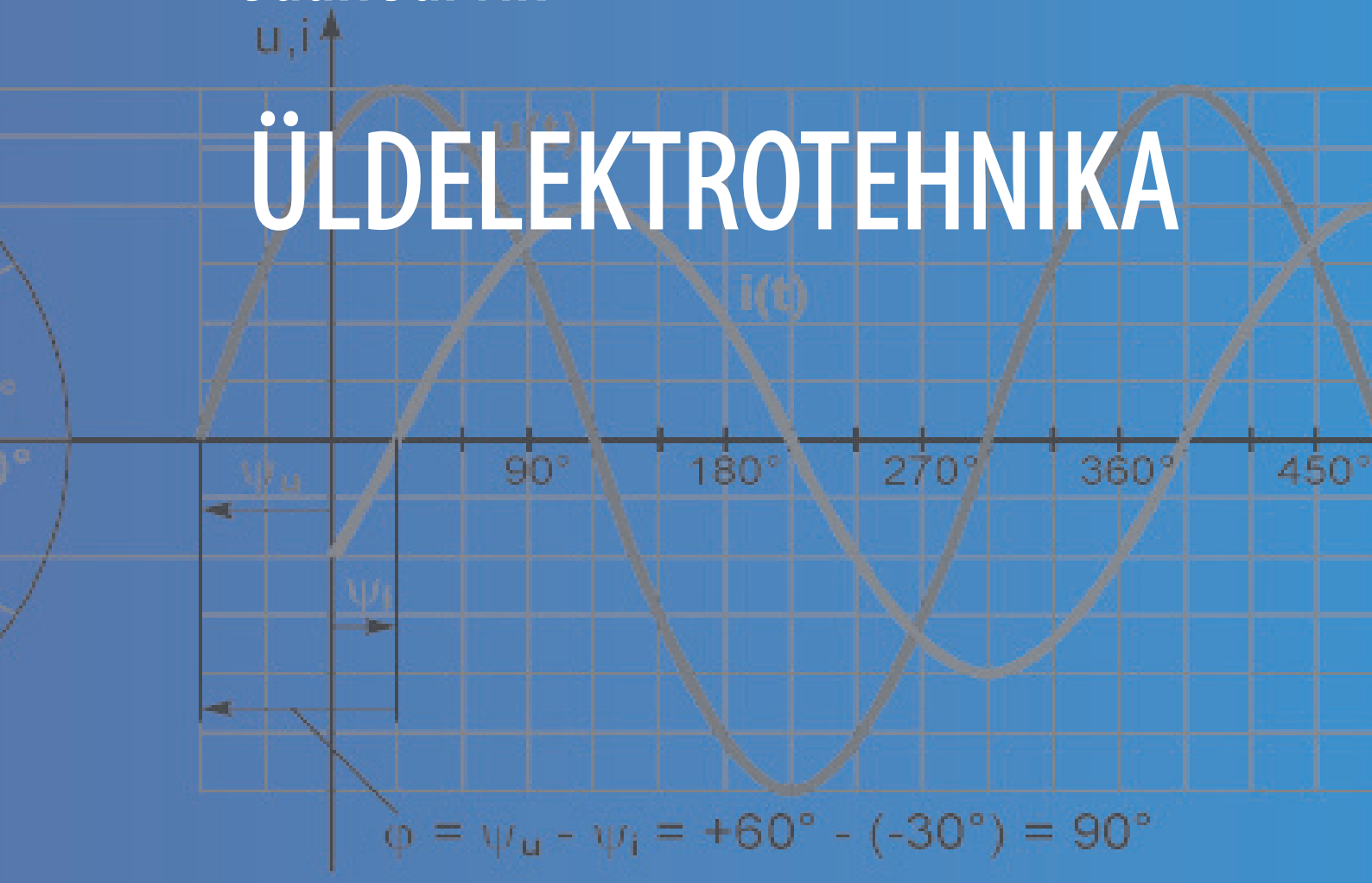
Jaan Järvik

ÜLDELEKTROTEHNIKA



Jaan Järvik

ÜLDELEKTROTEHNIKA

Õpik kõrgkoolidele

TTÜ
KIRJASTUS
Tallinn 2014

Ilmunud riikliku programmi
„Eestikeelsete kõrgkooliõpikute koostamine ja väljaandmine 2008–2012“ toetusel

Käesoleva õpiku väljaandmist toetasid:

Haridus- ja Teadusministeerium

ARCHIMEDES

Retsenseerinud
Eesti Maaülikooli tehnikainstituudi energeetika osakonna
professor Kuno Jürjenson
lektor Toivo Leola
dotsent Tõnis Peets

Eesti Lennuakadeemia side- ja navigatsiooniosakonna
professor Jaak Umborg

Kaane kujundanud Tiia Eikholm

Autoriõigus: Jaan Järvik, 2014

ISBN 978-9949-23-655-8

Sisukord

Sisukord ... 3
Eessõna ... 6
Sümbolid ... 8

1. ELEKTER JA SELLE OLEMUS ... 11
1.1. Põhiteadmised aine ehitusest ja elektri füüsikalisest olemusest ... 11
1.2. Elektriallika tekitamise ülilihtsustatud mudel ja allika kasutamise idee ... 16
1.3. Elektrivälja füüsikaline olemus ja selle graafiline kujutus ... 21
1.4. Tarbija lihtsustatud mudel. Laengute energia – (elektrivälja) vastastikmõju erinevate ainete korral ... 24
1.5. Elektrilaengute töötegemisvõime. Elektripotentsiaal ... 30
1.6. Voldiga mõõdetavad suurused. Elektriallikas, tarbija ja salvesti ... 31
1.7. Tarbija allikasisepinge ehk pinge ... 32
1.8. Elektrivool. Elektrivälja energia muundamine soojusenergiaks ... 35
1.9. Elektritakistus ... 40
1.10. Dielektrikud (isoleerivad ained) ... 43
1.11. Kondensaatorid ... 48
1.12. Varjestamine ... 56
1.13. Kordamisküsimused ... 59

2. ALALISVOOLU ELEKTRIAHELAD ... 60
2.1. Elektriahelate ja elektriskeemide elemendid ... 60
2.2. Elektriahelate aseskeemid ... 62
2.3. Ühekontuurilised (hargnemata) lineaarsed elektriahelad ... 63
2.4. Potentsiaali muutumine tarbijatakistil (koormustakistil) ... 71
2.5. Kondensaatori ja pooli kasutamine alalisvooluahelas ... 73
2.6. Takistite ühendusviisid ... 74
2.7. Ühe allikaga lineaarahelate arvutus ... 80
2.8. Mitme allikaga lineaarahelate arvutus ... 81
2.9. Allikate ühendamine jadamisi ja rööbiti ... 84
2.10. Siirdeprotsessid alalisvoolu-(AV)-ahelates ... 87
2.11. Mittelineaarsed elemendid alalisvooluahelas ... 94
2.12. Kordamisküsimused ... 95

3. MAGNETAHELAD ... 96
3.1. Magnetväli ... 96
3.2. Magnetväljade võimendamise viisid ... 98
3.3. Põhilised magnetilised suurused ... 102
3.4. Vooluga juhe välises magnetväljas. Elektromagnetiline jõud ... 104
3.5. Mitmesuguste ainete magnetilised omadused ... 106
3.6. Magnetahelad ... 112
3.7. Magnetomotoorjõud ja magnetiline takistus ... 113
3.8. Koguvooluseadus ... 114
3.9. Elektromagneti külgetõmbejõud ... 115
3.10. Elektri- ja magnetahelate sarnasusest ... 117
3.11. Kordamisküsimused ... 125

4. ÜHEFAASILISED VAHELDUVVOOLUAHELAD ... 126
4.1. Vahelduvvoolu saamine ... 126
4.2. Vahelduvvoolu, -sisepinge ja -pinge parameetrid ... 130
4.3. Oomtakistus e aktiivtakistus (lühidalt takistus) vahelduvvooluahelas. Pinnanähtus ... 137
4.4. Induktiivpool vahelduvvooluahelas ... 145
4.5. Kondensaator (mahtuvus) vahelduvvooluahelas ... 150
4.6. Vahelduvvoolu *RLC*-jadaahel ... 155
4.7. Vahelduvvoolu rööpahel ... 161
4.8. Vahelduvvoolu võimsus ja võimsustegur ... 164
4.9. Juhtivused vahelduvvooluahelas ... 169
4.10. Vahelduvvoolu hargahelad ... 170
4.11. Pinge- ja vooluresonants ... 172

4.12. Vektorite kujutamine kompleksarvude abil ... 178
4.13. Sümboli- ehk kompleksmeetod ... 185
4.14. Voolud, pinged ja takistused sümbolkujul ... 187
4.15. Kompleksvõimsus ... 191
4.16. Kordamisküsimused ... 194

5. KOLMEFAASILISED AHELAD ... 195
5.1. Materjali- ja energiasäästlike elektriedastussüsteemide kujundusideed ... 195
5.2. Kolmefaasilise voolu saamine ... 198
5.3. Tähtlülitus ... 200
5.4. Kolmnurklülitus ... 209
5.5. Kolmefaasilise voolu võimsus ... 211
5.6. Kordamisküsimused ... 214

6. MÕÕTMISMEETODID JA ANDURID ... 215
6.1. Põhimõisted ... 215
6.2. Mõõtevead ... 216
6.3. Voolu mõõtmine ... 217
6.4. Pinge mõõtmine ... 219
6.5. Uudsed mõõtetrafod ... 221
6.6. Takistuse mõõtmine ... 230
6.7. Võimsuse mõõtmine ... 234
6.8. Elektrienergia ja elektrikvaliteedi mõõtmine ... 237
6.9. Kompensatsioonimeetod ... 240
6.10. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine ... 240
6.11. Mitteelektriliste suuruste tajurite iseloomustus ... 242
6.12. Mitteelektriliste suuruste elektrimõõtmiste näited ... 246
6.13. Kordamisküsimused ... 248

7. MÕÕTERIISTAD ... 249
7.1. Põhimõisted ... 249
7.2. Elektromehaaniliste mõõteriistade ehitus ... 250
7.3. Magnetelektriline mõõtemehhanism. Tingtähis ... 252
7.4. Elektromagnetiline mõõtemehhanism. Tingtähis ... 254
7.5. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism. Tingtähis ... 256
7.6. Induktsioonmõõtemehhanism. Tingtähis . Halli anduriga elektriarvesti ... 258
7.7. Elektronmõõteriistad ... 259
7.8. Numbermõõteriistad ... 260
7.9. Meerikud ja ostsillograafid (ostsilloskoobid) ... 261
7.10. Elektritarbimise ja -kvaliteedi mõõteriistad ... 264
7.11. Elektrimõõteriistade tingmärgid ... 264
7.12. Kordamisküsimused ... 267

8. REAKTORID. TERASSÜDAMIKUGA POOL SIINUSPINGEL ... 268
8.1. Teraseskadu ... 268
8.2. Transformatoorse allikapinge võrrand ja kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagramm ... 269
8.3. Voolukõvera kuju ... 271
8.4. Terassüdamikuga pooli vektordiagramm ... 273
8.5. Terassüdamikuga pooli aseskeem ... 274
8.6. Reaktorid ... 276
8.7. Kordamisküsimused ... 278

9. TRAFOD ... 279
9.1. Trafo otstarve ja ehitus ... 279
9.2. Trafo tööpõhimõte ... 282
9.3. Trafo tühijooks ... 285
9.4. Koormatud trafo ... 287
9.5. Trafo aseskeem ... 289
9.6. Trafo lühis ... 291
9.7. Trafo pingemuutus ja välistunnusjooned ... 294
9.8. Trafo kasutegur ... 295
9.9. Kolmefaasilised trafod ... 297

9.10. Eriotstarbelised trafod 300
9.11. Kordamisküsimused 303

10. ASÜNKROONMASINAD 304
10.1 Sissejuhatus. 304
10.2. Pöördmagnetväli 308
10.3. Asünkroonmootori otstarve, ehitus ja tööpõhimõte 311
10.4. Staatorimähised 313
10.5. Staatori elektrilise tasakaalu võrrand 316
10.6. Rootori allikapinge ja -vool 317
10.7. Asünkroonmootori aseskeem ja vektordiagramm 319
10.8. Asünkroonmootori võimsuste bilanss ja kasutegur 322
10.9. Rootori elektriliste suuruste sõltuvus libistusest 324
10.10. Asünkroonmasina töötunnusjooned 326
10.11. Asünkroonmootori käivitamine 331
10.12. Asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse reguleerimine (*speed control*) 334
10.13. Kahepoolse toitega asünkroongeneraator 336
10.14. Ühefaasiline asünkroonmootor 339
10.15. Kahefaasiline asünkroonmootor 341
10.16. Kordamisküsimused 342

11. ALALISVOOLUMASINAD 343
11.1. Alalisvoolumasinate otstarve, ehitus ja tööpõhimõte 343
11.2. Ankrureaktsioon ja kommutatsioon 347
11.3. Alalisvoolumootorite mehaanilised tunnusjooned 348
11.4. Alalisvoolumootorite pöörlemiskiiruse muutmine 350
11.5. Püsimagnetitega alalisvoolumootor 352
11.6. Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinad 354
11.7. Universaalsed kommutaatormootorid 358
11.8. Kordamisküsimused 361

12. SÜNKROONMASINAD 362
12.1. Ehitus ja tööpõhimõte 362
12.2. Sünkroonmasina ankru vastumõju (-reaktsioon), aseskeem ja mehaaniline tunnusjoon 365
12.3. Sünkroonmootori elektromehaanilised ja elektrilised omadused 370
12.4. Püsimagnetitega sünkroonmasinad. Kujundus ja liigitus 372
12.5. Asünkroniseeritud sünkroonmasin 375
12.6. Ferromagnetergutusega (ferroergutusega) sünkroonmasinad 376
12.7. Samm-mootorid 381
12.8. Kordamisküsimused 387

13. ELEKTRIOHUTUS 388
13.1. Elektriohtlikkus ja ohutuse tagamine 388
13.2. Nüüdisaegsed elektriohutuse tagamise põhilahendused 393
13.3. Maandamine, mass ja potentsiaaliühtlustus 394
13.2.1. Kaitsemaandus, maandur ja potentsiaaliühtlustus 395
13.2.2. Mass (neutraal). 398
13.4. Rikkevoolu olemus 399
13.5. Rikkevoolukaitse põhimõte 401
13.5.1. Ühefaasilise tarbija rikkevoolu kaitse 401
13.5.2. Kolmefaasilise rikkevoolukaitse 402
13.6. Rikkevoolukaitselülitid 405
13.7. Rikkevoolureleed 406
13.8. Kõrgsagedusliku elektromagnetkiirgusvälja mõju inimesele 407
13.9. Kordamisküsimused 412

Kasutatud ja soovitatav kirjandus 413

LISA 1. ELEKTROTEHNIKA AJALOOST 417

LISA 2. JUHITAVATE JA KÜLLASTUSREAKTORITE ALASED UURIMISTÖÖD EESTIS 453

LISA 3. ELEKTRIENERGIA ÜLEKANNE 461

LISA 4. ELEKTRISKEEMIDE TINGMÄRKIDE NÄITEID 468

Eessõna

Elektrotehnika kursuse ülesanne on anda teadmisi elektromagnetilistest nähtustest, elektromagnetilisest ja elektromehaanilisest energiamuundamisest, tutvustada erinevate elektriseadmete otstarvet ja kasutamist eri valdkondades, selgitada nende tööpõhimõtet, tunnusjooni ja energeetilisi näitajaid. Elektrotehnika teoreetiline kursus põhineb matemaatikal ja füüsikal. See õpik on mõeldud eelkõige nendele üliõpilastele, kelle jaoks elektrotehnika pole põhieriala, kuid sobib ka sissejuhatusena elektriala üliõpilastele. Õpik võib olla kasulik kõikidele elektrihuvilistele ja elektriosa ka füüsikaõpetajatele. Autori pikaajaline töö üliõpilastega on näidanud, et elektrotehnika kursuse edukaks omandamiseks on vaja aru saada elektrinähtuste füüsikalisest olemusest. Hea tulemuseni saab jõuda siis, kui õppijal kujunevad erinevate elektriliste nähtuste kohta välja oma isiklikud lihtsustatud mudelid. Selle saavutamine eeldab õppijapoolset eesmärgipüstitust, püsivust ja eneseusku.

Kuidas õppida elektrotehnikat? Heaks inseneriks saamiseks tuleb arendada ka loovust. Meid ümbritsevas keerukas maailmas toimetulemiseks ei piisa üksnes faktiteadmusest. Oluline on arendada ka oma analüüsi- ja kujutlusvõimet. Loomevõime arendamiseks sobib faktipõhise hariduse kõrval paremini mõtlemispõhine haridus. Mingi ainevald on täiuslikult omandatud siis, kui õppijal tekkib selle raames oma isiklik ettekujutus probleemide olemusest, teadmus selle valdkonna varasematest kokkulepetest ja arusaamine põhjuslikest seostest. Ideaaliks on see, kui õppur suudab ainet kokkuvõtvalt ja piltlikult isiklike mudelitena ette kujutada.

Ühest vastust küsimusele, kuidas luua isiklikke mudeleid, ilmselt pole. Õppimiseks võib soovitada mudelit, mille järgi tuleks enne loengu kuulamist põgusalt tutvuda loengumaterjaliga, loengul kuulata aine asjatundjat ja mis eriti oluline, **koostada loengukonspekt**. Kui loengul jääb midagi arusaamatuks, tuleks kohe esitada täpsustavaid küsimusi. Pärast loengut on vaja lahendada ülesandeid läbivõetud materjali kohta. Täiesti ekslik on arusaam, et õpiku, konspekti või loengumaterjalide kättesaadavuse korral on konspekteerimine mõttetu. Konspekteerimine on aktiivne õppimistegevus, mis tõstab loengus osalemise kasutegurit sageli kordades. Konspekteerimisel tuleb jooksvalt valida olulise ja vähemolulise vahel ning õpitavat pidevalt analüüsida ja mõtestada. Seega **on isikliku ainemudeli loomise esimeseks etapiks konspekteerimine**.

Isikliku mudeli loomise **teiseks etapiks** on koduülesannete lahendamine, laboritööde tegemine ja kursuseprojektide koostamine. Ühtlasi on see esimeseks katseks sünteesida oma teadmiste põhjal uut teadmust.

Isikliku mudeli loomise **kolmanda, viimase etapi** moodustab eksamiküsimustele omakäeliste **lühivastuste koostamine** põhimõttel: „rohkem mõtet vähemate sõnadega, küll aga jooniste, tingtähiste ja valemite abil“. See on ühtlasi üliõpilase **isiklik mudel** õpitu kohta. Niisuguse õppejõu heakskiidetud lühivastustega stenogrammi (kiirkirjas üleskirjutatu) kasutamine eksamil on igati soovitatav. See leevendab pingelist eksamiõhkkonda ning võimaldab õpitu sisu paremini avada. Õppejõu pilk stenogrammile võimaldab hinnata sealset sõnade osakaalu ja tõenäolist teadmiste taset. Mida vähem on stenogrammis sõnu, seda paremini on sisu omandatud.

Elektrotehnika omandamiseks on õppijal vaja luua oma ettekujutus **laengust, laengu energiaväljast** (elektri- ja magnetväli), **elektriallikast, tarbijast, energiasalvestist, allika potentsiaalide vahest** (sisepinge e elektromotoorjõud), **potentsiaalist** (pinge maa suhtes), energia muundumise intensiivsust iseloomustavast **elektrivoolust**, tarbijal tekkivast **potentsiaalilangust**, lahti mõtestada heade ja halbade **elektrijuhtide ning isolaatorite** põhierinevused, aru saada, kuidas tekkib toiteallika väljundpinget tasakaalustav allika sisepinge **oomilises, induktiivses ja mahtuvuslikus takistuselemendis** (takistis, poolis, kondensaatoris).

Õpiku eripära ja ülesehitus. Koostaja on elektrotehnika kursust lugenud eri aegadel ja erinevate õpikute järgi. Klassikalised õpikud on valdavalt koostatud 19. sajandi ja 20. sajandi algupoolel elektri kohta omandatud empiiriliste teadmiste põhjal. Elektri olemust kirjeldatakse neis matemaatiliste valemite kogumina, kusjuures väga vähe ruumi on jäetud elektrinähtuste füüsikalise olemuse selgitamisele. Paljud põhimõtted, nagu nt ka see, et voolu suund ühtib negatiivse elektroni liikumissuunaga, on kehtestatud kokku-

leppeliselt. Elektrinähtuste keerukus pole võimaldanud seni koostada õpikut, milles kõik nähtused ja nende seosed oleksid füüsikaliselt aine ehituse taustal loogiliselt ära seletatud.

Üle kümne aasta on raamatu autor püüdnud oma loengutes lihtsustatud mudelite abil lahti mõtestada ja visualiseerida elektrilisi nähtusi, tuginedes energia jäävusele ja vastastikmõjule. Õpitavat ainet esitleti kolmel eri viisil. Viimane, kus **elektroni laeng on positiivne** ja vool allika positiivselt klemmilt suubub läbi tarbija negatiivsele klemmile, osutus kõige lihtsamaks ja loogilisemaks See õpik on koostatud lähtudes klassikalisest elektrotehnikast ja eelmainitud mõtetest. Elektroni märgimuutusega ei taotle õpiku koostaja senise elektrikäsitluse pea peale pööramist. Eesmärgiks on selgitada elektrinähteid lihtsamini, et väga napi loengute mahu juures oleks üliõpilastel võimalik omandada elektrotehnika põhitõed.

Kuidas omandas elektron negatiivse laengu? Ameerika teadlane ja riigitegelane B. Franklin (1706–1790) eeldas, et üks ja sama elektrivedelik võib olenevalt tasemest omada nii positiivset kui ka negatiivset laengut. Kõrgtasemel on vedelik siidine (laeng positiivne), madaltasemel vaigune (nimes oli „elektron“, negatiivne). Sellest ajast on elektroni laengut loetud negatiivseks, vaatamata sellele, et tänane ettekujutus aine ja aatomi ehitusest on oluliselt täiuslikum, kui see oli 260 aastat tagasi. Elektroni laengut positiivseks lugema ajendas asjaolu, et kui tasakaalustatud laengutega aatomist eemaldada lisaenergia abil aatomi üks osake – elektron, siis ei saa järelejääv aatom olla suurem kui algne, vaid on väiksem. Võib kujutada, et aatomis säilis elektroni „tühi pesa“ (elektroonikaspetsialistid nimetavad auguks) ja aatomi mass vähenes. Nii on ka laengutega. Võttes tasakaalus olevast laengusüsteemist (laengute summa = 0) elektroni, ainsa osakese, mida energia lisamisega (jõuga) on võimalik aatomist „ära rebida”, jääb algselt tasakaalustatud süsteemi null laengust järele nullist väiksem ehk negatiivne laeng, mitte nullist suurem. Koostaja tahab loota, et õpikus kasutatud märgistus lihtsustab elektri olemuse mõistmist ja kergendab elektrinähtuste visualiseerimiseks lihtsate mudelite koostamist. **Oluline on meeles pidada, et mujal on laengute märgistus vastupidine**.

Märgimuutus ja rida loengutel pakutavaid ülilihtsustatud mudeleid on koostatud selleks, et koostaja ise ja üliõpilased suudaksid endale loogilisemalt elektriala põhitõdesid lahti mõtestada.

Õpik on jaotatud 13-ks peatükiks, mis hõlmavad elektri olemuse kirjeldamist, elektri- ja magnetahelaid, elektrimõõtmisi, reaktoreid, trafosid ja elektrimasinaid ning elektriohutust. Peatüki alguses on sisukord, peatüki lõpus kordamiseks mõeldud küsimused, mis on koostaja praktikas ka eksamiküsimusteks. Paljud neist nõuavad arutlemisvõimet ja mõistmist. Lisas I on elektrotehnika ajalugu, mis tutvustab väljapaistvaid teadlasi, tänu kellele jõuti elektrotehnika arengus nii kõrgele tasemele. Ajalooline analüüs võimaldab ka mõista, miks on meie tänane ettekujutus elektrist jäänud viimasel sajal aastal pea muutumatuks, lõpuni lahti mõtestamata ja viimistlemata. Lisas II on ülevaade juhitavate ja küllastusreaktorite alastest uurimistöödest Eestis, mis peaks andma julgustavat eeskuju originaalsete elektriseadmete väljatöötamiseks Eestis ja tõstma õppurite huvi tehnika vastu. Lisa III kirjeldab, kuidas toimub elektrienergia ülekanne juhtmete abil ja juhtmevabalt. Lisas IV on esitatud elektriskeemide tingmärkide näiteid.

Materjali esitus. Õpiku tavatekstist väiksem tekst on huvilistele **süvaõppeks** pakutav üksikasjalikum info. Punakaspruuni paksu kirjaga trükitud mõisted tuleb **pähe õppida**.

Selle õpiku koostamisel on lisaks koostajapoolsetele originaalmaterjalidele kasutatud **Rein Võrgu, Vahur Mägi, Aleksander Voldeku, Eugen Puusepa, Kuno Jansoni**, aga ka vene-, saksa-, soome- ja ingliskeelsete elektrotehnikaõpikute ning internetimaterjale. Konspekti valmimisel on hindamatut abi osutanud **dotsent Evald Külm**. Elektromagnetvälja näiteid on modelleerinud **Ants Kallaste** ja **Heigo Mõlder**. Materjali vormistamisel on hindamatuks abiliseks olnud **Eda Ihlberg**. Arvutijooniseid tegid lisaks koostajale **Viktor Matenjov, Andre Allase, Jaan Kostjukov, Vladimir Ljutkin, Klaus Treimann, Mohamed Sidon, Erko Lepa, Georg Soots, Priit Reim, Valdo Salis, Mikk Lellsaar, Vassili Klotško, Uudo Kornel, Tom Arula, Maido Märss, Aleksei Sljusarev** ja **teised – südamlik tänu Teile**.

Märkused ja ettepanekud palun saata koostaja aadressile: **Jaan.Jarvik@ ttu.ee**

Sümbolid

Elektrilaeng:

- Q või q – elektrilaeng, C
- e – elementaarlaeng, C
- Λ – lineaarne laengutihedus, C/m
- σ – laengu pindtihedus, C/m^2
- ρ – laengu ruumitihedus, C/m^3
- F ja F_q – mehaaniline ja laenguid kooshoidev jõud, N

Pingete ja voolude tähised:

- u – pinge hetkväärtus, V
- U_m – pinge maksimaal- ehk amplituudväärtus, V
- U – pinge efektiiv- ehk tegevväärtus; alalispinge; allika väljundpinge; passiivelemendi potentsiaalilang, V
- U_k – pinge keskväärtus, V
- U_A – allika sisepinge, V
- $\varphi_1 = U_{1T}$ – punkti 1 potentsiaal ehk pinge maa suhtes, V
- U_r – aktiivpinge efektiiv- ehk tegevväärtus, V
- U_x – reaktiivpinge efektiiv- ehk tegevväärtus, V
- U_{rL} – reaalse pooli pinge aktiivkomponent, V
- U_{xL} – reaalse pooli pinge reaktiivkomponent, V
- $\dot{U} = Ue^{j\Psi_u}$ – komplekspinge, V
- i – voolu hetkväärtus, A
- i_0 – siirdeprotsessi algvoolu hetkväärtus ajahetkel $t = 0$
- I_m – voolu maksimaal- ehk amplituudväärtus, A
- I – voolu efektiiv- ehk tegevväärtus, alalisvool, A
- I_C – sobitatud talitluse koormusvool, A
- I_k – voolu keskväärtus ja lühisvool, A
- I_g – aktiivvoolu efektiiv- ehk tegevväärtus, A
- I_b – reaktiivvoolu efektiiv- ehk tegevväärtus, A
- I_{gL} – reaalse pooli voolu aktiivkomponent, A
- I_{bL} – reaalse pooli voolu reaktiivkomponent, A
- $\dot{I} = Ie^{j\Psi_i}$ – kompleksvool, A
- i_{pv} – pöörisvool e ringvool e Foucault' vool, A

Takistite ja juhtivuste tähistus:

- R – oomtakistus (*resistance*) alalisvooluahelas, Ω
- R_S – allikasisetakistus, Ω
- r – aktiivtakistus või lühidalt takistus (*resistance)* vahelduvvooluahelas, Ω; $r \geq R$, sagedusel 50 Hz on $r \approx R$
- R_m – magnetiline takistus
- ρ – eritakistus, Ω·m
- σ – erijuhtivus, S/m
- x_L – induktiivtakistus (*inductive reactance*) vahelduvvooluahelas, Ω
- x_C – mahtuvustakistus (*capasitive reactance*) vahelduvvooluahelas, Ω
- $x = x_L - x_C$ – reatiivtakistus (*reactance*) vahelduvvooluahelas, Ω
- z – näivtakistus (*impedance*) Ω; $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$
- G – oomjuhtivus (*conductance*) alalisvooluahelas, S
- g – aktiivjuhtivus või juhtivus (*conductance*) vahelduvvooluahelas, S
- b_L – induktiivjuhtivus vahelduvvooluahelas, S
- b_C – mahtuvusjuhtivus vahelduvvooluahelas, S

- $b = b_L - b_C$ – reaktiivjuhtivus vahelduvvooluahelas, S
- y – näivjuhtivus vahelduvvooluahelas, S; $y = \sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{x^2}} = \sqrt{\frac{1}{r^2} + \left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_L}\right)^2}$
- $\dot{Z}$ – komplekstakistus, Ω; $\dot{Z} = ze^{j\varphi} = z\cos\varphi + jz\sin\varphi = r + jx$
- $\dot{Y}$ – kompleksjuhtivus, S; $\dot{Y} = ye^{-j\varphi} = y\cos\varphi - jy\sin\varphi = g - jb$

Võimsuse ja kaovõimsuse tähised:

- P – võimsus
- p – võimsuse hetkväärtus
- Q – reaktiivvõimsus; Q_L – induktiivne reaktiivvõimsus; Q_C – mahtuvuslik reaktiivvõimsus
- $\dot{S} = \dot{U}I^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ$; VA – kompleksvõimsus, kus I^* on kompleksvoolu kaaskompleks
- p_F – pöörisvoolude erikadu, W/kg
- p_h – hüstereesi erikadu, W/kg

Kolmefaasiliste vooluringide tähised:

- *L*1, *L*2, *L*3 või *A, B* ja *C* – liinijuhtmed ning toiteallika ja tarbija faasitähised
- *N* – toiteallika neutraalpunkt
- *n* – tarbija neutraalpunkt
- *U* – liinipinge üldtähis, V
- U_{12}, U_{23}, U_{31} või U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – liinipinged, V
- U_f – faasipinge üldtähis, V
- U_1, U_2, U_3 või U_A, U_B, U_C – faasipinged, V
- U_N – neutraalpunktide nihkepinge, V
- $\dot{U}_N$ – neutraalpunktide kompleksnihkepinge, V
- *I* – liinivoolu üldtähis, A
- I_1, I_2, I_3 või I_A, I_B, I_C – liinivoolud, A
- I_f – faasivoolu üldtähis, A
- I_{12}, I_{23}, I_{31} – faasivoolud, A
- $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ – neutraaljuhtme kompleksvool, A

Magnetiliste suuruste tähised:

- Φ – magnetvoog, Wb
- *B* – magnetvoo tihedus, T
- μ või μ_a – magnetiline läbitavus või absoluutne magnetiline läbitavus, H/m
- μ_0 ja μ_r – vaakumi magnetiline läbitavus ja suhteline magnetiline läbitavus, H/m ja 1
- *H* – magnetvälja tugevus, H_c – koertsitiivjõud, A/m
- *F* – elektromagnetiline jõud, N
- W_m – magnetvälja energia, J; Ws
- *Iw* – magnetomotoorne jõud e magneetimisergutus, A ehk amperkeerd
- $F_p = I_p w_p$ – pooli *p* magnetomotoorjõud, A
- $U_{mk} = H_k l_k$ – magnetahela osa e lõigu magnetiline pinge, A
- R_M – magnetiline takistus,1/H
- B_r – jääkinduktsioon (jääk magnetvootihedus), T

Mehaaniliste suuruste tähised:

- *S* – ristlõikepindala, m^2
- *L* ja *D* – juhtmete pikkus ja vahekaugus, m
- *F* – jõud, N
- *M* – pöördemoment, Nm
- *s* – libistus, %;
- Ω_2 – rootori pöörlemise nurkkiirus, radiaani sekundis

Muud tähised:

- $\dot{E}$ – elektrivälja tugevuse vektorsuurus, N/C
- ε_a – keskkonna absoluutne elektriline tegur, F/m
- ε – keskkonna suhteline elektriline tegur
- ε_o – vaakumi elektriline tegur, F/m
- D – elektriline induktsioon, C/m^2
- α – takistuse temperatuuritegur
- t – temperatuur, ºC
- C – kondensaatori mahtuvus, F
- f_0 – ahela omavõnkesagedus, Hz

Mõõdetavate suuruste tähised:

- X – mõõdetav suurus
- A_x – mõõdetava suuruse arvväärtus
- X_e – mõõtühik
- ΔX – absoluutne mõõteviga
- γ – suhteline mõõteviga, %
- α – mõõteriista osuti hälve (jaotiste arv)
- C – mõõteriista konstant
- N – mõõteriista skaala jaotiste koguarv

1. ELEKTER JA SELLE OLEMUS

1.1. Põhiteadmised aine ehitusest ja elektri füüsikalisest olemusest
1.2. Elektriallika tekitamise lihtsustatud mudel ja allika kasutamise idee
1.3. Elektrivälja füüsikaline olemus ja selle graafiline kujutus
1.4. Tarbija lihtsustatud mudel. Laengute energia – (elektrivälja) vastastikmõju erinevate ainete korral
1.5. Elektrilaengute töötegemisvõime. Elektripotentsiaal
1.6. Voldiga mõõdetavad suurused. Elektriallikas, tarbija ja salvesti
1.7. Tarbija allikasisepinge e pinge
1.8. Elektrivool. Elektrivälja energia muundamine soojusenergiaks
1.9. Elektritakistus
1.10. Dielektrikud (isoleerivad ained)
1.11. Kondensaatorid
1.12. Varjestamine
1.13. Kordamisküsimused

1.1. Põhiteadmised aine ehitusest ja elektri füüsikalisest olemusest

Elektriaparaatide, -masinate ja elektrivarustussüsteemi töö mõistmiseks on vaja teada, kuidas toimivad süsteemi koosteosad ja elekter.

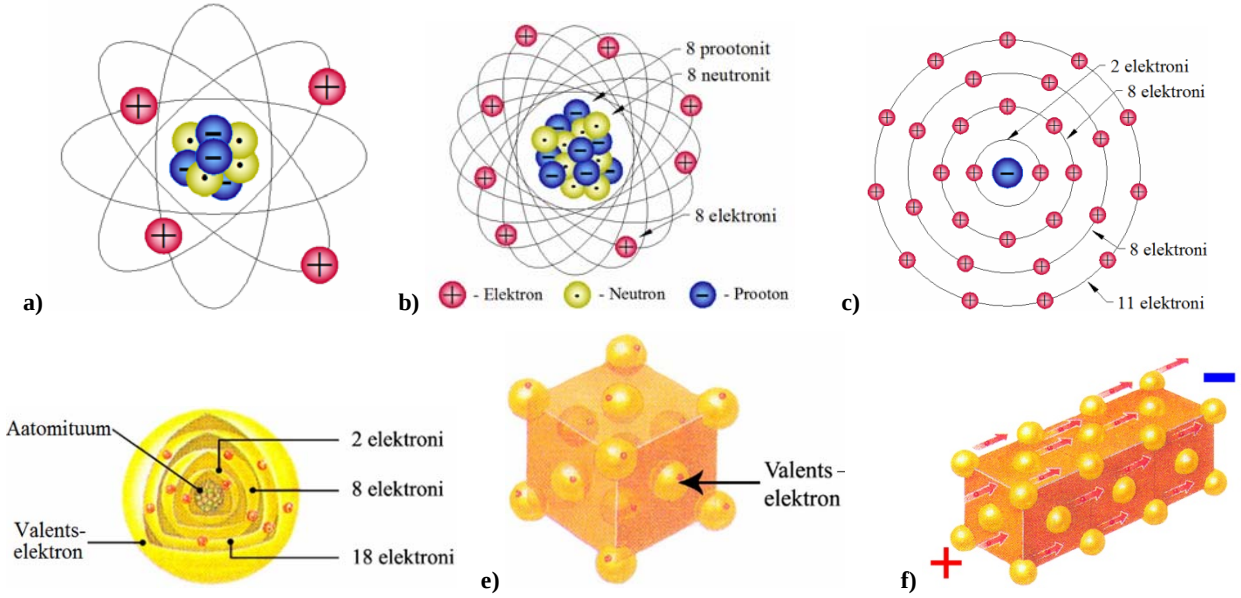
Molekulide ehitus. Materiaalne maailm on mitmekesine. Aineid (mateeria) eristavad kaal, värv, vastupidavus jne. Need omadused säilitatakse ka ainete väga väikesteks osadeks, nn **molekulideks** jagamisel. Molekulid koosnevad veel väiksematest osadest – **aatomitest**. Looduses leidub umbes 100 eri liiki aatomeid, mis erinevad üksteisest kaalu ja keemiliste omaduste poolest. Erinevate omadustega ainete (terased, klaasid, puit jt) molekulid koosnevad erinevatest aatomitest. Tahkete ainete aatomid paiknevad ruumis kindla korra järgi. Seetõttu on igal tahkel kehal kindel kuju, erinedes vedelikest ja gaasidest. Mateeria erinevad omadused olenevad aatomite koostisest ja nende paiknemisest molekulis.

Aatomid koosnevad omakorda siseehituseta nn **elementaarosakestest**. Aatomite ehitust selgitab teoreetiline **elementaarosakeste füüsika standardmudel**, mis kirjeldab elementaarosakesi ja nendevahelist vastastikmõju. Standardmudeli järgi on kolme liiki osakesi: alusosakesed, vastastikmõju (elektromagnetiline, tugev ja nõrk vastastikmõju) üle kandvad osakesed ning Higgsi boson. Elementaarosakesed on kvargid ja leptonid. On 18 erinevat kvarki, lisaks 18 antikvarki, leptoneid on 6 ja 6 antileptonit. Seega on elementaarosakesi, mis moodustavad Universumis oleva aine ja antiaine, põhimõtteliselt kokku 48. Erinevaid vastastikmõjusid (ehk jõudusid) vahendavaid osakesi (kalibratsioonbosonid) on kokku 12 (footon, kolm vahebosonit ja 8 kvarkidevahelisi jõude kirjeldavat gluuonit). Täiendavalt lisandub osakestele massi tekitav Higgsi boson. Elementaarosakeste koguarv [K. Loide] alusel 61. Standardmudeli loomine lõppes 1980. aastate keskel vahebosonite avastamisega. 2002. a tekkis vajadus mudeli väikeseks täpsustuseks. Mudeli alusel ennustatud puuduv Higgsi boson avastati 2012. a viimasena. Pikka aega on kõik katsetega tehtud mõõtmised kinnitanud standardmudeli õigsust. Standardmudel ei ole aga kõikehaarav teooria. See mudel ei kirjelda tumeainet, tumeenergiat ning ei haara gravitatsiooni. Kõigile lahendamata probleemidele loodetakse leida vastused uue **ühendteooriaga** (ingliskeelses kirjanduses *TOE – Theory of Everything* – kõike kirjeldav teooria).

Aatomite lihtsustatud ehitus. Eespool kirjeldatu järgi on aatomi ehitus väga keeruline ja pole veel lõpuni selge. Seetõttu on otstarbekas mitteelektriala üliõpilaste elektriõppes ja elektriala üliõpilastele elektrotehnika sissejuhatava kursuse raames kasutada suuri lihtsustusi. Lihtsustatult võib aatomit kujutada kerakujulise **tuumana** (joonis 1.1), mis on ümbritsetud kattega (kestaga). Kest on moodustatud erakordselt suure kiirusega alaliselt liikuvatest väikestest osadest – **elektronidest***. Aatomi tuum koosneb **prootonitest** ja **neutronitest**. Eri aatomid sisaldavad erineva arvu prootoneid, neutroneid ja elektrone. Kõige raskemates

* Selles õppematerjalis on joonisel 1.1 ja edaspidi kogu kursuse vältel **elektroni laeng tähistatud „+"-märgiga ja prooton „–"-märgiga.** Koostaja veendumus sellise muutuse kasulikkusest pärineb viimase kümne aasta nende üliõpilaste üldelektrotehnika kursuste loengupraktikast, kelle jaoks elektrotehnika pole põhieriala. Algselt olid loengud üles ehitatud klassikaliste õpikute põhjal.

aatomites loendatakse ligi 350 sellist osakest. Elektriahelate analüüsil kasutame **Rutherfordi** poolt 1910. a väljapakutud ja **Niels Bohri** (1913. a) täiendatud tänapäevast aatomi planetaarset mudelit (joonis 1.1), mis oma lihtsuse tõttu sobib elektriliste nähtuste näitlikuks kujutamiseks. Aatomis paiknevad elektronid tuuma ümber mitme kihina. Vesiniku ja heeliumi aatomitel on üks elektronkiht, süsiniku ja hapniku aatomitel kaks kihti ja raadiumil ning uraanil seitse kihti.



Joonis 1.1. Berülliumi (a), hapniku (b) ja vase aatomi lihtsustatud mudelid (c ja d) ning vasekristalli (e) ja elektronide liikumise lihtsustatud mudelid vaskjuhtmele (f)

Mis on elekter, elektriliste nähtude kasutusidee ja kuidas elektri põhiolemust piltlikult ette kujutada? Küsimus pole lihtsate hulgast. Vastamiseks tuleb teha väga suuri lihtsustusi. Kokkuvõtvalt: kõik elektrilised nähud seonduvad **elektrienergiaga,** seega vahetult elektrilaengutega.

Klassikalises füüsikas nimetatakse **elektrilaenguks** ehk **laenguks** elementaarosakese omadust osaleda elektromagnetilises vastastikmõjus, samuti osakese või silmaga nähtava keha omadust tekitada elektromagnetvälja ja alluda selle toimele. Seda omadust kirjeldatakse ka elektromagnetiliste jõudude tekitamisena ja nendele allumisena.

Elektrilaeng esineb kahel kujul, mida tinglikult nimetatakse positiivseks elektrilaenguks ehk **positiivseks laenguks** ja negatiivseks elektrilaenguks ehk **negatiivseks laenguks**. Elektrilaenguta osakest või keha nimetatakse **elektriliselt neutraalseks** ehk **neutraalseks**. Elektrilaengut kannavad kõik elektriliselt laetud osakesed (elektronid, prootonid, ioonid). Elektrilaeng, laeng ehk **elektrihulk** (elektrienergia hulk) on füüsikaline suurus, mis iseloomustab elektromagnetilises vastastikmõjus osalemise ja laengu energiavälja (elektromagnetvälja) tekitamise ning sellele allumise intensiivsust ja viisi. Seega on laengul **energiamuundamise** ehk **töötegemisvõime**, mis iseloomustab laengusse ja seda ümbritsevasse ruumi salvestunud elektrienergia kogust.

Elektrilaengu väärtus on positiivse laengu puhul positiivne arv ja negatiivse laengu puhul negatiivne arv. Neutraalsele osakesele või kehale võidakse omistada elektrilaengu väärtus 0. Elektrilaeng ehk elektrienergia hulk (elektrihulk) kui füüsikaline suurus iseloomustab ka näiteks muutuva elektrilaenguga keha elektrilaengu muutu ja mingit pinda läbivate osakeste elektrilaengute summat. Ka sel juhul võib elektrilaengu väärtuseks osutuda 0. Elektrilaengu tähis on tavaliselt Q või q. Elektrilaengu mõõtühik SI-süsteemis on kulon (tähis C).

Elektrilaengu jäävuse seadus. Maast isoleeritud keha elektrilaeng võib muutuda. Sel juhul annab ta osa oma laengust üle teisele maast isoleeritud kokkupuutes olevale kehale. Kehade suletud süsteemi summaarne elektrilaeng (kehade elektrilaengute algebraline summa) ei muutu. Seega saab ühe keha elektrilaeng suletud süsteemis muutuda üksnes nii, et ülejäänud kehade summaarne elektrilaeng muutub samapalju vastupidises suunas. See on elektrilaengu jäävuse seadus.

Tõmbe- ja tõukejõud. Ühenimeliste ehk samamärgiliste laengutega (st kahele positiivse laenguga või kahele negatiivse laenguga) osakestele või kehadele mõjub vastastikune tõukejõud. Erinimeliste ehk vastasmärgiliste laengutega osakestele või kehadele (st ühele positiivse laenguga osakesele või kehale ning ühele negatiivse laenguga osakesele või kehale) mõjub vastastikku tõmbejõud. Mis **hoiab elektrone aatomis**? Miks elektronid, olles tuumast piisavalt kaugel, ei eemaldu, vaid liiguvad ümber tuuma? Põhjus on selles, et osal tuumaosakestel (prootonitel) on negatiivsed ja elektronidel on positiivsed **elektrilaengud**. Iga elektroni ja prootoni laeng on täpselt võrdsed. Aatomis on positiivsete ja negatiivsete elementaarlaengute arv võrdne (prootoneid ja elektrone on ühepalju). Lihtsustatult võime öelda, et igal prootonil on oma elektron ja nad moodustavad vastasmärgiliste **laengute paar**i. Prooton paikneb tuumas, elektronil on orbiidil oma **„pesa“**. Pesade arv vastab täpselt prootonite arvule. **Aatomites võrdub laengupaaride laengute summa nulliga. Kui energiat ei lisata (näiteks ainet ei kuumutata), on aatomites laengud alati tasakaalus! Tasakaalustamata nn vabu elektrone tavaliselt ei esine. Neid saab muuta „vabaks“ vaid lisaenergia (lisajõu) vahendusel.**

Energia vabanemist ja neeldumist saab kujutada **kiirguskvantide** abil. Erijuhuks on uraani radioaktiivne kiirgus. Eeldatakse, et minevikus pidi universum olema valdavalt kiirgusstaadiumis, kus põhiosa universumi energiast eksisteeris **kiirguskvantide** (nt footonite) vormis. Tingimisi võiksime lisada veel elektronist ja positronist koosneva **kiirguskvandi** – footoni, mida saab samuti tinglikult osakeseks lugeda.

Silmaga nähtavad kehad koosnevad aatomitest, mille koosseisus on negatiivse elektrilaenguga prootonid, elektrilaenguta (elektriliselt neutraalsed) neutronid ja positiivse elektrilaenguga elektronid. Prootonid ja neutronid asuvad aatomituumas, elektronid moodustavad aatomituuma ümber elektronkatte. Kõigi prootonite elektrilaengud on täpselt võrdsed. Sama kehtib ka ergastamata (lisaenergiata) elektronide kohta. Prootoni ja elektroni elektrilaeng on absoluutväärtuselt võrdsed, kuid vastasmärgilised. Nende laengu absoluutväärtust nimetatakse **elementaarlaenguks**. Seda tähistatakse *e* ning selle ligikaudne väärtus

$$e = 1{,}602176462 \cdot 10^{-19} \text{ kulonit.}$$

Aatomis võrdub prootonite arv tuumas elektronide arvuga elektronkattes, mistõttu on aatom elektriliselt neutraalne (st tema elektrilaeng võrdub nulliga). Kui aatomi elektronkattest väljub üks või mitu elektroni või sinna lisandub üks või mitu elektroni, siis muutub ta vastavalt negatiivse või positiivse elektrilaenguga iooniks. Elektrilaeng võib ühelt kehalt üle minna ainult elementaarlaengute kaupa, sest ülemineva laengu kandjad on elementaarlaenguga või selle vastandväärtusega osakesed. Samuti on keha elektrilaeng alati elementaarlaengu kordne, sest see on tema koosseisus olevate elementaarlaenguga või selle vastandväärtusega osakeste elektrilaengute algebraline summa.

Tänapäeva teoreetilises füüsikas vaadeldakse prootoneid ja neutroneid ning nimetatakse **nukleonideks.** Neid võib tuumajõudude seisukohast vaadata ühe osakese – nukleoni – kahe eri olekutena. Prootonid ja neutronid koosnevad **kvarkidest**, elementaarlaengu suhtes murrulise elektrilaenguga fundamentaalosakestest. Nende elektrilaengu absoluutväärtus on $e/3$ või $2e/3$. Väikestel energiatel on kvargid prootonis ja neutronis sedavõrd tugevalt seotud, et neid sealt vabastada ei saa. Nii ei ilmne ka kvarkide murdarvulised laengud. Kvargid saavad vabaks alles ülikõrgetel energiatel.

Vastastikmõju. Füüsikas on üheks põhjapanevaks loodusnähtuste lahtimõtestamise aluseks mõiste **interaktsioon** (inter- + ld *actio* tegevus), mis eesti keeles lahtiseletatuna tähendab **vastastikune mõju** või lühemalt **vastastikmõju**. Viimase toimel mõjutab üks objekt teist ja selle tulemusel muutub nende liikumisolek. Mõju toimub mateeria vormi – **energiavälja** vahendusel. Välja toime avaldub **jõuna**. Näiteks kui paigutada juhe püsimagneti magnetvälja ja lasta läbi juhtme voolu, tekib lähteväljale täiendav juhtme liikuvate laengute energiaväli (magnetväli), mille vastastikmõjul tekkiv moonutatud liitväli põhjustab jõupaari tekke, mis püüab juhet ja magnetit liigutada nii, et tekiks uus tasakaaluolek väiksema energiatihedusega ruumis.

Seega seob vastastikmõju kaks mateeria vormi – aine ja energiavälja. Mis on aine ja energiavälja erinevused?

- Ühes ja samas ruumipunktis võib samaaegselt olla mitme laengu energiavälja liitväli, aineosakestel pole see võimalik.
- Väljadel puuduvad kindlad mõõtmed, ainel on. Energiaväli ulatub allikast väga kaugele, ka lõpmata kaugele.

