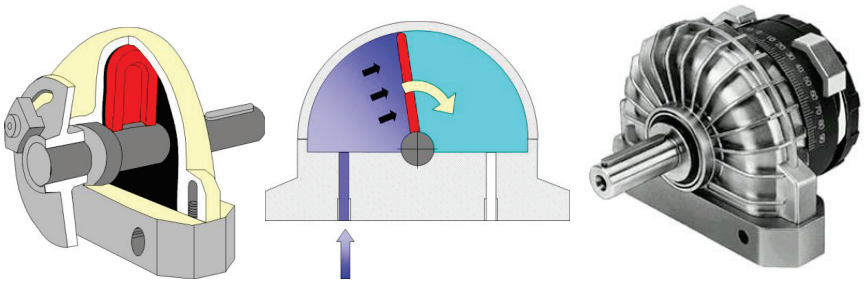
Joonis 5.8 Magnetilise ülekandega silinder

Neid silindreid kasutatakse juhtudel, kui vajatakse konstruktsiooni väikesi mõõtmeid nt. uste avamismehhanismides Kolvivarreta silindrid võimaldavad realiseerida pikki liikumisi, säästes samaaegselt ruumi.

5.1.6 Pöördsilindrid

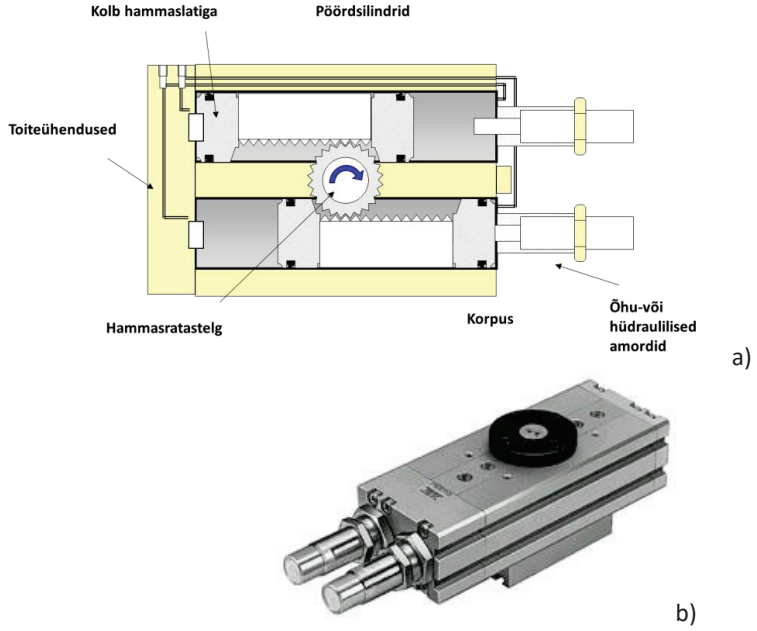
Sellise täituriga muundatakse suruõhus salvestatud või hüdrovedeliku energia ja selle tulemusena tekitatud jõud otse võllile (Joonis 5.9).

Labaga pöördsilindris asendab kolbi laba, mille pöörlemissuund sõltub sellest, kummale poole laba suruõhku juhitakse. Standardsed pöördenurgad on 45°, 90°, 180°, 270°. Pöördenurka saab reguleerida ka reguleerimiskruvide abil. [6]



Joonis 5.9 Pöördsilindri ehitus

Hammaslatt konstruktsiooniga pöördtäitur. Kahepoolse toimega silindri kasutatakse pöörleva liikumise saamiseks hammaslatte. Standardsed pöördenurgad on 45°, 90°, 180°, 270°, 720°. Pöördenurka saab reguleerida ka reguleerimiskruvide abil. Hammaslatt konstruktsiooniga pöördtäituri põhimõtteline ehitus on Joonis 5.10 a, ja üldvaade Joonis 5.10 b).



Joonis 5.10 Hammaslatt pöördtäituri ehitus (a) ja toote ülevaade (b)

5.1.7 Pneumosilindrite karakteristike jõudude määramine.

Pneumosilindri poolt arendatav jõud sõltub töörõhust, kolvi läbimõõdust ja tihendite poolt põhjustatud hõõrdejõust. Pneumosilindri poolt arendatava teoreetilise jõu suuruse saab leida kasutades valemit:

Fth = A • p,

kus Fth - silindri poolt arendatav teoreetiline jõud (N),

A - kolvi pindala (m^2),

p - kasutatav töörõhk (Pa).