Milles poolest sarnanevad aine ja energiaväli ?

- Ainel ja energiaväljal on vähimad kogused – aine algosakesed, energiaväljal kvandid.

- Aine ja energiaväli võivad teatud tingimustes teineteiseks muunduda, olles seejuures eristamatud.

Elektrinähtuste lahtimõtestamisel on väga tähtis **laengute energiaväljade (elektromagnetiline) vastastikmõju**. Ajalooliselt vaadeldakse elektrinähtuste avastamise järjestuse alusel eraldi elektrilist ja magnetilist vastastikmõju.

Elektriline vastastikmõju. Esineb laengute ja laetud kehade vahel. Nende ümber on laengute energiaväli (jõuväli), mida ajalooliselt kutsutakse **elektriväljaks**. Elektrilaengu (q või Q) suurus iseloomustab, mil määral osaleb ta elektrilises vastastikmõjus. Laengu minimaalne suurus on piiratud ja looduses väikseimat nimetatakse **elementaarlaenguks** e.

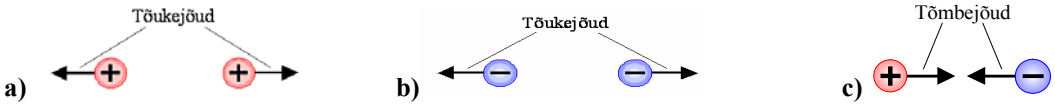
Coulombi seadus. Coulombi seaduse järgi mõjub elektrilaenguga liikumatute kehade (või osakeste) vahel jõud, mis on võrdeline elektrilaengute absoluutväärtustega ning pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga. Mõjuvad jõud tekkivad vähemalt kahe laengu energiaväljade liitumisel.

Füüsikas võetakse elektrilaengu ühikuks elektroni laeng. Elektrotehnikas mõõdetakse **elektrilaengu**t, st **elektrienergia kogust**, kulonites (C). **Üks kulon** on võrdub $6{,}29 \cdot 10^{18}$ elektroni laenguga. Elektroni elektrilaeng on 1 e, mis on $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ kulonit. Tegelikult ongi elementaarlaeng defineeritud just elektroni laengu järgi. Elektroni seisumass on 0,51 MeV/c^2, mis on ligikaudu $9{,}10 \cdot 10^{-31}$ kg. Näiteks on prooton elektronist 1836 korda massiivsem osake.

Kui mehaanilise, keemilise või muu energia vahendusel on tekitatud ruumiliselt eraldatud elektrilaengud, siis nendesse salvestatud energia ja energiaväljade liitumisel tekkivad laengute vahel tõmbe- või tõukejõud (joonis 1.2). Tõmbejõud, mis tekkivad positiivselt laetud elektronide ja negatiivselt laetud prootonite vahel, hoiavad elektrone aatomis ja sunnivad neid liikuma ümber aatomi tuuma.

Kahe aatomi lähenemisel tekib nende elektronide vahel tohutu tõukejõud. Nad takistavad aatomite edasist lähenemist ja määravad aatomite mahu (ulatuse). Selle mahu sisemusse ei suuda tungida teine aatom.

Miks tuum ei lagune elektrilise tõukejõu tulemusena, mis tekkib tema prootonite vahel? Tuuma koostisosade vahel (prootonite ja neutronite vahel) toimib ka väga suur vastastikune tõmbejõud, seda nimetatakse **tuumajõuks.** See jõud on märgatavalt tugevam vastastikusest tõukejõust prootonite ühenimeliste elektrilaengute vahel. Reeglina on aatomite tuuma osadeks jaotada väga raske. Erandiks on selliste aatomite tuumad (raadium, uraan, plutoonium jt), mis järk-järgult iseeneslikult lagunevad. Sellega kaasneb energia eraldumine. **See energia kandub ümbritsevasse ruumi kiirgusena**. Selliseid aineid nimetatakse **radioaktiivseteks.**



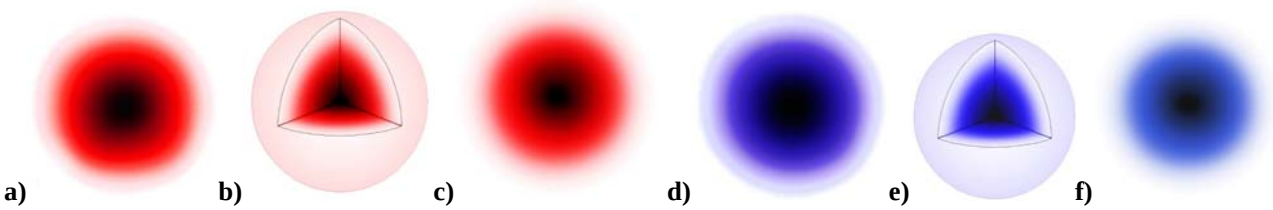
Joonis 1.2. Elektrilaengute vastastikuse mõju skeem. Tõuke- ja tõmbejõud

Ühe või paljude laengute liikumist keskkonnas nimetatakse elektrivooluks. Elektritarbijas iseloomustab vool elektrienergia muundumise tõhusust teisteks energialiikideks. Klassikalises elektrotehnikas loetakse elektrivoolu suunaks positiivsete laengute liikumise suunda, mis on vastupidine elektronide liikumissuunaga ja elektroni laengut loetakse negatiivseks. **Selle õppematerjali ulatuses loeme elektroni laengut positiivseks, mistõttu elektronide liikumise suund ja voolu positiivne suund ühtivad**.

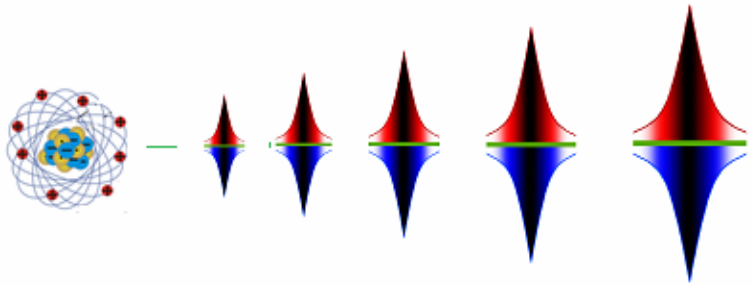
Kuidas elektrotehnikat õppides elektroni ja tema laengut piltlikult ette kujutada? Sellist üldtunnustatud kujutluspilti pole. Selles õpikus ei käsitleta elektronkatet elektronide „pilvena“, vaid vaadeldakse elektroni lihtsustatult ümber aatomi tuuma pöörleva väga väikese **energiapallina,** mille sisse ja mille ümber on koondunud elektroni laenguga võrdeline laenguenergia (elektromagnetenergia). Elektroni ümber on **energiaväli** (suure energiatihedusega energiapallist eemaldudes energiatihedus väheneb) ehk **laengu jõuväli** ehk **elektriväli.** Kui elektron paikneb tuumale kõige lähemal orbiidil, siis on energiapalli energiasisaldus väiksem kui välimistel orbiitidel. Kiirguskvantide neeldumise tagajärjel lähevad aatomite elektronid üle

kõrgemale (ergastatud) energiatasemele (piltlikult öeldes kasvab energiapalli läbimõõt ja see ei mahu lähteorbiidi „pesasse“).

Kui elektron on lisaenergia arvelt aatomist eraldatud ja paikneb elektrit mittejuhtivas keskkonnas, siis elektroni energiaväljas saab energia jagunemist ruumis lihtsustatult kujutada joonise 1.3 järgi. Siin vastab tumedam värv suuremale, heledam väiksemale energiatihedusele. Kui lisaenergia toimel on elektron aatomis sümmeetriatelgede suhtes nihutatud, siis tekkib niinimetatud **dipool**. Tänu salvestatud energiale on dipool omandanud töötegemisvõime ja muutunud väikeseks elektrienergia allikaks, lühidalt **elektriallikaks**. Joonis 1.4 iseloomustab dipooli tekkemehhanismi. Näiteks isoleermaterjalide korral, mis on ideaalsed dipoolide tekitajad, rebitakse lisaenergia rakendamisel järjest enam elektrone aatomi sümmeetriatelgedelt kaugemale. Dipooli laengute energiavälja salvestuv elektrienergia kogus võrdub dipooli tekitamisel muundatud energiakogusega. Seda iseloomustab joonisel 1.6 olev vasakult paremale muutuv energia-sammaste-lehtrite rida. Siin on parempoolse sammas-lehter-paari salvestatud elektrienergia palju suurem vasakäärmise omast.



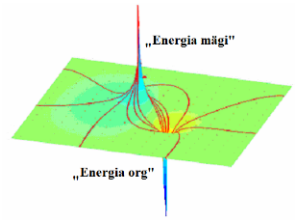
Joonis 1.3. Elektroni (a …c) ja prootoni (d…f) energiavälja lihtsustatud kujutlus. Tumedamas osas on energiatihedus suurem. Väliskihtides peaks energiatihedus energiaportsude – kvantide haaval muutuma. Seega peaks üleminekul ühelt portsult teisele olema „silmaga nähtav“ piirjoon



Joonis 1.4. Dipooli (elektriallika) tekke selgituseks. Lisaenergia arvelt elektronide eemaldamisel tekkiv elektronide laengute sammas ja nende tühjade pesade energialehter

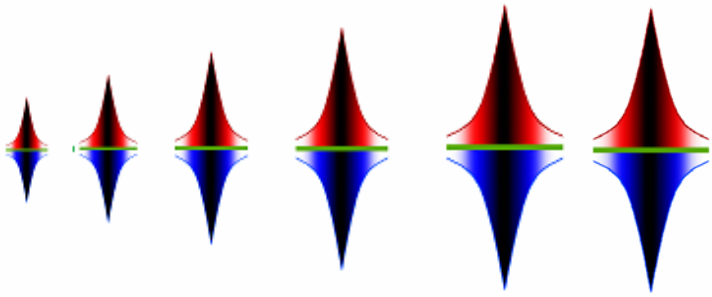
Sama palju erineb ka vastavalt nende energiamuundamis- (töötegemis)võime. Kui elektrone ärarebiva jõu toime lakkab, siis elektronid vabanevad ja samba-lehtri energiavälja jõudude toimel liiguvad elektronid tühjadesse pesadesse. Sinna „mahtumiseks“ peavad nad vabanema varem omandatud liigsest energiast. See toimub portsjonite (kvantide) kaupa, soojus- või valgusenergia kiirgamise teel ümbritsevasse keskkonda. Isikliku laengu energiavälja tõttu on töötegemisvõime ka üksikul elektronil. Seega on elektron ja üksik tühi pesa kõige väiksema võimsusega elektriallikateks.

Vaadeldes keskkonda, kus elektronid ja sama suur tühjade pesade kogum on eraldatud väikesele vahe-kaugusele punktlaengutena, saame modelleerimisprogrammi abil energiatiheduse jagunemise neid laenguid ümbritsevas ruumis. See vastab joonisel 1.5 olevale pildile. Tekkib „elektronide mägi“ ja „tühjade pesade“ org. Sisuliselt sarnaneb energiapallina vaadeldava elektronide ja nende peegelpildi, tühjade pesade energia jagunemine ümbritsevas keskkonnas dipooli energia jagunemisega. Põhierinevus on vaid elektronide ja tühjade pesade arvus.



Joonis 1.5. Dipool – väike elektriallikas. Elektroni ja ta „tühja pesa“ energia jagunemise idee aatomis

Kui me „rebime“ täiendava lisaenergia abil (lihtsustatud mudelit rebiva jõu tekkest vaadeldakse edaspidi) neutraalselt aatomilt elektroni, siis keskkonna suhtes eemaldame nullenergiaga aatomilt elektroni laenguga võrdelise positiivse koguse elektrienergiat. Seega tekkib algselt nullenergiaga aatomil sama suur negatiivne energiakogus ehk laeng. Graafiliselt võime seda kujutada positiivse energiasamba peegelpildina (joonis 1.6).



Joonis 1.6. Elektriallika tekke selgituseks. Elektronide eemaldamisel tekkiv elektronide laengute sammas ja nende tühjade pesade energialehter

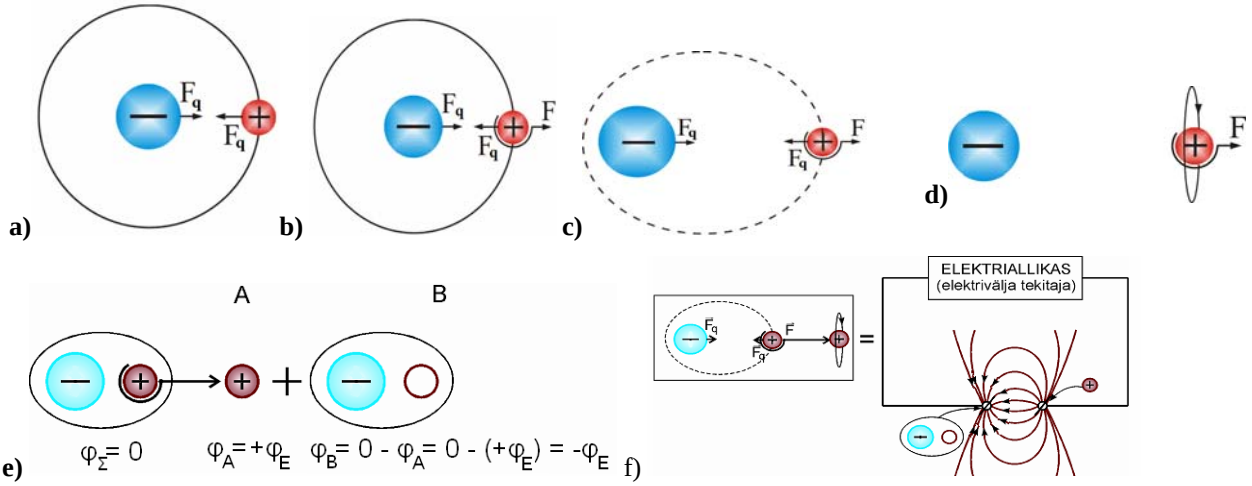
Rebides täiendava koguse elektrone, muutub positiivne energiasammas kõrgemaks ja samba ruumala suureneb. Samuti kasvab ka samba peegelpilt – elektroni tühjade pesade vastasmärgiline energiakogus – graafiliselt teravatipulise, lehtrikujulise „oru“ ruumala.

1.2. Elektriallika tekitamise lihtsustatud mudel ja allika kasutamise idee

Elektrilised nähtused seonduvad laengute ja nende elektrienergiaga. Laengute energiavälja on uuritud eri aegadel: algul hõõrdeelektriallikate, paigalseisvate (isoleerkeskkonnas „vangistatud“) laengute energiavälja (jõuvälja), mida hakati nimetama **elektriväljaks**; hiljem elektriallikate toimel liikuma pandud **laengutega – elektrivooluga kaasnevat, liikuvate laengute energiavälja**, mida nimetati **magnetväljaks.** Sellele traditsioonile tugineb kogu elektriahelate teooria. Maxwelli arendatud väljateooria lähtub ühtsest elektromagnetväljast ehk **sisuliselt laengute energiaväljast**. Looduses ei esine tavaoludes (välis- või sellest madalamal temperatuuril) teineteisest eemaldatud erinimelisi laenguid ja laengupaare. Seega pole ka tingimusi, et tekkiks laengu/laengute või laengupaaride jõuväli, mis võiks esile kutsuda laengute liikumise ehk voolu. Erinimeliste laengupaaride olemasolul tõmbuvad nad energia- ehk jõuvälja mõjul kokku, ühinevad ja muutuvad neutraalseks. Selleks et kasutada elektrilisi nähtusi, tarbida elektrienergiat (muundada elektrienergiat teisteks energialiikideks), tuleb neutraalsed aineosakesed kunstlikult, mingi energiamuundamisprotsessi jõudude abil muuta erinimelistest laengutest koosnevateks laenguteks ehk laengupaarideks, mille energia- ehk jõuvälja (elektrivälja) salvestuv elektrienergia kogus on täpselt võrdne laengupaaride tekitamisele kuluva energiaga. **Laengupaaride tekitamine toimub elektriallikates.**

Elektri kasutuseesmärgid. Igapäevaelus kasutatakse elektrit väga laialdaselt, muundades teda teisteks energialiikideks – valguseks, soojuseks, mehaaniliseks energiaks jne. See toimub **tarbijates.** Elektrienergia muundumisprotsessid käivituvad tarbijates koos voolu tekkega ning **muundumisprotsessi intensiivsust iseloomustab voolu suurus.** Elektrienergiat saadakse elektriallikate vahendusel. Elektriallikates (lühidalt **allikates**) muundatakse mingi lähteenergia liik – mehaaniline, soojus-, valgus-, keemiline – **elektrienergiaks**. **Kuidas toimub allikas energia muundamine elektrienergiaks?** Mis toimub allika sees? Vaatame seda kasutatavaimates elektriallikates toimuva näitel: pöörlevad elektrimasinad, elektrigeneraatorid. **Allika põhiülesanne on neutraalsete aineosakeste lõhestamine – paigalseisvatest aatomitest elektronide ärarebimine, selle tulemusel elektron-prooton-laengupaaride tekitamine ja laengute energiavälja loo-**

mine allika väljundisse. Lähteolukorras tasakaalustab paigalseisvas aatomis iga elektroni laengut vastasmärgiline ja võrdne prootoni laeng. Laengute summa võrdub nulliga ja aatomi elektrienergiakogus võrdub samuti nulliga. Joonisel 1.7 vaatleme mõttelist paigalseisvat aatomit, millel on üks elektron ja tuumas üks prooton. Aatomisisesed jõud F_q hoiavad elektroni oma orbiidil. Kui välisjõud F = 0, siis pöörleb elektron oma tavaorbiidil (a), elektronide-prootonite laengud on võrdsed, tasakaalus ja aatomil puudub väline energiaväli ning vastavalt võrdub potentsiaal (töötegemisvõime) nulliga, $\varphi_\Sigma = 0$. Kui rakendada elektronile välisjõud F, siis oleneb tulemus sellest, kui suur on jõud F (jõu F tekkemehhanism on kirjeldatud joonisel 1.9).



Joonis 1.7. Elektriallika tekke idee. Elektriallikas toimub väliste jõudude mõjul neutraalsete aatomite lõhestamine laengupaarideks

Kui välisjõud F = 0, siis pöörleb elektron oma tavaorbiidil (a) ka siis, kui välisjõud on väike (b). Kui $0 < F < F_q$, toimub polariseerumine (c). Kui $F > F_q$, siis rebitakse elektron orbiidilt ja see liigub koos oma energiaväljaga, mida kujutatakse magnetväljana* (d).

Et vähendada erinimeliste lähedase sisuga mõistete hulka, on õpikus loobutud elektromotoorjõu mõistest ja eelistatakse potentsiaali, potentsiaalide vahe, allika sise- (U_A) ja väljundpinge U ning tarbijal potentsiaalilangu mõisteid. Seega toimub allikas neutraalsete aineosakeste lõhestamine elektron-prooton-laengupaarideks ja nendega allika „laadimine“, elektrienergiaks muundamine. Toiming sarnaneb püssi laadimisega. Laadides püssi suurema laenguga, kasvab püssipadruni töötegemisevõime. Nii on ka elektriallikaga. Elektroni eemaldumisel muutub neutraalne aatom negatiivse laenguga iooniks. Et allika sündi muuta ilmekamaks, teeme järjekordse lihtsustuse ja nimetame tekkinud negatiivse iooni elektroni tühjaks „pesaks“ (e). Selliselt tekkinud laengupaari võime kujutada väikseima allikana (f), mille töötegemisvõime (energia muundamise võime) on määratud elektroni ja prootoni laengutega. Seega tekkib võrdsete, vastasmärgilise laengupaariga elektriallikas (f) **(erimärgilistel võrdsetel laengutel on võrdne potentsiaal – töötegemisvõime. Seega on laengupaari salvestatud kogu energia võrdeline laengute absoluutväärtuste summaga e potentsiaalide vahega).**

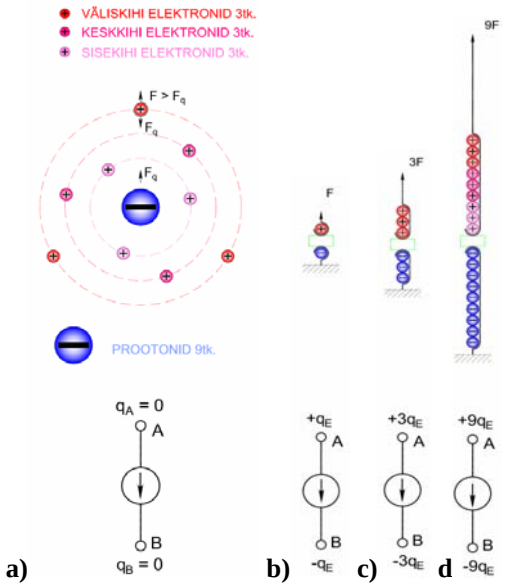
Selline laengupaar moodustab elektriallika klemmide vahele energiavälja (elektrivälja), nagu iga tavaline elektriallikas, ning sellise tinglikult kujutatud allika klemmid omandavad erimärgilised potentsiaalid (töötegemisvõime) ning nende potentsiaalide absoluutväärtuste summa ja ka allika klemmide potentsiaalide vahe võrdub allika töötegemisvõimet iseloomustava allikasisepingega U_A ehk elektromotoorjõuga E (mida edaspidi selles õpikus ei kasutata)

$$U_A = E = /\varphi_A/ + /\varphi_B/ = /+\varphi_E/ + /-\varphi_E/ = \varphi_A - \varphi_B = 2\varphi_E.$$

Elektrilaengu suhteline suurus q/e on elektronil +1; prootonil –1. Siin on e elektroni laeng ehk, tähistades selle q_E, saame $q_E = e$, prootonil vastavalt $-e$.

---

* Elektronide liikuma hakkamisel koos oma energiaväljadega moodustub liikuvate laengute energiaväli – **magnetväli**. Magnetvälja energia võrdub kõigi liikuma hakanud laengute energiaväljade summaga. Näiteks kui meil on 9 paigalseisvat laengut, siis nende elektrivälja energia võrdub 9 laengu elektrienergia kogusega ning laengute magnetvälja energia on null. Kui allikas paneb 9 „paigalseisvat“ laengut – elektroni – liikuma, siis nende magnetvälja energia on võrdne 9 laengu energiavälja summaga ja nende elektrivälja energia on null. Magnetväljas sisalduv energia võrdub täpselt energiahulgaga, mis kulus 9 elektroni ärarebimisele ja nende liikuma panemisele. Muundatava mehaanilise energia suurus määrab elektrienergia suuruse allikas. Täpselt sama suureks kujuneb allikas tasakaalustav elektron-prooton-paaride energiakogus.

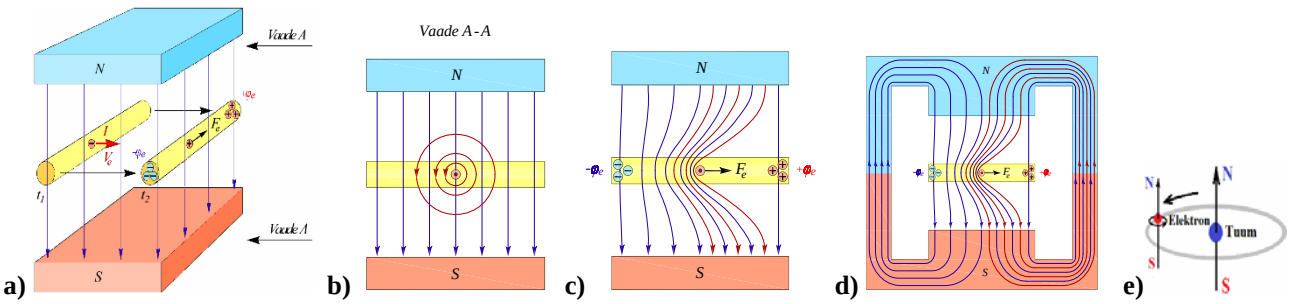


Joonis 1.8. Elektriallika tekke idee tinglik kujutis: a – neutraalne aatom, siin jõud $\vec{F}$ = 0; b – kõige väiksema võimsusega allikas; c – kolm ja d – üheksa korda võimsama allika kujutis

Joonisel 1.8 on kujutatud teise oletusliku aatomi mudeli alusel allika tekke ideed. Olgu meil aatom, mille tuuma ümber on kolm püsiorbiiti ja igal orbiidil kolm elektroni. Seega on elektrone 9 ja prootoneid tuumas samuti 9. Tähistame elektroni ja prootoni laengupaari tõmbejõud tähega $\vec{F}_q$. Rakendame elektronile jõu $\vec{F}$ (joonis 1.8), mis on võrdeline generaatori mähist liigutava jõuga. Kui see jõud on suurem kui $\vec{F}_q$ (seega $2\vec{F}_q < \vec{F} < \vec{F}_q$), saame tulemuse, mida on tinglikult kujutatud joonisel 1.8b. Rakendades kolm korda suurema jõu, saame tulemuseks joonisel 1.8c kujutatu. Veel omakorda kolm korda suurema jõu korral saadud tulemus on joonisel 1.8d.

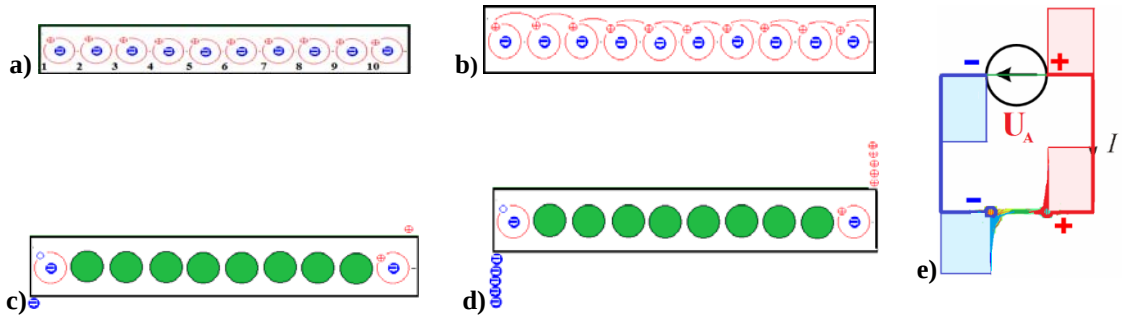
Kuidas tekitatakse generaatoris laengute energiaväljade (magnetväljade) liitumise teel elektronidele mõjuv jõud $\vec{F}$, seda selgitatakse joonisel 1.9. Igal elektronil, mis ringleb ümber oma aatomi tuuma ja samaaegselt pöörleb ümber oma telje, on oma isiklik energiaväli – magnetväli (joonis 1.9e). Kui liigutame elektrijuhti magnetväljas, väljad liituvad, tekkivad suurema ja väiksema kontsentratsiooniga väljaalad – tekkivad jõud, mis rebivad elektrone ära orbiidilt tuuma ümber.

Vaskjuhtme liikumisel liigub püsimagneti energiaväljas-magnetväljas (sinised väljajooned) vaatluse all olev elektron energiaväljaga ruumis koos juhtmega kiirusega *v*. See keerulise liikumisega laengu liikumine ruumis kujutab endast imeväikest elektrivoolu *I* (joonis 1.9a). Liikuva elektroni ümber olev energia- ehk magnetväli (punased väljajooned) liitub püsimagneti energiaväljaga. Seetõttu muutub energiatiheduse jaotus ruumis. Tekkivad suure ja väikese energiatihedusega alad. Kõrge energiatihedusega alal on palju välja väljajooni, väikese tiheduse korral vähe. Liitväljas (joonis 1.9c, d) kasvab energiavoog (magnetvoog), koosnedes meie näites sinistest (7) ja punastest (3) väljajoontest.



Joonis 1.9. Elektron-prooton-laengupaaride lõhestamine laengute energiaväljade (magnetväljade) liitumisel tekkivate jõudude abil: a – jälgime aatomi tuuma ümber tiirleva, keskel paikneva elektroni liikumist koos juhtmega; b – püsimagneti ja liikuva elektroni magnetväljad; c – püsimagneti ja elektroni liitmagnetväli; d – püsimagneti ja elektroni liitmagnetvälja väljajoonte teekond ferromagnetilise südamiku korral; e – elektroni energiaväli pöörlemisel ümber tuuma ja ümber oma telje

Koos magnetvoo kasvuga suureneb ka välja salvestatud energia elektroni liigutamiseks rakendatud mehaanilise energia võrra. Lisandunud punased väljajooned ei saa sulguda joonisel 1.9b näidatud teekonda pidi, vaid nad kulgevad püsimagneti väljajoontega koos ümber elektroni poolt tekitatud voolu. Selle tulemusel muutub magnetväli ebasümmeetriliseks: vasakul energia- ehk vootihedus kasvab, paremal kahaneb. Tekkib sümmeetriat taastav jõud $\vec{F}$, mis rebib laengupaarilt elektroni, jättes lähteaatomi orbiidile tühja elektroni „pesa“. Vaatame joonisel 1.10 seda protsessi lähemalt. Olgu meil väga lühike voolujuht (voolutoru), mille aktiivosas (magnetväljajoontega haaratud juhtmeosas) on 10 aatomit. Lähteolukorras (a), paigalseisva juhtme korral, on kõik joonisel kujutatud 10 aatomit tasakaalu olukorras. Liigutatagu juhet mehaanilise jõuga, mille poolt muundatav mehhaaniline energia võrdub viie laengupaari tasakaalustava elektrienergiaga.



Joonis 1.10. Elektronide liikumine juhtmes (a...d), allika kujutamine laengute (energia) pumbana ja potentsiaalide jagunemine (e) ahelas (vertikaalsete ühendusjuhtide potentsiaali pole skeemil näidatud)

Vaatleme mõttelisest ainult ühte viiest rööbiti kulgevast aatomite voolutorust. Joonisel 1.9 kujutatu järgi rakenduvad magnetväljade liitumisest tekkivad jõud üheaegselt voolutoru kõigi kümne aatomi elektronile (joonis 1.10b). Seetõttu liiguvad kõik 10 elektroni üheaegselt oma parempoolse naaberaatomi orbiidil vabanevasse pesasse. Eeldame, et juhtme otste vahel on õhk ehk isolaator. Selle tulemusel tekkib elektrit juhtiva keskkonna piiril, kümnenda aatomi poolsel juhtmeotsal liigne elektron. Vasakpoolsel keskkonna piiril tekkib ühe negatiivse laenguga tühi elektronipesa (joonis 1.10c). Juhi otste vahelisel 8 aatomil on pesades elektronid. Nad on neutraalsed ja joonisel tähistatud rohelise värviga. Seega **puuduvad allika aktiivosas tasakaalustamata laengud ja ka selle juhtmeosa töötegemisvõime (potentsiaal) võrdub nulliga**. Kõik elektrienergia kandjad, laengud, on koondatud muutuva keskkonna piirile, aktiivosa algusesse ja lõppu.

Sarnased protsessid toimuvad samaaegselt ka ülejäänud neljas aatomitest moodustatud voolutorus. Ära-rebitud elektronid liiguvad aatomi lähinaabri välisorbiidile, kümnendate aatomite elektronid jäävad juhtiva keskkonna piirile, vaskjuhi voolutorude parempoolse otsaaatomi lähedale. Nii tekkib meie näites sinna 5 liigset paarivälist laengut – elektroni. Juhi vasakpoolses otsas on aatomitel viis tühja elektronipesa. Juhi otste vahelisel 8 aatomil on pesades elektronid. Nad on neutraalsed ja joonisel tähistatud rohelise värviga (joonis 1.10d).

Kuna algselt oli elektron-prooton-laengupaaride laengute summa $q_\Sigma = 0$, siis, lahutades sellest ärarebitud viie elektroni positiivse laengu, saame, et vasakpoolse otsa aatomid omandavad laengu, mis on võrdne 5 elektroni ja vastupidise märgiga laenguga. Seega, $0 - 5(+q_E) = -5q_E$.

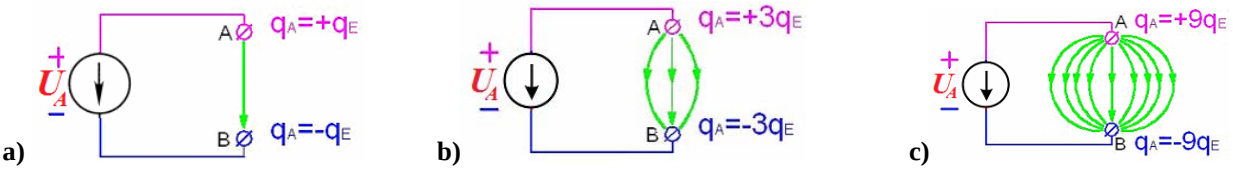
Nii tekkib vaskjuhtme otste laengute vahele **laengute energia-, jõu- ehk elektriväli**, millesse salvestuv energia võrdub elektronide ärarebimisele kulutatud mehaanilise energiaga, millest on lahutatud juhtme sees soojuskiirgusena eralduv energia (vt p 1.10, elektrivool). Kui juhtme liigutamisele rakendatud jõud on suurem kui 5 elektroni ärarebimiseks vaja, siis samamoodi rebitakse ära täiendav kogus elektrone, kus juhtme otstesse kogunevate elektronide-prootonite laeng kujuneb nii suureks, et laengute jõuvälja energia muutub täpselt võrdseks elektronide ärarebimisele kulutatud energiaga. Nii tekkib tasakaaluolukord $|+q_E| + |-q_E| = 2q_E$. **Allika talitlusest selgub, et allika väljundklemmidel on võrdsed ja vastasmärgilised laengud ning neil on ka võrdne töötegemisvõime – elektripotentsiaal.** Seega võime juhtme otste laengut vaadelda esimeses lähenduses lihtsustatult punktlaenguna. Vaadeldu põhjal on allikas nagu energiapump (joonis 1.10e), mis pumpab väiksemaid laengukandjaid, elektrone, neutraalsetelt aatomitelt elektronidest

moodustunud energiamäe tippu. Seal, kus elektronid „välja pumbati“, moodustub „elektronide tühjadest pesadest“ peegelpildina energiamäe ruumalaga võrdne energiaorg.

Allika tähistus. Joonistel 1.8; 1.10 ja kogu kursuse ulatuses on alalisvooluelektriallikat tähistatud ringina, noolega selle sees. **Noole teravik näitab allikasisepinge vektori suunda. Allika poolt välisahelas tekitatava elektrivoolu suund on läbi välisahela plussklemmilt miinusklemmile.** Näidatud on allika väljundklemmid, mille positiivsele klemmile kogunevad elektronid ja negatiivsele jäävad aatomid, mille ühest või mitmest elektroni „pesast“ on elektronid lisaenergia abil ära rebitud. Algselt (joonis 1.8a) oli aatomi sees positiivse laenguga elektronide ja negatiivse laenguga prootonite laengute summa null.

Laengupaaride energia(jõu)välja teke. Joonis 1.11 selgitab, mis osatähtsus on elektriallika klemmidele kogunenud laengupaaridel, kui neid on üks (a), kolm (b) ja üheksa (c). Allika klemmide *A* ja *B* laengute absoluutväärtuste summa võrdub skeemi a korral $|+q_E|+|-q_E|=2q_E$ ehk kahekordse elektroni laengu suurusega, skeemi b korral $6q_E$ ja c korral $18q_E$-ga. Aatomilt laengute ärarebimine sarnaneb ragulka kummide väljavenitamisega – vinnastamisega, mille vabastamisel on nad suutelised kivikest lennutama; elektronid aga tühjadesse pesadesse tagasi minema ja salvestatud energia ära muundama.

Klemmide laengute hulk iseloomustab nende „laadimiseks“ rakendatud energiahulka, mis muundus laengu-energiaks, nende töötegemise võimeks. Viimast iseloomustatakse laengute energiavälja (jõuvälja) abil, mida ajalooliselt on hakatud nimetama **elektriväljaks**. Seega eksisteerib ümber iga elektriliselt laetud osa (elektrilaengu) eriline mateeria vorm, mida nimetatakse **elektriväljaks**.



Joonis 1.11. Elektriallika väljundklemmidevahelise laengute energiavälja teke

Laengute energiavälja (jõuvälja, elektrivälja) salvestatud energiakoguse määrab positiivsete ja negatiivsete laengute koguarv ehk laengupaaride kahekordne arv.

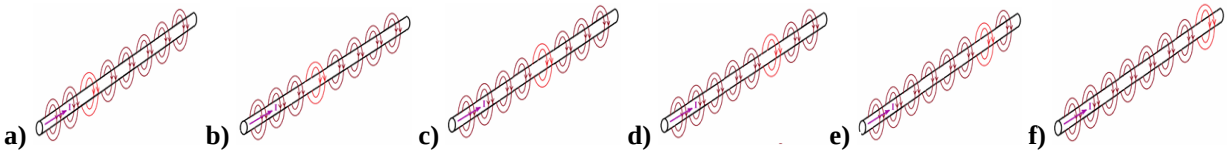
Joonisel 1.11 on ühe laengupaari korral kõige väiksema väljatugevusega välja kujutatud ühe väljajoone abil (a), kolme paari korral – kolme väljajoonega (b) ja üheksa laengupaari korral 9 väljajoonega (c). Nii on ka elektrivälja salvestatud energiakoguste suhe: üks, kolm ja üheksa.

Laengute energiaväli, elektri- ning magnetväli. Ajalooliselt on kujunenud olukord, et Maxwelli teooria alusel vaadeldakse ühtset elektromagnetvälja. Füüsikas ja elektriahelate teoorias vaadeldakse elektri- ja magnetvälja sageli eraldi. Piltlik ettekujutus, et elektri- ja magnetväli on laengu energiavälja kunstlikult lahutatud koosteosad, on jäänud piisava tähelepanuta.

Joonisel 1.12 on kujutatud elektronide liikumist elektrijuhis elektronide liikumise (voolu i) suunas, kui voolu suund on vasakult paremale. Lähteolukorras on punasega märgistatud elektron laenguga q_e vaatlejale A kõige lähem ja samm-sammult eemaldub vaatlejast A. Elektronide „rivis“ ümbritseb iga liikuvat elektroni tema isiklik energiaväli. Seetõttu aheldub vaatleja B mõõtemähisraamiga järjepidevalt mööduvate elektronide energiaväljade voog – magnetvoog. Vaatleja A näeb pidevalt viimase eemalduva elektroni laenguga q_e tasapinnaliselt kujutatud energiavälja (joonis 12b ja c). Siin iseloomustavad energiatiheduse jagunemist ruumis katkematud ringikujulised väljajooned, nn magnetvälja väljajooned. Vahelduvtoitepinge korral muutub elektronide liikumissuund iga perioodi vältel juhtmes. Seetõttu indutseerib ajas muutuv aheldusvoog raamis ajas muutuva potentsiaalide vahe, mida vaatleja B mõõteriistaga registreerib. Joonisel kujutatu põhjal määravad mõõtetulemuse põhiliselt mõõtemähisraami lähilaengute energiaväljade muutumiskiirused.

Joonis 1.12. Laengu energiavälja iseloomustamine elektri- ja magnetväljana. Vaatleja A vaatab piki juhet eemalduvaid laenguid ning näeb kujutist (b, c) ja vaatleja B registreerib temast vasakult paremale mööduvate elektronide energiavälja (d)

Joonisel 1.13 on kujutatud joonise 1.12 sarnast elektronide liikumist voolujuhis. Siin ei ole joonistel vaatlejaid A ja B näidatud. Joonistelt a...f näeme, et vaatamata laengute liikumisele vahetuvad mõttelise vaatleja B juures laengud. Punaste väljajoontega tähistatud laeng eemaldub sammhaaval paremale, mõõteriist aga registreerib vasakult pealetulevate uute laengute energiavälja (magnetvälja) muutumiskiirust ajas.



Joonis 1.13. Vaatleja B jälgib märgistatud elektroni liikumist vasakult paremale koos teiste mööduvate elektronidega ja nende energiaväljadega (a…f)

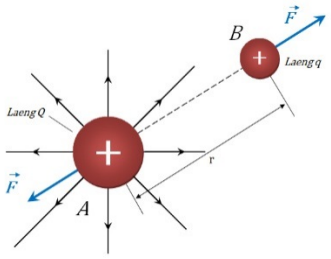
Kokkuvõte. Elektriliste nähtuste lahtimõtestamisel ja piltliku mudeli loomisel võib osutuda otstarbekaks lihtsustatud laengumudeli ja laengu energiavälja mõiste kasutamine. See võimaldab tõlgendada laengu energiavälja elektromagnetväljana. Seejuures saame seisva laengu välja vaadelda elektriväljana ja liikuvate laengute energiavälja magnetväljana.

Kuidas saaks laengut piltlikult kujutada? Üks võimalus on laengut kujutada energiapallina, kerana, mille sisemuses on suur energiatihedus. Ümber kera on väiksema tihedusega energiapilv. Kerast eemaldudes energiapilve tihedus väheneb. Michael Faraday võttis 19. sajandil kasutusele elektrivälja idee. Laetud keha (ka iga üksiklaengu) ümber on energiaväli, mille jagunemist ruumis kirjeldatakse väljajoonte abil, mida hakati kutsuma elektrivälja väljajoonteks. Lisaks laengu q ühikule C rahvusvahelises (SI) süsteemis kasutatakse ka mõisteid: lineaarne laengutihedus – λ, C/m; laengu pindtihedus – σ, C/m^2 ja ruumitihedus – ρ, C/m^3.

Sarnasus: ruumi keskele riputatud kuumutatud kerisekivi kiirgab ruumi soojusenergiat. Termomeetriga saame mõõta temperatuuri kivi ümbritsevas ruumis. Summaarset temperatuuri jagunemist nimetame temperatuuriväljaks. Sarnane on Maad ümbritseva atmosfääri õhurõhu väli. Need on skalaarväljad. Tõenäoliselt on sarnane on ka laengu energiaväli, mida saame ümbritsevas ruumis mõõta.

1.3. Elektrivälja füüsikaline olemus ja selle graafiline kujutus

Elektrivälja (seisva laengu energiavälja) iseloomustab igas punktis ning igal hetkel vektorsuuruse – elektriväljatugevuse $\vec{E}$ väärtus. Viimase mõõt on positiivsele ühikpunktlaengule mõjuv jõud (joonis 1.14). Mõõtühikuks on njuutonit kuloni kohta, N/C. Õhul on väljatugevuse kriitiline väärtus $3 \cdot 10^6$ N/C. Kui elektriväljatugevus ületab kriitilise väärtuse, toimub õhu elektriline läbilöök. Selle käigus kanduvad elektronid juhi aatomitelt õhku ja viimane hakkab elektrit juhtima (lisaenergia tõttu vabastatakse elektrone õhu aatomitest). Vabastatud elektronid kanduvad kiirenedes tugevas elektriväljas naaberaatomitele, kiirates seejuures liigset energiat valgusena ümbritsevasse keskkonda. Suvalisse punktlaengusse q mõjuv jõud võrdub korrutisega $q\vec{E}$ ja oleneb seega laengu q suurusest ja välja intensiivsusest $\vec{E}$. Elektriväli mõjub ka aatomisisestesse laengutesse, mistõttu erinevad ained elektriväljas polariseeruvad ja **tasakaalustavad** elektrivälja mõju.



Joonis 1.14. Elektriväli mõjutab elektrivälja toodud elektrilaengut *q* jõuga *F* ja vastupidi, q mõjutab laengut *Q* samasuure jõuga

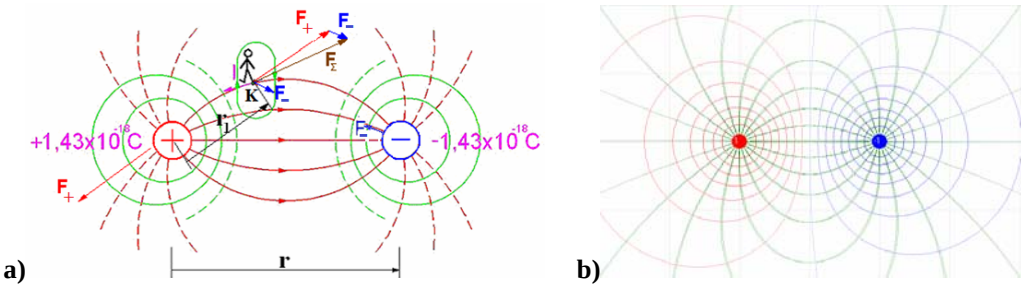
Elektriväljas ehk laengu energiaväljas on elektrienergia. Selle energia olemasolu avaldub elektriväljas laetud kehadele mõjuva jõuna, mis tekkib laengute energiaväljade liitumise tulemusel. Tavaliselt kujutatakse välja **elektriliste väljajoonte abil**. Väljajooned näitavad **elektrilise jõu mõjumise suunda**. Kokkuleppeliselt on väljajooned suunatud sellesse suunda, kuhu liiguksid elektriväljas positiivselt laetud osakesed. Väljajooned lähtuvad (hargnevad erinevatesse suundadesse) positiivse laenguga kehalt ja koonduvad negatiivse laenguga kehale. Suurema väljajoonte tihedusega piirkondades on suurem ka elektrivälja tugevus (energiatihedus).

Kuidas on võimalik koostada elektrivälja pilti? Pildi koostamisel saab lähtuda prantsuse füüsiku **Charles Coulombi** avastatud seaduspärasusest $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_a r^2}$,

kus q_1 ja q_2 on laengute absoluutväärtused C (kulonites); r – laengute vahekaugus, m; F – laengutevaheline jõud, N; ε_a – keskkonna absoluutne elektriline konstant $\varepsilon_a = \varepsilon\varepsilon_0$,

kus ε on keskkonna suhteline elektriline tegur, ε_0 – vaakumi elektriline konstant $\varepsilon_0 \approx 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ $C^2/N \cdot m$ (faradit meetri kohta) (F/m).

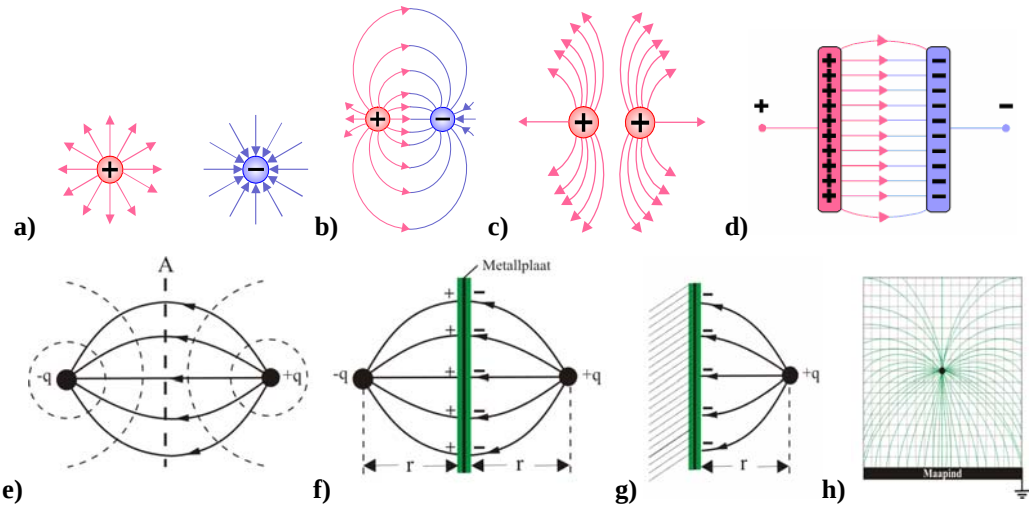
Olgu meil joonisel 1.15 vaadeldud punktlaengu paar, millel üheksa elektroni laeng võrdub $9/6{,}29 \cdot 10^{18} = 1{,}43 \cdot 10^{-18}$ kulonit (üks kulon on elektroni laengust $6{,}29 \cdot 10^{18}$ korda suurem). Joonisel 1.15a on kujutatud selle punktlaengupaari energiavälja (elektrivälja) arvutamise ideed Coulombi seaduse alusel. Joonisel 1.15b on sama väli modelleeritud arvutil, algsest erineva laengute vahekauguse korral. Kui teeksime mõttelise katse, paigaldades ühe elektroni ruumipunkti K, siis elektronile mõjub positiivse laengu (9 elektroni) läheduse tõttu suurem tõukejõud F_+ ja väiksem, kaugemal asuva negatiivse laengu tõmbejõud F_-. Nende kahe jõu summa F_Σ määrab elektroni liikumissuuna punktis K. Elektroni liikuma hakkamisel hakkab jõud F_+ kahanema ja F_- kasvama. Seetõttu liigub elektron edasi pruuni värviga kujutatud väljajoont pidi negatiivsele laengule. Selle tulemusel jõuab ühe laengupaari elekter tagasi oma „tühja pesasse“ ning kaugusel r jääb algsest üheksast järele 8 „tühja pesa“. Kui me oleksime kaaluta olekus ja „istuksime elektroni selga“, siis kulgeksime Münchhauseni kombel lähtepunktist K koos elektroniga negatiivsele laengule mööda pruuni värvi väljajoont. Selline elektroni (laetud osakese) liikumine ruumis on elektrivool. Voolu positiivne suund vastab elektroni liikumissuunale. Elektroni liikumisel eristatakse ta laengu energiaväljast nn magnetvälja, mille väljajoonte kokkuleppeline suund määratakse kruvireegli järgi. Elektroni liikumisega kaasneb laengu energiavälja elektrivälja komponendi vähenemine ja sama suur magnetvälja komponendi kasv. Elektroni naasmisel oma orbiidile, „tühja pesasse“, kiirguvad elektriväljas salvestunud liigsed energiakvandid ümbritsevasse keskkonda soojuskiirgusena.