Praktikas arvestatakse silindri poolt arendatavat tegelikku jõudu, mille leidmisel võetakse arvesse ka hõõrdejõudu. Normaaltingimustes (töörõhk 400-800 kPa) arvestatakse hõõrdejõu väärtuseks ligikaudu 3-20% silindri poolt arendatavast teoreetilisest jõust. Ühepoolse toimega silindri tegelik arendatav jõud:

Feff = (A • p) - (FR + FF).

Kahepoolse toimega silindri tegelik arendatav jõud kolvivarre väljaliikumisel (plusssuunalisel liikumisel):

Feff = (A • p) – FR.

5.2 Hüdraulilised täiturid

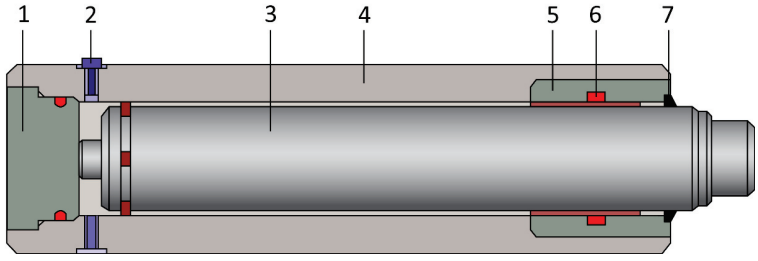
Hüdraulilistes süsteemides edastatakse energia pumbast koormuseni piki torustikke. Et saavutada täituri soovitud jõu ja pöördemomendi väärtusi, kiirust või asendit ning hoida neid vajadusel konstantsena kasutatakse erinevaid ventiile ja klappe. Need komponendid reguleerivad hüdrovedeliku rõhku ja voolukiirust. Iga ventiil või klapp tekitab torustikus takistust vedeliku voolule. [8]

5.2.1 Hüdrosilindrid.

Hüdrosilinder muudab hüdraulilise energia mehaaniliseks energiaks. See tekitab lineaar-liikumist ja seetõttu nimetatakse seda ka “lineaarsilindriks”. Põhiliselt eristatakse kahte tüüpi silindreid:

- ühepoolse toimega silindrid
- kahepoolse toimega silindrid

Ühepoolse toimega hüdrosilindri läbilõige on esitatud Joonis 5.11.



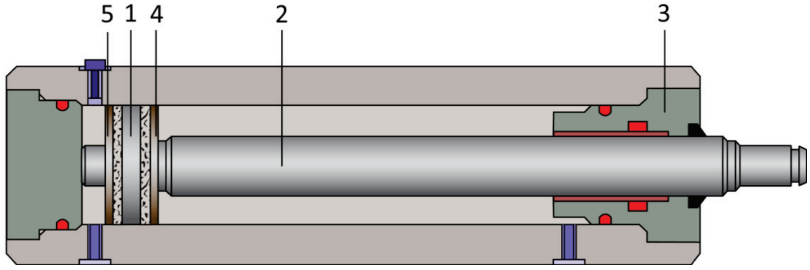
Joonis 5.11 Ühepoolse toimega silinder. (1 otsakork, 2 sisend, 3 kolb, 4 korpus, 5 laager, 6 tihend, 7 pühkija)

Ühepoolse toimega silindrites puutub töövedelikuga kokku vaid üks kolvi pooltest. Silinder suudab tööd teha vaid ühes suunas. Need silindrid töötavad vastavalt järgmise põhimõtte kohaselt:
Töövedelik voolab torustikust ühele poole kolbi. Vastujõu (kolvivarrele mõjuva koormuse) tõttu tõuseb silindris rõhk. Kui töövedeliku rõhust tulenev jõud kolvipindalale ületab vastujõu, siis hakkab kolb silindris liikuma ning kolvivars väljub silindrist.
Kolvi tagasiliikumiseks lülitatakse silindri sisend suunaventiili abil kokku tagasivoolupaaki viiva toruga ning hüdrovedeliku pealevool suletakse.
Kolvi tagasi liikumist mõjutab sellele mõjuv koormus vedru või välise koormuse raskuse näol. Kui need jõud ületavad torustiku ja klappide takistuse, hakkab töövedelik silindrist väljuma ning kolb tagastub.