Joonis 1.15. Üheksast elektron-prooton-laengupaarist koosneva punktlaengupaari jõuvälja (elektrivälja) arvutamise idee (a). Sama väli arvutil modelleerituna (b)

Arvutame voolutugevuse, kui üks elektron liigub valguse kiirusel (c ≈ 300 000 000 m/s), läbides 1 mm pikkuse teekonna oma „tühja pesasse“. Voolutugevus $I = q/t$. Ajavahemik 1 mm pikkuse teekonna läbimiseks on $t = r/c \approx 1\cdot10^{-3}/1\cdot10^{9} = 3{,}3\cdot10^{-12}$ s. Siit vool $I = \dfrac{6{,}29\cdot10^{-18}}{3{,}3\cdot10^{-12}} \approx 2\cdot10^{-6}$ A.

Joonisel 1.16 on kujutatud lihtsaimaid elektrivälju: a – üksildane positiivne ja negatiivne laeng; b – kaks erinimelist laengut; c – kaks samanimelist laengut; d – kahe paralleelse ja erinimelise plaadi homogeenne (ühtlaste omadustega) elektriväli. Pidevjoonega on näidatud elektrivälja tugevuse jooned (nn väljajooned). Joonisel 1.16e on vaadeldud elektrivälja punktlaengupaari vahel, joonisel 1.16f on välja sümmeetria tasapinda paigutatud kaks kokkusurutud metallplaati, mis laengute elektrivälja väljajooni ei muuda. Vasakpoolse metallplaadi välispinnale kogunevad elektronid, parempoolse plaadi välispinnale jäävad elektronide tühjad pesad. Kui eemaldada vasakpoolne plaat koos positiivsete laengutega, siis paremal oleva plaadi elektriväli ei muutu (g). Joonisel 1.16h on esitatud modelleerimistulemused, kus üks punktlaeng paikneb maapinnal oleva maandatud suure metallplaadi kohal. Seda punktlaengut võime kujutada samuti elektriallikana, mis on võimeline tekitama elektrivoolu, kui mingisse ruumipunkti paigutada näiteks elektron. Siis see elektron liiguks mööda väljajoont maandatud metallplaati ja sealt edasi maa sisse.



Joonis 1.16. Lihtsaimad elektriväljad: a – üksildane positiivne ja negatiivne laeng; b – kaks erinimelist laengut; c – kaks samanimelist laengut; d – kahe paralleelse ja erinimelise plaadi homogeenne (ühtlaste omadustega) elektriväli. Pidevjoonega on näidatud elektrivälja tugevuse jooned (nn väljajooned); e – elektriväli kahe punktlaengu vahel. Kriipsjoonega on näidatud sama potentsiaali jooned; f – laadimata metallplaat kahe punktlaengu vahel ei muuda välja pilti; g – plaadist paremal elektriväli ei muutu, kui eemaldada vasak negatiivne laeng. Negatiivse punktlaengu väljajoonte jagunemine maapinna lähedal (h)

Välja tugevus (intensiivsus). Elektriväli mõjutab elektrivälja toodud laengut q jõuga F, mis oleneb laengu q suurusest ja välja intensiivsusest. Elektrivälja intensiivsust võib hinnata jõu suuruse järgi, millega tõmmatakse või tõugatakse ühiksuurusega võrduvat elektrilaengut. Välja intensiivsust iseloomustab elektrivälja tugevus E.

$$E = \frac{F}{q}. \tag{1.1}$$

Laetud kehast eemaldumisel on väljajooned hõredamalt, st välja intensiivsus väheneb. Homogeenses elektriväljas on elektrivälja tugevus ühesugune välja kõikides punktides. Elektrilaengu q poolt tekitatud väljatugevus oleneb keskkonna elektrilistest omadustest, milles tekitatakse elektriväli, ja laengu q ning vaadeldava välja punkti B vahelisest kaugusest r

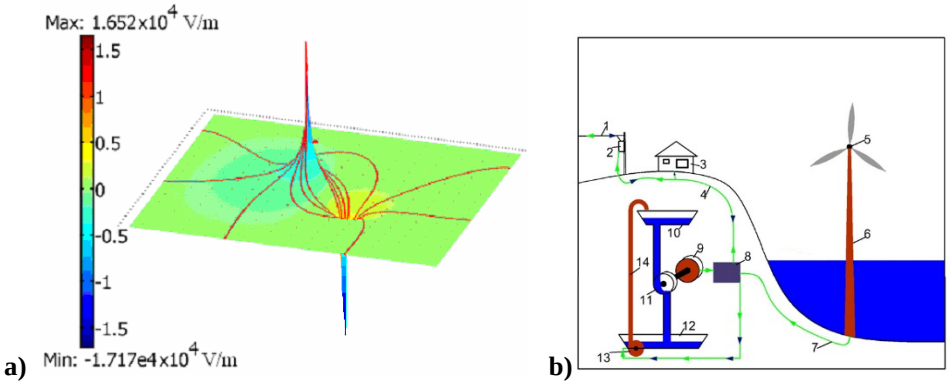
$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r^2}, \tag{1.2}$$

kus ε – konstantne keskkonda iseloomustav suurus, mida nimetatakse **suhteliseks dielektriliseks läbitavuseks**, $\varepsilon_0 = 8{,}86\cdot10^{-12}$ – **vaakumi elektriline konstant (tegur)**.

Elektriväli mõjub ka aatomisisestele laengutele, mistõttu aine elektriväljas polariseerub ja mõjutab omakorda elektrivälja. Sel juhul iseloomustatakse elektrivälja ka elektrilise induktsiooniga (elektrinihke vektoriga) *D*.

Vaakumi suhteline dielektriline läbitavus on võetud võrdseks ühega. Kõikide teiste ainete jaoks on ta suurem kui üks. Näiteks on portselanil 6, klaasil 7...8, destilleeritud veel 80 jne. Keskkonna suhteline dielektriline läbitavus näitab, kui **palju kordi väheneb mingis reaalses keskkonnas elektriväljas mõjuva elektrilise jõu suurus võrreldes vaakumiga.**

Joonisel 1.17a on modelleeritud ühe konkreetse laengupaari elektrivälja. Olgu meil ($1 \cdot 10^{12}$) elektronist ja samast kogusest prootonitest koosnev punktlaengupaar. Ühe kuloni suurune laeng sisaldab $6{,}29 \cdot 10^{18}$ elektroni. Seega negatiivse ja positiivse laengu suurused on $1 \cdot 10^{12}/6{,}29 \cdot 10^{18}$ elektroni = $0{,}16 \cdot 10^{-6}$ kulonit = 0,16 µC. Olgu laengute vahekaugus näiteks 1 mm. Joonisel 1.17a on näha, kuidas muutub elektrivälja tugevus ja potentsiaal laenguid ümbritsevas ruumis. Vasakul on positiivse laenguga elektronide ja paremal negatiivse laenguga prootonite koguarvuga võrdeline laeng. Seega on vasaku tipu kõrgus võrdeline elektronide „mäetipu“ kõrgusega ja parempoolse „orupõhja“ sügavus – tühjade elektronide pesade koguarvuga. Need laengupaari elektriväljatugevuse väärtused iseloomustavad ka iga ruumipunkti elektrilist potentsiaali ehk pinget (potentsiaalide vahet) rohelisega kujutatud nulltasandi suhtes. Kõik, mis jääb sellest tasapinnast kõrgemale („elektronide mäe“ sisse), on võrdeline kogu positiivse laengu elektrivälja salvestatud energiaga, ja kõik, mis jääb sellest tasapinnast allapoole (elektronide pesade „lehtrikujulise oru“ sisse), on võrdeline kogu negatiivse laengu elektrivälja salvestatud energiaga. See elektronide mäe ja elektronide pesade lehtrikujulise oru nulltasandist lähtuvalt määratud ruumalade absoluutväärtuste summa iseloomustab laengute elektrivälja salvestatud kogu elektrienergia suurust (töötegemise võimet).



Joonis 1.17. Elektriväli kahe punktlaengu vahel (a). Hüdroenergia salvesti – pumpelektrijaam (b)

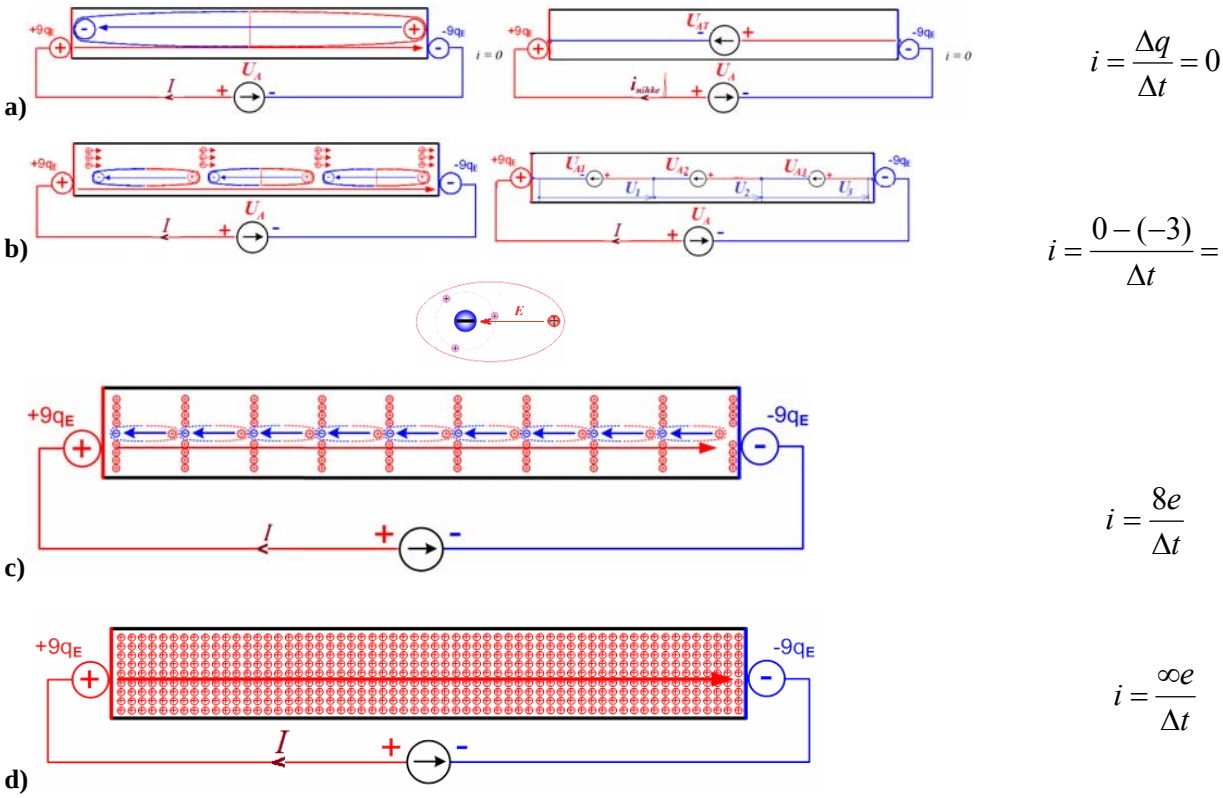
Oma olemuselt sarnaneb see joonisel 1.17b kujutatuga. Siin vaadeldakse näidet, kus masti 6 otsas oleva tuulegeneraatori 5 muutlikku väljundvõimsust ühtlustatakse näiteks vanasse kaevandusse ehitatud hüdroenergiasalvesti abil. Salvesti koosneb veega täidetud ülemisest 10 ja sama mahuga tühjast alumisest 12 veemahutist, hüdroturbiini 11 mahutitega ühendavast kahest rõhutorust, generaatorist 9 ja vett ülespumpavast pumbast 13 ning rõhutorust 14. Veel on joonisel toitevõrk 1, võrgu ühenduspunkt 2, tarbija 3, ühenduskaablid 4 ja 7 ning automaatikasüsteem 8. Kui hüdroturbiin paikneb meretasapinnas (0-tasandil), ülemine mahuti sellest 20 meetri kõrgusel ($h_1 = +20$ m) ja alumine $h_1 = -20$ m, siis veetasemete vahe (rõhukõrgus) $h = h_1 + h_2 = +20 - 2(-20) = 40\,\text{m}$. See veemahuti kõrgus merepinnast määrab ülemise mahuti vee potentsiaalse energia (töötegemise võime), mis käitab hüdroturbiini. Veemahutite kõrgustevaheline kaugus määrab vajaliku energiakoguse, et pump 13 pumpaks alumise mahuti vee ülemisse. Kui vee-energia muundamisel elektrienergiaks ja pumbaga ülespumpamisel oleks mõlema kasutegur 1, siis saaks sellisest süsteemist tõhusa energiasalvesti, mis võiks oluliselt siluda tuulegeneraatori puudusi püsiva elektrivarustuse tagamisel. Kahjuks on sellise süsteemikaod märkimisväärsed.

1.4. Tarbija lihtsustatud mudel. Laengute energia – (elektrivälja) vastastikmõju erinevate ainete korral

Kuidas käituvad erinevad ained elektriväljas? Allika laenguvälja – (elektrivälja) mõjule tekkib laengutevahelises keskkonnas (materjalis) alati niisama suur tasakaalustav vastumõju. Materjalis peab tekkima täpselt sama hulk laengupaare oma isikliku laengujõuväljaga – (elektromagnetväljaga). Joonisel 1.18 vaatleme erinevate omadustega materjalide käitumist elektriväljas.

Kuidas käituvad isoleerained elektriväljas? Vaatame seda kõige lihtsamal juhul, kui töösagedus on 0 Hz, seega alalispingega ahel. Olgu meil allikas, milles mehaanilise, keemilise või muu energia vahendusel on aatomitest eraldatud 9 elektroni, jättes allika teisele klemmile 9 prootonit. Allika 9 elektroni ja 9 prootoni laengute energiaväljа – elektriväljа – mõjule tekkib toiteallika klemmide laengutevahelises keskkonnas (materjalis) alati sama suur tasakaalustav väli (-mõju). Isoleermaterjalis tekkivad allika laengutega võrdsed, vastasmärgilised laengud oma tasakaalustava vastassuunalise energiaväljaga. Seega peab materjalis tekkima täpselt sama hulk laengupaare oma isikliku laenguenergia väljaga – elektriväljaga –, nagu see on lihtsustatult kujutatud joonisel 1.18 üheksat laengupaari omava allika korral.

Isoleermaterjal (dielektrik) on ideaalne tasakaalustava mõju tekitaja. Vastumõju tekkib 0 juhtivusliku voolu korral, kui me dipooli moodustamisega kaasnevat laengute nihkumist (nihkevoolu) ei arvesta (joonis 1.18a). Meie näite korral tekitab üks isoleermaterjali aatom allika 9 laengupaariga võrdsed 1×9 elektron-prooton-laengupaari dipooli (dipool – kahe suuruselt võrdse ja lähestikku asuva vastasnimelise laenguga süsteem), mille „isiklik“ elektriväli on täpselt võrdne ja vastassuunaline allika väljaga. **Dipooli saame asendada ekvivalentse allikaga**. See allikas on toiteallikaga **jadalülituses**, olles **tarbija talitluses**, mil **voolusuund (nihkevool) on vastupidine dipoolallika elektrivälja suunaga.** Kasutades etteruttavalt Kirchhoffi pingeseadust, saame: $U_A + U_{AT} = 0$ ehk $U_A = -U_{AT}$. Siin miinusmärk näitab, et tarbija allikas on tarbija talitluses sarnaselt laadima pandud autoakuga. Nihkevoolu suurus iseloomustab allika elektrienergia muundumist isoleermaterjalis algul elektrienergiaks, seejärel pärast toiteallika väljalülimist soojusenergiaks. Et tekkiv väike nihkevool kuumutaks materjali, peame ajaühikus tekitama nihkevoolu ülipalju kordi. See on võimalik vaid kõrg- ja ülikõrgsageduslike toiteallikate kasutamise korral.



$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = 0$$

$$i = \frac{0-(-3)}{\Delta t} = \frac{3e}{\Delta t}$$

$$i = \frac{8e}{\Delta t}$$

$$i = \frac{\infty e}{\Delta t}$$

Joonis 1.18. Elektriallika (laenguallika) laengute energiavälja (elektrivälja, punane väljajoon) mõju tasakaalustamine erinevates materjalides tekkivate vastassuunaliste laenguväljade summaga (sinine väljajoon): a – isolaatoris; b – väga halvas elektrijuhis; c – elektrijuhis; d – ülijuhis

Järeldused. Elektriallikas tekitab tarbija klemmidel elektrivälja, mis voolujuhtide korral paneb laengud liikuma ja tekitab elektrivoolu. Keskkonnal ja erinevatel materjalidel on elektronide aatomitelt ärarebimiseks vaja rakendada erinevat jõudu. Tavaoludes vabu elektrone ei esine. Neid saab tekitada elektronide energia suurendamisega. Isoleermaterjalides on elektronid aatomi tuumaga tugevalt seotud. Seetõttu on nad parimad allika laengupaaridele vastasmärgiliste laengupaaride ehk dipoolide tekitajad, millel on oma „isiklikud“ laengute energia(elektri)väljad. Ka dipoole võime lugeda elektriallikaks, millel on isiklik, imeväike töö-tegemisvõime, mis toimivad tarbija talitluses (allikasisepinge ja potentsiaalilang on vastassuunalised ning

potentsiaalilang ja voolusuund langevad kokku). Välise välja kadumisel toimib dipool allikana ja elektronid liiguvad tagasi tavaorbiidile. Summaarne laeng muutub nulliks ja elektriväli kaob. Seejuures liigub elektron allika poolt algselt põhjustatud liikumisega vastupidises suunas. Dipooli teke ja kadumine sarnaneb noole lennutamisel vibu vinnastamise ja vabakslaskmisega.

Kuidas käituvad halvad elektrijuhid elektriväljas? Vaatleme seda kõige lihtsamal juhul, kui töösagedus on 0 Hz. Halb elektrijuht ei ole ideaalne vastuvälja tekitaja. Tasakaalustav vastuväli tekkib väikese voolu korral (joonis 1.21b). Selle näite korral tekitavad tarbija (elektrijuhi) kolm aatomit allika 9 laengupaariga võrdsed 3×3 elektron-prooton-laengutepaari – kolm dipooli (joonisel 1.18b on eraldi näidatud), mille „isiklike“ elektriväljade summa on täpselt võrdne ja vastassuunaline toiteallika väljaga. Sellega kaasneb kolme väliskihi elektroniga võrdeline elektrivool. Siin liiguvad allikalt kolm elektroni lähiaatomi välisorbiidile. Lähiaatomi väliskihi elektronidele rakendub allika elektriväli, rebides sealt välja kolm elektroni. Nii liiguvad kõigi kolme aatomi elektronid üheaegselt naaberaatomi välisorbiidile ja parempoolselt aatomilt allika miinusklemmile. Meie oletusliku näite korral jõuavad elektronid esmalt aatomi välisorbiidile, kiirates elektriväljas kiirenduse käigus salvestatud liigse energiakoguse – energiakvandid – keskkonda. Nii tekkib elektrijuhis kolme elektroni laenguga võrdeline elektrivool ja vaadeldavas halvas elektrijuhis soojusenergia eraldumine kiirgusena. Ka siin toimivad dipoolid tarbija talitluses oleva allikana. Seega tekkivad toiteallika **välisahelas** kolm jadalülituses olevat allikat. Nende vastassuunaliste laenguväljade summa võrdub toiteallika laenguväljaga. Nendel tarbija talitluses olevatel allikatel on sisepinge ja potentsiaalilang vastassuunalised. Halva elektrijuhiga ahelas juhtivusliku ja nihkevoolu suurus iseloomustavad allika elektrienergia muundumist juhtmematerjalis soojusenergiaks.

Hea elektrijuht on halb vastumõju tekitaja. Tasakaalustav vastumõju tekkib suurema voolu korral. Mainitud näite korral tekitavad üheksa aatomit allika 9 laengupaariga võrdsed 9 x 1 elektron-prooton-laengupaari – dipooli, mille „isiklike“ elektriväljade summa on täpselt võrdne ja vastassuunaline allikaväljaga. Sellega kaasneb kaheksa elektroniga võrdeline elektrivool. Siin moodustab üks elektron siseorbiidil üheksast ühe prootoniga dipooli, ülejäänud 8 elektroni osalevad elektrivoolu tekkes. Hea elektrijuhiga ahelas juhtivusliku ja nihkevoolu suurus iseloomustavad ka allika elektrienergia muundumist juhtmematerjalis soojusenergiaks.

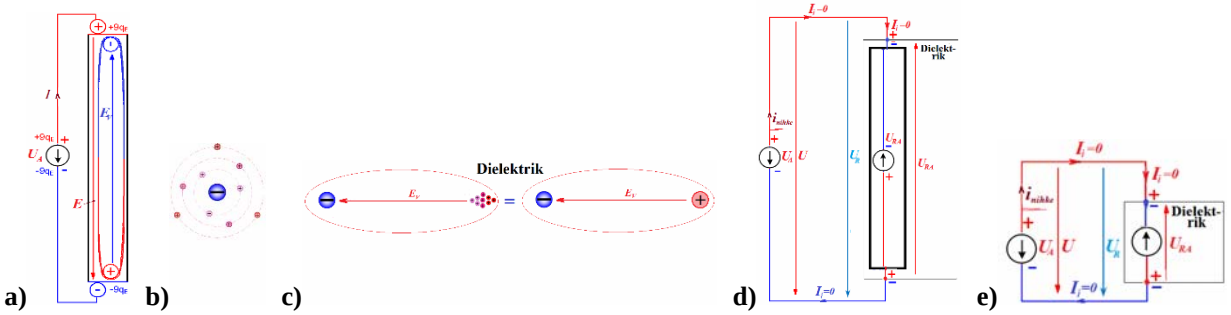
Ülijuht. Kui ülijuhile rakendatakse väline elektriväli, siis annavad aatomid ilma dipoole moodustamata ära suure koguse elektrone, tekkib laengute liikumine – elektrivool. Seega on ülijuht väga halb vastumõju tekitaja. Tasakaalustav vastumõju tekkib väga suure voolu korral, siis kaotab ülijuht ülijuhtivad omadused. Selle näite korral annab ülijuht ülijuhtivust tagavad elektronpaarid ära, ilma et moodustuksid allika 9 laengupaariga võrdsed elektron-prooton-laengupaarid – dipoolid, mille „isiklike“ elektriväljade summa oleks täpselt võrdne ja vastassuunaline allikaväljaga. Sellega kaasneb ajaühikus väga suure hulga elektronide arvuga võrdeline elektrivool – lühisvool, mida tasakaalustab ainult elektriallika sisetarbija. Allika energiamuundumist välisahelas (ülijuhis) ei toimu, see toimub allika sees, mistõttu allikas kuumeneb.

Järeldused: kui suudetakse tekitada elektrivälja (laengute energiavälja), siis suudetakse ka keskkonnas panna liikuma laenguid – tekitada elektrivoolu! Elektronide ja positiivsete või negatiivsete ioonide liikumist nimetatakse elektrivooluks. Elektrivoolu suunaks loetakse positiivsete laengute liikumise suunda. Keskkonnal ja erinevatel materjalidel on elektronide ärarebimiseks aatomitelt vaja rakendada erinevat jõudu. Tavaoludes vabu elektrone ei esine. Neid saab tekitada elektronide energia suurendamisega. Isoleermaterjalid on parimad laengupaaride – dipoolide tekitajad, millel on oma „isiklikud“ laengute energiaväljad – elektriväljad. Ülijuhtivad materjalid materjalisiseseid laengupaare – dipoole praktiliselt ei tekita.

Eespool vaatlesime vastastikmõju allika ja allika väljundis oleva keskkonna laengu energiaväljade, elektriväljade, näitel. Elektrotehnikas asendatakse ahelate teoorias laengute energiaväljad (elektri- ja magnetväljad) allikate ning tarbijatega, kusjuures laengute elektriväli asendatakse kondensaatori ja magnetväli induktiivpooliga. Seepärast vaatleme järgnevalt vastastikmõju mitte laengute energiaväljade, vaid toiteallikate ja tarbijates tekkivate allikate vahel.

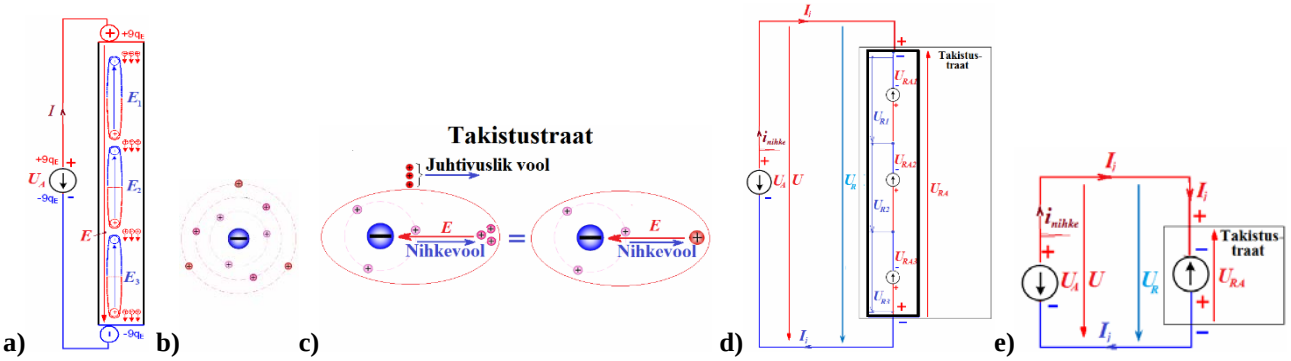
Dielektrik. Kui dielektrik ühendada 9 laengupaariga allikaga, siis meie oletusliku lihtsustatud mudeli puhul tekkib 9 elektroniga dielektriku aatomist dipool, mille laengute energiaväli (elektriväli E_V) on võrdne ja vastassuunaline allikaväljaga E (joonis 1.19a). Kui dielektrik pole allikaga ühendatud, siis on ta oletuslikul

aatomil (joonis 1.19b) erinimelised laengud tasakaalus ja nende energiaväli E_V puudub. Dielektriku tuuma ja elektronide vahelise tugeva tõmbejõu tõttu moodustub allikaga ühendamisel toiteallika elektrivälja mõjul dipool (joonis 1.19a ja c). Selle käigus toimub tuuma elektrostaatilises väljas elektronidel footonite neeldumine ning osa allika elektrienergiast muundatakse dipooli elektrienergiaks. Sellega kaasneb hetkelise nihkevoolu teke (joonis 1.19d). Nihkevoolu suurus i_{nihke} iseloomustab dipooli salvestuva elektrienergia kogust. Siin ühtib nihkevoolu suund tavatarbija juhtivusliku voolu i_j suunaga. Dielektriku korral $i_i = 0$. Seega sarnaneb dipooli teke allika tekkega. See on allikas toiteallikaga jadalülituses ja toimib allikana tarbija talitluses. Siin salvestub muundatav toiteallika energia alul liikuvate elektronide magnetvälja energiaks, seejärel tasakaalu saavutamisel tekkiva dipooli elektrivälja (energiavälja) energiaks. Kui toiteallika pinge muutub nulliks või klemmid ühendatakse lahti dielektriku klemmidelt, siis kohe tekkib algsega **vastassuunaline** nihkevool i_{nihke}. Elektronid liiguvad aatomi tühjadesse pesadesse, muundades selle käigus salvestatud elektrienergia soojusenergiaks. See toimub tuuma elektrostaatilises väljas elektronide footonite kiirgamisena dielektrikus (liigsete energiakvantide väljakiirgamise teel). Jooniselt 1.19d selgub, et dielektrikul võrdub potentsiaalilang $\boldsymbol{U_R}$ vastasmärgilise dielektriku allikasisepingega U_{RA}. Seega, $\boldsymbol{U_R = -U_{RA}}$ ja ka toiteallika pinge $\boldsymbol{U = -U_{RA}}$. Meie näites on toiteallikas ideaalne, kaovaba, seetõttu allikasisepinge ja -väljundpinge on võrdsed $\boldsymbol{U_A = U}$.



Joonis 1.19. Allika teke tarbijas, kui tarbijaks on dielektrik: a – dipooli teke; b – dielektriku aatomi oletuslik mudel; c – dipooli tekke selgituseks; d – dipooli asendamine allikaga; e – dielektriku asendamine jadalülituses tarbija talitluses oleva allikaga

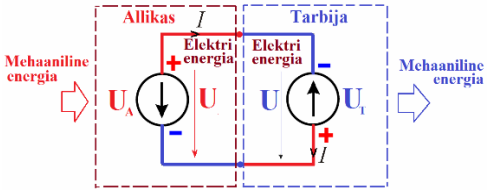
Takistustraat. Kui takistustraat ühendada 9 laengupaari omava allikaga, siis meie oletusliku lihtsustatud mudeli puhul tekkib kolm kolme elektroniga traadi aatomist dipooli, mille laengute energiaväljade (elektriväljade E_1, E_2 ja E_3) summa E_V on võrdne ja vastassuunaline allikaväljaga E (joonis 1.20a). Lisaks tavatarbija juhtivusliku voolu I_j suunaga nihkevoolule i_{nihke} tekkib ka kolme elektroniga võrdeline juhtivuslik vool I_j. Ka siin sarnaneb kolme dipooli teke kolme allika tekkega (joonis 1.20d).



Joonis 1.20. Allika teke tarbijas, kui tarbijaks on takistustraat: a – dipoolide teke; b – takistustraadi aatomi oletuslik mudel; c – dipoolide tekke selgituseks; d – dipoolide asendamine allikatega; e – takistustraadi asendamine tarbija talitluses jadalülituses oleva allikaga

Toiteallika pinge kadumisel tekkib kohe algsega i_{nihke} **vastassuunaline** nihkevool. Elektronid liiguvad aatomi tühjadesse pesadesse, muundades selle käigus dipoolidesse salvestatud elektrienergia soojusenergiaks. Jooniselt 1.20d selgub, et traadi potentsiaalilang $\boldsymbol{U_R}$ võrdub kolme osapotentsiaalilangu summaga ja on vastasmärgiline takistustraadi kolme allikasisepinge summale $\boldsymbol{U_{RA}}$. Seega, $\boldsymbol{U_R = -U_{RA}}$ ja ka toiteallika pinge $\boldsymbol{U = -U_{RA}}$. Meie näites on toiteallikas ideaalne, kaovaba. Seetõttu allikasisepinge ja välispinge on võrdsed $\boldsymbol{U_A = U}$.

Allika ja tarbija elektriline vastastikmõju. Siin (joonis 1.21) tekitab allikas tarbijas toiteallikaga jadalülituses oleva allika, mis on tarbija talitluses olev energiamuundur. Joonis 1.21 illustreerib generaatori ja mootori näitel, kus allikana toimivas generaatoris muundatakse mehaaniline energia elektrienergiaks. Tarbija talitluses olevas teises generaatoris (mootoris) toimub elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks.

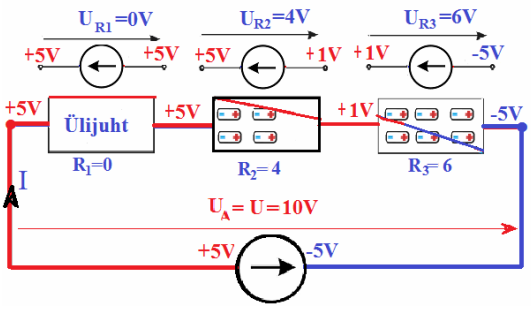


Joonis 1.21. Energiamuundamine allikas ja tarbijas

Seega on mootor tarbija talitluses olev allikas (generaator). Iga tarbija ühendamisel allikaga tekkib tarbijas tasakaalustav tarbija talitluses olev allikas mingi kindla energiamuundamise intensiivsuse, voolu, väärtuse juures.

Märkus: skeemil näitab nool allikat tähistava ringi sees allikasisepinge vektorite U_A ja U_T suunda.

Elektrivoolu tekitavad elektriallikad – elektrilaengute laadijad. Elektriallikates „kuhjatakse“ allika väljundklemmidele erimärgilisi laenguid. Need laengud põhjustavad laengute energiavälja (elektrivälja) tekke, mis omakorda tekitab allika klemmidevahelises keskkonnas laengute liikumise – elektrivoolu. Joonisel 1.22 on kujutatud elektriahel, mis sisaldab ideaalset ülijuhti ja ka head ja halvemat elektrijuhti. Viimaste aatomid moodustavad välise elektrivälja mõjul dipoolid: mida väiksem elektriline takistus, seda väiksemad. Joonisel 1.22 on kõik tinglikult kujutatud dipoolid ühesuurused, võrdsete vastuenergiaväljade tekitajatena

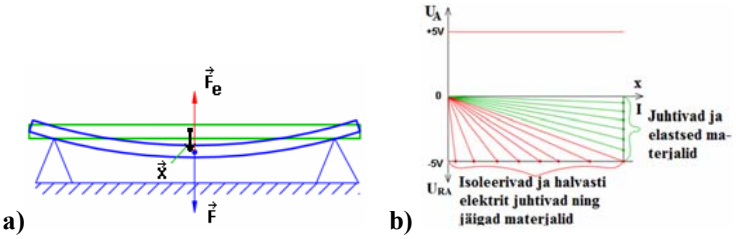


Joonis 1.22. Elektriahel, mis sisaldab ideaalset ülijuhti ja head ning halba elektrijuhti. Potentsiaalide jagunemine ahela elementidel

Vastastikmõju idee lahtimõtestamiseks on skeemis kujutatud allika klemmidele kogunenud kõigi, nii positiivsete kui ka negatiivsete laengute töötegemisvõimet (potentsiaali) voltides mõõdetava suurusena. Allika kogu energiamuundamis-(töötegemisvõime) on võrdne potentsiaalide vahega ehk allikasisepingega $U_A = +5 – (–5) = 10$ V. Siin ei tekki ideaalses ülijuhis allikat. Toiteallika mõju tasakaalustavad hea ja halvem elektrijuht oma dipoolide vastuenergiaväljade summaga. Tarbija talitluses oleval kahel allikal tekkivad ahela voolusuunaga vastassuunalised 4 ja 6 V suurused allikasisepinged. Nende allikate väljundpinged, mida võib ka **potentsiaalilanguks** nimetada, on niisama suured, kuid nende suund ühtib voolu suunaga. Viimane on põhitunnus, et allikas on tarbija talitluses.

Mõju ja vastumõju. Elektriahelate matemaatilised võrrandid kirjeldavad valitsevat tasakaalu nii staatiliste kui ka dünaamiliste protsesside korral. Nende võrrandite alusel pole lihtne ette kujutada, mis mida põhjustab ja millises ajalises järjekorras see toimub. Näiteks lihtne küsimus: **kumb on enne, kas pinge või vool ja kas on see ükskõik?** Sellele erilist tähelepanu ei pöörata ja õppija jaoks on küsimus jäänud umbmääraseks. Vaatame mõju ja vastumõju teket mehaanikanäite varal (joonis 1.23). Kahel toel paikneva tala vertikaalse läbipainde x algpõhjuseks on talale rakendatud jõud $\boldsymbol{F}$. Tekkiva vertikaalse läbipaine $\boldsymbol{x}$ väärtus oleneb materjali jäikusest ja rakendatud jõu $\boldsymbol{F}$ suurusest. Tasakaal tekkib, kui vastupidise suunaga elastsusjõud F_e võrdub talale rakendatud jõuga F. Elastsusjõu suund on alati vastupidine deformeeritava keha osakeste nihkevektori suunaga. Keha deformatsiooni põhjuseks on ühtede osakeste liikumine teiste osakeste suhtes (deformeerimisel aatomite ja molekulide vahelised kaugused muutuvad ning **elektrilised tõmbe- ja tõukejõud püüavad aatomeid algasendisse viia**). Deformatsiooni tagajärjeks on elastsusjõu tekkimine. Elastsusjõu projektsioon nihke suunal on Hooke´i seaduse alusel $F_e = –kx$, siin k on tala jäikus. Samamoodi toimib vastastikmõju ka elektriahelates. Kuna voolu põhjustab allika laengute energiaväli (elektriväli), mille

töötegemise võime kirjeldamiseks kasutatakse klemmide potentsiaalide vahe, allikasisepinge ning väljundpinge mõisteid, siis mõju ja vastumõju tasakaal tekkib sellise vooluväärtuse puhul, kui ahelas tekkivate allikate laengute energiaväljade summa on täpselt võrdne ja vastassuunaline allika omaga.



Joonis 1.23. Kahel toel paikneva tala vertikaalne läbipaine (a). Materjalide erinev võime välise elektrivälja mõjul luua vastuelektrivälja ja jõu *F* mõjul elastsusjõudu (b)

Elektriahela (joonis 1.20e) sarnasuse põhjal on nihe $x = -F_e / k$ sarnane vooluga, elastsusjõud tarbija allikasisepingega U_{RA} ja jäikus takistusega R. Seega, $I = -U_{RA} / R = U_A / R$ ja ilma sisetarbimiseta allika korral $I = U/R$. Seega võib Hooke´i seadust vaadelda Ohmi seadusena tala tarbeks.

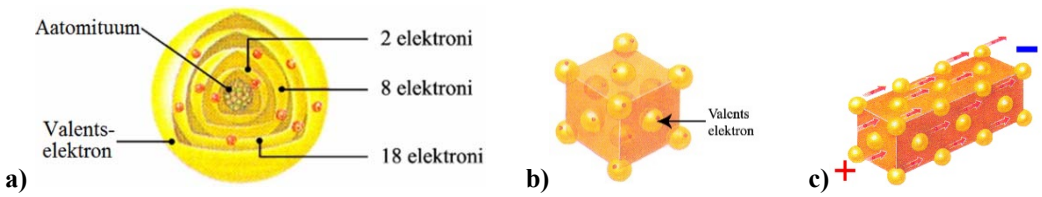
Näitest selgub, et mehaanikas on mõju ja vastumõju üheselt mõistetavalt ära seletatud. Elektriahela korral põhjustab ahelas tekkiva elektrivoolu allika klemmidevaheline elektriväli, ahelateooriast lähtuvalt potentsiaalide vahe ehk allikasisepinge U_A. Vool suureneb tasakaalu tekkimiseni, mil algpõhjus – mõju U_A muutub võrdseks tasakaalustava mõjuga U_{RA} – tarbija allikapingega. Ohmi seadus ühe allika ja ühe tarbija korral on $I = -U_{RA}/R = U/R$, kus U on allikaväljundpinge ehk tarbija potentsiaalilang.

Kui mehaanikas tekkib algjõule vastumõjuna jõud, siis ahelate teoorias on olukord umbmäärasem. Kasutatakse selliseid mõisteid, nagu allikasisepinge, allikapinge ehk allikaväljundpinge (allika klemmipinge) – need kutsuvad ahelas esile voolu. Voolu suund on läbi välisahela plussklemmilt miinusklemmile. Voolu tekkega kaasneb voolusuunalise tarbija allikapinge teke. Ka klassikalises elektrotehnikas, kus elektroni laengut peetakse negatiivseks, kuid voolu suunda loetakse allika plussklemmilt miinusklemmile, kasutatakse umbmäärast mõistet pingelang, sisuliselt potentsiaalilang, mis suunalt langeb kokku voolu suunaga. Kõik need suurused kirjeldavad potentsiaalide vahet ja mõõdetakse voltides. Selline olukord elektrotehnika õppimist ei lihtsusta, vaid muudab keerulisemaks.

Eraldi väärib märkimist, et Hooke´i seadus langeb sisuliselt kokku Ohmi seadusega. Põhjus on ilmne – nii mehaanikas materjali omadused (jäikus ja elastsus) kui ka elektriahelates (halb elektrijuht – isolaator ja hea elektrijuht – ülijuht) on omadused määratud aatomi- ja molekulisiseste laengutevaheliste vastumõjudega. Seda joonis 1.23 tinglikult ka kujutab.

Elektrivool vaskjuhtmes. Joonisel 1.22 oli kasutatud allika ja materjalide siseehituse oletuslikku mudelit, et selgitada allikavälja mõju ja materjalides tekkiva vastuvälja ideed ning voolu teket. Vase aatomil (joonis 1.24) paiknevad elektronid tegelikult neljas kihis: esimeses – 2, teises – 8, kolmandas – 18 ja neljandas – 1 valentselektron (aatomi elektronkatte väliskihi paardumata spinniga elektron). Vase aatomi tuumas on 35 neutronit ja 29 prootonit. Väliskihi valentselektronid võivad lähiaatomitega kohti vahetada välise jõu mõjul, näiteks elektrivälja mõjul. Tahkete materjalide aatomid moodustavad rühmi – kristalle (joonis 1.24b). Vaskjuhis paiknevad kristallid tihedalt koos. Elektrivälja jõudude mõjul saavad valentselektronid hakata liikuma aatomilt aatomile, tekitades elektrivoolu (joonis 1.24c).

Elektronide liikumine. Vase aatomil on üks valentselektron (molekulides osalevad valentselektronid keemilise sideme moodustamises). Kui vaskjuhe ühendada elektriallikaga, siis valentselektronide voog liigub elektrivälja jõu mõjul plussklemmilt miinusklemmile, tekitades elektrivoolu (joonis 1.24c).



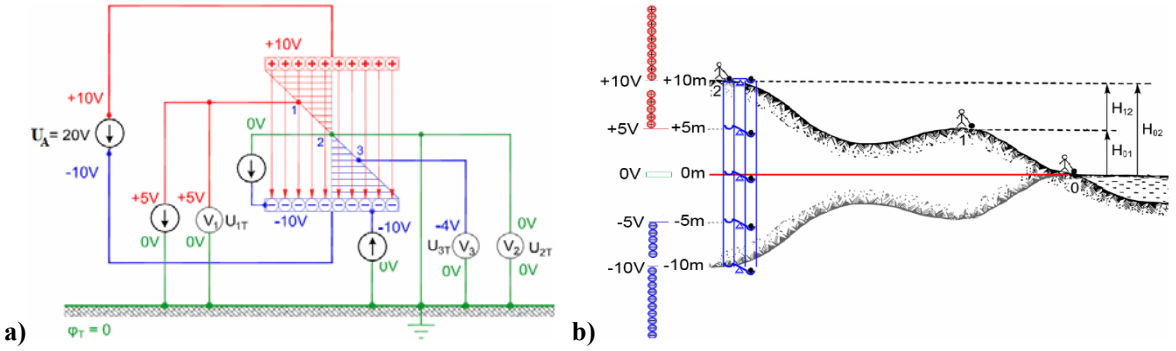
Joonis 1.24. Vase aatom (a), kristall (b) ja elektronide liikumine vaskjuhtmes (c)

1.5. Elektrilaengute töötegemisvõime. Elektripotentsiaal

Elektrivälja energia. Laengute energiaväljal, nn elektriväljal, on kindel energiavaru, st võime teha tööd. Elektrivälja energiat saab kasutada, kui viia elektrivälja mingi täiendav laeng. Välja jõudude toimel hakkab see laeng liikuma väljajoonte suunas, tehes teatud hulga tööd. Laengupaari energiavälja potentsiaalne energia oleneb laengute vastastikusest asendist ja nende asendist välises energiaväljas. Mingis kindlas asendis oleva laengupaari potentsiaalne energia võrdub tööga, mida teeb jõud, mis viib laengupaari sellest asendist teise asendisse, milles ta kokkuleppeliselt on loetud nulltasandil olevaks. Laengupaaril on energiavaru (töövaru), mida võib tagasi saada. Elektriahelate vaatlusel laengu energiaväljas on otstarbekas valida nulltasandiks **maa**, elektromagnetkiirust vaadeldes – **lõpmatus**. Kahest punktlaengust q_1 ja q_2 koosneva laengupaari potentsiaalne energia $E = q_1 q_2 / 4\pi\varepsilon_0 r$, kus r on laengutevaheline kaugus ja ε_0 on elektriline konstant.

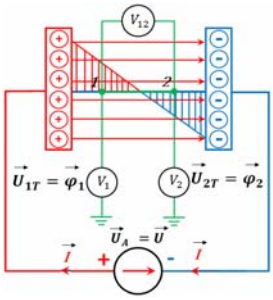
Elektripotentsiaal. Et iseloomustada energiat, mis on salvestatud igasse elektrivälja punkti, on kasutusele võetud spetsiaalne mõiste – **elektripotentsiaal (ladina keeles *potentia* jõud, võimsus, varjatud võimalused, võimalik varu) φ.** Elektripotentsiaali ühikuks on volt, V.

Elektrivälja antud punkti elektripotentsiaal on võrdne tööga, mida võib sooritada välja jõud positiivse ühiklaengu teisaldamisel sellest välja punktist välja piiride taha – nulltasandile, millel on nullpotentsiaal. Nullpotentsiaal on Maal. Seega võime elektriskeemis asetada positiivse potentsiaaliga punkti ja maa vahele elektriallika, millel maaga ühendatud klemmil on 0-potentsiaal ja vaadeldava punkti klemmil „+"-potentsiaal. Kui vaadeldava punkti ja maa vahele ühendada ülisuure sisetakistusega voltmeeter, siis näitab see allika potentsiaalide erinevust maa suhtes. Kui ühendada voltmeetri asemele väikese võimsusega valgustõhus indikaatorlamp, siis hakkab see piisava potentsiaalide erinevuse korral lambi koosteosade vahel põlema. Elektripotentsiaali mõiste sarnaneb raskusjõuväljas punktmassi kaalu ja kõrgusega maapinnast. Joonisel 1.25 punktmassi – kuuli tõstmiseks lähtepunktist 0 punkti 2 on vaja teha (kuul paikneb H_{02} tasandil) palju rohkem tööd, kui tema viimiseks punkti 1. Seepärast võib H_{02} tasandile tõstetud kuul laskumisel teha suurema töö kui tasandile H_{01} tõstetud kuul. Kuuli töötegemise võime suurus oleneb **nulltaseme valikust.** Olgu nulltasandiks valitud kõrgus +10 m. Paigutame sinna võrdõlgse kangisüsteemi, mille paremal kaalukausil on identne kuul. Asetades ülestoodud kuuli vasakule kaalukausile, jääb kangisüsteem tasakaalu. Seega puudub siin 10 m kõrgusele tõstetud kuulil töötegemise võime. Kui nulltasandiks on võetud kõrgus +5 m, siis lastes kuulil langeda sellele tasandil oleva võrdõlgse kangisüsteemi vasakule kaalukausile, lennutatakse paremal kaalukausil olev identne kuul H_{02} tasandile, ehk 5 m kõrgusele. Valides nulltasemeks –10 m, lennutatakse paremal kaalukausil olev identne kuul samuti H_{02} tasandile ehk 20 m kõrgusele. Raskusjõuväljas võetakse nulltasemeks, millest toimub kõrguse arvestus, harilikult mere tase (näiteks öeldakse, et mingi koht asub 200 m üle merepinna). Täpselt samuti on otstarbekas võtta laengu energiaväljas (elektriväljas) nullpotentsiaaliks maapinna potentsiaal (joonis 1.25a). Seega punkti 1 potentsiaal iseloomustab energiavälja töötegemisvõimet maa ehk nullpotentsiaali suhtes.



Joonis 1.25. Elektrivälja potentsiaalide vahe (a) sarnaneb kõrguste vahega (b) maa gravitatsiooniväljas

Seega, $\varphi_1 = U_{1T}$. Siin indeks T (ladina keeles *Terra*) tähistab maapotentsiaali. Potentsiaalide vahet mõõdetakse voltmeetriga. Lõpmata suure sisetakistusega voltmeetriga on võimalik mõõta näiteks välja punkti 1 potentsiaali maa suhtes. Kui me ühendaksime aga allika miinuslaenguga klemmi maaga, mis seetõttu omandab 0 V potentsiaali, siis tänu allikale, mis arendab 20 V suurust potentsiaalide vahet, muutub plussklemmi potentsiaal võrdseks +20 voldiga. See sarnaneb olukorraga, kus joonisel 1.25b valime nulltasandi 10 meetri sügavusele allapoole merepinda. Joonis 1.26 kujutab kondensaatori plaatidevahelise homogeense elektrivälja punkt 1 ja 2 potentsiaalide ja nende potentsiaalide vahe mõõtmisideed lõpmata suure sisetakistusega voltmeetri abil.



Joonis 1.26. Potentsiaalide vahe *U* ja potentsiaalide mõõtmisidee illustratsioon homogeense elektrivälja punktide 1 ja 2 vahel

1.6. Voldiga mõõdetavad suurused. Elektriallikas, tarbija ja salvesti

Ajalooliselt on kõik neli voldiga mõõdetavat suurust (elektromotoorjõud, potentsiaal, pinge, elektriväljatugevus) omandanud sõltumatud nimed. Elektriallika energiamuundamise (töötegemise) võime (klemmide potentsiaalide erinevuse) iseloomustamiseks võttis **A. Volta** kasutusele elektromotoorjõu mõiste, mis avab keeleliselt hästi asja olemuse. Hiljem võeti tarbija tasakaalustava vastumõju kirjeldamisel saksa, vene ja eesti keeles kasutusele elektripinge ja pingelangu mõisted, mis kahjuks ei ava üheselt tarbija vastumõju olemust. Märksa korrektsem on potentsiaalilangu mõiste. Inglise keeles tuletati uus mõiste A. Volta nimest ja tema allikast – *voltage* – eesti keeles voltaaž. Elektri olemuse lihtsamaks mõistmiseks oleks hea, kui kõigi voldiga mõõdetavate füüsikaliste suuruste korral lähtutaks elektrile – elektrienergiale – laengule – laenguenergiaväljale sisuliselt kõige lähemast mõistest. Selleks võib lugeda **potentsiaali.** Võttes potentsiaali kõigile neljale mõistele ühiseks perenimeks, saaksime kolmeks uueks nimeks **allika potentsiaalide vahe ja tarbija potentsiaalilang ning potentsiaalilang pikkusühikule.** Energiaga mitteüheselt seotud pingemõistest võiks üldse loobuda.

Valdavalt on elektrinähtused seotud allikate ja tarbijatega, seetõttu üldelektrotehnika kursuse raames piisaks täielikult neljast loetletud potentsiaalist lähtuvast mõistest (tabel 1.1, alumine rida). See veendumus on koostajal kahjuks tekkinud pärast õpiku käsikirja valmimist. Käsikirja kirjutamise ajal oli ühise perenime valiku aluseks: **pinge, voltaaž** ja **elektromotoorjõud.** Seega võiks elektriväljatugevust nimetada ka **pingeks** (ehk **voltaažiks) pikkusühikule** ja tähistada tähisega *E*. Igapäevaelus on mugavad lühivormid. Võimalik on näiteks: potentsiaal = **maapinge**, allikaväljundpinge = **allikapinge**, potentsiaalilang tarbijal = **potentsiaalilang**, elektriväljatugevus = **pingetugevus.**

Tabel 1.1

Voldiga mõõdetavate suuruste nimevarjundid

Klassikaline	Elektromotoorjõud	Allika klemmipinge	Potentsiaal	Tarbija allikasisepinge	Pingelang	Elektriväljatugevus
Soovitatav	Allikasisepinge	Allikaväljundpinge = pinge	Pinge (maa suhtes) = maapinge	R, L – allikapinge; C – vastuallika U	Potentsiaali-lang	Pinge pikkusühikule = pingetugevus
Soovitatav	Allika sisevoltaaž	Allika väljundvoltaaž = voltaaž	Voltaas (maa suhtes) = maavoltaaž	R, L – voltaaž ja C – vastuvoltaaž	Potentsiaali-lang	Voltaaž pikkusühikule = voltaažitugevus
Soovitatav	Allika potentsiaalide vahe	Allika väljund-potentsiaalide vahe	Potentsiaal	Tarbija allikapotentsiaalide vahe	Potentsiaali-lang	Potentsiaalilang pikkusühikule

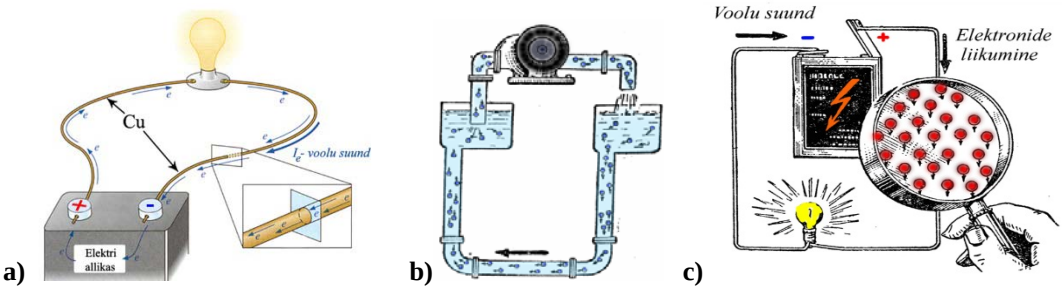
Arvamused voldiga mõõdetavate suuruste perenime suhtes. 2011. a. väljendas oma arvamust 98 mitteelektriala üliõpilast. **47%** eelistas **allikapinge** ja tarbija **allikapinge** ning **22% klassikalist** elektromotoorjõu ja pinge kasutamist. **15% allikavoltaaži** ja **tarbija allikavoltaaži** kasutamist. **8%** eelistas **EMJ** kasutamist. **2%** eelistus puudus. Ühiseks perenimeks pakuti veel ka **antivoltaaž, voltsius, volting**, **voolsus** ning **potentsiaal**. Arvati, et kui kasutada füüsika algõppes samu mõisteid mis konspektis, siis voltaaž suunab kõige paremini elektriliste nähtuste algpõhjuste ja tasakaalu tekke mõistmisele.

Allikasisepinge (-voltaaž ehk **elektromotoorjõud)** tekitab ja säilitab elektrivoolu suletud elektriahelas, mis toidab tarbijaid, tagab elektrienergia muundumise teisteks energialiikideks. Allikasisepinge (-voltaaž) tekkib mehaanilise, keemilise või muu energia muundamisel laengute energiavälja energiaks ja võrdub koormamata allika (tarbija takistus on lõpmata suur – väljundklemmidel on õhuvahe) **klemmide maapingete (maavoltaažide e potentsiaalide)** vahega.
Energiamuundamise protsesside eripära alusel võib kõiki elektriseadmeid ja nende ühendusjuhtmeid liigitada **allikateks, tarbijateks ja salvestiteks.** Kadudeta **allikates** toimub mehaanilise, soojus-, keemilise või kiir-

gusenergia kaovaba muundamine elektrienergiaks. **Tarbijates** toimub elektrienergia muundamine mehaaniliseks, soojus-, keemiliseks või kiirgusenergiaks. **Salvesti** põhiülesanne on elektrienergia salvestamine ja säilitamine. Salvesti toimib salvestusprotsessis tarbijana, vahepeal säilitajana, tühjendamisprotsessis elektriallikana.

Üldjuhul moodustavad elektriallikas, -tarbija, salvesti, neid ühendavad elektrijuhtmed ja lülitusaparatuur **suletud elektriahela**, mida mööda saab tarbijates energiamuundamise korral elektrivool katkematult kulgeda. **Põhjust, mis kutsub esile elektronide korrastatud liikumise elektriahelas, nimetatakse allika potentsiaalide vaheks, sisepingeks, elektromotoorjõuks (EMJ) või sisevoltaažiks.** Sisepinge (-voltaas) hoiab alal allika maapingete (potentsiaalide) erinevuse allika klemmidel ehk allika**väljundpinge (voltaaži)**. Allikasisepinge (EMJ sisevoltaaži) ja tarbija potentsiaalilangu (-voltaaži) ühikuks on **volt**, **V.**

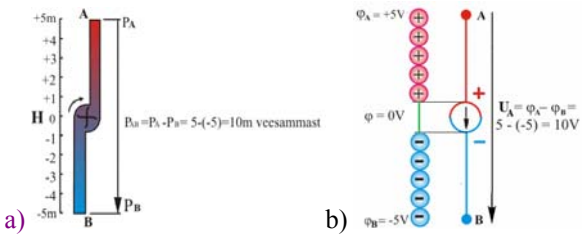
Märkus: Kuna rahvusvahelise leppe alusel peetakse mõõtühikuga sarnast füüsikalise suuruse nimetust ebasoovitatavaks, siis edaspidi on „voltaaži“ kasutamisest loobutud ning eelistatud pinge mõistet. Elektromotoorjõust on samuti loobutud nime pikkuse tõttu.



Joonis 1.27. Elektriallikas kindlustab voolu katkematu kulgemise suletud elektriahelas (a ja c), nii nagu pump kindlustab vee voolamise suletud torujuhtmes (b)

Nii nagu pump tekitab välise jõuallika abil sisendi ja väljundi vahel rõhkude vahe (joonis 1.27 ja 1.28), toimub elektriallikas mehaanilise, keemiliste, magnetvälja ja muud liiki energia muundamisel neutraalsete aatomite lõhestamine positiivselt ja negatiivselt laetud aineosakesteks.

Allika klemmidele kogunevaid laenguid võib tinglikult kujutada laengute sambana (joonis 1.28b). Mida kõrgem sammas, seda suurem on laeng klemmil ja pinge (potentsiaal) maa suhtes ning maapingete vahe ehk allikasisepinge. Veevarustussüsteemis on elektriallika analoogiks veepump (a). Siin paikneb pump maapinnal ja pumpab kaevust vett 5 meetri sügavuselt 5 meetri kõrgusele. Pumba sisendklemmi ja väljundklemmi rõhkude vahe $\Delta P_{AB} = P_A - P_B = 5 - (-5) = 10$ meetrit veesammast. Kui ühendada allika klemmide vahele elektritarbija, näiteks hõõglamp, siis tekkib ahelas elektrivool (joonis 1.27c). Ka enne lambi lülitamist on allikal imeväike tühjenemise vool läbi lekketakistuse (ideaalseid isoleermaterjale, mis tekitavad nullvoolu juures võrdse vastumõju, kahjuks pole). Siin täidab allikas sama ülesannet, mis veepump veevarustussüsteemis (b).



Joonis 1.28. 10-meetrisele veesamba rõhkude absoluutväärtuste summale vastavat rõhkude vahet arendava veepumba (a) ja 10-voldist allikasisepinget arendava allika tinglik kujutamine (b)

1.7. Tarbija allikasisepinge ehk pinge

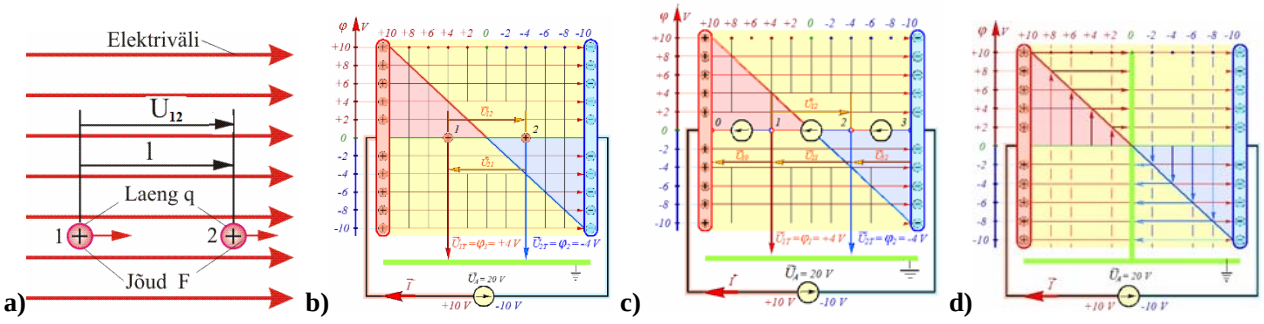
Elektriahelas on kõikide elektriliste nähtuste algpõhjuseks allika laengute energiaväljast põhjustatud allikasisepinge olemasolu. Suletud ahelas kutsub allikasisepinge esile elektrivoolu, mille suurus kujuneb selliseks, et ahela koosteosades tekkivate potentsiaalilangude summa võrdub täpselt allikasisepinge väärtusega.

Voolu suund on allika plussklemmilt läbi välisahela miinusklemmile. Elektriahelas koormusena toimivatel elementidel, s.o tarbijatel, allika sisetakistil ja salvestitel (salvestustalituses) tekkivad koos vooluga allikasisepinget tasakaalustavad **vooluga vastassuunalised tarbija talitluses olevad allikapinged ja ka vooluga samasuunalised tarbijate potentsiaalilangud.** Klassikalises füüsikas ja elektrotehnikas mõistetakse elektripinge all elektrivälja sisejõudude või -tungide intensiivsust. Seega iseloomustab elektriline pinge kahe punkti vahelise elektrivälja intensiivsust skalaarsuurusena, mis on võrdne nende punktide pingete vahega maa suhtes, lühidalt „maapingete“ ehk potentsiaalide vahega (joonis 1.29a).

Siin on U_{12} allika poolt tekitatud pinge, mis võrdub

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{1T} - U_{2T}\,. \tag{1.3}$$

Vaadates välja koos allikaga (joonis 1.29b, c), muutub olukord ühesemaks. Siin tekkib sarnane väli kondensaatori plaatide vahel. Vaadeldes maapingete vahet väljapunktide 2 ja 1 vahel, saame $U_{21} = \varphi_2 - \varphi_1 = U_{2T} - U_{1T}$. Kuidas tõlgendada pinget U_{12} ja U_{21} vektorsuuruste korral? Vooluvektoriga samasuunaline on **potentsiaalilang** $\dot{U}_{12}$ võrdub tarbijas tekkiva tasakaalustava **vastuallikapingega**. Tarbijaks on siin kondensaatori plaatidevaheline isoleervahemik, mis samamoodi kui joonisel 1.19 tekitab dipoole – allikaid. Neid võib vaadelda tarbijasiseste elektriallikatena (joonis 1.29c). Joonisel on tähistatud neli punkti: 0, 1, 2 ja 3. Nende punktide pinged maa suhtes on vastavalt +10, +6, –6 ja –10. Asendades nende punktidevahelised mõttelised dipoolid isoleervahemiku allikatega, saame kolm jadalülituses olevat allikat. Allikate klemmide potentsiaalid (maapinged) on meie näites vastavalt +10, +6, –6 ja –10 V ning kolme allika sisepinged 6, 8 ja 6 V. Nende summa on 20 V, mis on võrdne ahela toiteallika sisepingega. Joonisel 1.29 on rohelisega kujutatud Maa 0 V väärtust omavat maapotentsiaali (pinget maa suhtes). Plaatidevahelised punased ja sinised vektorid näitavad ligikaudselt potentsiaalide jagunemist. Paremale suunatud nooled iseloomustavad positiivset maapinge väärtust, vasakule suunatud – negatiivset.



Joonis 1.29. Potentsiaalide vahe elektrivälja punktide 1 ja 2 vahel kondensaatoris määrab töö, mida on vaja kulutada laengu q ümberpaigutamiseks nende punktide vahel

Elektrivälja erinevate punktide potentsiaalilang (maapingete vahe) U_C on arvuliselt võrdne laengu q ümberpaigutamiseks (suurema maapingega väljapunktist teise, väiksema maapingega punkti) vajaliku töö A ja selle laengu suhtega $U_C = \dfrac{A}{q}$. (1.4)

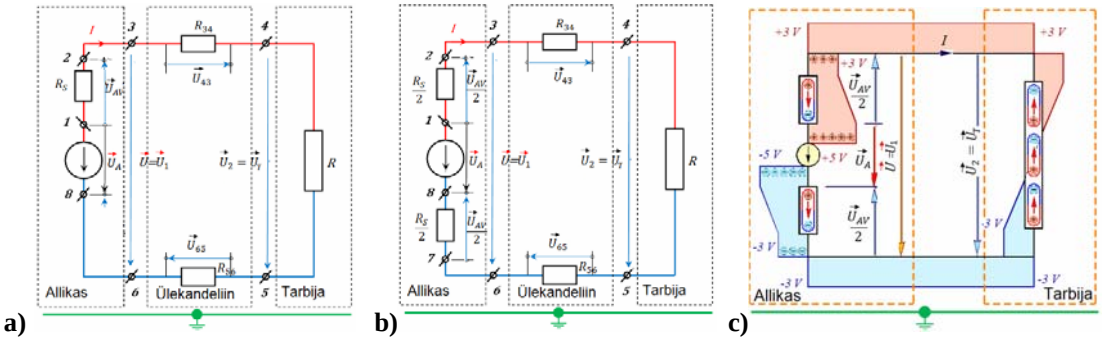
Allikapinge tähistamisel on soovitatav mõlemad punktid märkida indeksina, nagu valemis (1.3).

Lähtudes elektriväljatugevusest E, saame, et allikapinge $U = \dfrac{A}{q} = \dfrac{Eql}{q} = El$.

Elektrivälja kahe punkti vaheline allikapinge U iseloomustab välja salvestunud energiat, mis muundatakse elektrilaengute ümberpaigutumisel nende punktide vahel teiseks energialiigiks. Elektripinge ühikuks on volt (V). Elektrivälja tugevust võib väljendada samuti kahe punkti vahelise pinge ja nende punktide vahekauguse l suhtena (homogeenses väljas) $E = \dfrac{U}{l}$, V/m. (1.5)

Pinge vaatlemine skalaarsuurusena raskendab allikate ja tarbijate vastastikmõju lahtimõtestamist. Seepärast vaadeldakse selle kursuse raames nii potentsiaali – pinget maa suhtes, allika sise- ja väljundpinget, potentsiaalilangu kui ka tarbija allikapinget vektorsuurustena.

Tarbija allikapinge füüsikaline olemus on, et kõikides tarbijates tekkivad toiteallika laenguvälju tasakaalustavad dipoolidesisesed vastassuunalised laenguenergiaväljad (allikad). Joonis 1.30c selgitab allikate teket tarbijates, lisaks toimib tavatarbijale tarbijana ka allikas ise. Kui allikat läbib vool, siis toimub allika sees, näiteks generaatori mähisetraadis, elektronide kiirendamisega kaasnev lisaenergia salvestamine ja järgnev liigse energia väljakiirgamine Seega muundab allikas osa elektrienergiast allika sees soojusenergiaks. Selle muundusprotsessi iseloomustamiseks kasutatakse allika sisetakistuse mõistet. Õpikutes ühendatakse sisetakistus tavaliselt jadamisi ideaalse (kadudeta) allikaga. Selline lülitus pole päris korrektne. Siin ei vasta voolu olemasolul allika klemmide potentsiaal (pinge maa suhtes) füüsikalisele sisule. Joonisel 1.30b, c on allika sisetakistus jagatud kaheks võrdseks osaks ja nende vahele on lülitatud ideaalne kaovaba allikas. Sellise lülituse korral, kui allikasisepinge on 10 V, tarbijate potentsiaalilangud kokku 6 V ja kumbagi sisetakistusel à 2 V. Nii on allika miinusklemmi pinge maa suhtes (lühidalt maapinge) –3 V ja plussklemmil +3 V. See on korrektne tulemus. Asetades kogu sisetakistuse 4 Ω skeemil allikast üles, nagu joonisel 1.30a, oleksid vastavad suurused +1 V ja –5 V, mis pole allika klemmide tegeliku potentsiaalide jagunemisega kooskõlas.



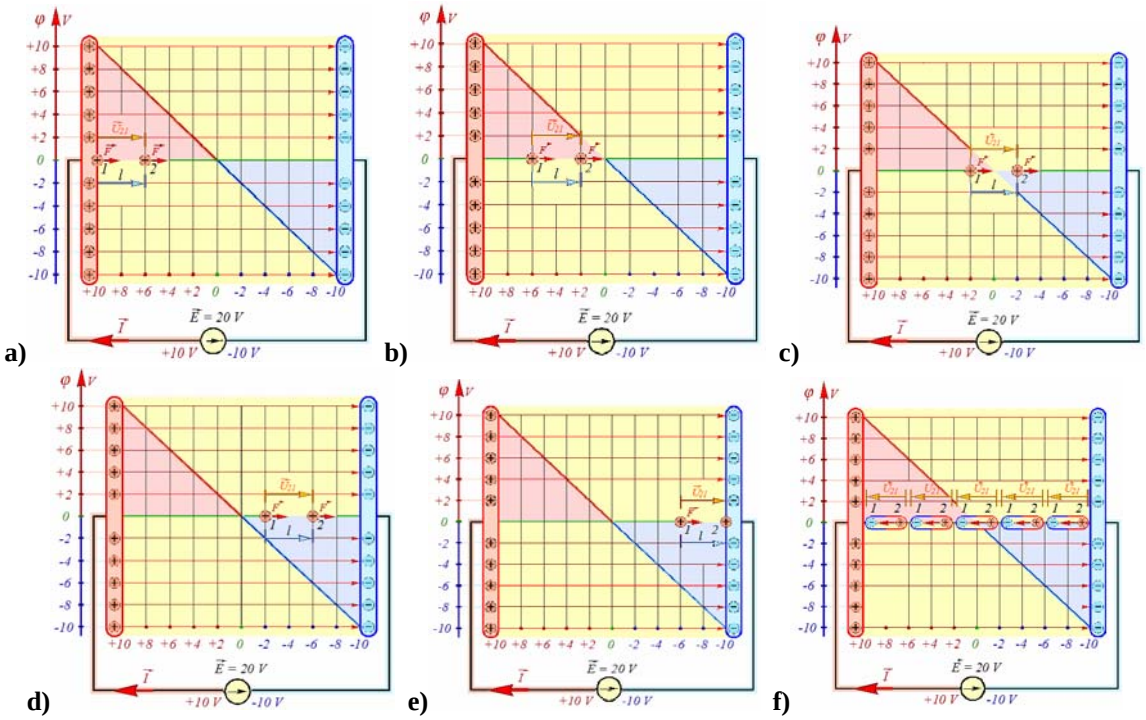
a) b) c)

Joonis 1.30. Üht allikat, tarbijat ja ülekandeliini sisaldav elektriahel (a ja b). Allika sisetarbijal toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks. Skeemil (b) on allika sisetakistus jagatud kaheks, see tagab allika koormamisel selle aseskeemis klemmide potentsiaalide korrektse muutumise (c)

Toiteallika sisepinge ja tarbija allikasisepinge. Vaatame lähemalt allikasisepinge olemust joonisel 1.31 . Siin on allika klemmid ühendatud kahe plaatelektroodiga, mille vahel on suure lihtsustusena kujutatud lineaarne pinge (potentsiaali) jagunemine maa suhtes. Vaatleme punktide 1 ja 2 potentsiaalide vahet. Joonisel 1.31a punkti 1 potentsiaal $\boldsymbol{\varphi_1}$ = 10 V ja $\boldsymbol{\varphi_2}$ = 6 V. Siin voolusuunaline kahe punkti vaheline potentsiaalilang $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 10 - 6 = 4$ V. Ka järgneval neljal joonisel (b...e) on sama suur potentsiaalilang 4 V, olgugi et $\boldsymbol{\varphi_1}$ = +6 V, +2 V, –2 V ja –6 V ning $\boldsymbol{\varphi_2}$ = 2 V, –2 V, –6 V ja –10 V. Need potentsiaalilangud iseloomustavad allikat, tema **allikaväljundpinget.**

Kondensaatori plaatelektroodide vahel tekkivad dipoolid ehk tarbija allikad (joonis 1.31f). Tinglikult on kujutatud, et tarbijas moodustunud 5 dipooli oma vastassuunalise energiaväljaga moodustavad tasakaalustava, allikaga vastassuunalise liseenergiavälja. Dipoolide moodustumisega kaasneb allikapinge suunale vastav nihkevool (elektronid nihkuvad miinusplaadi suunas) ja üliväike elektrienergiakoguse muundumine dipoolide elektrivälja energiaks. Selles näites on tarbija allikapinge kõigi 5 dipooli puhul võrdne. Näiteks vasakäärmisel dipooli tekitatud allikasisepinge $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = +10 - (+6) = 4$ V. Paremäärmisel dipoolil $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = -6 - (-10) = 4$ V.

Järeldus: pinge kujutamine skalaarsuurusena muudab umbmääraseks põhjuslike seoste mõistmise. Seetõttu vaadeldakse kogu kursuse raames kõiki voltides mõõdetavaid suurusi vektoritena.



Joonis 1.31. Tarbija potentsiaalilangu teke elektriahelas

1.8. Elektrivool. Elektrivälja energia muundamine soojusenergiaks

Soojuse eraldumine voolujuhis. Samamoodi toimub elektrienergia muundumine soojusenergiaks voolujuhtides nii vahelduvvoolu (VV) kui ka alalisvoolu (AV) korral. Elektronide liikumise tekitamiseks elektrivälja (laengute energiavälja) energia (jõu) mõjul on lähteaatomi tuuma mõjualal vaja elektronidele lisada energiat. Et elektron saaks „maanduda“ samaaegselt liikuma hakanud naaberaatomi elektroni tühja pesasse, tuleb liikuma hakkamiseks vajalik salvestatud, kuid naaberaatomi orbiidile „maandumist” takistav liigne energia naabertuuma mõjualal (vt Märkus) soojusenergia näol kiirata ümbritsevasse keskkonda, nagu seda on kujutatud joonisel 1.32.

Märkus: Vaba elektron ei saa ei neelata ega väljastada footonit, kuna nende protsesside korral ei täideta üheaegselt energia ja impulsi jäävuse seadust. Näiteks kui footoni energia ületab $2mc^2$ vähesel määral, siis tekkivad väikese kineetilise energiaga elektron ja positron. Et täita impulsi jäävuse seadust, peab osakeste tekke summaarne impulss võrduma ligikaudu 2 mc. Elektroniga footoni neeldumine ja kiirgus **on võimalikud** vaid tuuma elektrostaatilises väljas. Suure massi tõttu võtab tuum vastu liigse impulsi ja väga väikese osa energiat.

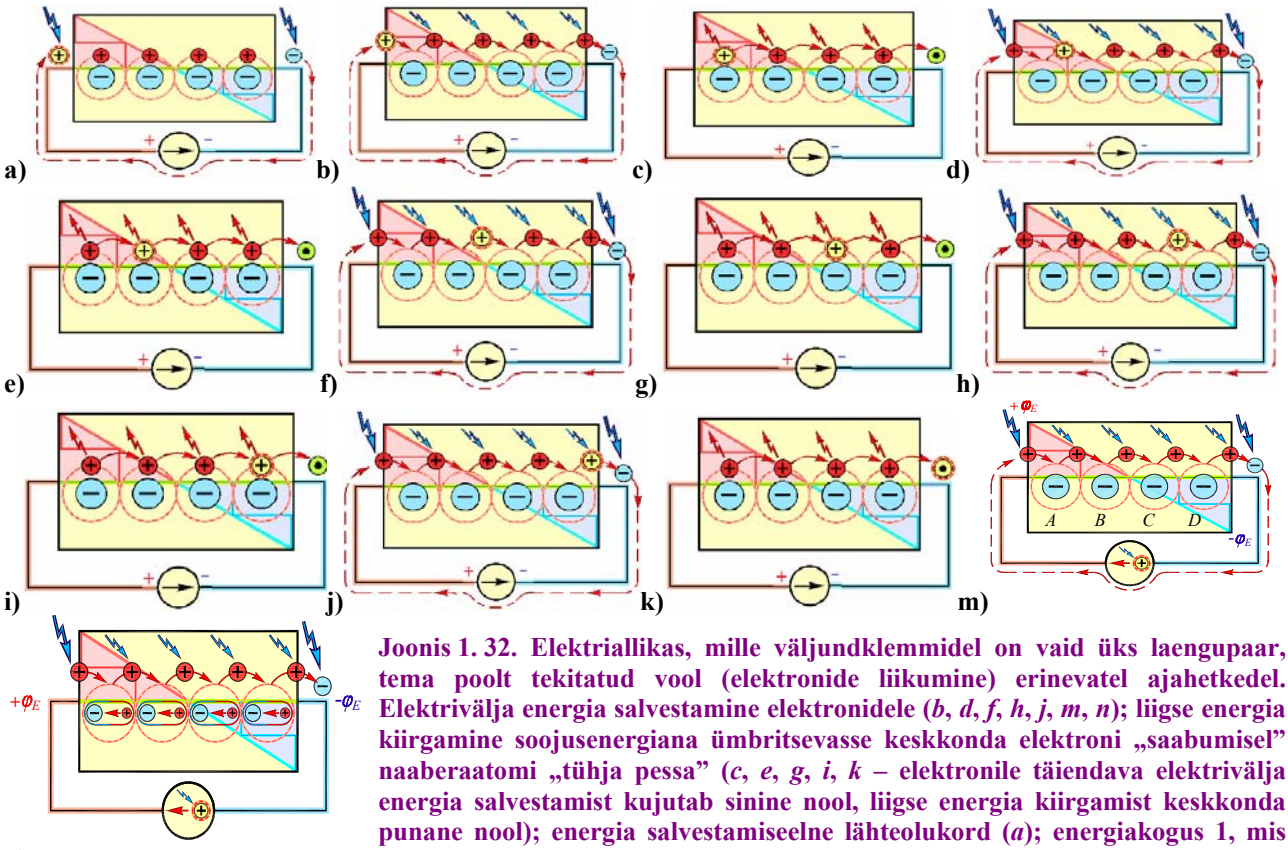
Alalisvoolu korral jääb elektronide liikumissuund läbi allika ja tarbija muutumatuks, vahelduvvoolu korral elektronide liikumissuund perioodiliselt muutub.

Vaatame elektriallikat, mis mehaanilise energia abil lõhestab allika sees neutraalseid aatomeid nii, et ajas muutumatult on allika positiivsel klemmil üks elektron ja negatiivsel üks tühi elektroni pesa. Vaatame voolu teket allikast, ülijuhtivast voolujuhist ja takistist koosnevas ahelas. Jälgime kollase värviga märgistatud elektroni liikumist selles suletud ahelas (kontuuris).

Joonisel 1.32 a on tinglikult kujutatud lähteolukorda, kus voolujuhis on neli teineteise kõrval paiknevat aatomit ja lihtsuse mõttes vaadeldakse neil vaid ühte laengupaari, mille moodustavad välimise elektronkatte üks positiivne elektron ja tuuma üks negatiivne prooton. Lähteolukorras, enne kui allikas esimene elektron jõuab vaadeldava tarbija (nelja aatomit sisaldav voolujuht) vasakpoolse otsani ja tarbija klemmidel puuduvad laengud, on tarbija aatomite laengute summa võrdne nulliga.

Joonis 1.32b kujutab olukorda, kus esimene elektron on parempoolselt klemmilt ära tõmmatud ja jõudnud läbi allika tarbija vasakpoolsele klemmile. Parempoolsel klemmil on üks elektroni tühi pesa. Selle tulemusena on nelja aatomiga

tarbija juhtmelõigu vasaku otsa potentsiaal võrdeline elektroni laenguga ja parema otsa potentsiaal võrdeline elektroni tühja pesa laenguga. Lihtsustame ja eeldame, et juhtmelõigu sees jagunevad potentsiaalid piki juhet lineaarselt, nagu see on näidatud joonisel 1.32b. Allikas tagab väljundklemmidel pidevalt kahe laengu energiaga võrdelise muutumatu potentsiaalide vahe. Olgu tarbija juhtmematerjal selline, et aatomi tuuma ja väliskatte elektroni vaheline tõmbejõud on väiksem kui elektronile mõjuv elektrivälja jõud, sisekatte elektroni ja tuumavaheline jõud aga suurem. Seetõttu tekkib üheaegselt kaks protsessi: väliskesta elektronid rebitakse neljal aatomil samaaegselt ära ning sisekesta elektronid ja tuumad moodustavad üheaegselt neli dipooli. Olgu nende nelja dipooli siseelektriväljade summa täpselt võrdne vastassuunalise allikaklemmide elektron-positron-laengupaari elektriväljaga. Tekkis tasakaaluolukord, kus dipoolid püsivad muutumatutena ja nelja aatomi elektronid liiguvad vasakult paremale (joonis 1.32b...m).



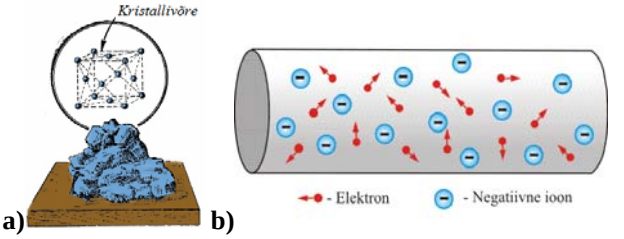
Joonis 1. 32. Elektriallikas, mille väljundklemmidel on vaid üks laengupaar, tema poolt tekitatud vool (elektronide liikumine) erinevatel ajahetkedel. Elektrivälja energia salvestamine elektronidele (*b*, *d*, *f*, *h*, *j*, *m*, *n*); liigse energia kiirgamine soojusenergiana ümbritsevasse keskkonda elektroni „saabumisel" naaberaatomi „tühja pessa" (*c*, *e*, *g*, *i*, *k* – elektronile täiendava elektrivälja energia salvestamist kujutab sinine nool, liigse energia kiirgamist keskkonda punane nool); energia salvestamiseelne lähteolukord (*a*); energiakogus 1, mis salvestub elektroni liikumisel ühelt aatomilt teisele (*n*)

Potentsiaali lineaarse jagunemise korral rakendub tarbija juhtme sees nelja aatomi väliskihi elektronile võrdne potentsiaalide vahe, mis rebib üheaegselt igalt neljalt aatomilt ühe elektroni. Allika elektrivälja energia arvelt suureneb iga elektroni kineetiline energia (sinine nool). Elektronide liikudes saab nende energiat vaadelda magnetvälja energiana. Vaatame kollase elektroni teekonda läbi elektriahela: *a* – allika tõttu liigub elektron „stardipositsioonile". Voolujuhis puuduvad dipoolid; *b* – kollane elektron siseneb nelja aatomiga voolujuhti. Siin rakendub üheaegselt kõigi nelja aatomi väliskihi elektronile allika laengupaari elektriväli. Parempoolse aatomi elektron hakkab liikuma tarbijast välja klemmil oleva tühja pesa suunas. Nii hakkavad kõigi nelja aatomi väliskihi elektronid üheaegselt liikuma joonisel vasakult paremale. Elektronide ärarebimisel muundub neisse salvestatud energia liikuva elektroni energiaks. Allika laengute tõttu salvestub energiaväljale aatomite välis- ja siseorbiidi dipoolidesse täiendav energia, mida on kujutatud sinise välgunoolena. Tänu täiendavale energiale suureneb energiapallina kujutatud elektroni energiakogus ja läbimõõt. Seetõttu ei mahu elektron paremal oleva naaberaatomi „tühja pesasse".

Joonisel 1.32c on kujutatud olukorda, kus elektronid läbivad naaberaatomi tühja pesasse maandumiseks „saleduskuuri", kiirgavad välja liigse energia soojuskiirgusena ning lõpetavad selle sammu. Äärmise vasaku aatomi väliskihist liigub elektron naaberaatomile, viimase oma paremal olevale naaberaatomile jne, kuni paremalt äärmise aatomi elektron liigub allika miinusklemmini, tühja elektroni pesasse. Samm-sammult liikumine naaberaatomile on aeglasem protsess, kuid kogu ahelas elektronide üheaegse liikumise tõttu kandub nende liikumisega kaasnev mõju ühelt allika klemmilt läbi kogu ahela teise klemmini valguskiirusel (*ca* 300 000 kilomeetrit sekundis). Voolujuhti tekkinud elektronide liikumise

(voolu) toimel kiirgub elektronide liikumapanemiseks vajalik energiakogusega võrdne kogus soojusenergiat. Tähistades voolutugevuse tähega *I*, juhtme takistuse (see iseloomustab energiakogust, mis sellel materjalil on vajalik elektronide ärarebimiseks oma aatomite väliskihist) tähega *R* ja aja tähega *t*, saame tarbijas eralduva soojusenergia väärtuseks $W = I^2Rt$.

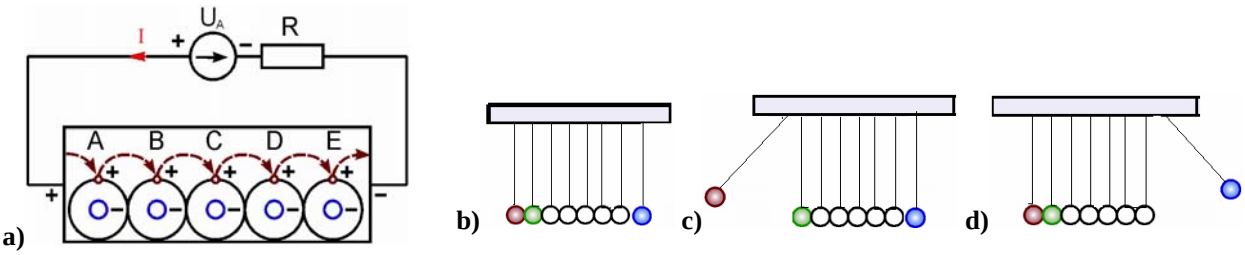
Elektrivool erinevates materjalides. Elektrijuhtide iseärasuseks on elektrilaenguga mateeriaosakeste (elektronid ja ioonid) võimalus liikuda allika elektrivälja jõu toimel keha sisemuses. On olemas kaks põhilist elektrijuhtide liiki: metallid ja hapete, soolade ning leeliste vesilahused, mida nimetatakse elektrolüütideks. Metallides paiknevad aatomid korrapäraselt, moodustades ruumvõre (joonis 1.33a).



Joonis 1.33. Metallides on aatomid paigutatud korrapäraselt, moodustades ruumilise kristallivõre. Metalli kuumutamisel elektronidele lisaenergia andmise tõttu rebivad välisorbiidi elektronid end lahti tuuma prootonitest, muutudes nn vabadeks elektronideks, mis elektrivälja puudumisel on ebakorrapärases liikumises, täites aatomitevahelist ala

Metallide aatomite välimistel orbiitidel asuvad elektronid on tuumadega nõrgemalt seotud kui siseorbiidil olevad. Kui lisandub näiteks **märkimisväärne** tasakaalu rikkuv soojusenergia, siis võivad elektronid välisorbiidilt lahkuda. Seejärel liiguvad nad aatomite vahel, minnes üle ühe aatomi mõjupiirkonnast teise, täites aatomitevahelise ruumi samamoodi gaasiga. Neid elektrone nimetatakse tinglikult vabadeks (joonis 1.33). Vabad elektronid on kaootilises (ebakorrapärases) liikumises ja ei tekita positiivset laengut üheski elektrijuhi osas. Et sundida elektrone liikuma juhtmes korrapäraselt, on vaja jõudu, mis suudab nad liikuma panna. Selle jõu tekitab allika väljundklemmidele kogunenud laengupaaride energiavälja energia, pingete erinevus maa suhtes – allikasisepinge (nagu joonisel 1.30). Suure lihtsustusena loeme, et ilma kuumutamata metallides nn vabu elektrone ei ole. See väide kehtib esimeses lähenduses madalate temperatuuride juures.

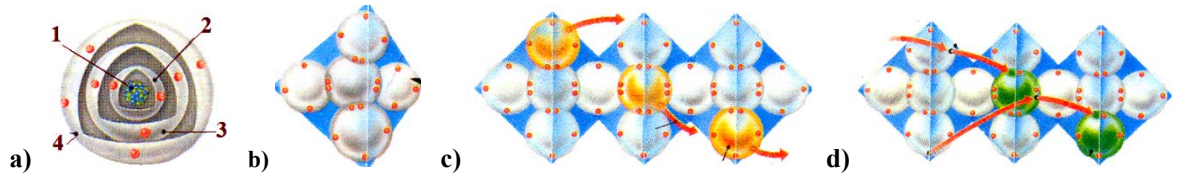
Joonisel 1.34 vaadeldakse elektronide ja piljardikuulide liikumise väikest sarnasust. Positiivse laenguga elektronid hakkavad allika elektrivälja mõjul üheaegselt liikuma (a). Nad liiguvad lähteaatomite välisorbiidilt lähinaaberaatomi välisorbiidile. Nii ka paremalt äärmine aatom. Nööri otsa riputatud kuulid lähteasendis (b) on nagu ahel, kus elektriallikas pole ahelaga ühendatud. Ühendamise järgselt ja pärast punase kuuli lööki (c) hakkavad elektronid ja sinine kuul kohe liikuma (d), kui punane kuul puudutab rohelist kuuli.



Joonis 1.34. Elektronide ja piljardikuulide liikumise tinglik sarnasus. Positiivse laenguga elektronide üheaegne liikumine allika elektrivälja mõjul (a); kuulid lähteasendis (b); enne (c) ja pärast punase kuuli lööki (d). Sinine kuul hakkab liikuma kohe, kui punane kuul puudutab rohelist kuuli.

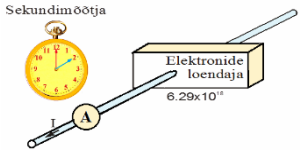
Elektrivool pooljuhis. Pooljuhtide elektritakistust muudetakse lisandite abil. Kasutatakse aktseptorite (ladina keeles *acceptor* – vastuvõtja) ja doonoritega legeerimist (sulami omaduste lisanditega parendamine). Aktseptor on aineosake, mis võib elektrone endaga liita. Doonor on võõraine osake, millelt võib elektron välismõju toimel siirduda pooljuhi juhtivustsooni. Pooljuhti, milles doonorite kontsentratsioon ületab aktseptorite oma, nimetatakse ***n*-tüüpi pooljuhiks**. Doonor-aktseptor-sideme korral annab doonor oma elektronpaari vaba orbiidiga aktseptorile (joonis 1.35c). Pooljuhti, milles aktseptorite kontsentratsioon ületab doonorite oma, nimetatakse ***p*-tüüpi pooljuhiks**. Pesajuhtivus (aukjuhtivus) on elektrijuhtivus, mille puhul elektrivool kulgeb aines nii, nagu oleks voolu põhjustanud mitte elektronide, vaid **negatiivse** laenguga

pesade liikumine (joonis 1.35d.). Klassikalises elektrotehnikas on aukudel (pesadel) – kvaasiosakestel positiivne laeng.



Joonis 1.35. Elektrivool pooljuhtides: a – kolme elektronkihiga räni aatom. Aatomi tuum sisaldab 14 neutronit ja 14 prootonit; b – ränikristall; c – juhtivuse laengukandjaks on ülekaalus elektronid; d – juhtivuse laengukandjaks on ülekaalus elektronide tühjad pesad („augud"): 1 – tuum, 2 – sise-, 3 – keskmine, 4 – välisorbiit

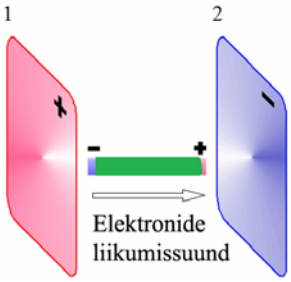
Elektrivoolu (tugevuse) ühik on 1 amper (A). Elektrivoolu tugevus juhtmes on 1 A, kui sekundis läbib juhet elektrilaeng 1 kulon, s.o $6{,}29 \cdot 10^{18}$ elektroni (joonis 1.36).



Joonis 1.36. Voolutugevuse 1 A korral läbib juhtme ristlõiget ühes sekundis 6,29 × 10^{18} elektroni

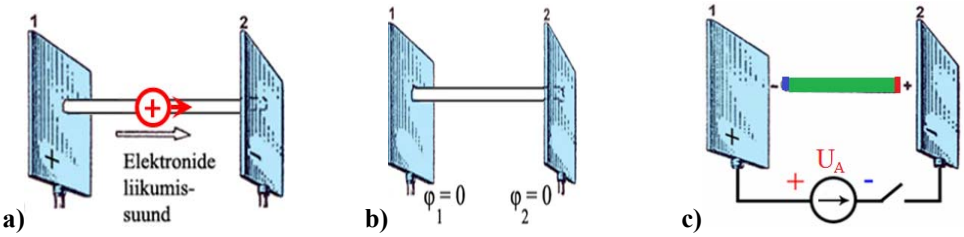
Juhtme viimisel elektrivälja, mille tekitavad näiteks laengutega plaadid 1 ja 2 (joonis 1.37), tõmmatakse negatiivselt laetud plaadi 2 poolsesse juhtme otsa elektrone juhtme vaskpoolsest otsast, kus tühjadest elektroni pesadest moodustub negatiivne laeng (seal tekkib elektronide puudujääk). Parempoolses otsas, kus tekkib elektronide ülejääk, moodustub positiivne laeng. Juhtme keskosa (roheline) aatomitel on pesad elektronidega täidetud ja seetõttu tasakaalustamata laengud puuduvad.

Juhtmeotste laengud moodustavad oma sisemise tasakaalustava elektrivälja, mis on suunatud plaatide väljale vastu. Seepärast kulgeb elektrivool juhtmes seni, kuni sisemine elektriväli on tasakaalustanud välise välja mõju. Protsess kulgeb silmapilkselt.



Joonis 1.37. Laetud plaatide elektriväli paneb aatomi elektrone samaaegselt liikuma juhtmes negatiivselt laetud plaadi suunas

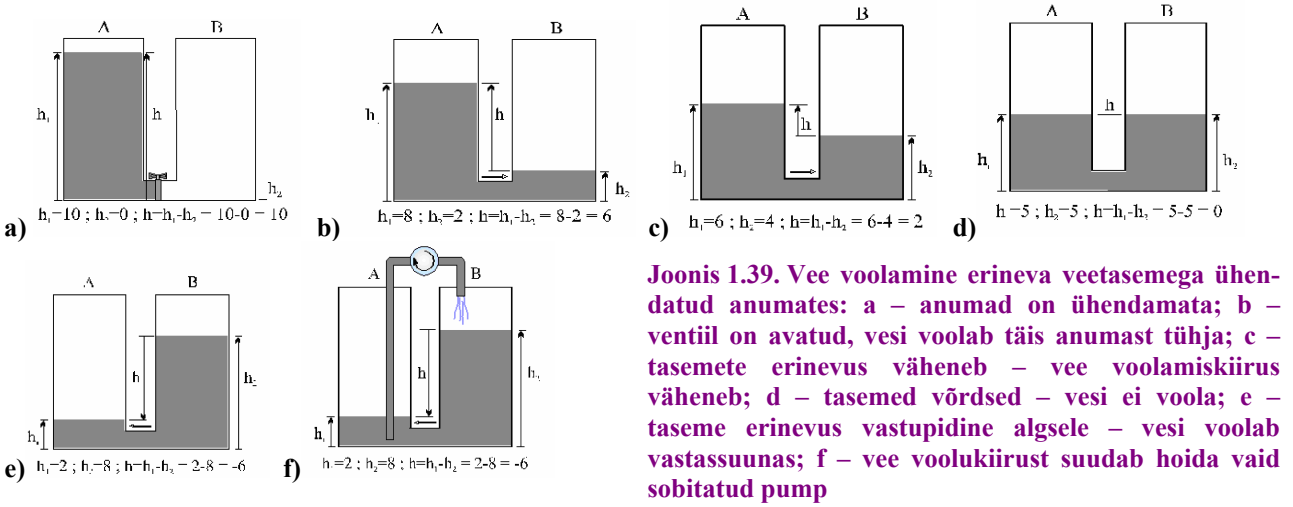
Kui joonisel 1.38a viia kaks laetud plaati 1 ja 2 kokkupuutesse nende vahel oleva juhtiva vardaga, siis varras muutub elektrijuhiks nendele üleliigsetele elektronidele, mis asuvad positiivsel plaadil. Need elektronid suunduvad mööda metallvarrast negatiivse plaadi poole, s.o mööda varrast kulgeb juhtivuslik elektrivool.



Joonis 1.38. Laenguga plaatide energiavälja mõjul rebitakse neutraalsetelt aatomitelt elektrone, mis liiguvad metalljuhis negatiivse plaadi suunas (a). Kui laetud plaate 1 ja 2 nihutada metalljuhi suunas kontakti tekkeni (b), siis nad laetakse tühjaks (c)

Voolu kulgemine kestab seni, kuni mõlemad plaadid on muutunud neutraalseks ega oma laengut (joonis 1.38a). Sarnane on olukord veega täidetud ühendatud anumate korral. Nii nagu elektronide voog plaadilt 1 püüdleb juhet mööda plaadile 2, nii ka vesi anumast A voolab anumasse B seni (joonis 1.39), kuni vee tasemed on võrdsustunud ($h_1 = h_2$).

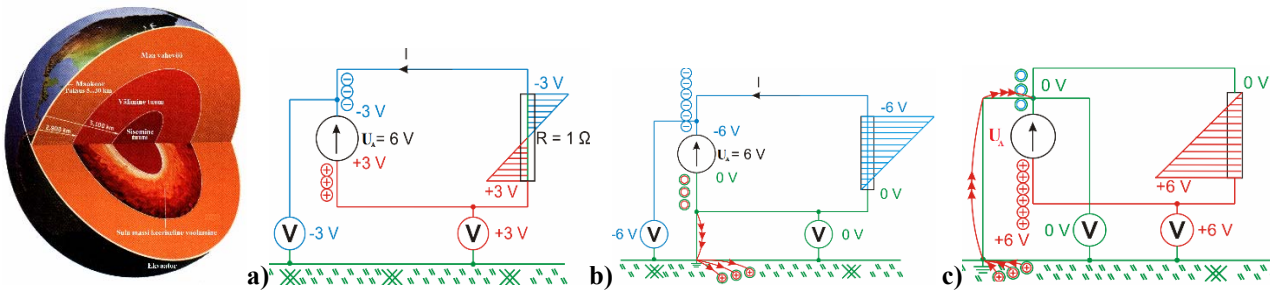
Kui anuma B veetase on kõrgem kui A-l (joonis 1.39e), siis hakkab vesi voolama anumast B anumasse A ja veevoolu suund muutub algsele vastupidiseks. Et tagada katkematut ja muutumatut vee voolukiirust ühest anumast teise, tuleb kasutada pumpa ning veetasemete vahe automaatregulaatorit, mis tagab ka veetarbimise muutuste korral niisama suure pumbatootlikkuse muutuse. Pumbaga sarnast rolli täidab ka elektriallikas joonisel 1.38c, kui lüliti on sisse lülitatud.



Joonis 1.39. Vee voolamine erineva veetasemega ühendatud anumates: a – anumad on ühendamata; b – ventiil on avatud, vesi voolab täis anumast tühja; c – tasemete erinevus väheneb – vee voolamiskiirus väheneb; d – tasemed võrdsed – vesi ei voola; e – taseme erinevus vastupidine algsele – vesi voolab vastassuunas; f – vee voolukiirust suudab hoida vaid sobitatud pump

Elektrivool suletud ahelas ja ahela eri punktide maandamise korral. Vaatame üht allikat ja tarbijat sisaldavat elektriahelat, mis on maandatud või maandamata. Joonisel 1.40a on ahel maandamata. Allikas arendab sisepinget $U_A = |+3| + |-3| = 6$ V. Siis on vool ahelas kõigi kolme näite korral $I = 6/1 = 6$ A. Vaatleme ideaalset sisetarbimiseta allikat (sisetakistus võrdub nulliga).

Märkus: esitatud U_A väärtusele vastavad kolm laengupaari ei vasta tegelikkusele. Voolutugevuse 6 A korral läbib juhtme ristlõiget ühes sekundis 6 · 6,29 × 10^{18} elektroni. Väikest arvu laengupaare on aga kergem ette kujutada, seepärast on siin kasutusel sellised ebareaalsed numbrid.

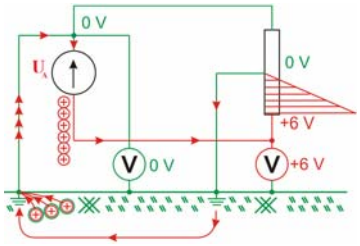


Joonis 1.40. Maa siseehitus. Elektrivool suletud ahelas erinevate ahelaosa punktide maandamise korral

Elektriallikas genereerib pidevalt 6 V suurust sisepinget, st hoiab olukorda, kus klemmidel on 3 laengupaari ehk kokku 6 laengut. Voolu tekitavad elektronid, mis liiguvad läbi tarbija suletud ahelas allika negatiivsel klemmil olevate pesade poole. Ühendusjuhtmed on meil ülijuhid, nad ei sisalda tarbijat ja nendel potentsiaalilangu ei ole. See on takistil, kus tekkivad allika elektrivälja tasakaalustavad dipoolid, mille sisemiste elektriväljade summa muutub võrdseks allika vastassuunaliste laengupaaride elektriväljaga. See tasakaal tekkib meil 6 A voolu korral. Kuna allikas arendab oma klemmidel kogu aeg muutumatut allikasisepinget, on liikumine pidev ja vool muutumatu. Voltmeetrid (V) näitavad pinget nulltasandi – maa suhtes, potentsiaale maa suhtes.