Kahepoolse toimega silinder. Kahepoolse toimega silindrite korral on võimalik kolbi töövedelikuga mõjutada mõlemalt poolt, seega on võimalik mõlemas suunas tööd teha. Need silindrid töötavad vastavalt järgmisele põhimõttele: Töövedelik voolab ühele poole kolbi ja avaldab kolvi pindalale survet. Sisemised ja välimised takistused võimaldavad rõhul tõusta järgneva seaduse järgi:

$F = p * A$,
kus jõud F arvutatakse (saavutatakse) rõhu p ning kolvipindala A korrutise abil. [8]

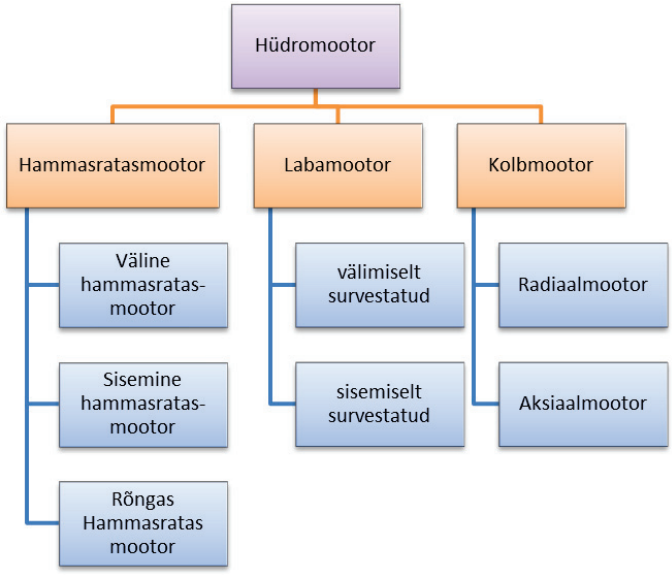
Lõpuks olemasolevad takistused ületatakse ning kolb hakkab liikuma, põhjustades kolvivarre väljumise. See on võimalik tänu energiamuundumisele hüdraulilisest energiast mehaaniliseks energiaks, mida saab juba koormusseade kasutada. Kahepoolse toimega silindri läbilõige on esitatud Joonis 5.12.



Joonis 5.12 Kahepoolse toimega silinder(1 kolb, 2 kolvivars, 3 laager, 4 tihend, 5 tihendikate)

5.2.2 Hüdromootorid.

Hüdromootorid on oma ehituslikult sarnased hüdropumpadega. Hüdromootoreid kasutatakse täituritena erinevates masinates. Need muundavad hüdroenergia sirgjooneliselt liikuva mehhaanilise seadme (osa) energiaks või pöördliikumise energiaks.
Hüdromootorite liigitus on esitatud Joonis 5.13.



Joonis 5.13 Hüdromootorite klassifikatsioon

5.3 Kokkuvõte

Erinevates tööstusharudes vajalike masinate mehhaniseerimiseks ja automatiseerimiseks toodetakse väga erineva konstruktsiooniga ja võimekusega hüdrosilindreid, hüdromootoreid ja hüdropumpi. Oma spetsiifilistele vajadustele sobiva tehnilise lahenduse leiate tehnilisest kirjandusest ja tootjate kataloogidest.

5.4 Teadmiste kontroll

Peatükk 5. Teema 10: Pneumaatilised ja hüdraulilised täiturid

1. Mis on ühepoolse toimega silinder?
    a. ühe kolvi ja kolvivardaga silinder;
    b. silinder, milles hüdraulilist või pneumaatilist rõhku tekitatakse ainult ühel pool kolvi,
    c. silinder, milles kolb liigub ainult ühes suunas;
    d. silinder, mis võimaldab rakendada jõudu ainult ühes suunas.
2. Mis on kahepoolse toimega silinder?
    a. kahe kolvivardaga silinder;
    b. silinder, milles hüdraulilist või pneumaatilist rõhku tekitatakse mõlemal pool kolvi;
    c. silinder, milles kolb liigub mõlemas suunas,
    d. silinder, mis võimaldab rakendada jõudu mõlemas suunas.
3. Mis on pöördsilinder?
    a. silinder, milles on pöördliikumisega element;
    b. ühe- või kahepoolse toimega silinder koos mehaanilise ülekandega, mis muundab lineaarliikumise pöördliikumiseks;

c. pöördlabaga silinder;
d. hammaslatt-ülekandega varustatud silinder.

4. Mis on mehaaniline ülekanne?
   a. mehaanilise liikumise, kiiruse ja jõu muundamise seade;
   b. mehaanilise võimsuse suurendamise seade;
   c. mehaanilise energia ülekande süsteem koos kiiruse ja jõu muundamisega;
   d. mehaanilise jõu ja momendi võimendamise süsteem.
5. Mis on hõõrdekaod?
   a. hõõrdekaod laagrites ja ülekannetes ning aerodünaamilisest takistusest tingitud ventilatsioonikaod;
   b. kõik kaod, mis pole rauaskaod;
   c. kõik kaod, mis pole elektrilised kaod;
   d. laagrite võimsuskaod.

TEADMISTE KONTROLL - TULEMUSED

Tabelist leiate õiged vastused enese teadmiste kontrolli küsimustele. Teadmiste kontrolli küsimustikud (koos valikvastustega) asuvad iga peatüki lõpus.