Joonisel 1.40b on allika positiivne algselt kolme elektroniga klemm maandatud. Maandamisel suubuvad kolm elektroni lõpmatu suurde erinimeliste laengute hoidlasse – maa sisse sealsete aatomite tühjadesse pesadesse ning laeng maandatud klemmil muutub nulliks. Maanduse tõttu on nüüd allika klemmi potentsiaal 0 V. Allikas arendab muutumatult allikasisepinget 6 V. Seega on allika negatiivse klemmi uueks potentsiaaliks –6 V. Klemmile tekkivad täiendavad kolm tühja elektroni pesa ning klemm omandab kuuele prootoni laengule võrdelise potentsiaali. Nii on allikal algse väljundpingega võrdne potentsiaalide vahe $U_A = 0 - (-6) = 6$ V. See tekitab ahelas elektronide liikumise – elektrivoolu.

Joonisel 1.40c on allika negatiivne algselt kolme elektroni tühja pesaga klemm maandatud. Maandamisel liikusid 3 elektroni maa seest tühjadesse pesadesse ning allika „–"-klemm omandas potentsiaali 0 V. Kuna elektriallikas arendab ikka sisepinget 6 V, tekkib teisele klemmile potentsiaal +6 V ehk siis 3 elektroni asemel 6. Seega, $U_A = +6 - 0 = 6$ V. Allikasisepinge tekitab suletud ahelas elektronide liikumise – elektrivoolu. Kui vooluring on kahest kohast ühendatud maaga (joonis 1.41), hakkavad laengud liikuma läbi maa. Maandamisel liikusid 3 elektroni maa seest tühjadesse pesadesse ning allika „–"-klemm omandas null-potentsiaali. Sellega kaasnes imeväike vool. Kuna elektriallikas arendab ikka sisepinget 6 V, tekkib teisele klemmile potentsiaal +6 V ehk siis 3 asemel on 6 elektroni. Seega $U_A = |6| - |0| = 6$ V. Allikasisepinge tekitab maa kaudu suletud ahelas elektronide liikumise – elektrivoolu. Siin liiguvad elektronid plussklemmilt läbi alumise takistiosa, parempoolse maanduse ja maa ning vasakpoolse maanduse kaudu allika miinus-klemmile.



Joonis 1.41. Elektrivool suletud ahelas ja ahela eri punktide maandamine

1.9. Elektritakistus

Elektritakistuse füüsikaline olemus. Elektronide korrapärase liikumise elektrijuhis tagab allika laengute energiaväli. Et elektrone ära rebida, selleks peab neid ergastama, saavutama püsiorbiidil oleku energiatasemega võrreldes suurema kvantseisundi (energiataseme). See toimub elektromagnetkiirguse – kvantide osavõtul. Elektrijuhtide erinevuse määravad paljuski elektron-prooton-laengupaaride vahelised vastastikused külgetõmbejõud ja see, kui suur on dipoolide laengute tasakaalustavate väljade tekitamise võime. Laengute vastuväljad tasakaalustavad mingi vooluväärtuse juures algmõju – allikavälja. Tugevate sidemete korral muundatakse osa allika elektrivälja energiast elektronide ergastamisele kuluvaks energiaks. Väliskihi elektronid, liikudes aatomilt naaberaatomi vastavale orbiidile, kiirgavad keskkonda elektriväljalt kiirendamise käigus salvestunud liigse osa energiast. Samaaegselt toimub ka tuumale lähemal olevate elektronide rebimine tuumast eemale, nii et moodustuvad sisemise elektriväljaga dipoolid (kahe suuruselt võrdse lähestikku asetseva vastasnimelise elektrilaenguga süsteem). Dipoolide elektriväljad on vastasmärgilised allika väljaga, nõrgendades viimast ja ka piirates voolu suurust. Allika elektrivälja suuna muutumisel polariseeruvad dipoolid ümber. Liikudes tagasi algsele orbiidile, kiirgavad ka selle protsessi käigus sisekihi elektronid soojuskiirgusena keskkonda elektriväljalt dipooli moodustamise käigus salvestunud liigse osa energiast. Selle tulemusel juhe soojeneb ning kiirgab omakorda soojust ümbritsevasse keskkonda. Nii toimub elektrijuhtide jahtumine.

Silmas pidades asjaolu, et halvemate elektrijuhtide elektronid osutavad oma tugevamate elektron-prooton vastastikuse külgetõmbejõu tõttu teatavat takistust ergastumisele ja voolu tekkele, öeldakse, et **juhtmetel on elektritakistus**. Kui juhtme takistus on väike, siis juhe soojeneb teatud voolu toimel võrdlemisi nõrgalt, kui aga takistus on suur, siis võib juhe sama voolu korral tuliseks muutuda. Takistuse ühikuks on oom (Ω). Eristatakse takistust alalis- ja vahelduvvooluahelates: alalisvoolul **oomtakistus** tähistusega *R*, vahelduv-

voolul **aktiivtakistus** ehk **takistus** ning tähistatakse *r*. Pinnanähtuse tõttu on reeglina $r \geq R$, sagedusel 50 Hz, kui juhtme ristlõige on alla ühe ruutsentimeetri, siis $r \approx R$.

Elektrijuhtivus. Juhtivus – võime juhtida elektrivoolu. Juhtivus on takistusega pöördvõrdeline suurus, s.o 1/R. Juhtivuse ühikuks on siimens (S), S = 1/Ω. Valemites tähistatakse juhtivust tähega *G* (alalisvool) või *g* (vahelduvvool).

Erinevate materjalide elektrijuhtivus. Eri metallide aatomite erineva vastuväljade tekitamise võime tõttu näib, et nad osutavad elektrivoolu kulgemisele erinevat takistust. Suuremat takistust osutavad need metallid, millel aatomi tuuma ja elektronide vahelised tõmbejõud on suuremad. Tõenäoliselt sellised materjalid allika poolt tekitatud elektriväljas osaliselt polariseeruvad. Polariseerunud aatomitel tekkib sisemine, allika elektriväljaga vastassuunaline elektriväli, mis osaliselt tasakaalustab allika elektrivälja mõju. **Ideaalsetel ülijuhtidel ei ole praktiliselt võimet tekitada allika väljaga vastassuunalist sisemist elektrivälja.** Väga suurte voolude korral kaotavad ülijuhid tekkiva väga tugeva magnetvälja mõjul oma ülijuhtivad omadused.

Kõige suurem elektrijuhtivus on hõbedal ja vasel, nende aatomistruktuur annab oma nõrkade tõmbejõudude tõttu kergesti elektronid vabaks, nende elektronid on kergesti ergastatavad. Järgnevad kuld, kroom, alumiinium, mangaan, volfram jne. Halvasti juhivad voolu raud ja elavhõbe.

Erinevate metallide ja sulamite elektrivoolu juhtimise võime üle võib otsustada nende **eritakistuse** ρ järgi, mis arvuliselt võrdub 1 m pikkuse ja 1 mm^2 ristlõikega juhtme takistusega. Näiteks hõbeda eritakistus 20°C juures on 0,016 $\Omega \cdot mm^2/m$, vasel 0,0175 $\Omega \cdot mm^2/m$, alumiiniumil 0,029 $\Omega \cdot mm^2/m$, terasel – 0,13...0,3 $\Omega \cdot mm^2/m$. SI-süsteemis on eritakistuse ühikuks Ω·m.

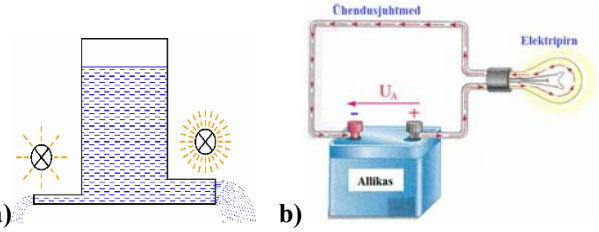
Alumiiniumi elektrijuhtivus on 1,7 korda väiksem kui vasel ja seepärast kasutatakse alumiiniumi natuke harvemini kui vaske. Puhtad metallid juhivad elektrit alati paremini kui nende sulamid. Seda seletatakse asjaoluga, et lisandi moodustavate elementide aatomid kiiluvad end metalli kristallivõresse ja rikuvad selle õige struktuuri. Lõpptulemusena muutub kristallivõre elektrivoolule tõsisemaks takistuseks. Erinevate soojendusseadmete jaoks kasutatakse suure eritakistusega spetsiaalseid sulameid: nikkelpronksi (vase ja nikli sulam) eritakistusega 0,4...0,5 $\Omega \cdot mm^2/m$; nikroomi (nikli ja kroomi sulam) 1,1 $\Omega \cdot mm^2/m$; fekraali (kroomi, alumiiniumi ja raua sulam) 1,4 $\Omega \cdot mm^2/m$ ja teisi.

Elektrivoolu juhina toimivad ka maapind, taimede, loomade ja inimese eluskoed. Elektrivoolu juhib toores puit ja niiskes olekus paljud teised isoleermaterjalid.

Takistuse suurus. Peale juhtmematerjali mõjutab takistuse suurust juhtme ristlõige *S*. Selles suhtes sarnaneb elektritakistus takistusega, mis on vee liikumisel torus ning oleneb toru ristlõike pinnast (joonis 1.42a). Takistuse suurus oleneb ka elektrijuhtme pikkusest *l*, mida pikem on juhe, seda suurem arv polariseerunud aatomeid liidab oma elementaarsed laengupaaride elektriväljad, et tasakaalustada allika elektriväli. Seetõttu tekkib väljade tasakaal väiksema vooluväärtuse korral. Iga juhtme takistuse võib määrata valemiga

$$R = \rho \frac{l}{S}. \qquad (1.6)$$

Selleks et saada elektrijuhtme takistust oomides, on vaja tema pikkus valemis (1.6) võtta meetrites, aga ristlõige ruutmillimeetrites.



Joonis 1.42. Erineva pikkuse ja ristlõikega juhtmed osutavad elektrivoolule erinevat takistust. Kui vool läheb mööda peenikesi ja pikki juhtmeid, siis lambi hõõgniit hõõgub nõrgalt; kui juhtmed ei ole pikad ja on küllalt suure ristlõikega, siis lambi hõõgniit hõõgub eredalt.

NÄIDE 1.1

Määrata vasest juhtme takistus, mille pikkus on 100 m ja ristlõige 2 mm^2. Vase eritakistus on 0,0175 Ω·mm^2/m.

Lahendus

Valemi (1.1) järgi saame:

$$R = \rho\frac{l}{S} = 0{,}0175\frac{100}{2} = 0{,}875\ \Omega .$$

Takistuse olenevus temperatuurist. Metallist juhtmete elektritakistus oleneb nende temperatuurist. Soojenemisel takistus suureneb. Jahtumisel väheneb.

Uurides metallide omadusi väga tugeva jahutuse korral, avastasid teadlased suurepärase nähtuse: absoluutse nulli lähedal (–273,16 ºC) kaotavad mõned metallid elektritakistuse täielikult. Nad muutuvad ideaalseteks juhtideks, olles võimelised pikka aega juhtima voolu suletud ahelas väga väikese vooluallika mõju korral. Seda nähtust nimetatakse **ülijuhtivuseks**. Ülijuhtivus avaldub alumiiniumi, tsingi, inglistina, seatina (plii) ja mõnede teiste metallide juures. Looduses on siiski veel mõned sulamid, mille elektritakistus muutub võrdlemisi väikeseks teatud temperatuurivahemiku puhul, mis on absoluutsest nullist kõrgemal.

Elektrijuhtmete takistuse muutumise määra temperatuuri muutumisel arvestatakse nn takistuse temperatuuriteguri α järgi. See tegur näitab, millise osa moodustab elektrijuhtme takistuse muutumine tema algsuurusest temperatuuri muutmisel 1 ºC; α väärtus on vase ja alumiiniumi jaoks võrdselt 0,004, nikkelpronksi jaoks 0,000005.

Metalljuhtme R_t takistuse mis tahes temperatuuri t juures võib määrata valemiga

$$R_t = R_0\left[1 + \alpha\left(t - t_0\right)\right], \tag{1.7}$$

kus R_0 on elektrijuhtme takistus mingi algtemperatuuri t_0 juures (näiteks temperatuuri +20 ºC juures), mis võib olla arvutatud valemi (1.6) järgi; $t - t_0$ on temperatuuri muutus.

NÄIDE 1.2

Määrata vasest toitejuhtme takistus, mille pikkus on 10 km ja ristlõige 100 mm^2 temperatuuride 20 °C ja 50 °C juures.

Lahendus

Valemi (1.1) järgi 20 °C juures saame:

$$R_0 = \rho\frac{l}{S} = 0{,}0175 \cdot \frac{10000}{100} = 1{,}75\ \Omega .$$

Valemi (1.2) järgi 50 °C juures

$$R_t = R_0\left[1 + \alpha\left(t - t_0\right)\right] = 1{,}75\left[1 + 0{,}004\left(50 - 20\right)\right] = 1{,}96\ \ \Omega.$$

Metalljuhtmete omadust suurendada oma takistust soojenemisel kasutatakse tihti nüüdisaegses tehnikas temperatuuri mõõtmisel. Nii näiteks määratakse mootorite katsetamisel pärast remonti nende mähiste kuumenemise temperatuur takistuse mõõtmise teel enne ja pärast koormust kindla ajavahemiku (harilikult ühe tunni) jooksul.

NÄIDE 1.3

Mootori mähiste takistus temperatuuril +20 °C oli võrdne 0,0182 Ω; pärast mootori tunniajalist tööd kasvas mähiste takistus kuni 0,024 Ω. Leida, millise temperatuurini soojenesid mootori mähised (mähised on vasktraadist, α = 0,004).

Lahendus

Valemist (1.2) leiame: $t - t_0 = \dfrac{R_{t1} - R_0}{\alpha R_0} = \dfrac{0{,}024 - 0{,}0182}{0{,}004 \cdot 0{,}0182} = 80^\circ\mathrm{C}$;

kuna algtemperatuur t_0 on 20 °C, siis mootori mähised soojenesid temperatuurini t = 20 + 80 =100 °C.

Sellise põhimõtte järgi on ehitatud ka nn takistustermomeetrid, kus masina erinevatesse osadesse, kuumutus-seadmetesse jm on paigutatud peenikesed traadid. Nende traatide takistuse muutumise järgi määratakse masinate ja seadmete temperatuuri muutumine töö käigus.

1.10. Dielektrikud (isoleerivad ained)

Mõnedes ainetes hoiduvad kõik elektronid kindlalt oma tuuma lähedusse ja vabade elektronide ning ioonide arv on nendes tähtsusetu. Selliseid aineid nimetatakse mittejuhtideks, dielektrikuteks või isolaatoriteks; siia kuuluvad gaasid, nende hulgas ka õhk, mõned vedelikud (mineraalõlid, lakid), aga samuti portselan, klaas, vilgukivi, kumm, parafiin, eboniit jt. Kõige levinumad dielektrikud on õhk ja vaakum.

Dielektrikute kasutamine tehnikas. Dielektrikud on leidnud laia kasutusala elektrotehnilistes seadmetes juhtmete ja voolujuhtivate osade isoleerimiseks voolu lekke eest, aga samuti elektrilöögi ohu ärahoidmiseks. Mida kõrgem on elektriseadme tööpinge, seda paksem ja kvaliteetsem peab olema voolujuhtivate detailide isolatsioon – kaitsekiht.

Dielektrikute polarisatsioon. Dielektrikute paigutamisel elektrivälja (joonis 1.43), näiteks erinimeliselt laetud plaatide 1 ja 2 vahele, toimub positiivselt laetud elektronpilve(-kesta) nihkumine välja väljajoontele vastassuunas (negatiivse plaadi 2 suunas). Aatomi tuumad püsivad lähteasendis. Selle tulemusel polariseeruvad dielektriku elektriliselt neutraalsed molekulid, s.o molekulide koostisse kuuluvad positiivsed laengud (elektronid) nihkuvad välja jõudude suunas ja tekitavad **nihkevoolu**. Kõik tuumaga seotud negatiivsed laengud püsivad lähteasendis. Tekkinud dipoolidel moodustub sisemine, allika välja tasa-kaalustav vastassuunaline oma „isiklik“ laengupaari elektriväli.

Joonis 1.43. Dielektriku polariseerumine elektriväljas, kui allika moodustab üks (a) ja mitu laengupaari (c). Kaamelid üritavad lahti vedada Eesti vägilase Georg Lurich käsi (b)

Allika laengute ja dipoolide laengute energiaväljad on igal ajahetkel võrdsed. Selle võrdsuse tekkega kaasneb kindla suurusega nihkevoolu teke. Tugeva elektronide ja tuuma vastastikuse tõmbejõu tõttu dielektrikust elektrone ära rebida ei õnnestu. Moodustub allika elektrivälja tasakaalustav tarbijaallikas oma „isikliku“ laengupaari elektriväljaga. Joonisel on elektriallika poolt tekitatud välja kujutatud punase noolega, dipooli laengupaari vastuvälja sinise noolega. Dielektriku tuuma ümbritsevalt orbiidilt elektroni ärarebimine sarnaneb joonisel 1.43b kujutatud olukorraga, kus Eesti vägilane **Georg Lurich** näitas, kes on tugevam. Pärsia šahhi Buhhaara emiiri kaks kaamelit üritasid Georg Lurichi käsi lahti vedada. Üks vedas ühele, teine teisele poole – edutult. Lurich hoidis käsi sõrmede haardega koos. Šahh kinkis kaamelid Lurichile, need toodi Eestisse Velisele Lurichi onupoja juurde Kalase tallu.

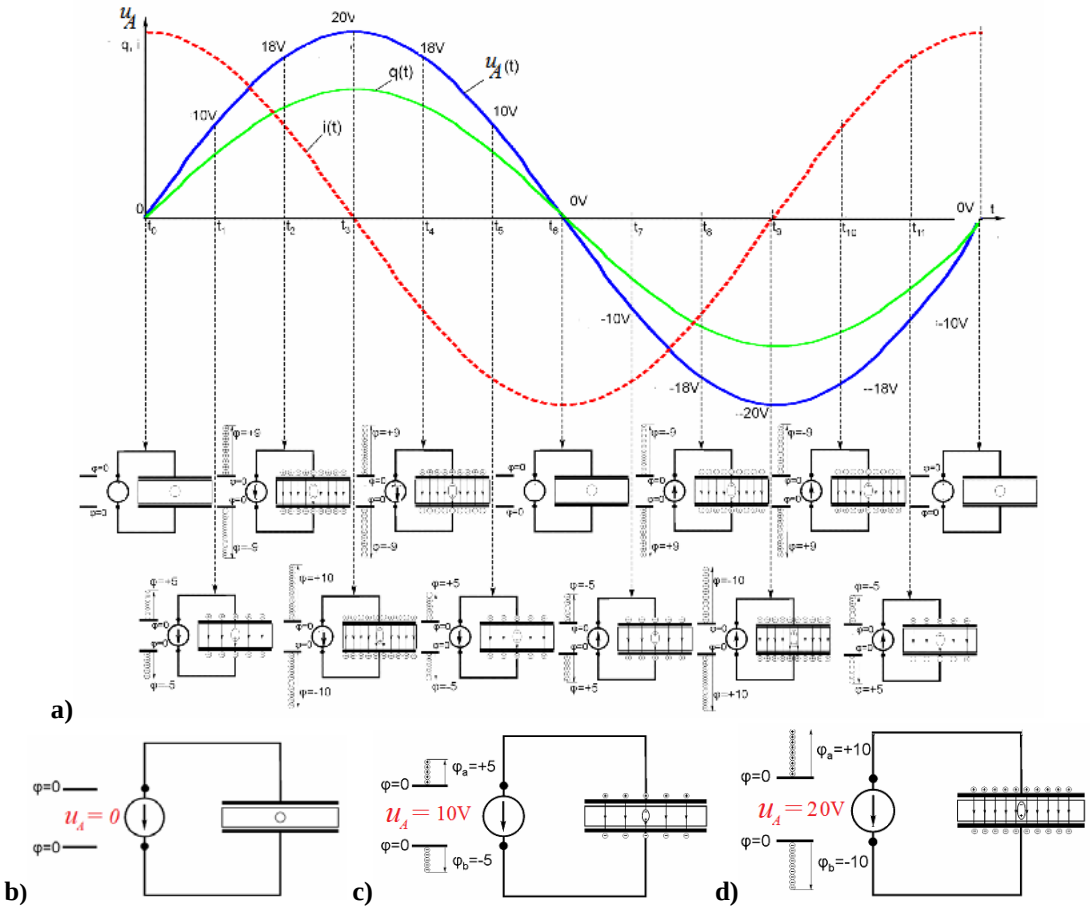
Kui aga suurendada allikapinget (tõmbejõudu) tuhandetes kordades, siis saabub kriitiline hetk, mil elektronid rebitakse dielektrikult, toimub läbilöök ja dielektrik hakkab voolu juhtima. Seda elektrivälja tugevust nimetatakse **läbilöögitugevuseks**. Lubatav väljatugevus, mida dielektrikud võivad pikaajaliselt taluda, on

läbilöögitugevusest paar korda väiksem. Eri dielektrikutel on need väärtused erinevad. Õhul on see *ca* $3 \cdot 10^6$, vilgul $(80...200) \cdot 10^6$ V/m.

Joonisel 1.43 vaadeldakse dielektriku polariseerumist vahelduvvoolu elektriväljas. Sellises polariseerunud seisundis asuvad molekulid seni, kuni dielektrik paikneb elektriväljas. Kui elektrivälja tugevus ei ole kriitiliselt suur, ei saa molekulide positiivsed ja negatiivsed laengupaarid täielikult lahku minna, sest elektronid püsivad dielektriku aatomites ja molekulides aatomi- ja molekulisiseste jõudude tõttu.

Elektrilaengute nihkumise momendil tekkib dielektriku molekulides nn nihkevool (joonis 1.43). Kuid erinevalt juhtivuslikust voolust elektrijuhis ei tekki see mitte elektronide liikumise tõttu ühelt aatomilt teisele, vaid tänu elektronide nihkumisele aatomi tuuma suhtes. Nihkevool tekkib dielektriku sisseviimisel elektrivälja ja tema eemaldamisel välja mõjutsoonist või ka välja intensiivsuse (tugevuse) muutumisel. Muutumatu elektrivälja puhul ei saa nihkevoolu dielektrikus tekkida.

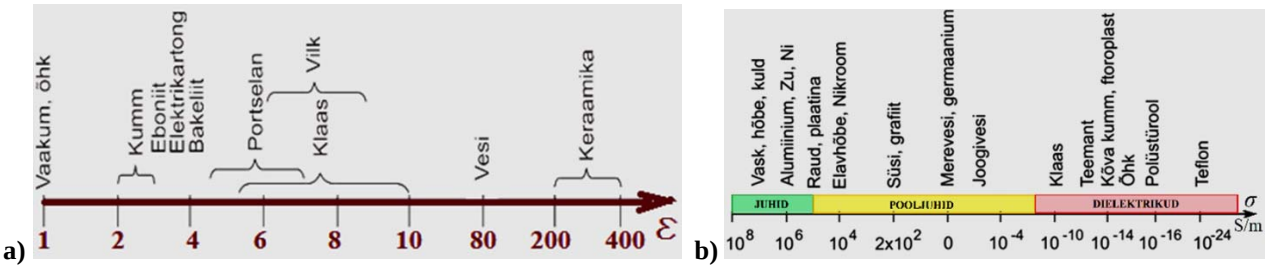
Joonisel 1.44 on vaadeldud dielektriku polariseerumist ajas muutuvas elektriväljas. Siit selgub, et siinuseliselt muutuv elektriväli kutsub kondensaatori plaatidel esile laengu siinuselise muutuse. Kuna elektrivoolutugevus i on võrdne laengu muutumise kiirusega $i = dq/dt$, siis ajahetkel t_0 on see suurim (funktsiooni puutuja kalle on suurim). Ajahetkel t_3 on laengu muutumise kiirus võrdne nulliga ja t_3 voolu hetkväärtus $i = 0$.



Joonis 1.44. Dielektriku aatomi polariseerumine siinuseliselt muutuvas elektriväljas (a). Elektriväli erinevatel ajahetkedel: b – kui t = t_0 ja t_6; c – kui t = t_1 ja t_5; d – kui t = t_3

Dielektrikute ja juhtivate materjalide tunnussuurused. Juhtivaid materjale iseloomustatakse eritakistuse ρ ja erijuhtivuse σ abil. **Elektrijuhtideks** võib tinglikult lugeda materjale, mille eritakistus on vahemikus $\rho < 10^{-5}...1^{-8}$ Ω·m (juhtivus $\sigma > 10^5$ S/m), **dielektrikuteks** materjale eritakistusega vahemikus $\rho > 10^{-5}$ Ω·m (juhtivus $\sigma < 10^5$ S/m) ja **pooljuhtideks** materjale eritakistusega vahemikus $\rho = 10^{-5}...10^8$ Ω·m (juhtivus σ = 105...10^{-8} S/m). Isoleermaterjale – dielektrikuid hinnatakse ka dielektrilise läbitavusega ε, mis iseloomustab

nende tasakaalustava allika loomis- ehk polariseerimisvõimet elektriväljas. $\varepsilon = E_0 / E$ on suurem kui 1, kus E_0 on välise elektrivälja tugevus ja E on materjalisisese elektrivälja tugevus, mis on tekitatud dipoolide laengute potentsiaalide vahest. Kui viia plaatkondensaatori plaatide vahele õhu asemele dielektrik, siis kondensaatori mahtuvust saab suurendada kuni ε korda (joonis 1.45), võrreldes vaakum- või õhkisolatsiooniga kondensaatoriga. Näiteks vilkisolatsiooniga kondensaatori (ε = 6...9) elektrimahtuvus samasuurte plaatide ja sama plaatide vahekauguse korral on 6...9 korda suurem kui õhkdielektrikuga kondensaatoril. Ideaalsel dielektrikul on laengutevahelise väga suure tõmbejõu tõttu juhtivus null. Seega ei saa dielektrikus juhtivuslikku voolu kergesti esile kutsuda. Joonis 1.45a iseloomustab erinevate isoleermaterjalide dielektrilise läbitavuse väärtusi, joonis 1.45b juhtivate ja pooljuhtivate materjalide ning dielektrikute juhtivuse väärtusi. Näeme, et head dielektrikud on keraamilised materjalid, aga ka polüstürool, teflon.



Joonis 1.45. a – isoleermaterjalide suhtelised dielektrilised läbitavused; b – erinevate ainete juhtivused

Dielektriku läbilöök. Kui allika elektrivälja tugevus ületab kriitilise piiri, siis toimub dielektriku läbilöök ja läbi dielektriku „voolab" juhtivuslik vool. Taoline õhu läbilöök toimub näiteks äikese ajal, kui pilve ja maa vahele tekib suur potentsiaalide vahe, kutsudes esile õhu molekulide ioniseerimise ja elektrilahenduse tekkimise – välgu, mis kujutab endast gigantset elektrisädet (joonis 1.46b...d). Äike kannab endas väga suurt elektrilaengut. Sattudes elektrivõrku, võib ta põhjustada suuri kahjustusi. Selle ärahoidmiseks paigutatakse alajaamadesse ja jaotusvõrku spetsiaalne liigpinge kaitseaparatuur, nn **lahendid ning piksekaitsesüsteemid.** Liigpingelahendi on elektriaparaat seadmeosade potentsiaali kiireks vähendamiseks lühiajalise hästi juhtiva elektrilise ühenduse tekitamisega. Lahendid ja maaühenduskontuur juhivad kaitstavat objekti ohustavad hõõrdeelektri laengud maa sisse. Piksekaitse kasutamise korral on tähtis tagada hea maanduskontuuriga kvaliteetne tehniline lahendus. Vastasel korral võib kasu asemel olla ka kahju.

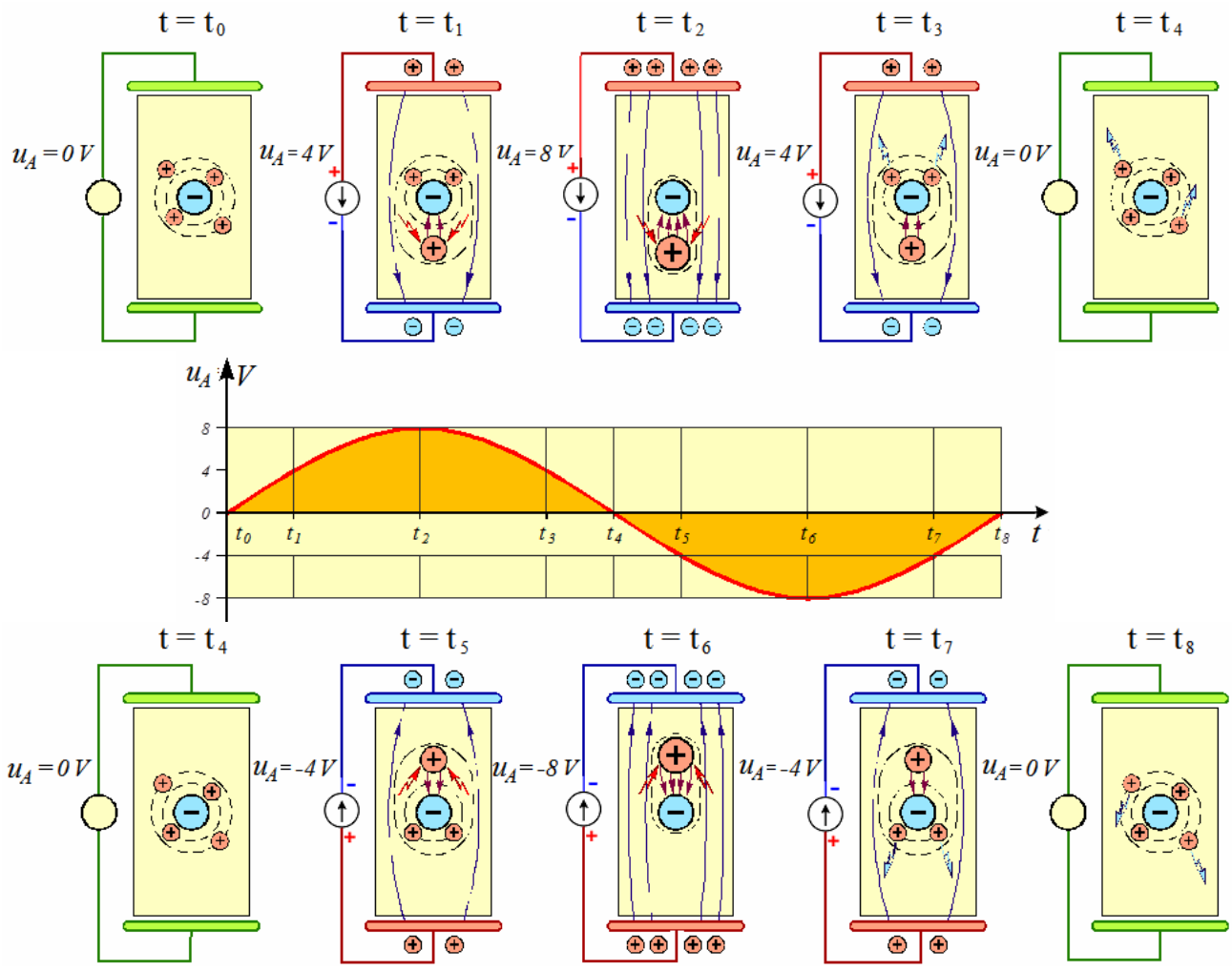
Joonis 1.46. Väga tugevas elektriväljas toimub kõrge pinge puhul dielektriku läbilöök; heaks isolaatoriks olev õhk muutub juhiks (a). Välk kujutab endast õhu läbilööki, mille tekitab hõõrdeelektrist pilve kogunenud laengute elektriväli (b...c). Ameerikas kõrgel vaatetornis äikese ajal tehtud foto (e). Inimene vaateplatvormil (f)

Elektrivälja tugevus, mis on lubatud isoleerivale materjalile tema kasutamisel elektriseadmes, on mitu korda väiksem läbilöögitugevusest. Väga kõrgete temperatuuride puhul muutuvad kõik isoleerivad ained elektrijuhtideks.

Miks tõusevad äikesepilve ja ülikõrgepingeliini all kuivad juuksed püsti? Joonisel 1.46e on foto USAst, kus daamil, kes seisis äikesepilve all vaateplatvormil, tõusid juuksed püsti. Püüame selgitada, mispärast. Joonisel 1.46f on kujutatud skemaatiliselt vaateplatvormi, inimest ja pilve. Olgu pilvel positiivne laeng. Kuivad juuksed on isolaator. Neis moodustuvad dipoolid, mille negatiivse laenguga osa tõmmatakse pilve laengute ja dipoolide vahelise tõmbejõu mõjul pilve suunas. Mida tugevam on väli, seda tugevamad on tõmbejõud, mis on piisavad kergete, kuivade juuste püsti tõmbamiseks, nagu see on fikseeritud joonisel 1.46e.

Sarnane olukord võib kuiva ilmaga olla ka ülikõrgepingega elektriülekandeliinide all. Erinevalt äikesepilvest, mille laeng muutub ajas väga aeglaselt, muutub vahelduvvoolu korral liinijuhtme laengu märk 50 korda sekundis. Suhteliselt kõrge sageduse ja mehaanilise inertsi tõttu ei hakka ihu ja juuksekarvad värisema üles-alla, vaid jäävad harali ning tekitavad tundlikul inimesel veidi ebameeldiva tunde.

Kuidas muundub elektrienergia dielektrikutes soojusenergiaks? Isoleermaterjalides muundub elektrienergia soojusenergiaks väga väikese intensiivsusega. Protsessi olemust avab joonisel 1.47 kujutatu. Siin on üheksale hetkele (t_0 ... t_8) vastavad allika ja isoleermaterjali laengute tasakaalu olukorrad. **Hetkel t_0** võrdub allikapinge hetkväärtus nulliga ja plaadikujulistel elektroodidel laengud puuduvad. Vaadeldav tuuma ja nelja elektroni omav isoleeraine aatom on samuti tasakaalus ja tema vastasmärgiliste laengute summa võrdub nulliga. Protsessi idee jälgimiseks on tehtud suur lihtsustus, võttes iga elektroni potentsiaali võrdseks ühe voldiga.



Joonis 1.47. Elektrienergia muundumine dielektrikus soojusenergiaks. Energeetilise tasakaalu teke üheksal ajahetkel (t_0 ... t_8)

Ajahetkel t_1 on allikapinge hetkväärtus 4 V. Mehaanilise energia muundamisel elektrienergiaks tekkis kaks laengupaari. Nende energiaväljad – elektriväljad (kaks väljajoont ülalt alla) rakenduvad plaatelektroodide vahel paiknevale isoleermaterjalile. Elektrivälja mõjul rebitakse oma orbiidilt alumise elektroodi suunas kaks elektroni. Moodustub kahe elektrivälja väljajoontega dipool. Seega võrdsustusid allika ja dipooli vastassuunalised elektriväljad (neis on võrdne energiasisaldus) kahe laengupaari omava dipooli tekkega. Seejuures sama palju, kui muundati mehaanilist energiat elektrienergiaks, salvestus energiat dipooli elektrivälja. Seega omandas algselt ajahetkel t_0 lisaenergiata aatom ajahetkel t_1 kahe laengupaari elektrivälja energiaga võrduva koguse.

Ajahetkel t_2 on joonisel 1.47 kujutatu järgi allikaväljundpinge (klemmide potentsiaalide vahe) kasvanud kaheksa voldini. Selle tasakaalustamiseks tõmmatakse isolaatori aatomil kõik 4 elektroni allika elektrivälja jõu mõjul alumise elektroodi suunda. Aatomi tuum laengut omavate prootonitega jääb paigale. Tekkis nelja laengupaariga dipool, mis omandas hetkel t_2 nelja laengupaari elektrivälja energiakoguse.

Ajahetkel t_3 on allika klemmidel potentsiaalide vahe vähenenud nelja voldini. Nüüd nõrgenevad allika elektriväli ja dipooli moodustavad jõud. Piltlikult öeldes, et kaks elektroni saaksid tagasi oma tavaorbiidile tuuma ümber, peavad nad vabanema liigsest salvestunud energiast. See toimub kvanthaaval soojuskiirgusena. Nendest soojusenergia väikestest kogustest hakkab dielektrik kuumenema. Et see kuumenemine oleks märgatav, peab protsessis osalema ülisuur arv isoleermaterjali aatomeid ning protsessi kordussagedus peab olema samuti ülikõrge.

Ajahetkel t_4 on allika klemmidel potentsiaalide vahe 0 V. Seega puudub dipooli tekitav ja alalhoidev elektrivälja jõud. Isoleermaterjali aatomi kaks ülejäänud elektroni tõmmatakse tagasi nende tühjadesse pesadesse aatomi tuuma ümbritseval tavaorbiidil, kiirates eelnevalt välja üleliigse energiakoguse. Piltlikult võib ette kujutada nii, et kui allika elektriväli lisab elektronidele energiat, siis elektronid paisuvad (elektronil suureneb kõrge kontsentratsiooniga laengu energiakiht, nagu inimesel rasvakiht). Tavaorbiidile tagasiminekuks peavad nad läbima ülikiire saleduskuuri ja kõhnuma. See liigsest energiast ülikiire vabanemine toimub soojuskiirguse näol, mis kiirgab kvanthaaval soojusenergiat ümbritsevasse keskkonda, meie juhtumil isoleermaterjali sisse.

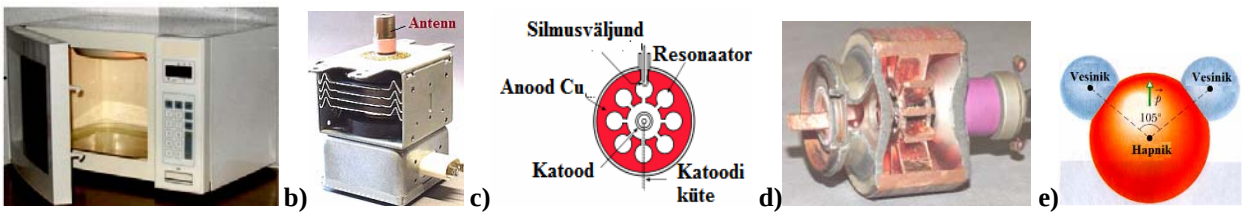
Ajahetkel t_5 on allika klemmidel potentsiaalide vahe –4 V. Selle tulemusena rebitakse oma orbiidilt ülemise elektroodi suunas kaks elektroni. Moodustub tasakaalustav dipool oma „isikliku“ elektriväljaga. Protsess kordub, ainult välja suund on algsega vastupidine.

Nii eraldub isoleermaterjalides soojus kõrgsageduselektrivälja toimel. Puidukuivatuse praktikas paigaldatakse kuivatatav puumaterjal plaatelektroodide vahele, nagu seda on lihtsustatult kujutatud joonisel 1.47. Kuivatust on võimalik muuta oluliselt tõhusamaks, kui plaatelektroodid on ühtlase ja tugeva jõuga surutud vastu kuivatatavat puitmaterjali. Sel juhul **on toorest puitu võimalik kuivatada lisaks nihkevoolule ka juhtivusliku vooluga.** Toores puit on halb, kuid siiski elektrijuht.

Mikrolaineahi. Mikrolaineahjus kasutatakse toidu kuumutamiseks mikrolaineid. See on elektromagnetiline kiirgus. Tavaliselt kasutatakse mikrolaineahjudes kiirgust sagedusega 2,45 GHz. Lainepikkuseks on 12,2 sentimeetrit. Mikrolaineahju põhikoosteosadeks on transformaator (muudab tavalise 230-voldise pinge kõrgepingeks) ja magnetron (tekitab mikrolaineid). Mikrolainete elektriväli tekitab samamoodi joonise 1.47 väljaga nihkevoolu nii juhtivas kui ka dielektriku omadustega toiduosades. Kiirgusvälja kasvades rebitakse laenguid ja neisse salvestub täiendav energia. Välja kahanedes kandub liigne laengute energia kvantide haaval soojuskiirgusena ümbritsevasse keskkonda, seega toidu sisse. Vaatamata väga väikestele energiakogustele kuumeneb toit kiiresti ülikõrge lisamissageduse tõttu .

Magnetron (joonis 1.48) koosneb resonaatoritega varustatud vasest anoodplokist, katoodist, püsimagnetist, anoodi ning katoodi toiteahelast ja jahutusribidest. Anoodi ja resonaatorite geomeetrilised mõõdud määravad kiirgussageduse. Magnetron on isevõnkuv seade, mis toiteallikale lisaks muid võnkeseadmeid ei vaja. Võnkumiste käivitamiseks tuleb anoodile rakendada täpselt ettenähtud anoodpinge. See pinge oleneb resonaatori mõõtmetest ja rakendatava magnetvälja tugevusest. Magnetroni antenn koos lainejuhiga suunab kiirguse ahju kambrisse (resonaatorisse).

Selle kiirguse sagedus muutub olenevalt koormustakistusest, toitevoolust ja temperatuurist ning pole täpselt reguleeritav, mikrolaine kuumutuse ja mõne radari tüübi korral pole see probleemiks. Seal, kus vajatakse täppissagedust, kasutatakse klüstrone. Magnetron on tõhus energiamuundur. Näiteks annab mikrolaineahi võimsusega 1,1 kW ca 0,7 kW kiirgusenergiat ehk kasutegur on ca 65%.

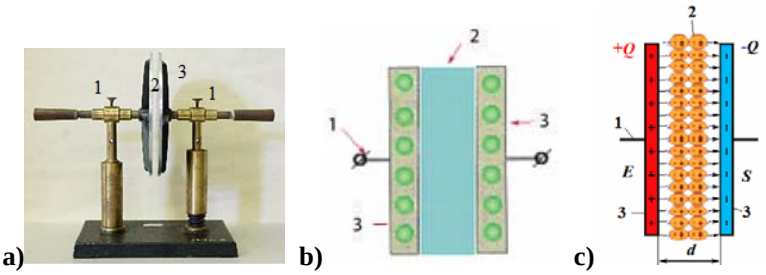


Joonis 1.48. Mikrolaineahju (a) ja magnetroni (b, c, d) ehitus ning vee vee molekul

Ahju kambri resonaatori pindadelt peegelduvad lained liituvad ja lahutuvad antennist kiirguvate lainetega. Tekkivad seisvad lained, mille elektriväljatugevus kambri eri punktides on erinev. Piltlikult võib kujutada, et ruumi täidavad lainepikkusest olenevate mõõtmetega energiapallid, mille sees toimub toidu kuumutamine. Pallidest mittehaaratud ruumis toit ei soojene. Sellepärast kasutatakse pöördlauda, mille peal toit kuumeneb ühtlasemalt. Kuna toit koosneb sageli erinevate elektriliste omadustega koosteosadest, mis kuumenevad erinevalt, siis oodates temperatuur ühtlustub. Vee molekulid moodustavad dipoole, olles polariseeritud (joonis 1.48e), seetõttu on vee kuumutamine ahjus tõhus. Mikrolaine kuumutuse eeliseks on, et **kuumutatakse materjali seest**, mis on tõhus ka materjali kuivatamisel.

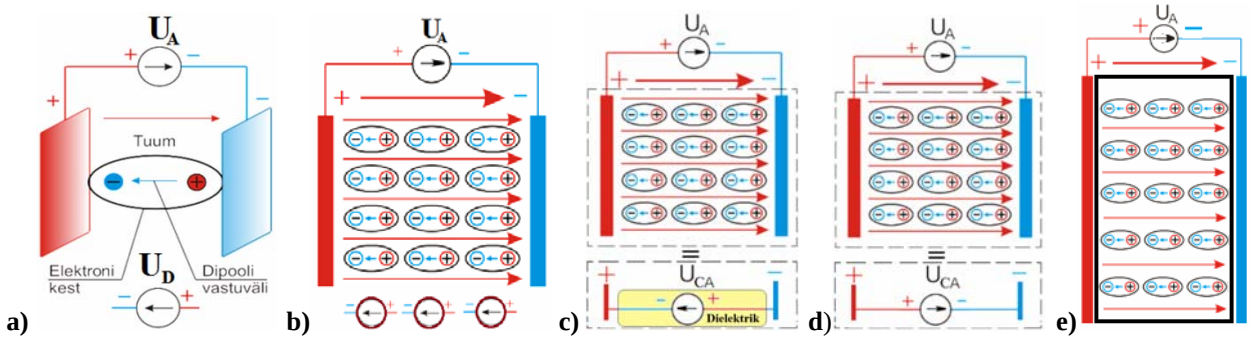
1.11. Kondensaatorid

Kondensaator on seade, mis on võimeline salvestama elektrienergiat (laenguid). Lihtsaim kondensaator (joonis 1.49) koosneb kahest metallplaadist 3 (elektroodid), mida eraldab mingi dielektrik 2 ja mis ühendatakse elektriahelasse klemmide 1 abil.



Joonis 1.49. Lihtsaim kondensaator koosneb kahest metallplaadist (elektroodist), mis on eraldatud dielektriku kihiga (a...c): 1 – klemm, 2 – dielektrik, 3 – kondensaatori plaat

Kondensaatori plaatide vaheline elektriväli. Laadimiseks tuleb kondensaator ühendada elektriallikaga. Laadimise lõpul omandavad kondensaatori plaadid allika väljundklemmidega samad potentsiaalid. Plaatidevahelises isoleerainega täidetud ruumis (joonis 1.50) tekkib punase noole suunaline kondensaatori elektriväli. Selles keskkonnas, mis ei juhi elektrit, muutub juhtivusvool nulliks ja väga väikese nihkevoolu juures võrdub tasakaalustav siniste nooltega tähistatud isoleeraine dipoolide vastassuunaline elektriväljade summa kondensaatori väljaga. Dipoolide tarbija talitluses olevad allikad (voolu suund on vastupidine loomulikuga) on välise toiteallika suhtes jadalülituses (joonis 1.50b, c). Kondensaatoris seevastu tekkis vastuallikas (joonis 1.50d), mis on rööplülituses välise toiteallika suhtes.



Joonis 1.50. Kondensaatori plaatide vahelise elektrivälja tasakaalustamine: a – dipooli teke; b ja c – õhk-isolatsiooni (ε=1); d – õhkisolatsiooni ja e – kummi (ε=2) korral

Vaatame kondensaatori elektrivälja jõudude mõjul dipoolide teket, kui kondensaatori plaatide vahel on õhk (ε = 1) ja kummi (ε = 2). Kummi korral on vastuvälja võimendamine 2 korda tõhusam.

Võttes sellise kummi, mille lubatud väljatugevus on võrdne õhu omaga tavatingimustes, võib plaatide vahekaugust vähendada (joonis 1.50e). Parema ettekujutuse loomiseks võime kondensaatori kogu laengut Q vaadelda koosnevana kahest osalaengust: Q_V – kui kondensaatori plaatide vahel oleks vaakum, Q_D – dielektriku korral. Seega, $Q = Q_V + Q_D$.

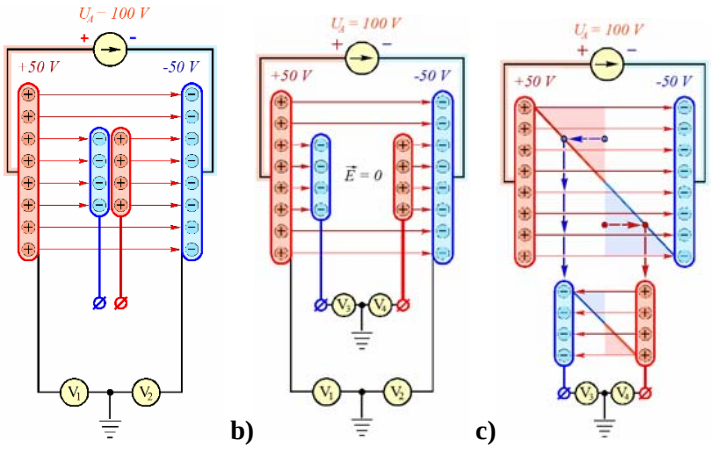
Eespool käsitletud dielektrikute polarisatsiooni iseloomustav suhteline dielektriline läbitavus ε **väljendub** suhtega $$\varepsilon = \frac{Q}{Q_V} = \frac{Q_V + Q_D}{Q_V} = 1 + \frac{Q_D}{Q_V}.$$

Võrreldes kondensaatorite mahtuvust C_V (kui dielektrikuks elektroodide vahel on vaakum) mahtuvusega C, saame dielektriku korral $$C_V = \frac{Q_V}{U} \text{ ja } C = \frac{\varepsilon Q_V}{U} = \varepsilon Q_V.$$

Kokkuleppe alusel loetakse dielektrikuteks materjale, mille suhteline dielektriline läbitavus on suurem kui üks. Kui asendame muutumatute mõõtmetega kondensaatoril vaakumi või õhu isolatsioondielektrikuga, siis kondensaatori mahtuvus suureneb ε korda. Joonisel 1.45 on esitatud mõningate dielektrikute suhtelise dielektrilise läbitavuse väärtused. Tavaliselt vedelatel dielektrikutel ε = 2…5, destilleeritud veel ca 80. Enam kasutatavatel tahketel dielektrikutel on ε = 2,0…10, erikeraamikal kuni mõni tuhat ning senjettelektrikutel kuni mõnikümmend tuhat.

Elektriväli, kui kondensaatori plaatide vahel paikneb kaks kokkusurutud metallplaati. Joonisel 1.51 vaadeldakse potentsiaalide jagunemist kondensaatori plaatidevahelises ruumis. Esimesel joonisel (a) on kondensaatori sümmeetriateljel kaks väiksemat kokkusurutud vaskplaati. Nende plaatide välispinnale kogunevad vastasmärgilised laengud. Kui need vaskplaadid teineteisest eemaldada ja tekitada nende vahele õhkvahe, siis plaatidevahelises ruumis kompenseeruvad allika poolt tekitatud ja metallplaatide väljad. Plaadid omandavad vastasmärgilised potentsiaalid. Kui eemaldada väikeste vaskplaatide paari plaate sümmeetriliselt teineteisest (b), omandavad nad potentsiaali, mis vastab plaatidevahelises ruumis nende asukohale (c). Erinimeliste laengute eraldumist elektrivälja asetatud juhis nimetatakse **elektrostaatiliseks induktsiooniks.** Seega, kui viia kaks kokkusurutud väiksemat vaskplaati kondensaatori plaatidevahelisse elektrivälja, siis hakkavad elektronid liikuma negatiivse laenguga kondensaatori plaadi suunas. Elektronide liikumine kutsub esile elektrivälja muutumise.

Elektronide liikumine lakkab siis, kui plaatide vastassuunaline elektriväli muutub võrdseks allika elektriväljaga vaskplaatide välispindade vahel, st kui elektrivälja tugevus vaskplaatide sees on saanud võrdseks nulliga.

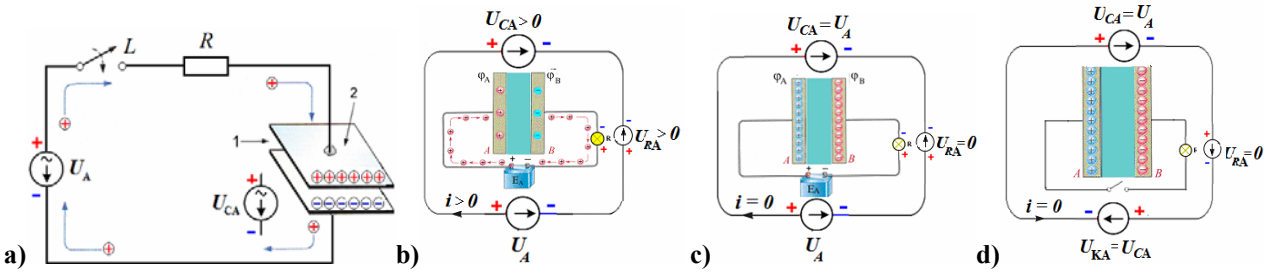


a) b) c)

Joonis 1.51. Potentsiaalide jagunemine plaatidevahelises ruumis: a – sümmeetriateljel paiknevad kaks kokkusurutud väiksemat vaskplaati; b – väikeste vaskplaatide vahele tekitati õhkvahe; c – väikeste vaskplaatide paar eemaldati kondensaatori elektriväljast

Vaskplaatide pinnal on elektrivälja väljajooned pinnaga risti (joonisel 1.51b). Vastasel korral oleks väljatugevuse vektoril plaatide otste pinnaga paralleelne komponent. See kutsuks esile laengute liikumise ehk elektrivoolu piki plaatide otste pinda. Seega on elektriväljas paikneva plaadi pind ekvipotentsiaalpind. Eemaldades väikeste vaskplaatide paari kondensaatori elektriväljast, saame laetud kondensaatori, mille plaatide potentsiaalid vastavad joonisel b omandatud potentsiaalidele.

Kondensaatori laadimine ja tühjenemine. Ühendades kondensaatori allikaga (joonis 1.52a, b), tekkib ahelas vool ja hõõglamp põleb, kondensaatori laadimisel elektroodilt 1, mis on ühendatud allika „–“-klemmiga, suunduvad elektronid läbi allika teisele elektroodile (poolusele) 2, mille tulemusena muutub see elektrood positiivselt laetuks.

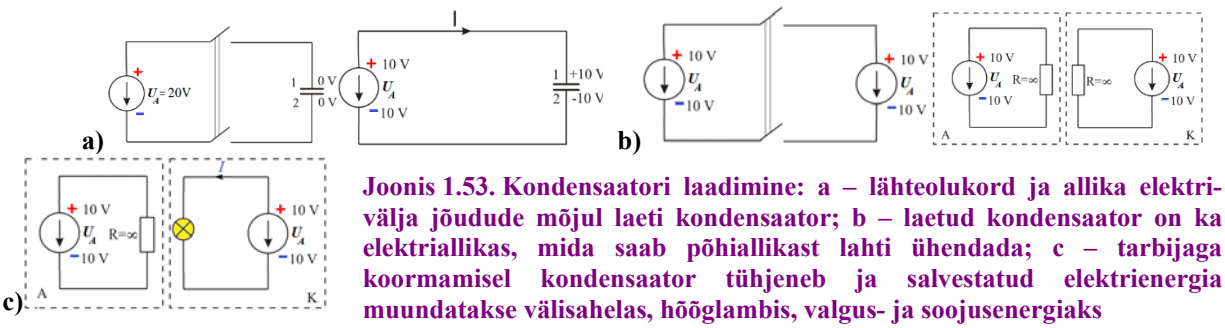


Joonis 1.52. Kondensaatori laadimisel rebitakse allika elektrivälja jõudude mõjul negatiivselt plaadilt elektrone positiivsele plaadile (a, b). Tühjenemisel antakse salvestunud elektrienergia välisahelasse (d)

Kondensaatori elektroodile 1 jäävad tasakaalustamata, elektronide negatiivse laengu suurusega prootonid. Selletõttu muutub elektrood 1 negatiivselt laetuks. Lõpptulemuseks on kondensaatori mõlemal elektroodil võrdsed, kuid nende energiaväljaga (elektriväljaga) märgilt vastupidised laengud. Selles väljas polariseeruvad dielektriku aatomid. Tekkivad aatomisisesed elektriväljad, mis liituvad. Tekkinud summaarne väli nõrgendab plaatidevahelist elektrivälja ja suurendab seeläbi kondensaatori mahtuvust. Kui polariseerunud dielektriku aatomite summaarne väli muutub võrdseks allika poolt tekitatud plaatidevahelise elektriväljaga, siis kondensaatori laadimine lõpeb. Tasakaalu teket võib selgitada ka nii: elektriväli tekitab kondensaatori plaatide vahele kindla suurusega potentsiaalide erinevuse – vastuallikasisepinge. Kui see potentsiaalide vahe saab võrdseks allikasisepingega, siis elektronide liikumine kondensaatori ahelas, s.o elektrivool selles ahelas katkeb. See moment vastab kondensaatori laadimisprotsessi lõppemisele, vool lakkab ja lamp kustub (joonis 1.52c). Kondensaatoris tekkib allikasisepingega võrdne ja vastassuunaline kondensaatori vastuallikapinge U_{CA} ehk toiteallikaga vastassuunaline allikasisepinge. Niisiis muutub kondensaator samuti elektriallikaks. Kondensaatori lahtiühendamisel elektriallikast võib kondensaator pikka aega säilitada salvestunud elektrilaengut (joonis 1.52d). Laetud kondensaator on elektrienergia allikaks, millel on kindla väärtusega allikasisepinge, mis on määratud allikasisepinge väärtusega kondensaatori lahtiühendamise hetkel.

Joonisel 1.52b, c, d on näha, missugused elektriahela elemendid tekitavad laadimisprotsessi käigus toiteallika pingele tasakaalustava, võrdse summaarse allikapinge. Joonisel *b* on selleks kondensaator ja hõõglamp; joonisel *c* on täislaetud kondensaatoril selleks kondensaatori vastuallikas. Joonisel *d* on kondensaatori allikapinge tasakaalustajaks lüliti kontaktidevahelisel isoleervahemikul tekkiv allikas U_{KA}.

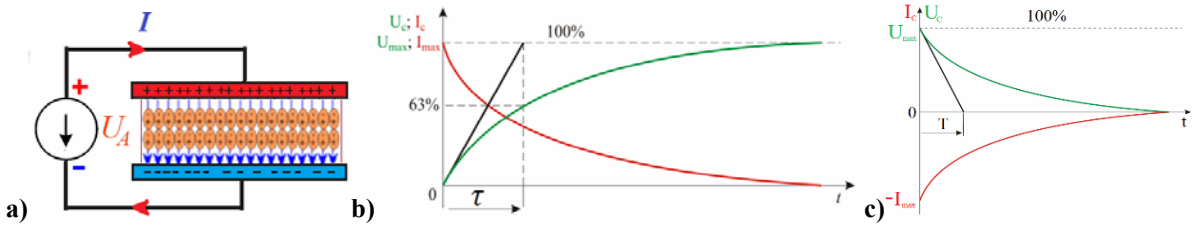
Joonisel 1.53 esitatakse samu protsesse elektriliste aseskeemidena. Laadimise eel on toiteallikas ühendamata. Lüliti sulgemisel toimub eespool kirjeldatud laadimine (a). Laadimise lõpul vool lakkab ja ahela võib välja lülitada. Sellele vastab aseskeem, kus nii toiteallikas kui ka kondensaator on lülitatud lõpmata suure takistusega tarbijaga, milleks on õhuvahemikuga ahela katkestus (b). Kui ühendada laetud kondensaatorite elektroodid mingi tarbijaga, näiteks hõõglambiga, siis hakkab kondensaator tühjenema. Juhis tekib vool *I*, sest kondensaatori positiivsel elektroodil üleküllus olevad elektronid suunduvad negatiivsele elektroodile. Hakkab vähenema ka elektroodidevaheline potentsiaalide vahe, s.o kondensaatori laengute energiavälja (elektrivälja) salvestunud energia muundatakse välisahelas, hõõglambis, valgus- ja soojusenergiaks.



Joonis 1.53. Kondensaatori laadimine: a – lähteolukord ja allika elektrivälja jõudude mõjul laeti kondensaator; b – laetud kondensaator on ka elektriallikas, mida saab põhiallikast lahti ühendada; c – tarbijaga koormamisel kondensaator tühjeneb ja salvestatud elektrienergia muundatakse välisahelas, hõõglambis, valgus- ja soojusenergiaks

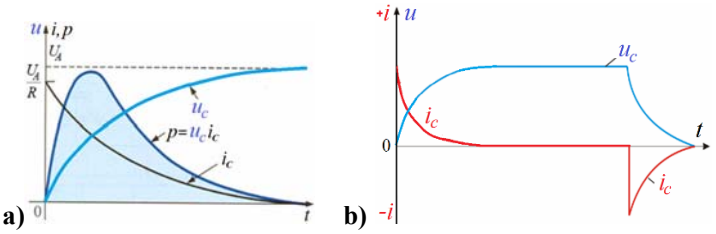
Hetkel, kui elektronid täidavad tühjad pesad kondensaatori negatiivsel plaadil, kaob elektroodide vahel laengute energiaväli (elektriväli) ja vool ahelas lakkab. See tähendab, et toimub kondensaatori täielik tühjenemine, s.o ta muundab ära kogu kondensaatorisse salvestunud elektrienergia.

Joonisel 1.54 on esitatud kondensaatori täis- ja tühjakslaadimist iseloomustavad voolu ja pinge muutumise kõverad ajas. Vaatame joonisel 1.54a ahelat hetkel, kui lüliti sisse lülitati. Siis algab kondensaatori laadimine vastavalt joonisele 1.54b ja nagu kirjeldati eespool. Kondensaatori laadimisega kaasnev siirdeprotsess lõpeb ligilähedaselt viie ajakonstandi τ mööodudes (b). Oomtakistust ja kondensaatorit sisaldavas ahelas $\tau = RC$. Kui lüliti välja lülitada (skeemil pole näidatud), siis tekkib ahelas katkestus ja kondensaator säilitab oma laengu nagu elektriallikas, näiteks aku.



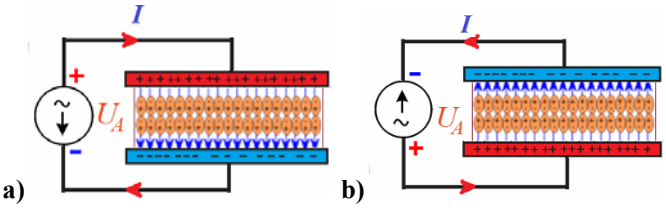
Joonis 1.54. Kondensaatori laadimine alalisvooluallikalt (a): kondensaatori pinge ja voolu muutus laadimisel (b) ja tühjakslaadimisel (c). Ajakonstandi τ määramine

Kuna kondensaatori klemmide vahel on isolatsiooniks õhk, mille elektriline takistus pole lõpmata suur, siis läbi õhu voolava imeväikese voolu tõttu laeb kondensaator mingi aja jooksul ennast tühjaks. Kui täislaetud kondensaator ühendada tarbijaga, siis tekkib läbi koormustakistuse uus ahel ning ahelas hakkab voolama laadimisvooluga vastassuunaline vool I (joonis 1.53c). Vool kestab seni, kuni kondensaatori mõlema plaadi potentsiaalid võrdsustuvad ning muutuvad võrdseks nullpotentsiaaliga. **Kondensaatori laadimine ja tühjakslaadimine toimuvad vastassuunas. Elektronid ei läbi plaatidevahelist isolatsioonimaterjali. Nad liiguvad ühelt plaadilt teisele, kas läbi allika või läbi tarbija.** Joonisel 1.55 näeme, kuidas toimub ajas kondensaatori laadimine ja energiasalvestamine (a), laengu säilitamine ning tühjakslaadimine (b). Kondensaatori elektrivälja salvestatud energia saab määrata võimsuse p muutumise kõvera aluse pinna summeerimisega (integreerimisega), sest võimsus p võrdub energiaga ajaühikus ja on määratav igal ajahetkel kondensaatori voolu i_c ja pinge U_c korrutisena. Algul energiasalvestamise kiirus kasvab, saavutab maksimumi ja siis kahaneb aeglaselt nullini.



Joonis 1.55. Kondensaatori pinge, voolu ja salvestatud energia muutus tema laadimisel alalisvooluallikalt (a) ning kondensaatori laadimine ja tühjakslaadimine (b) koormustakistusele R

Kui koostada ahel joonise 1.56 järgi, siis hakatakse kondensaatorit pidevalt täis ja tühjaks laadima, kuna toiteallika sisepinge muudab pidevalt väljundklemmide polaarsust. Kui kondensaatori klemmidel hakkab potentsiaalide vahe vähenema, siis kondensaator laeb ennast tühjaks algsuunale vastassuunas.



Joonis 1.56. Kondensaator vahelduvvooluahelas. Laadimine ja tühjakslaadimine esimesel (a) ja teisel poolperioodil (b)

Mahtuvus. Elektrimahtuvuse all võime mõista laengut, mis on vajalik keha laadimiseks teatud potentsiaalini. Andes kehale laenguga elektrienergiat, kasvab keha potentsiaal võrdeliselt talle antud laenguga. Seega $\varphi \equiv q$ ja võrdeteguriks on 1/C. Nii saame φ = q / C ehk C = q / φ. Nendest seostest näeme, et elektrimahtuvus on laeng, mis tuleb anda kehale, et muuta selle potentsiaali ühe ühiku võrra.

Kondensaatori võimet salvestada elektrienergiat (elektrilaenguid) iseloomustatakse kondensaatori mahtuvusega. Mida suurem on kondensaatori mahtuvus, seda suurem on temasse salvestunud elektrilaeng – nii nagu

anuma või gaasiballooni mahu suurenemisel suureneb sinna mahtuva vedeliku või gaasi kogus. Kondensaatori laengu salvestamisvõime määravad:

- elektroodi pindala,
- elektroodide vahekaugus,
- elektroodidevahelise dielektriku materjal.

Seega oleneb kondensaatori mahtuvus tema elektroodide mõõtmetest ja kujust, nende vastastikusest asetusest ja elektroode eraldava dielektriku omadustest. Mida suurem on kondensaatori elektroodide pindala, mida väiksem on kaugus nende vahel ja mida suurem on elektroodidevahelise dielektriku dielektriline läbitavus, seda suurem on kondensaatori mahtuvus.

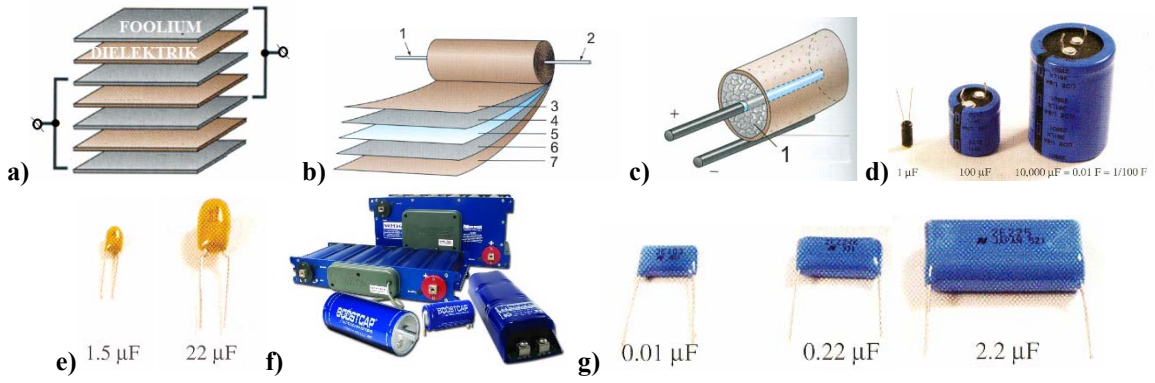
Dielektriku dielektrilise läbitavuse mõju kondensaatori mahtuvusele seletub sellega, et suure dielektrilise läbitavusega ainetes suureneb molekulide polariseerumine sama väljatugevuse juures ja moodustub suurem arv elektrilaengute paare (dipoole). Polariseerunud molekulid tekitavad täiendava elektrivälja, mis nõrgendab põhivälja kondensaatori elektroodide vahel. Seetõttu võib vooluallikast kondensaatorisse üle minna suurem hulk elektrilaenguid.

Kondensaatori mahtuvus C määratakse valemiga $$C = \frac{Q}{U}, \qquad (1.8)$$

kus Q – kondensaatori laeng; U – allikapinge.

Kondensaatori mahtuvust mõõdetakse faradites (F). Mahtuvust 1 farad on kondensaatoril, milles 1 V pinge juures salvestub 1 kuloni suurune elektrihulk. Praktikas kasutatakse peamiselt palju väiksemaid ühikuid: mikrofarad (µF) – üks miljondik osa faradist, seega 1 µF = $1 \cdot 10^{-6}$ F ja pikofarad (pF) – üks miljondik mikrofaradist ehk 1 pF = $1 \cdot 10^{-12}$ F.

Kondensaatorite ehitus. Olenevalt kasutatud dielektrikust ja valmistamise tehnoloogiast liigitatakse kondensaatorid: kile-, keraamilised, elektrolüüt-, ülikondensaatorid ja muutuva mahtuvusega kondensaatorid (joonis 1.57). Kasutades dielektrikuna õhu asemel erinevaid suure dielektrilise läbitavusega materjale, õnnestub kondensaatori samade mõõtmete juures suurendada tema mahtuvust mitu korda. Kondensaatori elektroodide pindala suurendamiseks tehakse ta harilikult mitmekihilisena.



Joonis 1.57. Kondensaatorid: plaatkondensaator (a); kilekondensaator (b). Firma Maxwell Technologies ülikondensaatorid mahtuvusega kuni 3000 faradit (f); keraamilised kondensaatorid (g)

Kilekondensaatorid. Dielektrikuks võib olla 1...30 µm paksune polüester (kahealuseliste hapete ja mitmealuseliste alkoholidega polümeerid), polükarbonaat (süsihappe ja dioksüühendite polüestrid, diflon), polüpropeen või polüstüreen (klaasisarnane kõva plastmass), mille dielektriline läbitavus on 2...4. Elektroodidena kasutatakse õhukest fooliumi, paksusega 5 µm või kilele sadestatud alumiiniumi õhukest kihti (joonis 1.57b). Fooliumkilekondensaatori elektroodideks on õhukesest alumiiniumplekist (fooliumist) lindid, mis on koos nende vahel asetsevate 2...10 µm paksuste dielektrikuribadega rulli keeratud.

Keraamilised kondensaatorid. Kõrgsageduskeraamikakondensaatorid (joonis 1.57g). Neil on dielektrik väikese läbitavusega, ulatudes 3...550. Kõrgsageduskeraamikal on väga väikesed kaod kõrgete sagedusteni ja nõrk mahtuvuse temperatuurisõltuvus. Kõrgsageduskeraamikal põhinevad kondensaatorid on töökindlad, nad

ei kulu peaaegu üldse. Mahtuvuse temperatuurisõltuvus on neil üpris lineaarne ja võib olla nii positiivne kui ka negatiivne.

Senjettkeraamilised kondensaatorid. Senjettelektrikud on välise elektrivälja mõjuta, iseeneslikult polariseeruvad ained, nende dielektriline läbitavus võib olla kuni 10 000. Selline dielektriline läbitavus võimaldab luua väikeste mõõtmetega väga suure mahtuvusega kondensaatoreid. Kuid senjettkeraamikast dielektrikul on suur energiakadu ning mahtuvus oleneb tugevalt ja mittelineaarselt temperatuurist, sagedusest ja pingest. Seega saab neid kasutada ainult madalatel sagedustel ja pingetel ning kohtades, kus väikeste mõõtmete juures on vaja suuri mahtuvusi ja mahtuvuse väärtusele on lubatud suured kõrvalekalded. Puudus: nad vananevad kiiresti.

Elektrolüütkondensaatorid. Alumiiniumelektroodidega elektrolüütkondensaatorid on suure **mahtuvusega** püsikondensaatorid. Nende ühe plaadi moodustab alumiiniumpleki riba. Teise plaadina toimib **elektrolüüt**, mis asub kiudainest lindis. Üheks klemmiks on tavaliselt kondensaatori alumiiniumist kere. Elektrolüüt-kondensaatori pingestamisel alalispingega katab elektrolüüsi tõttu tekkiv elektrit mittejuhtiv alumiiniumoksiid õhukese kihina positiivse elektroodi. See isoleeriv kiht toimibki elektrolüütkondensaatoris **dielektrikuna**. Tekkinud dielektriline oksiidikiht on mõne **molekuli** paksune, seepärast on kondensaatori plaadid teineteisele väga lähedal ja tekkiv mahtuvus suur. Paksemate oksiidikihtide korral saab kõrgemal pingel töötava elektrolüütkondensaatori.

Ülikondensaator ehk superkondensaator on elektrienergia salvestamise seade, milles energia salvestatakse süsinikelektroodidele elektrostaatiliselt. Võrreldes teiste liikidega, on tegu väga suure mahtuvusega kondensaatoriga, mille mahtuvus on keskmiselt 5...7 F/cm^2 (tavalistel kondensaatoritel on erimahtuvus üle miljoni korra väiksem). Salvestatud energia on seega suurusjärgus 10 Wh kuupdetsimeetrile, mis ei ole suur, jäädes kuni 25 korda maha parimatest liitiumvooluallikatest. Siiski on sellisel energiasalvestamisel teatud eelised, mis teevad ülikondensaatori eriti atraktiivseks. Peamisena olgu märgitud energia salvestamise ja energia kättesaamiseks kulutatav aeg, mis võib kesta tunde, kuid võib toimuda ka sekundite jooksul. Tavaliselt on kondensaatorite minimaalne laadimisaeg võrdne kolmekordse ajakonstandiga 3*RC*, kus *R* on sisetakistus ja *C* on mahtuvus. Kui parimatel elektrolüütkondensaatoritel on *RC* millisekundi suurusjärgus, siis ülikondensaatoril on *RC* vahemikus 0,5 kuni 10 sekundit olenevalt kasutatavatest koosteosadest.

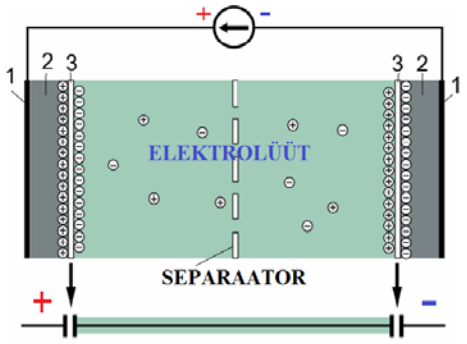
Selline elektrienergia salvestamise meetod avastati juba 1957. aastal seoses kütuseelemendi uuringutega. Katsete käigus ilmnes anomaalia, kus elektrivool ei katkenud kohe pärast gaasivoo sulgemist, vaid element tootis elektrit mõnda aega edasi. Uurimisel selgus, et selle põhjuseks oli kütuseelemendis aktiivse materjali kandjana kasutatud poorne süsinikelektrood, mis suutis hoida sees märkimisväärset laengut. Sel ajal oli süsinikul eripinnaga 400 m^2/g mahtuvus 80 F/g. Ka Tartus paiknev väikeettevõte Tartu Tehnoloogiad OÜ tegeleb alates 1998. aastast nanostruktuurse süsiniku uurimisega ning ülikondensaatorite arendustegevuse ja katsetootmisega.

Lisaeelised: ülikondensaatori tühjendamisel on võimalik saada suurt võimsust, mille garanteerib juba eespool mainitud väike ajakonstant ja ülimadal sisetakistus. Suure võimsuse ja märkimisväärse energiatiheduse tõttu on olulised eelised keemiliste vooluallikate ees. Välispinnaline laengute salvestamine on väga tõhus (kuni 99%) ja oluline energiasalvestamise seisukohalt. Ülikondensaatoril on pikk kasutusiga, mis võimaldab tagada kuni miljon täis- ja tühjakslaadimise tsüklit. Akudel on see näitaja kuni 2000 tsüklit.

Ülikondensaatori tööpõhimõte. Laadimine sarnaneb väliselt akule, erinev on elektrilaengute salvestamine. Akudes salvestatakse energia elektrokeemilise protsessi tulemusena, mis seisneb enamasti selles, et aku laadimisel lahuses olevad metallioonid viiakse elektroodi pinnale ja muudetakse vabaks metalliks. Aku tühjakslaadimisel lahustub metall elektrokeemiliste protsesside tõttu uuesti. Saadud protsessi iseloomustab kõrge energiatihedus, kuid töötsüklite arv on piiratud. Ülikondensaatoris salvestatakse elektrienergia samuti elektroodidele, kuid mitte keemiliselt. Nimelt salvestatakse ioonid elektroodi pinnale adsorptsiooni teel (molekulaarjõududest tingitud kinnitumine tahke aine pinnale). Elektroodi materjali suurele eripinna >1000 m^2/g ja süsiniku suure erimahtuvuse tõttu saadakse ka suured mahtuvused ~1 F/cm^2 ühe elektroodi pinnaühiku kohta. Seetõttu piisab suure mahtuvuse saamiseks suhteliselt väikeste mõõtmetega elektroodidest.

Ülikondensaator [133] koosneb kahest elektroodist, mille välispinnal on ühendusklemmid – kollektorid (joonis 1.58). Elektroodide vahel paikneb elektrolüüdiga immutatud laengute eraldaja – separaator. Elektrolüüdiks kasutatakse

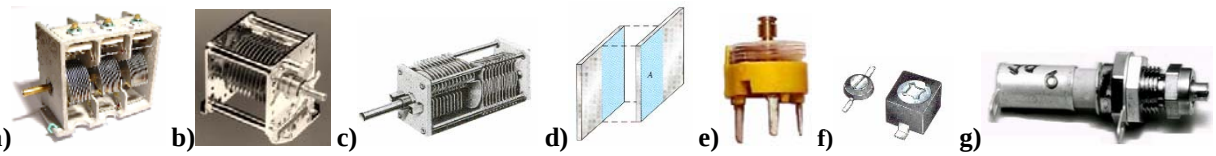
vesilahuseid ja orgaanilisi lahuseid. Elektrolüüt määrab kondensaatoripotentsiaalide vahe väärtuse. Vesilahuste korral küünib see ühe voldini ja orgaaniliste elektrolüütide korral kuni 3 voldini. Kõrgema pinge saamiseks ühendatakse üksikelemendid jadalülitusega kondensaatorpatareiks. Ülikondensaatori laadimisel liiguvad elektronid parempoolselt elektroodilt 2 läbi kollektori 1, allika teise kollektori 1 vasakpoolsele elektroodile 2, tekitades koos parempoolse elektroodi elektronide tühjade pesadega laengute ühise energiavälja (elektrivälja). Selle välja mõjul liiguvad elektrolüüdi positiivselt laetud ioonid paremale, negatiivsed vasakule. Suurepinnalise aktiveeritud söe poorid toimivad seejuures laengu salvestajatena. Elektroodide ja laengute eraldaja separaatori abil moodustatakse kaks järjestikku ühendatud Helmholtzi kakskihti – kondensaatorit 3. Plaatide pindala suurus ning elektroodidevaheline kaugus määravad mahtuvuse ja elektrolüüdiga immutatud separaator määrab sisetakistuse. Ülikondensaatoris kogutakse laengud elektroodi pinnalt kokku voolukollektorite (-kogujate) kaudu ning tarbija ühendamisega välisahelasse toimub kondensaatori tühjakslaadimine ja ioonid liiguvad tagasi elektrolüüti. Laadimisel protsess kordub taas. Tühjenemis-laadimiskõverad on patareidel ja kondensaatoritel erinevad. Kui patarei või aku on püsipinge allikas, siis ülikondensaatori pinge muutub laadimisel ajas. See muudab keerulisemaks akude asendamise ülikondensaatoritega, kuid võimaldab täpselt määrata kondensaatori laadimisastme igal ajahetkel. Ülikondensaatoreid võib ilma süsteemi kahjustamata energiast tühjaks laadida kuni null voldini. Tavaliselt on ülikondensaatorsüsteemid kujundatud selliselt, et kasutatakse ära kuni pool kogupingest, 75% maksimaalsest salvestatud energiast.



Joonis 1.58. Ülikondensaatori ehitus: 1 – kollektor, 2 – elektrood, 3 – kakskiht

Ülikondensaatorite kasutamine on aasta-aastalt kasvanud seal, kus energiaallikatest vajatakse lühikese aja jooksul üha suuremaid võimsusi. Tavaliselt on üksikelementide mahtuvused ühe kuni mõne tuhande faradi piires. Eristatakse suure energia ja võimsusega kondensaatoreid. Väikese mahtuvusega ülikondensaatoreid kasutatakse olmeelektroonikas. Suure mahtuvusega elemente kasutatakse süsteemides, kus vajatavad võimsused on suured ja akud üksi ei rahulda, näiteks elektriajamiga transpordisüsteemide korral ka autotööstuses. Kasutatakse auto kineetilist energiat ehk pidurdusenergiat, mis salvestatakse kondensaatoritesse. Ülikondensaatorite kasutamisel elektriallikatena akude asemel on **põhieelisteks** lihtsad laadimisseadmed ning kiire laadimine ja tühjakslaadimine; suur laadimis-tühjenemistsüklite arv; mittemürgised materjalid; mittepolaarsed ja alla 5% kaod. Tehases märgitakse «+» ja «−», et näidata võimaliku säilinud pinge polaarsust pärast esmalaadimist tehases. **Puudused:** väiksem erienergia 5…12 Wh/kg, liitiumioonakul 200 Wh/kg; mõnevoldine väljundpinge oleneb laadimisastmest; lühisel võivad sisekontaktid läbi põleda; võrreldes akudega oluliselt suurem isetühjenemine.

Muutuva mahtuvusega kondensaatorid on häälestus- ja seadekondensaatorid (joonis 1.59). Häälestuskondensaatori moodustavad kas alumiiniumplaadid või hõbetatud vaskplekist paralleelsed poolümarad plaadid. Plaatide vahel on õhk või mõni väikese kaoga dielektrik. Häälestuskondensaatorite mahtuvus jääb vahemikku 1...470 pF. Seadekondensaator koosneb paigalseisvast ja pööratavast osast (staatorist ja rootorist). Põhiliselt kasutatakse keraamilise dielektrikuga seadekondensaatoreid, mille plaatideks on dielektrikule sadestatud hõbedasektorid. Seadekondensaatorid on väikese mahtuvusega, mis jääb vahemikku 1...33 pF.

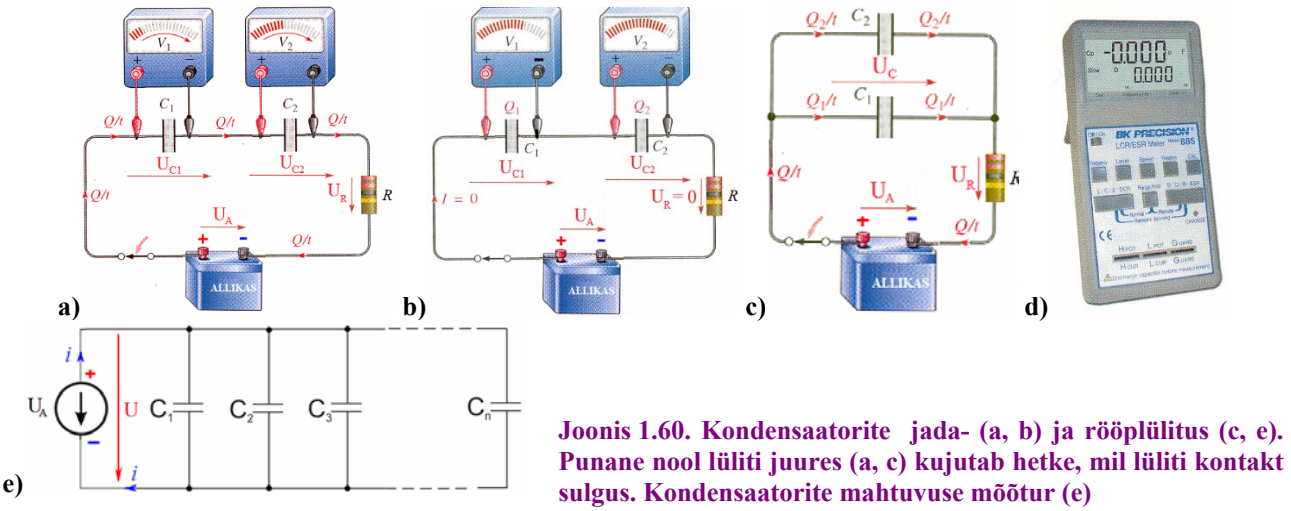


Joonis 1.59. Muutuva mahtuvusega kondensaatorid

Pöördkondensaator (joonis 1.59a, b, c) koosneb kahest õhuvahega eraldatud plaadigrupist: liikumatust ja liikuvast. Liikuvad plaadid võivad liikumatute suhtes ümber asetuda; kondensaatori telje pööramisel muutub vastastikku kattuvate plaatide pindala ja kondensaatori mahtuvus. Siis kui kondensaatori plaadid paiknevad omavahel kohakuti, on kondensaatori mahtuvus suurim.

Tänapäeval kasutatakse muudetava mahtuvusega kondensaatorite valmistamisel sageli pooljuhte. Dielektrikuna toimib sel juhul pooljuhi laengukandjatest tühjenenud osa. Viimase paksust ja ka detaili mahtuvust saab muuta rakendatud pinge muutmise teel. Sellist seadet nimetatakse **varikapiks** (inglise keeles *variable capacity* ehk muudetav mahtuvus).

Kondensaatorite ühendusviisid. Et saavutada mittemuutuvate parameetrite korral vajalik kondensaatorite kogumahtuvus, võib kondensaatoreid C_1, C_2 ... C_n ühendada jadamisi või rööbiti (joonis 1.60).



Joonis 1.60. Kondensaatorite jada- (a, b) ja rööplülitus (c, e). Punane nool lüliti juures (a, c) kujutab hetke, mil lüliti kontakt sulgus. Kondensaatorite mahtuvuse mõõtur (e)

Rööplülituse korral (joonis 1.60c, e) on kõikidel kondensaatoritel võrdne toitepinge U_A. Kondensaatorpatarei kogulaeng Q koosneb üksikute kondensaatorite laengute summast. Laetud osakesed kogunevad kondensaatorite plaatidele, nagu vesi täidab ühendatud anumad. Veetase on kõikides anumates ühesugune, vee kogumass aga moodustub üksikute anumate veemasside summana. Seega kogulaeng

$$Q = Q_1 + Q_2 + \ldots + Q_n,$$

ja kogumahtuvus

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

Kondensaatorpatarei kogumahtuvus rööplülitusel on võrdne iga üksiku kondensaatori mahtuvuste summaga.

Jadalülituse korral (joonis 1.60a ja b) võrdub kondensaatorpatarei kogupinge U üksikute kondensaatorite potentsiaalilangude summaga $U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$.

Sisuliselt tähendab see, et ühise allika pingeväärtuse tasakaalustavad igal ajahetkel iga kondensaatori potentsiaalilangude summa. Olgu laeng Q kõigil kondensaatoritel ühesugune. Avaldades pinge U laengu Q ja mahtuvuse C kaudu saame valemist $C = Q/U$

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \ldots + \frac{Q}{C_n}.$$

Siit

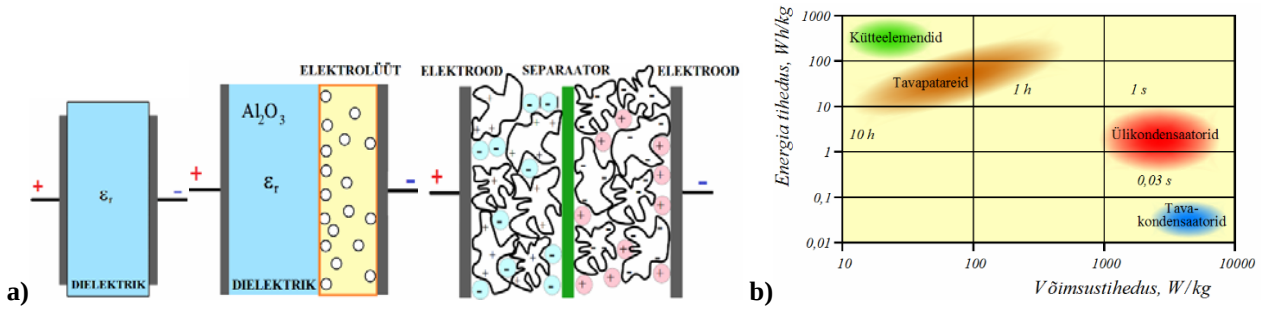
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}.$$

Kondensaatorpatarei kogumahtuvuse pöördväärtus on jadaühenduse korral võrdne üksikute kondensaatorite mahtuvuste pöördväärtuste summaga. Joonisel 1.60a ja b on näidatud pinge muutus kondensaatori laadimisel ja lõpus. Laadimisel läbib siirdeprotsessi käigus kõiki elemente vool ($I = \Delta Q/\Delta t$) ja takistil on potentsiaali lang. Laadimise lõpul vool lakkab ($I = 0$), potentsiaalilang U_R muutub nulliks ja kondensaator omandab laengu Q.

Kondensaatorite mahtuvuse mõõtmiseks on numbrilised mõõteriistad (joonis 1.60d).

Kondensaatorite võrdlus. Joonisel 1.61 on eri tüüpi kondensaatoreid iseloomustavad andmed: vasakul tava-, keskel elektrolüüt- ja paremal ülikondensaatori omad. Elektrirongides ja mootorvedurites kasutatakse kuivi elektrolüütkondensaatoreid. Elektrolüütkondensaator valmistatakse kahest õhukesest rullikeeratud lindist, mille vahele on pandud spetsiaalse elektrolüüdiga (boorhappe lahus ammoniaagiga glütseriinis) immutatud paber.

Üks alumiiniumlintidest kaetakse õhukese alumiiniumoksiidi kelmega, see tekitab suure dielektrilise läbitavusega dielektriku. Kondensaatori elektroodideks on oksiidikelmega kaetud lint ja elektrolüüt; teine lint on vaid elektrikontakti loomiseks elektrolüüdiga. Kondensaator paigutatakse alumiiniumkeresse.



Joonis 1.61. Kondensaatorite võrdlus: vasakul tava-, keskel elektrolüüt- ja paremal ülikondensaator (a). Erinevate energiasalvestite võimsus- ja energiatihedus (b)

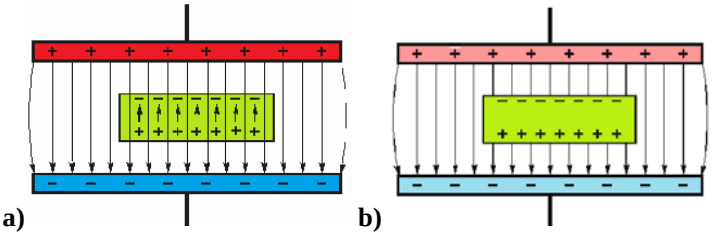
Elektrolüütkondensaatori lülitamisel alalisvooluahelasse on vaja rangelt jälgida pooluste polaarsust: ebaõige lülituse korral toimub dielektriku läbilöök.

Iga kondensaatorit iseloomustab mitte ainult tema mahtuvus, vaid ka pinge suurus, mida talub dielektrik. Liiga suure pinge korral rebitakse dielektriku elektronid aatomitest ära ja toimub kondensaatori läbilöök. Kondensaatoreid kasutatakse laialdaselt tootmisettevõtete elektrivarustussüsteemides ferromagnetseadmete magnetväljade loomiseks vajaliku reaktiivvõimsuse tootmiseks (kompenseerimiseks) kohapeal, elektromagnetiliste võnkumiste tekitamiseks ja vahelduvvoolu silumiseks. Sageli kasutatakse kondensaatoreid elektrirongides, mootorvedurites ja teistes konstruktsioonides (autod, traktorid jt) elektriaparaatide kontaktide sädelemise vähendamiseks.

Kondensaatoriteks on mitte ainult tehases valmistatud riistad, vaid ka mis tahes kaks dielektrikuga eraldatud juhti. Nii on kondensaatoriks kaks paralleelselt asetatud juhet, juhe ja maa, metallkestaga elektrikaabel jt. Neil kõigil on teatav mahtuvus, mis mõjutab tunduvalt elektrotehniliste seadmete tööd vahelduvvoolu puhul.

1.12 Varjestamine

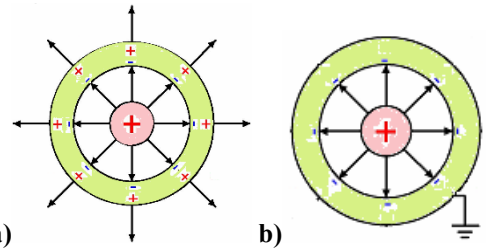
Vaatleme, mis juhtub metalliga elektriväljas. Elektronid liiguvad väljajoonte suunas, kogunedes pinnakihi lähedale ja tekitades vastaspinnas elektronide puudujäägi. Nii moodustub ühes pinnakihis positiivne, teises negatiivne laeng. Laengud paiknevad ümber seni, kuni laengutevaheline jõuväli – vastassuunaline algse välja suunaga elektriväli – saab võrdseks algse väljaga (joonis 1.62a). Seega metalli sees elektriväljad tasakaalustuvad ja algse ning tekkinud välja summa muutub võrdseks nulliga (joonis 1.62b).



Joonis 1.62. Metall elektriväljas. Allika elektrivälja ja metallisisese elektrivälja tasakaalustumise mehhanism (a) ja lõpptulemus (b)

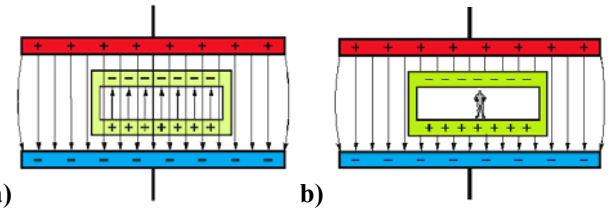
Vaatame õõnsat metallkera, mille keskel on laeng $+Q$. Sellelt laengult algavad väljajooned võivad lõppeda negatiivsel laengul (joonis 1.63). Positiivne laeng $+Q$ tõukab positiivse laenguga elektronid oma pesadest välja. Nii tekkivad kera sisepinnal negatiivsed laengud. Öeldakse, et laeng $+Q$ indutseerib (*inductio* – ladina keeles ergutamine, sissejuhtimine) kera sisepinnale negatiivsed laengud, mille summa on $-Q$. Tõukejõudude

mõjul kogunevad elektronid kera välispinnale, tekitades seal positiivse laengu suurusega $+Q$. Viimane laeng tekitab kera ümber elektrivälja, mis nagu jätkab kera sees olevat elektrivälja. Jooniselt 1.63 selgub, et maandamata metallkera ümber on elektriväli samasugune kui ilma metallkestata laengu korral. Kui metallkest on maandatud (joonis 1.63b), siis kera välispind omandab maa nullpotentsiaali ja väljaspool kera elektrivälja ei teki.



Joonis 1.63. Maandamata (a) ja maandatud (b) õõnsa metallkera elektriväli, kui kera keskpunktis paikneb positiivne laeng $+Q$

Elektrivälja kõrvaldamist mingis ruumiosas nimetatakse **varjestamiseks.** Massiivse metallesemega (joonis 1.64) sarnane laengute ümberpaigutamine toimub ka seest tühjas metallkestas (joonis 1.64), mistõttu metallkesta sees algne allika ja laengute ümberpaigutusega tekkiv sisene elektriväli tasakaalustuvad. Seda kasutatakse elusolendite ja seadmete kaitseks väliste elektriväljade eest.



Joonis 1.64. Seest tühja metallkesta elektriväli (a) ja selle kasutamine kaitsena väliselektrivälja mõju eest (b)

Kui vaatame õõnsat metallkera mingi allika elektriväljas, siis samamoodi joonise 1.64b tulemusega metallist õõneskeras väli puudub.

NÄIDE 1.4

Punktlaengu elektriväli. Metallkeral raadiusega R_k = 1 cm on positiivne laeng $Q = 4\cdot10^{-9}$ C. Algul oli kera õhus, seejärel paigutati destilleeritud vette, mille $\varepsilon = 80$.

Arvutada väljatugevus E ja potentsiaal φ õhus ja destilleeritud vees punktides A, B ja C, mis asuvad kera tsentrist vastavalt 30, 60 ja 90 cm kaugusel, aga ka proovikehale laenguga $q = 3 \cdot 10^{-12}$ C välja poolt avaldatav jõud F.

Lahendus

1. Leiame väljatugevuse. Meie juhtumil kera joonmõõtmed ei ole võrreldavad kaugustega punktideni, milles väljatugevust määratakse. Seoses sellega võib kera vaadelda kui laetud punktikujulist keha ja leida väljatugevused näidatud punktides valemiga

$$E_0 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}, \tag{1.9}$$

kus $\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}$ F/m on elektriline konstant, mis iseloomustab vaakumi elektrilisi omadusi;

ε – keskkonna suhteline dielektriline läbitavus, mis määratakse kui absoluutse dielektrilise läbitavuse ja elektrilise konstandi suhe. See näitab, kui palju on väli keskkonnas nõrgem väljast vaakumis. Et õhu $\varepsilon \approx 1$, siis valem (1.9) võtab kuju $E_0 = \dfrac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$.

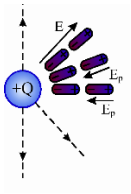
Seega väljatugevus punktis A on $$E_A = \frac{4\cdot10^{-9}}{4\pi\cdot8{,}85\cdot10^{-12}(0{,}3)^2} = 400 \text{ V/m}.$$

Väljatugevuse määramiseks punktis B pole vajadust kasutada valemit (1.9), tuleb lihtsalt silmas pidada, et E on pöördvõrdeline kauguse ruuduga.

Kuna $R_B = 2R_A$, siis $E_B = \frac{E_A}{4} = 100$ V/m.

Punkti C jaoks saame $E_C = \frac{E_A}{9} = 44{,}5$ V/m.

Enne kui leida väljatugevus samades punktides juhtumil, kui õhk on asendatud destilleeritud veega, tuletame meelde dielektriku polarisatsiooninähtuse olemust. Elektrilaengu elektrivälja mõjul (joonis 1.65) tekkib destilleeritud vee polaarsete molekulide (dipoolide) korrastatud orientatsioon.



Joonis 1.65. Destilleeritud vee polarisatsioon

Seejuures on dipoolide elektriväli või polarisatsiooniväli E_p suunatud laengu Q väljale vastu. Järelikult summaarne väli $E' = E - E_p$. Arvuliselt määratakse välja nõrgenemine ε väärtusega. Leiame nüüd väljatugevuse juhtumil, kui dielektrikuna kasutatakse destilleeritud vett: $E'_A = E_A / \varepsilon = 400/80 = 5$ V/m, vastavalt $E'_B = 100/80 = 1{,}25$ V/m ja $E'_C = 44{,}5/80 = 0{,}56$ V/m

2. Leiame jõu, millega väli mõjutab laengut q omavat proovikeha. Vastavalt väljatugevuse definitsioonile $E = F/q$, järelikult $F = E\,q$ ning jõud õhu korral on:

$F_A = E_A q = 400 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 1{,}2 \cdot 10^{-9}$ N; $F_B = E_B q = 100 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 0{,}3 \cdot 10^{-9}$ N; $F_C = E_C q = 44{,}5 \cdot 3 \cdot 0^{-12} = 0{,}134\ 10^{-9}$ N.

Destilleeritud vees on vastavalt $F_A' = E_A' q = 5 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 0{,}015 \cdot 10^{-9}$ N,

$F_B' = E_B' q = 1{,}25 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 0{,}00375 \cdot 10^{-9}$ N,

$F_C' = E_C' q = 0{,}56 \cdot 3 \cdot 10^{-12} = 0{,}00168 \cdot 10^{-9}$ N.