Peatüki nr. ja selles teema nr.	Küsimuse nr.				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**
Peatükk 1. SISSEJUHATUS. **Teema 1**	a, d	b	a, b, c, d	a, b, c	b
Peatükk 2.ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE **Teema 2**	b, d	a, c	c, d	b	a
Peatükk 2.ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE **Teema 3**	a, d	a	b, d	b, c	b
Peatükk 2. ELEKTRO MEHAANILINE MUUNDAMINE **Teema 4**	b	b	b	a, c	a, c
Peatükk 2. ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE **Teema 5**	b, d	a, b, c	a	a, c, d	a
Peatükk 2. ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE **Teema 6**	a	a, e	c	a, b, c	a, b
7. 4. ELEKTROMEHAANILINE MUUNDAMINE **Peatükk 2. Teema 7**	a, b	a, b	d	c, d	c
Peatükk 3, 4. JÕUPOOLJUHTMUUNDURID **Teema 8**	c, d	a, c	a, b	c, d	a, b
Peatükk 4. ELEKTRIAJAMID **Teema 9**	a	a, b, c, d	e	a, b	a, b, c
Peatükk 5. PNEUMAATILISED JA HÜDRAULILISED TÄITURID **Teema 10**	b, d	b, c, d	a, b, c, d	a, c, d	a, d

KIRJANDUS

1. T. Lehtla, Elektriajamid, Tallinn: Tallinn University of Technology, Department of Electrical Drives and Power Electronics, 2007, pp 190.
2. T. Lehtla, Sujuvkäivitid ja Sagedusmuundurid, Tallinn : Tallinn University of Technology, Department of Electrical Drives and Power Electronics, 2003 .
3. Lehtla, T. *Jõuelektroonika ja Elektriajamid.* Tallinn : Tallinn University of Technology, Department of Electrical Drives and Power Electronics, 2003. pp 104.
4. Brosch, P, F. *Frequenzumrichter. Prinzip, Aufbau, Einsatz.* Augsburg : Verlag Moderne Industrie, 2000. pp 83.
5. Barnes, M. *Variable Speed Drives and Power Electronics.* London : IDC Technologies, 2003. pp 286.
6. Lehtla, T. *Sujuvkäivitid ja Sagedusmuundurid. .* 2003 : Tallinn University of Technology,Department of Electrical Drives and Power Electronics, Tallinn .
7. *Softstarter Handbook.* Västerås : ABB Automation Technology Products AB, 2004. pp 94.
8. Croser, P ja F., Ebel. *Pneumatics Basic Level.* Denkendorf : Festo Didactic GmbH & Co, 2002.
9. Merkel, D, Schrader, B ja Thomes, M. *Hydraulics Basic Level.* Denkendorf : Festo Didactic GmbH & Co, 2003.
10. Kreith, F. *Mechanical Engineerig Handbook.* s.l. : USA: CRC Press, 1999. pp 115.
11. Morriss, S. Brian. *Automated Manufacturing Systems: Actuators, Controls, Sensors and Robotics.* McGraw-Hill : s.n., 1994.
12. Bishop R, H. *The Mechatronics Handbook.* : CRC Press, 2002. pp 1229.
13. Lehtla, T. *Robotitehnika.* Tallinn University of Technology, Department of Electrical Drives and Power Electronics, Tallinn. pp 104.
14 Brindfeldt, E., Pettai, E. *Actuators in Robotics*, Tallinn 2016. pp 103.

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Project partners

Poland
Project coordinator
Industrial Research Institute for Automation
and Measurements (PIAP)
Contact: M.Sc. Michał Smater
@: msmater@piap.pl
W: www.piap.pl

Greece
Technical University of Crete
Laboratory of Distributed Multimedia Information
Systems and Applications (TUC/MUSIC)
Contact: Prof. Em. Stavros Christodoulakis,
Dr. Polyxeni Arapi
@: stavros@ced.tuc.gr, xenia@ced.tuc.gr
W: www.music.tuc.gr

Bulgaria
Technical University of Gabrovo (TUGAB)
Contact: Prof. Toshko Nenov
@: tnenov@tugab.bg
W: www.tugab.bg

Estonia
Tallinn University of Technology (TalTech)
Contact: Assoc. Prof. Em. Elmo Pettai
@: elmo.pettai@taltech.ee
W: www.ttu.ee

Bulgaria
European Center for Quality Ltd. (ECQ)
Contact: Ms. Bianka Ivanova
@: bivanova@ecq-bg.com
W: www.ecq-bg.com

This project (2016-1-PL01-KA202-026350) has been funded with support from the European Commission. This publication reflects the views only of the author and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.