3. Leiame eelmainitud punktide potentsiaalid. Tuleb meeles pidada, et kui väljatugevus on välja jõukarakteristikuks, siis potentsiaal on energeetiliseks karakteristikuks. Samuti on vaja märkida, et potentsiaali väärtus oleneb nullpotentsiaaliga punkti valikust. Sel juhtumil loeme lõpmatult kaugel oleva punkti potentsiaali nulliks. Siis üksildase punktikujulise laetud keha (nn punktlaengu) potentsiaal leitakse valemiga

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R}.$$

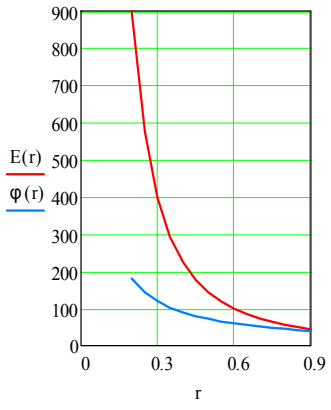
Kuid potentsiaali ja elektriväljatugevuse avaldiste kõrvutamisel saame potentsiaali leidmiseks mainitud juhul lihtsa avaldise $\Phi = ER.$ (1.10)

$\varphi_A = E_A R_A = 400 \cdot 0{,}3 = 120$ V;
$\varphi_B = E_B R_B = 100 \cdot 0{,}6 = 60$ V;
$\varphi_C = E_C R_C = 44{,}5 \cdot 0{,}9 = 40$ V.

Et destilleeritud vee jaoks $\varepsilon = 80$,
siis $\varphi'_A = \varphi_A / 80 = 120/80 = 1{,}5$ V;
$\varphi'_B = \varphi_B / 80 = 60/80 = 0{,}75$ V;

$\varphi'_C = \varphi_C / 80 = 40/80 = 0{,}5$ V. Joonisel 1.66 esitame ka E ja φ graafikud sõltuvalt kaugusest kera keskpunktist

$E(0.01) = 3.597 \times 10^{5} \frac{V}{m}$ $\varphi(0.01) = 3.597 \times 10^{3}$ V



r =	E(r) =	φ(r) =
0.2	899.18	179.836
0.25	575.476	143.869
0.3	399.636	119.891
0.35	293.61	102.763
0.4	224.795	89.918
0.45	177.616	79.927
0.5	143.869	71.934
0.55	118.9	65.395
0.6	99.909	59.945
0.65	85.13	55.334
0.7	73.402	51.382
0.75	63.942	47.956
0.8	56.199	44.959

Joonis 1.66. Väljatugevuse ja potentsiaali olenevus kaugusest kera keskpunktist

1.13 Kordamisküsimused

1. Teie ettekujutus aine ehitusest ja elektri füüsikalisest olemusest, laengust.
2. Elektriallika tekitamise ja kasutamise idee. Allika, tarbija ja salvesti olemus.
3. Laengu energiavälja – elektromagnetvälja füüsikaline olemus. Välja tekitamine ja selle graafiline kujutus.
4. Mis on potentsiaal ja kuidas Teie seda endale ette kujutate? Maandamine. Kuidas maandatud ahelaosa saavutab nullpotentsiaali?
5. Mis on allika potentsiaalide vahe (sisepinge U_A) ja kuidas seda endale ette kujutate? Kuidas on võimalik tekitada U_A?
6. Mis on elektrivool, seos elektrienergiaga? Kuidas kujutate ette elektronide liikumist elektriväljas? Juhtmete soojenemine.
7. Mille poolest erinevad elektrijuht, ülijuht ja isolaator ning miks nad toimivad elektriväljas erinevalt?
8. Tarbija allikapinge ja potentsiaalilangu teke takistis, poolis, kondensaatoris.
9. Kuidas ja millal tekkib elektriahelas mingi kindla väärtusega vool, mis määrab voolu suuruse? Tarbijatel tekkiv potentsiaalilang.
10. Akude lülitused ja nende töö allika ja tarbijana.
11. Kuidas toimib kondensaator elektriahelas? Vastuallikas kondensaatoris. Millised on varjestamise ideed?

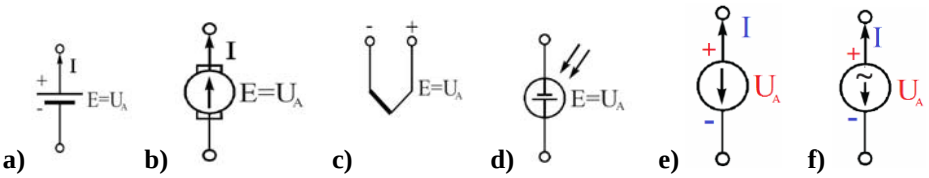
2. ALALISVOOLUELEKTRIAHELAD

2.1. Elektriahelate ja elektriskeemide elemendid
2.2. Elektriahelate aseskeemid
2.3. Ühekontuurilised (hargnemata) lineaarsed elektriahelad
2.4. Potentsiaali muutumine tarbijatakistil (koormustakistil)
2.5. Kondensaatori ja pooli kasutamine alalisvooluahelas
2.6. Takistite ühendusviisid
2.7. Ühe allikaga lineaarahelate arvutus
2.8. Mitme allikaga lineaarahelate arvutus
2.9. Allikate ühendamine jadamisi ja rööbiti
2.10. Siirdeprotsessid alalisvoolu- (AV)-ahelates
2.11. Mittelineaarsed elemendid alalisvooluahelas
2.12. Kordamisküsimused

2.1. Elektriahelate ja elektriskeemide elemendid

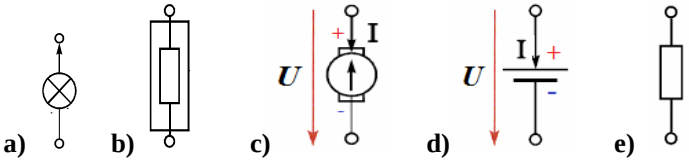
Elektriahel on seadmete kogum, mille kaudu saab kulgeda elektrivool ja milles toimuvaid elektromagnetilisi protsesse võib kirjeldada potentsiaali, potentsiaalide vahe, elektriallika ja tarbijapinge mõistete abil. Elektriahelad koosnevad elektrienergiaallikatest, energia ülekandeseadmetest ja teistesse energialiikidesse muundamise seadmetest. Neist esimesi nimetatakse elektriallikateks, teisi – **ülekandeliinideks (ühendus-juhtmeteks)** ja kolmandaid elektrienergia **tarbijateks**.

On tavaks kujutada elektriahelaid elektriskeemide abil, milles allikad ja tarbijad, samuti neid ühendavad liinid on märgitud standardiga määratud graafiliste tingmärkidega. Raamatu lõpus olevas lisas 4 on esitatud tingmärkide näiteid. Elektriallikates (joonis 2.1) muundatakse mingi teist liiki energia elektrienergiaks. Siia kuuluvad galvaanielemendid ja akud, elektromehaanilised generaatorid, termopaarid, fotoelemendid, magnetohüdrodünaamilised generaatorid, kütuseelemendid ja teised muundurid.



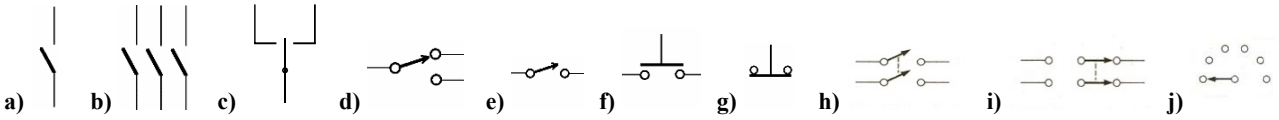
Joonis 2.1. Alalisvoolu energiaallikate üldkasutatav tähistusviis: a – galvaanielemendid ja akud; b – alalisvoolu-generaatorid; c – termopaarid; d – fotoelemendid. Selle õpiku tähistus: e – alalisvoolu elektriallikas; f – vahelduvvoolu elektriallikas

Elektriallikad ja allikasisepinget omavad tarbijad (elektrimootorid, akud laadimisprotsessis jt) loetakse tinglikult **aktiivelementideks**. Elektriedastusliinid, ühendusjuhtmed ja elektrienergiat muundavad tarbijad (joonis 2.2), nagu takistid, elektriahjud, elektrivalgustusseadmed jt, loetakse **passiivelementideks**. Oomtakisti (resistor) on passiivelement, milles toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks ja neid kasutatakse mitmesugustes elektriahelates. Takistis toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks.



Joonis 2.2. Elektritarbijate tähistusi elektriskeemidel: a – hõõglamp; b – elektriahi; c – alalisvoolumootorid; d – akud laadimistalituses; e – takisti üldtähis

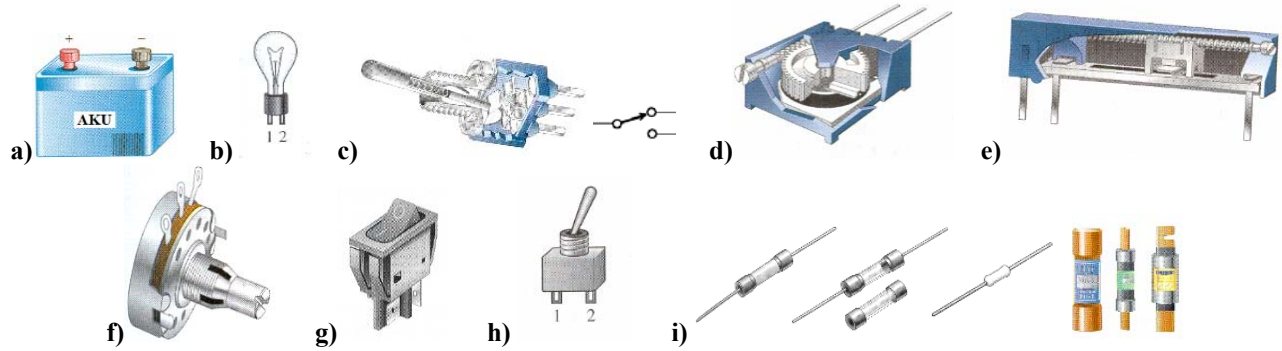
Tarbijate ühendamiseks allikaga (sisse- ja väljalülitamiseks) kasutatakse **lüliteid**. Neid nimetatakse ka kommutatsiooniaparaatideks, tumbleriteks jne. Joonisel 2.3 on näidatud lülitite tingmärke.



Joonis 2.3. Lülite tingmärke: a ja e – lüliti sulguv kontakt, b – kolmefaasiline lüliti, c ja d – kahepositsiooniline ümberlüliti, f ja g – sulguva ja avaneva kontaktiga nupplüliti, h ja i – kahepooluseline lüliti ja ümberlüliti, j – kuuepositsiooniline ümberlüliti

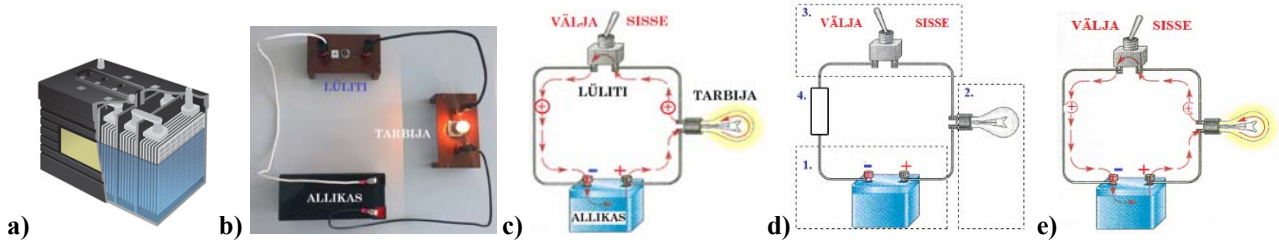
Joonisel 2.4 on esitatud elektriahelates kasutatavad seadmed: a – allikas, b – hõõglamp, c, g ja h – lüliti, i – sulavkaitse, d, e ja f – reguleeritav takisti. Need on väikese võimsusega, nn nõrkvooluseadmed.

Elektriahelad võivad koosneda aktiiv- ja passiivelementide meelevaldsest arvust, mis asuvad omavahel sõlmede kaudu ühendatud erinevates **harudes**. Iga haru, mis **on ühe ja sama vooluga ahela osa,** sisaldab ühe või mitu järjestikku (jadamisi) ühendatud elementi. Igasse **sõlme – harude ühenduskohta** – suubub vähemalt kolm haru. Jadamisi harudest moodustatud kinnist vooluteekonda nimetatakse **kontuuriks.** Ühekontuurilist elektriahelat nimetatakse ka **vooluringiks, mitmekontuurilist – hargahelaks.** Kui ahela koosteelementide tunnussuurused ei olene voolust ega pingest, siis nimetatakse ahelat **lineaarahelaks, vastasel korral mittelineaarseks.**



Joonis 2.4. Elektriahela koosteelementide näiteid: a – allikas, b – hõõglamp, c, g ja h – lüliti, i – sulavkaitse (vasakul väikese võimsusega ja paremal võimsad), d, e ja f – reguleeritav takisti

Lihtsaim elektriahel (joonis 2.5b, d, e) koosneb elektriallikast (patarei), lülitist, ühendusjuhtmetest ja tarbijast (hõõglamp). Joonisel 2.5c on kujutatud tingmärkide abil ahela elektriskeem. See on jadaahel, mille kõikides elementides on üks ja sama vool.



Joonis 2.5. Lihtsaim alalisvoolu elektriahel

Tavaliselt lihtsustatakse skeemi ja ühendusjuhtmete takistus loetakse võrdseks nulliga. Neid kujutatakse ülijuhtidena, **mille alguses ja lõpus on üks ja seesama potentsiaal**. Kui ühendusjuhtmete pikkus on märkimisväärne, siis on tülikas iga juhtmemeetri takistust eraldi arvestada. Need liidetakse omavahel ja saadakse nn **koondparameetritega** takisti. Nii pikkade juhtmete takistust arvestatakse ühe või kahe

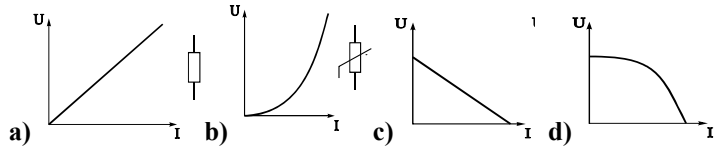
koondparameetritega takisti abil. Seega muundatakse takistust omavas juhtmes elektrienergiat soojusenergiaks. Juhtme aatomites tekkivad laengupaarid – dipoolid (imeväikesed, potentsiaalide erinevust tasakaalustavad allikad), mille elektriväli on vastassuunaline toiteallika väljaga.

2.2. Elektriahelate aseskeemid

Elektriahelates ja elektriseadmetes toimuvate nähtuste tundmaõppimine lihtsustub reaalsete seadmete asendamisel nende elektriliste **aseskeemidega** – **ideaalseid elemente sisaldavate matemaatiliste mudelitega**. Iga ideaalset elementi iseloomustab ainult üks parameeter. Need skeemid peegeldavad reaalsete elektriahelate omadusi ja teatud tingimuste järgimisel lubavad lihtsustada ahelate analüüsi.

Elektriahelad jaotatakse **jada-** ja **hargahelateks**. Jadaahela kõikides elementides on ühesugune vool. Hargahelad jagunevad omakorda **rööp-** ja **segaahelateks**. Rööpahela kõikidel elementidel on üks ja seesama potentsiaalide vahe ehk **potentsiaalilang**. Ahelaelementide põhitunnusjoonteks on nende potentsiaalilangu sõltuvus voolust, mida nimetatakse **voltampertunnusjooneks (karakteristikuks)**. Need võivad olla lineaarsed või mittelineaarsed. Tarbijaid iseloomustab elektritakistus. Lineaarse takistuse puhul avaldub pinge ja voolu vaheline sõltuvus Ohmi seadusega ***U = IR***. Joonisel 2.6 on lineaarse ja mittelineaarse takisti ning lineaarse ja mittelineaarse elektriallika voltamperkarakteristikud (tunnusjooned).

Põhiliselt huvitab meid ahela elektriline seisukord. Seepärast pole vajadust arvestada konkreetset seadet, vaid piisab selle põhiparameetri – takistuse R arvestamisest. Konkreetse seadme asemel on aseskeemis takisti tingmärk. Takistuse suurus määrab iga potentsiaalide vahe korral seadmes toimuvate energiamuundusprotsesside intensiivsuse – voolu suuruse.

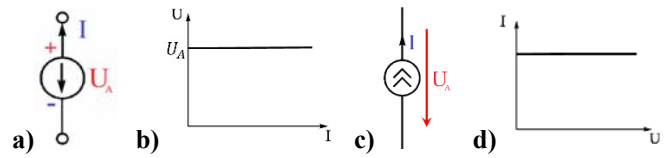


Joonis 2.6. Takisti lineaarne (a) ja mittelineaarne (b) voltampertunnusjoon. Elektriallika lineaarne (c) ja mittelineaarne (d) voltampertunnusjoon

Elektriallikate voltamperkarakteristikuid nimetatakse sageli **väliskarakteristikuteks.** Nad võivad samuti olla lineaarsed (joonis 2.6c) või mittelineaarsed (joonis 2.6d). Tavaliselt väheneb allika klemmipinge voolu suurenemisel. Selle põhjuseks on allika omatarve, millega kaasneb potentsiaalilangu teke allika sisetakistusel R_S.

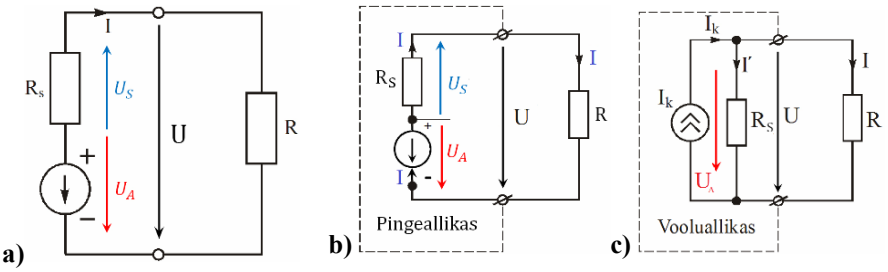
Allikate aseskeemide korral (joonis 2.7) kasutatakse **ideaalse pingeallika** ja **ideaalse vooluallika** mõisteid. Mõningate allikate sisetakistus on nii väike, et voolu muutumisel allika klemmipinge praktiliselt ei muutu, jäädes võrdseks pingega tühijooksul U_{tj}, mida sageli tähistatakse ka tingtähisega U_0. Siis võrdub see praktiliselt allikasisepingega (elektromotoorjõuga). Niisugused allikad asendatakse aseskeemides ideaalsete pingeallikatega. Neid iseloomustab konstantne parameeter $U_A = \text{const}$ ja nende sisetakistus on null. Seega allikasisepinge U_A võrdub **väljundpingega** (klemmipingega) U. Voolu väärtuse määrab siis tarbijate takistus, lühise korral (tarbija takistus on null) tekkiv vool läheneb teoreetiliselt lõpmatuseni. Seega ideaalne pingeallikas annab tarbijale lõpmatult suurt võimsust kui tarbija takistus läheneb nullile.

Teistsuguste allikate puhul on sisetakistus väga suur võrreldes välisahela (tarbija) takistusega ja seetõttu nende vool praktiliselt ei olene allikaväljundpingest. Niisugused allikad asendatakse aseskeemides ideaalsete vooluallikatega (joonis 2.7c). Neid iseloomustab konstantne parameeter I, mis võrdub lühisvooluga, nende sisetakistus on lõpmata suur. Seetõttu allikaga jadamisi ühendatud tarbija takistuse piiramatul suurenemisel kasvab allika klemmipinge ning võimsus teoreetiliselt lõpmatuseni. Seega ideaalne vooluallikas annab tarbijale lõpmatult suurt võimsust, kui tarbija takistus läheneb lõpmatusele.



Joonis 2.7. Ideaalne pingeallikas (a) ja ta voltampertunnusjoon (väljundkarakteristik) (b). Ideaalne vooluallikas (c) ja selle voltampertunnusjoon (väljundkarakteristik) (d)

Reaalseid elektriallikaid saab aseskeemidel kujutada kas ideaalse pinge- või vooluallika abil, lisades skeemi (joonis 2.8) passiivelemendi R_S või G_S.



Joonis 2.8. Reaalse (kadudega) elektriallika aseskeemid sisaldavad: a ja b – ideaalset pingeallikat ja sisetarbijat R_S; c – ideaalset vooluallikat ja sisetarbijat R_S

Reaalset allikat asendatakse nn **Thévenin'i** aseskeemiga, mis koosneb ideaalsest pingeallikast ja jadamisi lülitatud nullist suurema väärtusega allika sisetakistusest R_S (joonis 2.8b). Reaalse allika aseskeemi väljundkarakteristik (joonis 2.6c) avaldub valemiga

$$U = U_A - R_S I \,. \tag{2.1}$$

Takistiga R koormatud reaalse pingeallika väljundkarakteristikut iseloomustab suurim pinge $U = U_A$ tühijooksu talitluses ja suurim vool lühistalitluses $R = 0$ puhul. **Lühisvoolu** I_k piirab siis ainult allika sisetakistus R_S:

$$I_k = \frac{U_A}{R_S} \,. \tag{2.2}$$

Kui allika sisetakistus R_S on palju suurem kui koormustakistus, s.o $R_S >> R$, siis allika vool I jääb praktiliselt konstantseks R muutumisel. Sellist allikat iseloomustab joonisel 2.7d esitatud väliskarakteristik, s.o ideaalse vooluallika karakteristik. Jagame võrrandi (2.1) kõik liikmed takistusega R_S:

$$\frac{U}{R_S} = \frac{U_A}{R_S} - I$$

või

$$I = I_k - \frac{U}{R_S} = I_k - G_S U \,.$$

kus G_S on allika sisejuhtivus.

Reaalsed elektrienergia allikad asendatakse aseskeemidel harilikult pingeallikatega, kui tarbijate takistus on suur võrreldes allika sisetakistusega, s.o nad töötavad tühijooksule lähedasel talitlusel. Kui allika talitlus on lähedane lühistalitusele, s.o kui tarbija takistus on väike võrreldes allika sisetakistusega, siis on otstarbekam nn **Nortoni** aseskeem, kus ideaalse vooluallikaga on rööbiti lülitatud lõpliku väärtusega allika sisetakistus R_S. Välisahela R suhtes on mõlemad skeemid samaväärsed.

Passiivseteks ahelaelementideks on **takisti, ideaalsed kadudeta kondensaator ja kadudeta pool.**

2.3. Ühekontuurilised (hargnemata) lineaarsed elektriahelad

Siin ja edaspidi käsitletakse koondparameetritega ahelaid, s.t eeldatakse, et ühendusjuhtmete takistus on null (lõpmatult suur juhtivus). Juhul kui pikkade juhtmete (liinide) puhul ei saa nende takistust jätta arvestamata, tähistatakse seda eraldi takisti tingmärgiga.

Kui kõikide elektriahela elementide takistused ei olene voolu ega allikapinge suurusest ja suunast, siis **nimetatakse** neid elemente, nagu ka kogu ahelat, **lineaarseks**.

Ühekontuurilises ühe elektriallikaga lineaarses elektriahelas on vool võrdeline allikasisepingega ja pöördvõrdeline kogu ahela takistusega.

Reaalse elektriallika sisetakistus $R_S \neq 0$, kuid tihti seda väiksuse tõttu ei arvestata. Kui allikas voolu ei ole, siis on allikapinge (selle väljundpinge) võrdne allikasisepingega U_A ja allikas on tühijooksu talitluses. Tühijooksul on vooluring silmnähtavalt katkestatud, sest lüliti õhkisolatsioonivahemiku ja tarbija takistuse summa läheneb lõpmatusele (joonis 2.5c). Seega on allikasisepinge U_A ja väljundpinge tühijooksul võrdsed: $U_A = U_0 = U$. Vool ahelas on väga väike ja läheneb nullile $I \approx 0$. Allika potentsiaalilang sisetakistusel R_S läheneb nullile $U_S = IR_S \approx 0$.

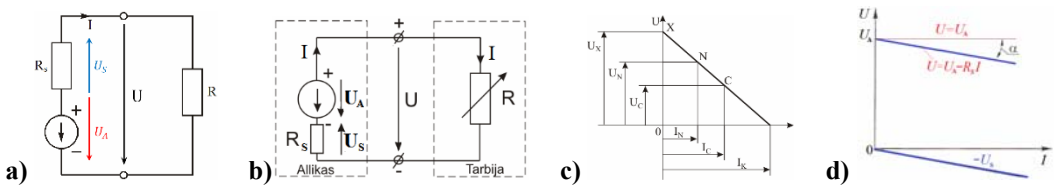
Igasuguse elektriallika sees (vt 1. peatükk), mõjuvad laetud osakestele kahesugused jõud, ühed – **mitteelektrilise** ja teised **elektrilise** päritoluga. Esmased neist on **mitteelektrilise** päritoluga jõud, nn **kõrvalised** jõud, mis muudavad neutraalsed aatomid vastasmärgiga elektriliselt laetud elektronideks ja prootoniteks. Selle tulemusel kogunevad allika väljundklemmidele erinimelised laengud.

Näiteks: alalisvoolu- kui ka vahelduvvoolugeneraatori puhul tekitavad auru-, vee- või gaasiturbiinid kõrvalisi mehaanilisi jõudusid. Alalisvoolugeneraatori põhielemendiks on magnetväljas liikuv juhe.

Koos juhtmega liiguvad generaatori magnetväljas „isiklikku“ magnetvälja omavad (joonis 1.19e) elektronid. Liitudes generaatori ergutusväljaga, tekitab kahe välja liitmagnetväli elektrone ärarebiva jõu. Elektronid rebitakse juhtme ühte otsa, mis laadub positiivselt, juhtme teises otsas elektronide puudujäägi tõttu negatiivselt (vt joonis 1.10d). Suletud elektriahelas (joonis 2.9) määratakse voolu suurus Ohmi seaduse järgi kogu ahelale:

$$I = \frac{U_A}{\sum R} = \frac{U_A}{R + R_S},$$

kus R on välisahela takistus, mis koosneb tarbija ja ühendusjuhtmete takistustest, kus toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks; R_S – elektriallika sisetakistus, kus samuti toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks.



Joonis 2.9. Ühekontuurilise elektriahela aseskeem püsi- (a) ja reguleeritava koormuse (b) korral. Elektriallika väliskarakteristikud, kui c – sisetakistus R_S on suur ning d – kui R_S on väike

Eespool esitatud valemist järeldub ka allikapinge (väljundpinge) avaldis, valem 2.1, $U = U_A - R_S I$. Väljundpinge vektor on suunatud allika positiivselt pooluselt negatiivsele. Konstantse allikasisepinge korral oleneb allikapinge (väljundpinge) voolu suurusest, mis määrab potentsiaalilangu $U_S = R_S I$ elektriallika sees.

Allika sisetakistuse võib määrata allika väliskarakteristikult (joonis 2.9d):

$$R_S = \frac{m_U}{m_I} \tan\alpha,$$

kus m_U ja m_I on mõõtkavategurid, α aga väliskarakteristiku kaldenurk abstsisstelje (voolutelje) suhtes.

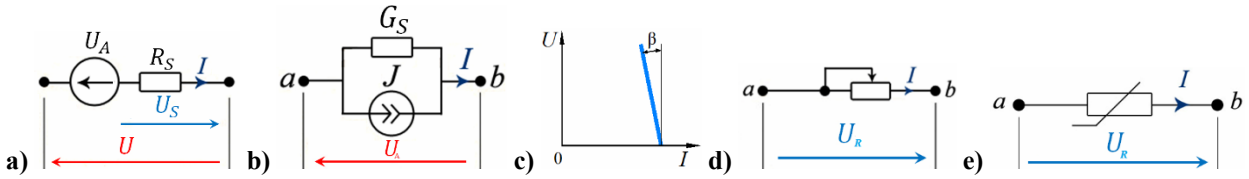
Allikapinge U on allikasisepingest U_A väiksem potentsiaalilangu võrra allika sisetakistusel. Kui sisetakistus on väga väike, siis võib seda mitte arvestada ja väliskarakteristik on lähedane ideaalse pingeallika karakteristikule (sinine joon joonisel 2.9d). Teisendades väliskarakteristiku avaldise kujule $I = \frac{U_A - U_S}{R_{välis}}$ ehk

$I = \dfrac{E - U_S}{R_{välis}}$, saame voolu sõltuvuse pingest, mis on tuntud kui **Ohmi seadus** allikasisepinget sisaldava ahelaosa kohta.

Mõningate allikate väliskarakteristik on peaaegu vertikaalne (joonis 2.10c). Siis võib selle avaldise esitada kujul $I = J - G_S U$, kus allika sisejuhtivus

$$G_S = \frac{m_1}{m_E}\tan\beta\,.$$

Sellisele allikale vastab joonisel 2.10b esitatud aseskeem. Kui $G_S \approx 0$, s.o väliskarakteristikuks on peenjoon (joonis 2.10c), siis võib sellise energiaallika lugeda ideaalseks vooluallikaks, mille vool ei sõltu allikaväljundpingest. Vastasel korral on reaalsest allikast saadav vool I väiksem ideaalse allika voolust J suuruse $G_S U$ võrra, mis kujutab endast allika sisejuhtivuse voolu.

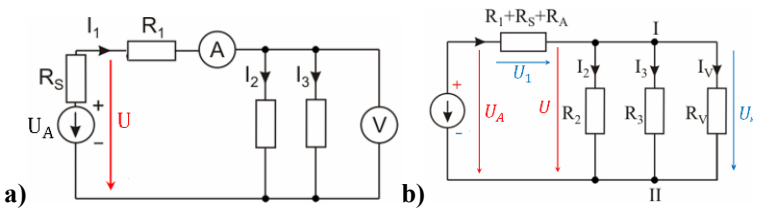


Joonis 2.10. Reaalse pingeallika (a) ja reaalse vooluallika aseskeem (b) ning väliskarakteristik (c). Reguleeritava takisti (d) ja mittelineaarse takisti (e) tingmärgid

Märgime, et joonisel 2.9d kujutatud väliskarakteristik on iseloomulik akude, patareide jt galvaanielementide ning alalisvoolumasinate puhul, aga joonisel 2.9c esitatud karakteristikud – türistoride baasil töötavate toiteallikate korral.

Joonisel 2.10d on näidatud reguleeritava takisti tingmärk, mille takistust saab muuta piirides $R_{min} \le R \le R_{max}$. Harilikult saavutatakse see spetsiaalse libiseva kontakti liigutamisega. Joonisel 2.10e on mittelineaarse takisti tingmärk, mille takistus oleneb voolust I või pingest U. Konstruktsiooni poolest võivad erinevate võimsustega ja otstarbega takistid oluliselt erineda. Ühiseks on neis selliste suure eritakistusega materjalide nagu konstantaan, manganiit jt kasutamine.

Kõrvuti vaadeldud jõuelementidega võivad ahela koostisse kuuluda ka mõõteriistad, nagu ampermeetrid (tähistatakse tähega A ringi sees) voolude mõõtmiseks ja voltmeetrid (tähistatakse tähega V ringi sees) pingete mõõtmiseks. Joonisel 2.11a on skeem, mis sisaldab ühte ampermeetrit (voolu I_1 mõõtmiseks) ja ühte voltmeetrit (potentsiaalilangude $U_2 = U_3$ mõõtmiseks). Nende mõõteriistade õigel ühendamisel ei muutu ahela talitlus (s.o ei muutu või peaaegu ei muutu ahela elementide pinge ja vool). See saavutatakse nii, et **ampermeetri sisetakistus R_A on väga väikese väärtusega**, aga **voltmeetri sisetakistus R_V väga suur**. Neid takistusi võib arvestada joonisel 2.11b esitatud skeemiga. Kui $R_A << R_s$ ja $R_V >> R_2$ aga $R_V >> R_3$, siis võib võtta $R_A = 0$, $R_V = \infty$.



Joonis 2.11. Ampermeetrit ja voltmeetrit sisaldav elektriahel (a) ja selle asekeem (b)

Avaldis $I = \dfrac{U}{R}$ on **Ohmi seadus ahelaosale**, mille klemmidele on rakendatud allikaväljundpinge U, mis määrab voolu I suuna selles ahelaosas ja koos takistusega R voolu suuruse. Analüüsime lihtsaimat elektriahelat (joonis 2.9a), mis koosneb allikast ja tarbijast.

Avaldist $U = f(I)$, kui U_A = const ja R_S = const, nimetatakse lineaarse elektriallika väljund- ehk volt-amperkarakteristikuks ehk pinge-voolu tunnusjooneks (joonis 2.9c). Selle järgi võib mis tahes I väärtuse puhul leida pinge U väärtuse ja järgneva valemiga arvutada **tarbija võimsuse**:

$$P_2 = I^2 R = \frac{U_A{}^2 R}{(R + R_S)^2}.$$

Elektriallika võimsus koosneb tarbijas (koormusel) ja allika sees muundatavast võimsusest:

$$P_1 = I^2 R + I^2 R_S = I^2 (R + R_S) = \frac{U_A{}^2}{R + R_S}.$$

Energia jäävuse seaduse kohaselt peab **allika arendatav võimsus $U_A I$ olema tarbija võimsusest**, s.o $I^2 R$, suurem allika kaovõimsuse $I^2 R_S$ võrra. Tõepoolest, kooskõlas valemiga (2.1)

$$U_A I = I^2 R + I^2 R_S .$$

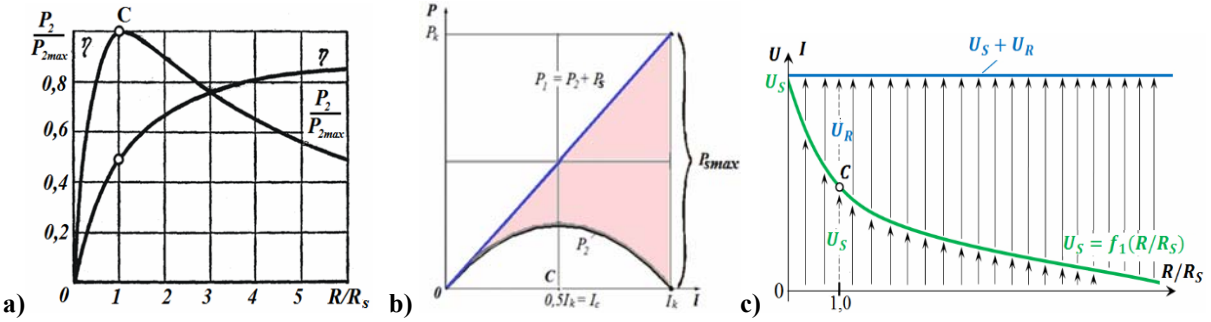
Viimast seost nimetatakse **võimsuste bilansiks**, mis üldisemal juhul on $\sum U_A I = \sum I^2 R$.

Seadme **kasutegur** $$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{R}{R + R_S} = \frac{1}{1 + R_S / R}.$$

Voltamperkarakteristiku punkt *X* (joonis 2.9c) **vastab tühijooksule**, mis esineb avatud ahela korral, kui I_X = 0 ja pinge $U = U_A$. Punkt N määrab nimitalitluse, kui pinge ja voolu väärtused võrduvad nimiväärtustega U_N ja I_N, mis on esitatud elektriallika passis. Punkt K iseloomustab lühistalitlust, mis tekkib allika klemmide omavahelisel ühendamisel (nn lühistamisel), s.o kui välisahela takistus R = 0. Tekkivat **lühisvoolu** piirab vaid allika sisetakistus $I_K = \frac{U_A}{R_S}$.

I_K on harilikult palju kordi suurem nimivoolust I_N, kuna elektriallika sisetakistus $R_S << R_N$. Lühistalitluses allika klemmipinge $U_K = 0$. Tarbijavõimsus on null (välisahelas tarbija puudub). Kogu allikavõimsus eraldub allika sees, muutudes soojuseks.

Joonisel 2.12 vastab punkt C **sobitatud talitlusele, kui välisahela ja allika sisetakistus on võrdsed $R = R_S$.**



Joonis 2.12. Tarbija suhtelise võimsuse ja seadme kasuteguri olenevus tarbija suhtelisest takistusest (a). Allika P_1, tarbija P_2 ja allikas eralduva võimsuse P_S sõltuvus ahela voolust I (b). I ja U sõltuvus takistuste suhtest R_S/R (c)

Siis sobitatud talitluse koormusvool $$I_C = \frac{U_A}{2R_S}.$$

Välisahelasse antakse suurim võimsus $P_{2\max} = \frac{U_A{}^2}{4R_S}$ ja seadme kasutegur $\eta_C = 0{,}5$.

Sobitatud koormust (talitlust), kui $\frac{P_2}{P_{2\max}} = \frac{4R^2}{(R+R_S)} = 1$ ja $I_C = \frac{U_A}{2R} = \frac{I_K}{2}$

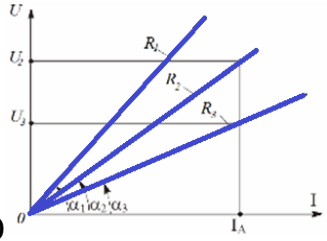
kasutatakse nn nõrgavoolutehnikas (automaatika-, mõõtmis-, sideseadmetes ja mujal) eesmärgiga saada suurimat võimsust tarbijas, kuna neil juhtudel pole väikese võimsuse tõttu kasuteguri väärtusel erilist tähtsust.

Elektroenergeetikas erineb seadmete talitlus tunduvalt sobitatud koormusega talitlusest ja $I << I_C$, tingituna takistuste suurest erinevusest $R >> R_S$, mille tõttu sellistes süsteemides on suur kasutegur.

Praktikas on oluline takistuste suhe R_S/R. Joonisel 2.12c on sõltuvused $I = f\left(\frac{R_S}{R}\right)$ ja $U = f\left(\frac{R_S}{R}\right)$, mis avalduvad vastavalt $I = I_k \frac{1}{1+\frac{R}{R_S}}$ ja $U = U_A \frac{1}{1+\frac{R_S}{R}}$.

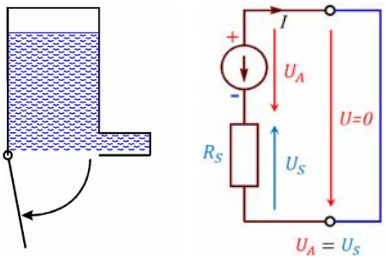
Pinge-voolu tunnusjoone analüüs. Vaatame, kuidas muutuvad pinge ja vool ahela aktiiv- ja passiivelemendis. Aktiivelemendiks on allikad, passiivelemendiks aga tarbijad. Ühe allika ja tarbija korral on aktiivelemendis allikasisepinge ja voolusuund vastassuunalised, passiivelemendis voolusuund ja potentsiaalilangu suunad langevad kokku.

Passiivelemendi potentsiaalilang $U = RI$. Seega, kui R = const, siis pinge-voolu tunnusjoon on nullpunktist lähtuv sirge, α – kaldenurk, m_R – mõõtkava tegur. Kui tarbija takistus R suureneb, siis ka kaldenurk α kasvab ja vastupidi (vt joonis 2.13d). Joonisel on kolme passiivelemendi (tarbija takisti) $R_1 > R_2 > R_3$ potentsiaalilangud. Nende puhul samamärgilist allikasisepinget graafikul samaaegselt ei vaadelda. Et koormusvool erinevate koormustakistuste väärtuste korral võrduks näiteks vooluga I_A, siis tarbija toitepinge (allikaväljundpinge) väärtus U peab olema suurem väikseima takisti potentsiaalilangust U_3, sest $I_A R_2 > I_A R_3$ (sest $R_2 > R_3$).

a) b) c) d) 

Joonis 2.13. Passiivelemendi näited (a,b,c) ja nende pinge-voolu tunnusjoon (d)

Aktiivelemendil sisetakistusega R_s väljundpinge (klemmipinge) $U = U_A - IR_s$. **Tühijooksul** $U = U_A$; **Lühisetalitlus.** Lühisel tarbija takistus R = 0 ja seetõttu allikaväljundpinge $U = 0$, ahelas voolab **lühisvool** $I = I_k$**, mille suurust piirab ainsana allika sisetakistus.** Seega, $I_k = \frac{U_A}{R_s}$.

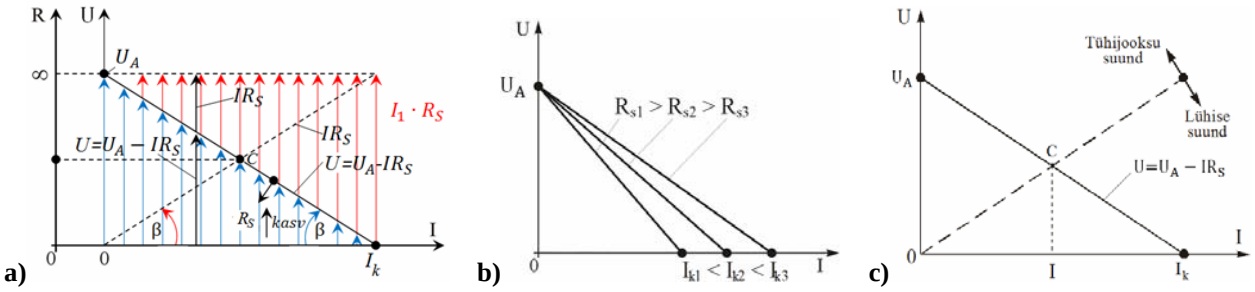


Joonis 2.14. Lühise teke elektriallikas

Lühise teke elektriallikas sarnaneb veepaagiga, millel ootamatult eemaldatakse põhi. Lühistatud allikal puudub tarbija tasakaalustav mõju ja lühisvoolu piirab vaid väike allika sisetakistus (sisetarbija takistus). (joonis 2.14).

Nimitalitlusel töötab elektriallikas nimipinge ja nimivooluga, võimsus vastab nimivõimsusele. Nimijahutustingimuste korral on siis ka nimitemperatuur, mis tagab seadmele **nimieluea**, mis suuremate elektriseadmete korral projekteeritakse *ca* 25 aastaks. Kui seade töötab alakoormusel, siis ta eluiga pikeneb, liigkoormuse korral lüheneb.

Kui allika ja tarbija pinge-voolu (volt-amper) **absoluutväärtuste** karakteristikud esitada graafiliselt, siis nende karakteristikute ristumispunkt määrab ahela tööpunkti. Jooniselt 2.15a ja c näeme, et kui tarbija takistus R on lõpmata suur (tühijooks, ahelas on õhuvahe – katkestus), siis kogu allikapinget tasakaalustav potentsiaalilang tekkib õhuvahel ja sisetakistusel R_s on potentsiaalilang IR_s võrdne nulliga. Lühisetalitluses on vastupidi: vahepeal, tühijooksule lähemal, on siniste nooltega kujutatud allikaväljundpinge U suurem allika sisetakistuse potentsiaalilangust (punased nooled); sobitatud koormuse korral on nad punktis C võrdsed ja lühisetalitlusele lähemal on sinised lühemad kui punased. Jooniselt 2.15a ja c selgub, et kui allika sisetakistus suureneb, siis suureneb ka pinge-voolu tunnusjoone kaldenurk β.



Joonis 2.15. Aktiivelemendi (allika) pinge-voolu tunnusjoon tarbijate erineva takistuse väärtuste korral (a, b, c)

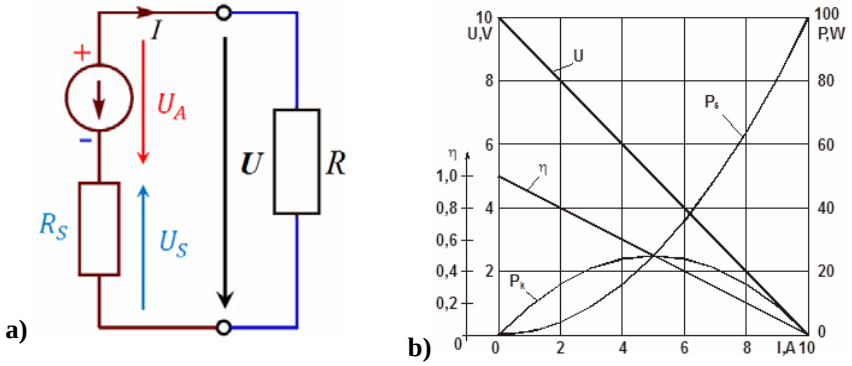
Järgnevas näites käsitletakse allika ja tarbija tööd, kui tarbija takistus muutub tühijooksust kuni lühisetalitluseni. Võimsuse (energia ajaühikus) põhjal vaadeldakse, kui suur osa elektrienergiast läheb tarbijasse, et muunduda teisteks energialiikideks (kasulikuks tööks). Sealt selgub, et lühisetalitluse korral muundub kogu energia allika omatarbena sisetakistusel soojusenergiaks.

NÄIDE 2.1

Antud: Elektriahel (joonis 2.16), mis sisaldab reaalset pingeallikat U_A=10 V, R_s=1 Ω ja tarbijat (koormust), mille takistus R muutub vahemikus nullist lõpmatuseni.

$$\begin{cases} U = U_A - IR_s; \\ P = U \cdot I = U_A I - I^2 R_s \\ P_s = I^2 R_s \\ \eta = \dfrac{P}{P_s + P} = \dfrac{U_A - IR_s}{U_A} \end{cases}$$

Leida: U, P_k, P_s, $\eta(I) = ?$



Joonis 2.16. Lihtsaim elektriahel (a), kus tarbija takistus *R* muutub vahemikus nullist kuni lõpmatuseni ja sellele vastavad ahela tunnusjooned (b)

Lahendus

Arvutustulemused on tabelis 2.1.

Tabel 2.1

Ahela arvutustulemused, kui tarbija takistus *R* muutub vahemikus nullist lõpmatuseni

I	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
P	0	9	16	21	24	25	24	21	16	9	0
P_s	0	1	4	9	16	25	36	49	64	91	100
η	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
R	∞	9	4	2,33	1,5	1,0	0,66	0,43	0,25	0,11	0

Tarbija võimsus on suurim, kui kasutegur on 50%. Kasutegur on suurim tühijooksu lähedastes talitlustes ja muutub nulliks lühise korral. P_{max}=25 W, kui $U = \frac{U_A}{2} = \frac{U_0}{2} = \frac{10}{2} = 5$ V ja kui $I = \frac{I_k}{2} = \frac{10}{2} = 5$ A.

Lühisel eraldub kogu võimsus allikas

$P_l = I_l^2 \cdot R_s = 10^2 \cdot 1{,}0 = 100$ W. See võib olla **OHTLIK** väikese jahutuspinnaga allikale**!**

Tühijooksul ja lühisel võrdub kasulik võimsus tarbijas nulliga.

NÄIDE 2.2

Antud: U_A = 60 V, R_s = 9 Ω.

Leida: U, P_2, P_s, $\eta(I)$ = ?

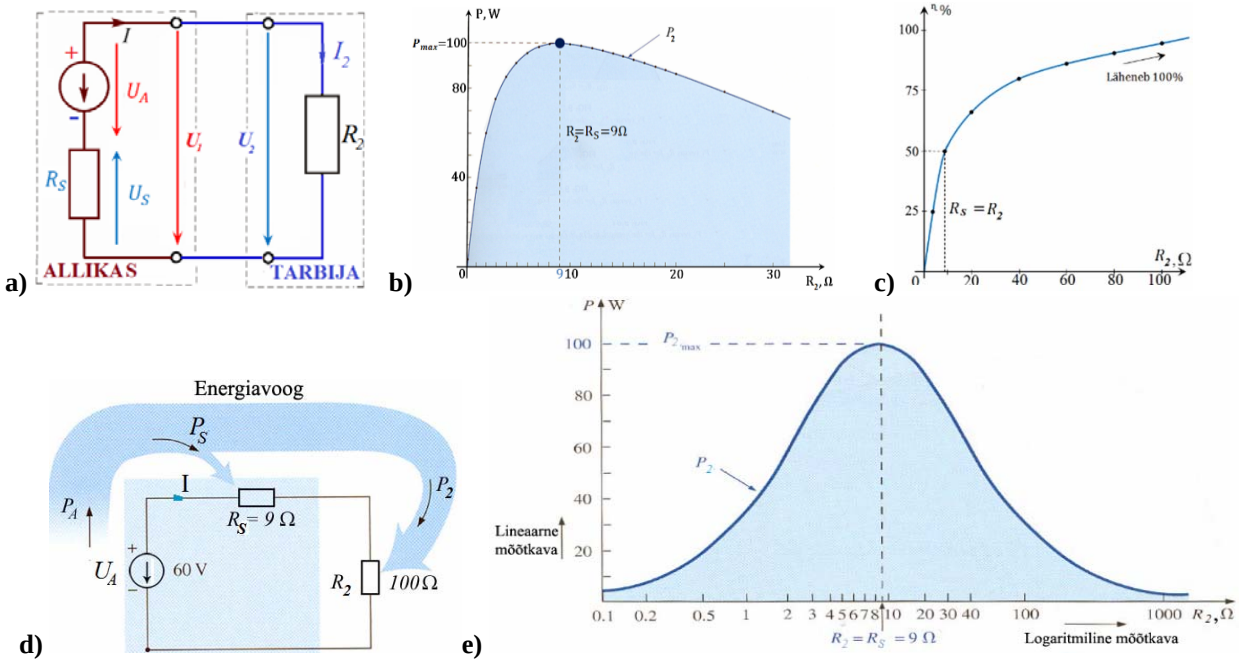
Lahendus

Arvutustulemused on tabelis 2.2 ja joonisel 2.17. Tarbijate elektrivarustusülesannete lahendamisel on allika (toitevõrgu) suuruste indeks 1, tarbijal 2.

Tabel 2.2

Ahela tunnusjoonte arvutustulemused, kui tarbija takistus *R* muutub

R_2, Ω	P_2, W	I_2, A	U_2, V	R_2, Ω	P_2, W	I_2, A	U_2, V
0,1	4,35	6,60	0,66	**13**	96,69	2,73	35,46
0,2	8,51	6,52	1,30	**14**	95,27	2,61	36,52
0,5	19,94	6,32	3,16	**15**	93,75	2,50	37,50
1	36,00	6,00	6,00	**16**	92,16	2,40	38,40
2	59,50	5,46	10,91	**17**	90,53	2,31	39,23
3	75,00	5,00	15,00	**18**	88,89	2,22	40,00
4	85,21	4,62	18,46	**19**	87,24	2,14	40,71
5	91,84	4,29	21,43	**20**	85,61	2,07	41,38
6	96,00	4,00	21,00	**25**	77,86	1,77	44,12
7	98,44	3,75	26,25	**30**	71,00	1,54	46,15
8	99,65	3,53	28,23	**40**	59,98	1,22	48,98
9	**100,00**	**3,33**	**30,00**	**100**	30,30	0,55	55,05
10	99,72	3,16	31,58	**500**	6,95	0,12	58,94
11	99,00	3,00	33,00	**1000**	3,54	0,06	59,47
12	97,96	2,86	34,29				



Joonis 2.17. Tarbija toitelülitus (a) ja võimsuse P_2 ja toiteallikas eralduva võimsuse P_s ning kasuteguri η sõltuvus takistusest R_2

Jooniselt 2.17d näeme, et kui tarbija- (koormustakistus R_2) on *ca* 10 korda suurem kui allika sisetakistus R_s, siis läheb suurem energiavoog tarbijatakistusse ja oluliselt väiksem eraldub allika sisetakistusel.

Tugevvoolutehnikas on maksimaalne kasutegur 0,5 vastuvõetamatu. On lubamatu, et potentsiaalilang toiteallikate sisetakistusel oleks üle 10%. See vastab kasutegurile 0,9. Kasutegur suureneb, kui kasvab suhe R_2/R_s. Seepärast kasutatakse tugevvoolutehnikas võimsaid allikaid, mille sisetakistus on võrreldes koormustakistusega väike, $R_2 >> R_S$. **Seega peab elektriahel töötama võimalikult tühijooksu lähedases talitluses.**

Praktikas esineb kaks nõuet:

- suure kasuteguri väärtuse nõue,
- nõue, et allika ja ülekandeliinide läbilaskevõime oleks tarbija(te) võimsusega kooskõlas.

Esimene nõue on tähtis siis, kui on vaja üle kanda suuri võimsusi või seda energiat muundada näiteks mehaaniliseks energiaks elektrimasinates. Siin võib isegi vähene kasuteguri tõstmine anda suurt säästu. Seega peaks toitesüsteemi võimsus tarbija võimsusega võrreldes olema ideaalis lõpmata suur, allika sisetakistus aga lõpmata väike.

Nõrkvoolutehnikas on allikad väikese võimsusega (R_s on suur). Energiat tarbitakse allika vahetus läheduses. Ülekande kasutegur pole nii tähtis. Siin on oluline, et tarbija saaks maksimaalset võimsust. See on sobitatud koormusega siis, kui $R_2 = R_s$ või allikapinge $U = U_A/2$ ja $I = \frac{U_A}{2R_2} = \frac{I_k}{2}$ ning võimsus

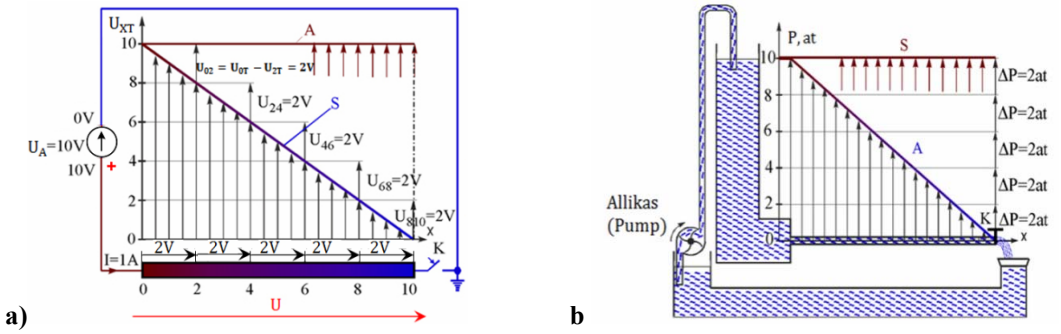
$$P_{k\,\max} \; P_{k\,\max} = \frac{U_A I_k}{4} = \frac{U_A^{\,2}}{4 R_s}.$$

Samad seisukohad kehtivad elektrienergia ülekandel kiirgusenergia vahendusel, ka raadiosides.

2.4. Potentsiaali muutumine tarbijatakistil (koormustakistil)

Vaatleme koormustakistipotentsiaali muutumist joonise 2.18 põhjal. Olgu lüliti *K* avatud (a) ja kraan *K* (b) suletud. Siis on takistused lõpmata suured ning vool ahelas ja veevool puuduvad. Potentsiaali jaotumist iseloomustavad siis sirged *A* ja *S*. Potentsiaal piki trassi on muutumatu – 10 V ja 10 atm.

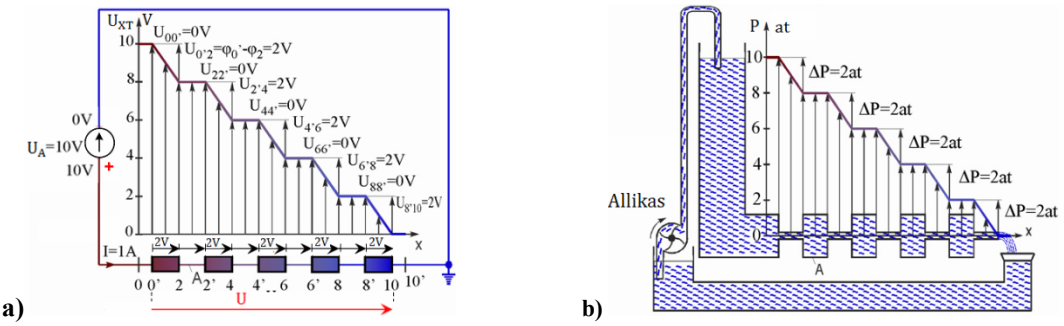
Kui sulgeda lüliti *K* ja avada kraan *K*, siis voolavad nii elektrivool kui ka vesi. Pinge maa suhtes (potentsiaal) jaotub siis vastavalt sirgetele *S* (suletud) ja *A* (avatud).



Joonis 2.18. Välja- ja sisselülitatud elektriahel (a – akust ning takistist koosneva ahela analoog) ja suletud ning avatud kraaniga veetorustiku süsteem (b). Nullpotentsiaali ahelas tagab maanduskontuur. Nullnivooks joonisel b on võetud merepinna tase

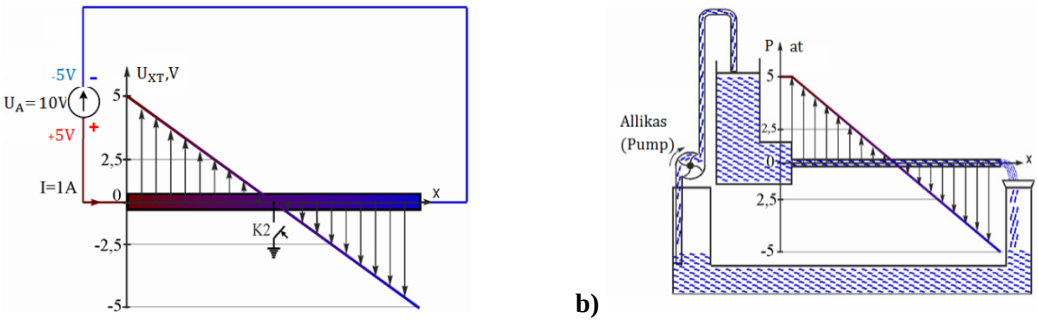
Joonisel 2.18a skeemil on lüliti K üks poolus maandatud. Siis algsed maandamata allikaklemmide potentsiaalid +5 V ja –5 V muutuvad. Negatiivne klemm omandab nullpotentsiaali. Positiivne klemm omandab allikasisepinge (potentsiaalide vahe) tõttu +10 V potentsiaali +10 volti.

Joonisel 2.19a on näidatud potentsiaali jaotumine suletud ahelas, kui jadamisi on ühendatud viis takistit takistusega à 2 oomi. Siin on üks 10-oomine takistus „lõigatud“ viieks võrdseks takistiks. Kuna takistite-vaheliste ahelaosade takistus on null, siis neil osadel potentsiaal ei muutu. Joonisel 2.19b on sarnaselt joonisega 2.19a näidatud rõhu (potentsiaali) jaotumine, kui peenike veetoru teatud hüdraulilise takistusega vaheldub suure diameetriga veetoruga, mille takistus on ligikaudu null.



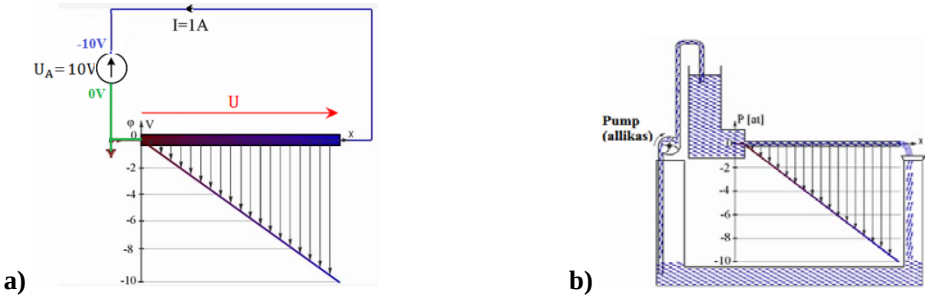
Joonis 2.19. Suletud elektriahel ja veetorustiku süsteem: a – potentsiaalide jaotumine takistite jadaühenduse korral; b – rõhu jaotumine, kui peenike veetoru vaheldub suure diameetriga veetoruga

Joonisel 2.20a on potentsiaali jaotumine suletud ahelas, kui ahelas on takisti takistusega 10 oomi. Siis takisti alguses on potentsiaal +5 V ja lõpus –5 V. Takisti keskel on potentsiaal (pinge maa suhtes) null. Kui see punkt maandada, s.o sulgeda lüliti *K*2, siis potentsiaali jaotus takistil ei muutu. Joonisel 2.20b on sarnaselt esitatud rõhu jaotumine, kui pump võtab vett 5 m sügavuselt allpool merepinda paiknevast veemahutist.



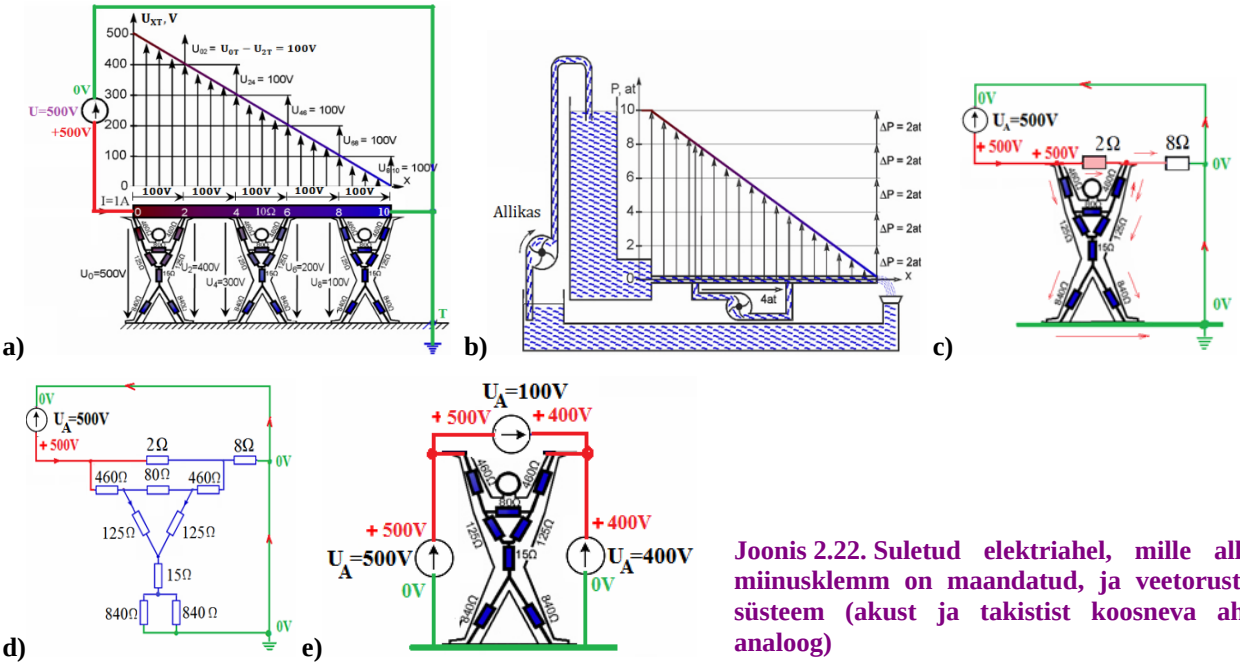
Joonis 2.20. Suletud elektriahel ja veetorustiku süsteem: a – potentsiaalide jagunemine kontuuris, kui maandus on ühendatud või mitteühendatud takisti keskele; b – rõhu jaotumine peenikesel veetorul. Joonisel b pumpab pump vett 5 m allpool merepinda paiknevast veemahutist 5 meetri kõrgusele

Joonisel 2.21a on näidatud ahela skeem, kus allika plussklemm on maandatud. Miinusklemm omandab siis potentsiaali väärtuse –10 V. Samamoodi joonisega 2.21a on joonisel 2.21b näidatud rõhu (potentsiaali) jaotumine, kui veepump pumpab vett 10 m sügavuselt.



Joonis 2.21. Suletud elektriahel, mille allika plussklemm on maandatud ja veetorustiku süsteem (akust ja takistist koosneva ahela analoog). Nullnivooks on joonistel b võetud merepinna tase

Joonisel 2.22a on variandid surmavalt ohtlikust puutepingest, kui inimene seisab voolu juhtival põrandal ja puudutab ühe või kahe käega koormustakistust. **Nii sattub inimene eluohtlikku olukorda!** Ta muutub elektritarbijaks, teda läbivad erinevad voolukontuurid. Inimene talub väga väikest voolu (kuni 30 mA lühiajaliselt).



Joonis 2.22. Suletud elektriahel, mille allika miinusklemm on maandatud, ja veetorustiku süsteem (akust ja takistist koosneva ahela analoog)

Joonisel on näidatud inimkeha ligikaudne elektriline aseskeem. Siin on käte takistus *ca* 460, jalgadel 840 oomi. Rindkeres moodustub takistuskolmnurk, ülemine takisti on 80, külgmised 125 oomi. Rindkere kolmnurga ja jalgadeni ulatuva kehaosa takistus *ca* 15 oomi. Olenevalt ahela maandatud punkti kaugusest võib potentsiaalide vahe inimese käe ja jala vahel muutuda nullist kuni 500 V. Kahe käe potentsiaalide vahe on kõigi kolmel juhtumil *ca* 100 V. Allikast ja takistist koosneva ahela analoogiks on veetorustiku süsteem. Joonise 22b osas pumpab pump vett merepinna tasemelt 10 meetri kõrgusele. Avatud kraani korral voolab torus vesi. Piki toru on surve erinev. Kui toruga ühendada rööbiti veeturbiin, s.t tarbija, mis muundab veevoolu energiat mehaaniliseks energiaks, siis turbiin hakkab tööle survete erinevuse tõttu.

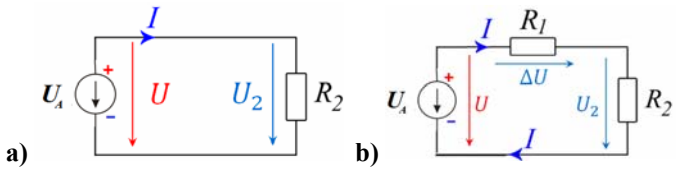
Kui inimene seisab voolu juhtival põrandal (a, c ja e) ning puudutab kahe käega koormustakistit, siis võib ta sattuda eluohtlikku olukorda! Ta muutub elektritarbijaks ja teda läbivad erinevad kontuurivoolud. Joonisel 2.22c on vaatluse all inimene takisti vasakpoolses otsas. Inimest läbivate voolude väärtused saab leida skeemi d teisendamisega. Asendades rindkere juures oleva takistite kolmnurga tähega, jada ja rööplülituses takistid ekvivalentsega, tekkib uus takistite kolmnurk. Asendades ka selle tähega, saame kogu ahela ekvivalentse takistuse ning voolu. Kasutades joonisel 2.38 esitatud hargahela arvutusvõtteid, saab piisavalt korrektselt määrata inimest läbivate voolude väärtused. Ligikaudsel hindamisel võime inimesele rakendunud potentsiaalide vahed asendada 3 allikaga (joonis 2.22e), mis kutsuvad esile voolud kolmes suletud kontuuris ning määrata nende ligikaudsed väärtused.

2.5. Kondensaatori ja pooli kasutamine alalisvooluahelas

Teoreetiliselt on igal reaalsel elektriahelal (või selle osal) oomiline takistus, induktiivsus ja mahtuvus ning selle aseskeem peaks sisaldama kõiki passiivseid ahelaelamente (*R, L, C*). Mõned neist võivad olla aga nii väikesed, et neid võib mitte arvestada.

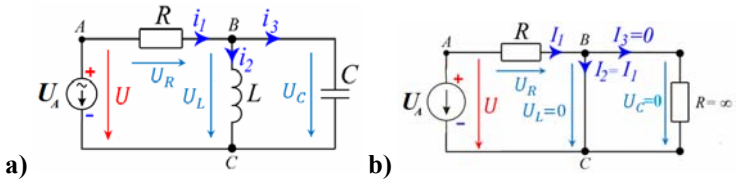
Elektriahelat on mugav kujutada joonisena, nn **elektriskeemina**, mis koostatakse ahelaelementide tingmärkidest ja näitab ka nende ühendamisviisi.

Joonise 2.5 lülitusele vastab aseskeem joonisel 2.23, kus pingeallikas U_A vastab akule ja koormustakistus R_2 elektrilambile. Kui ühendusjuhtmete takistus on küllalt suur võrreldes koormustakistusega, siis aseskeemi lisandub takistus R_l, mis arvestab liinijuhtmete takistust (joonis 2.23b). Ka allika aseskeemile võib lisanduda sisetarbimist arvestav takisti.



Joonis 2.23. Ahela aseskeem ühendusjuhtmete tühise (a) ja arvestatava takistuse (b) korral

Pingeallikat U_A, takistit R, induktiivpooli L ja kondensaatorit C sisaldava elektriahela skeem on näidatud joonisel 2.24a.



Joonis 2.24. Vahelduvvoolu (a) ja alalisvoolu (b) skeem

Neil skeemidel näidatakse harud, sõlmed B ja C, pingete ning voolude i_1, i_2, i_3 valitud positiivsed suunad.

Elektriahelaid liigitatakse ahelates toimuvate elektromagnetiliste protsesside ja ahelaelementide iseloomu järgi. Elektromagnetiliste protsesside järgi jagatakse ahelad alalisvooluahelateks (kui elementide voolud ja pinged perioodiliselt ajas ei muutu) ja vahelduvvooluahelateks (kui ahelat toitva allika potentsiaalide vahe ja elementide voolu suund ja suurus muutuvad perioodiliselt ajas).

Lihtsaimad on alalisvooluahelad, kuna nende aseskeemides puuduvad induktiivpoolid ja kondensaatorid. Kui vool on konstantne, siis pooli sisepinge avaldisest $u = L\dfrac{\Delta i}{\Delta t}$ järeldub, et tema pinge on null, s.o pool alalisvoolu aseskeemil kujutab endast lühist – ideaalset nulltakistusega juhti. Kui pinge on konstantne, siis kondensaatori voolu avaldisest $i = C\dfrac{\Delta u}{\Delta t}$ järeldub, et tema vool on null, s.o kondensaator kujutab aseskeemil haru katkestust (joonis 2.24b).

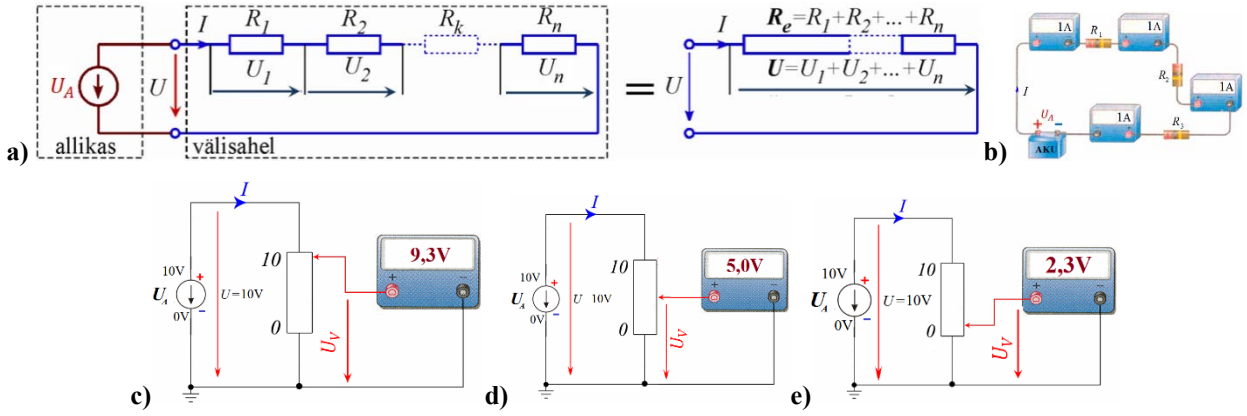
Ahelaelementide iseloomu järgi jagatakse ahelad lineaarseteks ja mittelineaarseteks. Ahel on lineaarne, kui kõik tema elemendid R, L, C on lineaarsed ja allikasisepinge konstantne. Ahel on mittelineaarne, kui ta sisaldab kas või üht mittelineaarset koosteosa.

2.6. Takistite ühendusviisid

Takisteid (tarbijaid) võib omavahel ühendada mitmel viisil. Ahelate arvutuse seisukohalt on oluline skeemi lihtsustada mitme takistuse asendamise teel ühe või minimaalse arvu võrdväärsete takistitega.

Tarbijate jadaühenduse korral (joonis 2.25) on **kõikides takistites üks ja seesama vool** I, mis tekitab takistitel $R_S, R_1, R_2, ..., R_n$ vastavalt potentsiaalilangud $U_S, U_1, U_2, ...U_n$. Ohmi seaduse järgi

$$I = \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = ... = \frac{U_n}{R_n}.$$



Joonis 2.25. Takistite jadaühendus (a ja b). Potentsiaalilangude (voltmeetri sisendpinge) jagunemine takistil (c...e)

Kirchhoffi pingeseaduse põhjal võrdub allikaväljundpinge välisahela kõikide potentsiaalilangude summaga:

$$U = U_1 + U_2 + ... + U_n.$$

Avaldades potentsiaalilangud voolu ja takistite kaudu, saame $U = IR_1 + IR_2 + ... + IR_n$.

Et $$\frac{U}{I} = R_1 + R_2 + ...R_n = R_e,$$

siis jadaühenduse korral välisahela ekvivalenttakistus võrdub osatakistuste summaga

$$R_e = \sum_1^n R_k. \qquad (2.3)$$

Joonisel 2.25a on piltlikult kujutatud, et jadaahela takistid võib mõtteliselt kokku lükata nii, et mitme takisti asemele saame ühe nende takistuste summaga võrdväärse takistusega takisti.

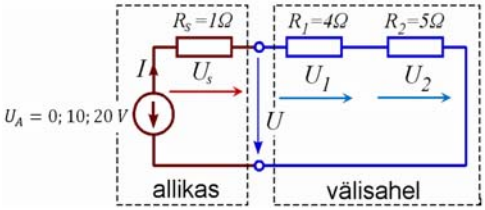
Ahela kogutakistus R_Σ võrdub allika sisetakistuse R_S ja välisahela ekvivalenttakistuse R_e summaga.

$$U_A / I = R_\Sigma = R_S + R_e .$$

NÄIDE 2.3

Antud: elektriahel on jadalülituses takistitega (R_1 ja R_2). Toiteallika sisetakistus R_S = 1 Ω.

Leida: ahela vool ja potentsiaalilangud kolme U_A väärtuse juures U_A = 0; 10 ja 20 V kõigil joonisel 2.26 kujutatud takistitel.



Joonis 2.26. Takistite jadalülitus

Lahendus

Leiame voolud $$I = \frac{U_A}{R_\Sigma} = \frac{U_A}{R_S + R_1 + R_2} = \frac{U_A}{1+4+5} = \frac{U_A}{10} .$$

Seega kolme U_A väärtuse puhul on kolm voolu väärtust vastavalt 0; 1 ja 2 A.

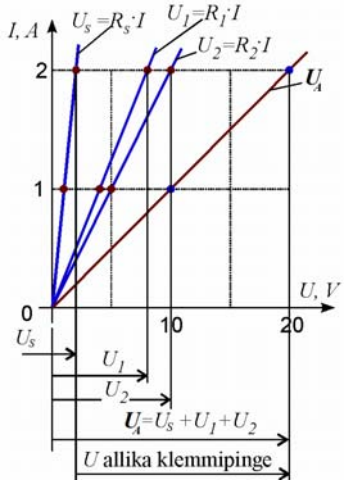
Leiame iga voolu väärtuse korral ahelas tekitatud potentsiaalilangud U_S, U_1 ja U_2. Nende summa võrdub allikasisepingega U_A. Potentsiaalilangud ahelas väljenduvad järgmiste seostega:

$$U_S = IR_S,\ U_1 = IR_1 \text{ ja } U_2 = IR_2.$$

Allikasisepinget tasakaalustavate potentsiaalilangude summa mingi konkreetse voolu I väärtuse juures on

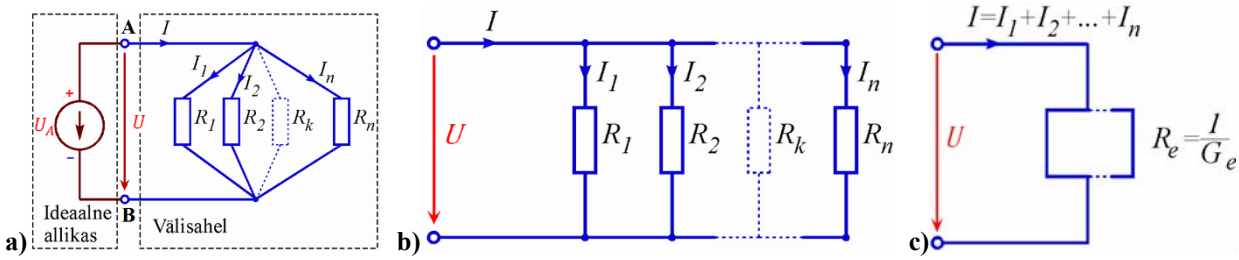
$$U_A = U_S + U_1 + U_2 = IR_S + IR_1 + IR_2 = I(R_S + R_1 + R_2) = IR_\Sigma .$$

Kanname graafikule punktidena arvutatud potentsiaalilangude absoluutväärtused ja neile vastavad voolud. Ühendame need omavahel sirgjoonega. Saame iga ideaalse takisti (R_S, R_1 ja R_2) voltampertunnusjoone. Nende liitmisel leiame sõltuvuse $U_A = f(I)$ (joonis 2.27), mille abil võib määrata voolu mis tahes allikasisepinge väärtuse korral.



Joonis 2.27. Potentsiaalilangude leidmine takistite jadalülituse korral. Allikaväljundpinge (klemmipinge) on allika sisetakistil oleva potentsiaalilangu võrra allikasisepingest väiksem

Tarbijate rööplülitus(-ühendus). Olgu n elemendist koosnev rööpahel (joonis 2.28). Ideaalse ilma kadudeta allika korral sisepinge väärtus võrdub allikapinge (väljundpinge) väärtusega $U_A = U$.



Joonis 2.28. Ahela skeem takistite rööplülituse korral (a). Praktikas (graafiliselt lihtsam kujutada) kasutatavaim rööpahela skeem (b), kus sõlmed A ja B on jaotatud sama potentsiaali omavateks sõlmedeks. Ahela ekvivalentne aseskeem (c), kus suuremat voolu läbilaskev ekvivalentne takisti R_e on siin kujutatud suurema põiklõikega

Tarbijate rööplülituse korral on **kõigi takistite ühistele klemmidele rakendatud üks ja seesama allika-sisepinge** või allikapinge (väljundpinge), mis põhjustab takistites $R_1, R_2, ..., R_n$ vastavalt voolud $I_1, I_2, ..., I_n$. Ohmi seaduse põhjal

$$U = I_1 R_1 = I_2 R_2 = ... = I_n R_n. \tag{2.4}$$

Siin **võrdub allikavool tarbijate üksikute haruvoolude summaga**:

$$I = I_1 + I_2 + ... + I_n. \tag{2.5}$$

See on **Kirchhoffi esimene seadus – hargnemispunkti (sõlme) suubuvate voolude summa võrdub hargnemispunktist väljuvate voolude summaga.** Üldjuhul, arvestades voolude suunda, saame:

$$\sum I = 0.$$

Asetades võrrandisse (2.5) haruvoolude väärtused seosest (2.4), saame:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + ... + \frac{U}{R_n},$$

millest

$$\frac{I}{U} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + ... + \frac{1}{R_n} = \frac{1}{R_e}, \tag{2.6}$$

kus üldjuhul rööplülituse välisahela ekvivalenttakistus $R_e = \dfrac{1}{\sum_1^n \dfrac{1}{R_k}}$. (2.7)

Avaldise (2.6) ja (2.7) ning $G = \dfrac{1}{R}$ põhjal $\dfrac{I}{R_e} = G_1 + G_2 + ... + G_n = G_e$.

Seos (2.7) on siis avaldatav kujul $R_e = \dfrac{1}{\sum_1^n G_k}$.

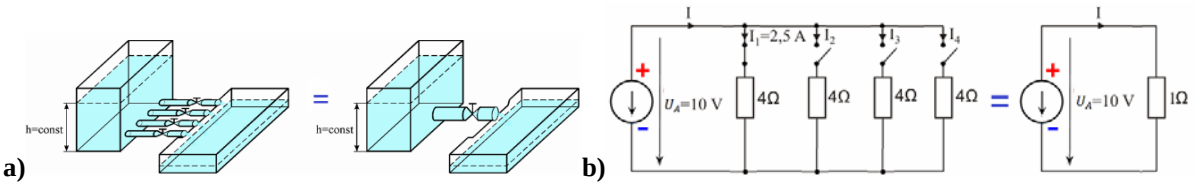
Jooniselt 2.28 on näha, et rööpahela takistid võib mõtteliselt kokku lükata üheks suurema ristlõikega takistiks, mille takistus on alati väiksem rööpahela takistitest kõige väiksema väärtusega takisti omast.

Seega võrdub rööpühenduse korral välisahela ekvivalentjuhtivus kõigi osajuhtivuste summaga.

Kahe rööbiti ühendatud takisti ekvivalenttakistus (2.5) põhjal

$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \tag{2.8}$$

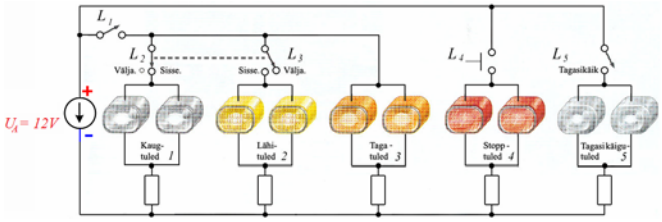
Rööplülituse olemust iseloomustab muutumatu veenivooga reservuaari näide (joonis 2.29), millest väljuvad viis identset kuulkraaniga varustatud vee väljavoolutoru (a). Avades esimese toru, tekkib veevool näiteks 10 liitrit minutis, avades kraani rööplülituses oleval teisel torul, kasvab kogu vool 20 liitrini minutis jne.



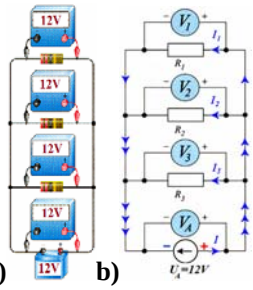
Joonis. 2.29. Mitme veetoru(a) ja takisti (b) asendamine ühe võrdväärsega

Viimase, viienda kraani avades kasvab koguvool 50 liitrini minutis. Need 5 paralleeltoru võib asendada ühe võrdväärse jämedama toruga, mille hüdrauliline takistus on 5 korda väiksem ning selle toru avamisel veevoolu tugevus on 50 liitrit/min. Sarnane olukord on ka elektriahelas (joonis 2.29b). Siin on allikas pingega 10 V ja neli rööplülituses olevat tarbijat (takistit). Esimese takisti lülitamisega tekkib vool 2,5A, järgmise lülitamisega lisandub veel 2,5 A. Viimase, neljanda lüliti sulgemise järel kasvab koguvool I esimesega võrreldes 4 korda ja on 10 A. Seega neli rööptalituses olevat võrdset takistit võib asendada ühe võrdväärse neli korda väiksema takistusega takistiga. Ka siis voolab lüliti sulgemisel ahelas vool 10 A.

Joonisel 2.30a on esitatud autovalgustite toiteskeem. Siin lülitatakse eraldi lülitite abil sisse ja välja kaug-, lähi-, taga-, stopp- ja tagumise käigu tuledepaarid.



Joonis. 2.30. Autovalgustid



a) **b)**

Joonis 2.31. Allikast ja kolmest rööplülituses olevast takistist koosnev ahel (a) ja selle elektriskeem

Joonisel 2.31a on piltlikult näidatud takistite rööplülitus. Takistitel olevat potentsiaalilangu mõõdavad voltmeetrid, mille näidud on kõigil võrdsed. Joonisel 2.31b on näidatud sama ahela elektriskeem.

NÄIDE 2.4

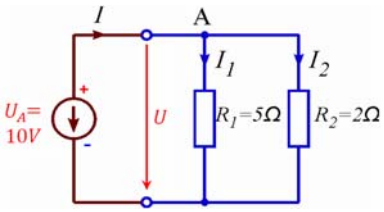
Antud: olgu meil ideaalsest kaovabast allikast ($U_A = U$) ja kahest rööplülituses olevast ideaalsest takistist R_1 ja R_2 koosnev elektriahel (vt joonis 2.32).

Leida: välisahela ekvivalenttakistus ja voolud I, I_1 ja I_2.

Lahendus

Teades takistitele rakendatud allikapinge väärtust ning R_1 ja R_2 suurust, võib arvutada haruvoolud I_1 ja I_2

$$I_1 = \frac{U_A}{R_1} = \frac{10}{5} = 2\ \text{A}; \qquad I_2 = \frac{U_A}{R_2} = \frac{10}{2} = 5\ \text{A}.$$



Joonis 2.32. Allikast ja kahest rööplülituses olevast takistist koosnev elektriahel

Leitud I_1 ja I_2 väärtuste põhjal määrame Kirchhoffi I seaduse abil sõlme A suubuva voolu I

$$I = I_1 + I_2 = 2 + 5 = 7 \text{ A}.$$

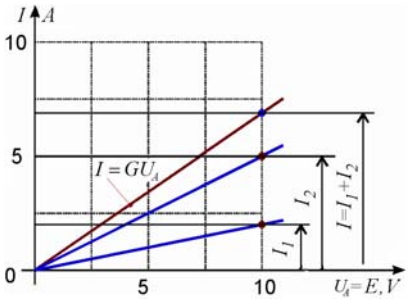
Leiame voolud ka juhtivuste kaudu

$$I = I_1 + I_2 = G_1 U_A + G_2 U_A \text{ ehk}$$

$$I = (G_1 + G_2) U_A. \text{ Siit rööplülitusega ahela juhtivus}$$

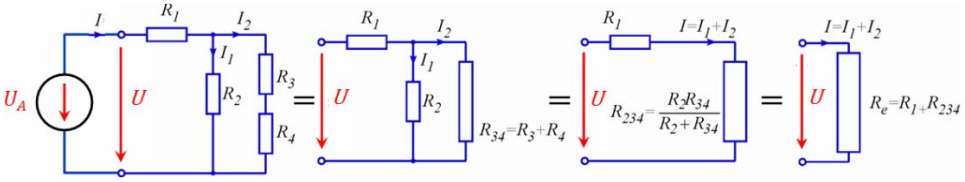
$$G = G_1 + G_2 = \frac{1}{5} + \frac{1}{2} = \frac{2+5}{5 \cdot 2} = 0{,}7 \text{ S}.$$

Rööplülituse välisahela ekvivalentne takistus $R_e = \frac{1}{0{,}7} = 1{,}429$ Ω. Leiame voolud juhtivuse kaudu. Joonisel 2.33 on 10 V suuruse allikapinge väärtusele kantud voolude $I_1 = G_1 U_A = \frac{1}{5} \cdot 10 = 2$ A ja $I_2 = G_2 U_A = \frac{1}{2} \cdot 10 = 5$ A väärtused ning nende summa. Koguvoolu saab leida ka ekvivalentse juhtivuse kaudu $I = G U_A = 0{,}7 \cdot 10 = 7$ A.



Joonis 2.33. Voolu leidmine juhtivuse kaudu

Tarbijate segalülitus koosneb jada- ja rööplülituses olevatest skeemielementidest ning on taandatav ühele ekvivalenttakistusele. Joonisel 2.34 on näide takistite segalülitusest.



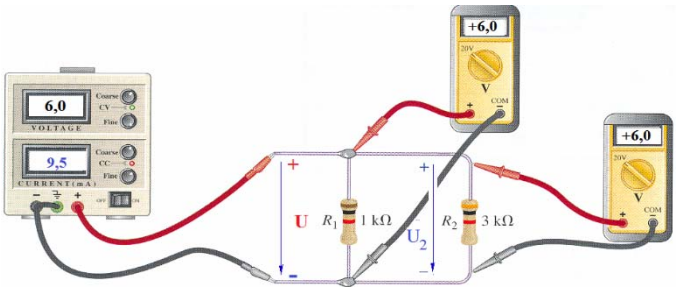
Joonis 2.34. Takistite segalülituse asendamine ekvivalentse takistiga

Siin on jadamisi ühendatud takistid R_3 ja R_4, mis on asendatavad ühega: $R_{34} = R_3 + R_4$.

Takistiga R_{34} on rööbiti ühendatud takisti R_2. Viimased asendame ühega: $R_{234} = \frac{R_2 R_{34}}{R_2 + R_{34}}$.

Joonistel 2.28 ja 2.34 on teisendustel tinglikult näidatud, et jadaahela takistuste liitmisel on ekvivalentne takisti pikem ja rööpahelal laiem („põiklõige“ suurem).

Tarbijate rööplülituse kokkuvõte. Rööplülituse korral on igale tarbijale rakendatud allikapinge ehk üks ja sama potentsiaalide (maapingete) vahe. Joonisel 2.35 oleval pildil mõõdavad voltmeetrid ühte ja sama potentsiaalide vahet – potentsiaalilangu takistitel. Allikavool võrdub mõlema takisti haruvoolu summaga (joonis 2.36a). Seega kujuneb allika koguvool tarbijate haruvoolude summast. Seda on piltlikult kujutatud joonisel 2.36b, kus vaatleja näeb silla alla suubuvat jõge veevooluga Q_1. Seejärel jaguneb jõgi kaheks harujõeks. Veevool kitsamas harus Q_2 (suurem hüdrauliline takistus) jääb väiksemaks kui veevool laiemas harus Q_3. Samapalju vett, kui silla alla suubub (Q_1), sealt ka väljub. Seega on tulemus $Q_1 = Q_2 + Q_3$ kooskõlas Kirchhoffi I seadusega elektriahelatele (joonis 2.36a ja c).

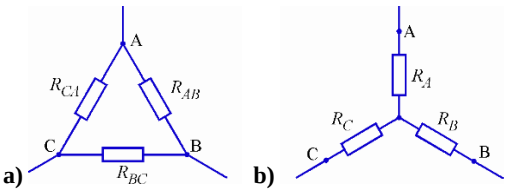


Joonis 2.35. Rööplülituse korral on tarbija pinged võrdsed

a) **b)** **c)**

Joonis 2.36. Takistite rööplülitus ja Kirchhoffi I seaduse piltlik tõlgendus jõe veevoolu sarnasuse alusel. Sõlme suubuvate voolude summa võrdub sõlmest äravoolavate voolude summaga

Teisendused tähtlülitusest kolmnurka ja vastupidi. **Täht- ja kolmnurklülituses** on kolm takistit ühendatud nii, et nad ei moodusta ei jada- ega rööplülitust. Skeemi kolme punkti $A, B,$ ja C vahel on näidatud kolmnurklülitus joonisel 2.37a ja tähtlülitus joonisel 2.37b. Seejuures on kolmnurklülitus asendatav ekvivalentse tähtlülitusega ja vastupidi. Sellist teisendust rakendatakse skeemide lihtsustamiseks.



a) **b)**

Joonis 2.37. Takistite kolmnurklülitus (a) ja tähtlülitus (b)

Ekvivalentse tähtlülituse takistused on kolmnurklülituse takistuste kaudu avaldatavad

$$R_A = \frac{R_{AB}R_{CA}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{CA}},$$

järgmiselt: $$R_B = \frac{R_{BC}R_{AB}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{CA}}, \qquad (2.9)$$

$$R_C = \frac{R_{CA}R_{BC}}{R_{AB}+R_{BC}+R_{CA}}.$$

Ekvivalentse kolmnurklülituse takistusi saab leida tähtühenduse takistuste kaudu

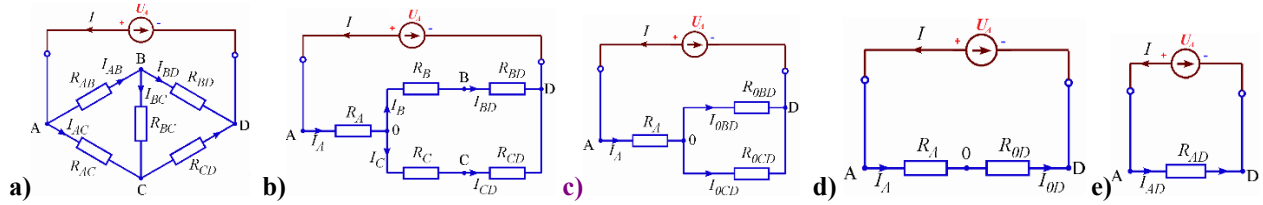
valemitega $$R_{AB} = R_A + R_B + \frac{R_A R_B}{R_C},\ R_{BC} = R_B + R_C + \frac{R_B R_C}{R_A},\ R_{CA} = R_C + R_A + \frac{R_C R_A}{R_B}. \qquad (2.10)$$

Edasine arvutus toimub nagu tarbijate segalülituse korral.

2.7. Ühe allikaga lineaarahelate arvutus

Ahela arvutamisel on tavaliselt vaja leida voolud ahela kõikides harudes ja toiteallikas, kusjuures on antud allikasisepinge U_A ja kõikide harude takistused. Lineaarahelates on takistused konstantsed (ei sõltu voolu tugevusest).

Ühe allikaga hargneva ahela ehk hargahela korral on üheks lahendusmeetodiks ahela lihtsustamine võrdväärseks jadaahelaks. Vaatleme seda joonisel 2.38a esitatud lülituse korral.



Joonis 2.38. Hargahela lihtsustamine

Asendades kolmnurklülituses (*ABC*) takistid valemite (2.10) alusel ekvivalentse tähtlülituses takistitega, saame joonisel 2.38b esitatud skeemi. Leides ekvivalenttakistused jadamisi ja rööbiti ühendatud takistite asemele, saame skeemid joonistel 2. 38c, d ja lõpuks e.

Viimase skeemi alusel vool toiteallikas $I \equiv I_{AD} = \frac{U_A}{R_{AD}+R_S} = I_A \equiv I_{OD}.$

Teades voolu, on võimalik leida potentsiaalilang punktide 0 ja *D* vahel (joonis 2.38d), $U_{OD} = I_{OD}R_{OD}$

ja siis voolud (joonis 2. 38c). Voolu I_{BC} arvutamiseks on vaja leida potentsiaalilang punktide *B* ja *C* vahel. Punkti *B* potentsiaal φ_B on punkti *D* potentsiaalist φ_D kõrgem potentsiaalilangu võrra takistil R_{BD} ehk

$$\varphi_B = I_{BD}R_{BD} + \varphi_D;$$

samamoodi $$\varphi_C = I_{CD}R_{CD} + \varphi_D.$$

Kui $\varphi_B > \varphi_C$, siis $U_{BC} = \varphi_B - \varphi_C = I_{BD}R_{BD} - I_{CD}R_{CD}$ ja vool $I_{BC} = \frac{U_{BC}}{R_{BC}}.$

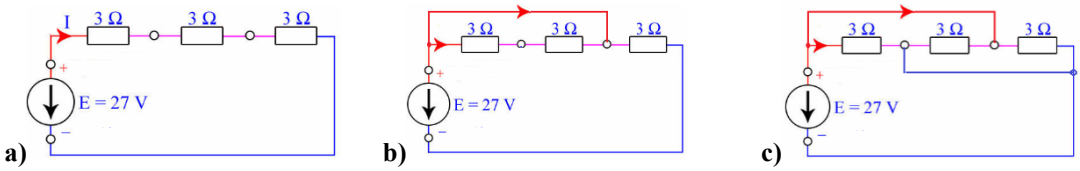
Nüüd saame Kirchhoffi esimese seaduse järgi sõlmede *B* ja *C* (joonis 2. 38a) kaudu vastavalt voolud

$I_{AB} = I_{BD} + I_{BC}$ ja $I_{AC} = I_{CD} + I_{BC}.$

Kontrolliks võib veenduda, et näiteks hargnemispunktis A $I_{AB} + I_{AC} = I$.

NÄIDE 2.5

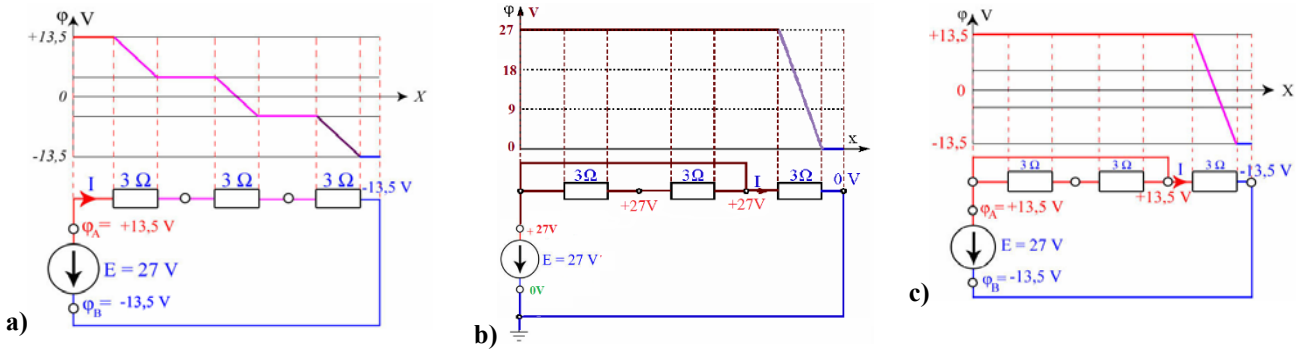
Leida toiteallika vool ja potentsiaalide jagunemine kolmes ahelas a, b ja c, kui allika klemm on maandatud ja maandamata.



Joonis 2.39. Voolude ja potentsiaalide leidmine, kui ahela osi sillatakse ühendusjuhtme abil

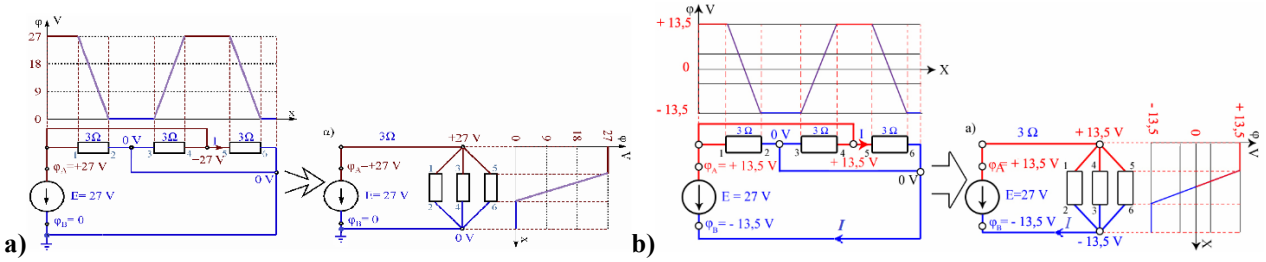
Lahendus. Lülitus a, siin on vool *I*=27/(3+3+3)=3 A. Lülitus b, siin on vool *I*=27/3=9 A. Lülitus c, siin on vool *I*=27/1=27 A.

Joonisel 2.40 on esitatud potentsiaalide jagunemine joonise 2.39 lülitustele. Joonisel 2.40b on allika miinusklemm maandatud.



Joonis 2.40. Potentsiaalide jagunemine erinevate lülituste korral, kui ahela osa on maandatud ja maandamata

Variant 2.39c jaoks on joonisel 2.41 esitatud kaks lahendusvarianti. Esimene (a), mis vastab olukorrale, kui **allika miinusklemm on maandatud.** Teine (b), mis vastab olukorrale, kui **elektriskeemil on miinusklemm maandamata.**



Joonis 2.41. Potentsiaalide jagunemine kahe lülituste korral. a – allika miinusklemm on maandatud, b – maandamata

2.8. Mitme allikaga lineaarahelate arvutus

Kahte või enamat vooluallikat sisaldava ahela arvutamiseks on palju meetodeid, kusjuures rakendatakse tavaliselt sellist, mis viib kõige kiiremini sihile. Mitme allika korral võib tekkida ka olukord, et mingi allikas (näiteks aku) ei tööta mitte elektriallikana, vaid muutub tarbijaks, olles laadimistalitluses. Sellisel puhul on

allika klemmipinge suurem selle sisepingest ja voolu suund on tavasuunaga vastupidine . Siis saame allikapingeks:

$$U = U_A + IR_S.$$

Arvutiprogrammide levikuga on rida varasemaid meetodeid kaotanud oma praktilise tähtsuse. Aga kõiki elektriahelaid saab arvutada Kirchhoffi kahe seaduse järgi. Esimest seadust (vooluseadust) vaadeldi eespool.

Kirchhoffi teine seadus (pingeseadus) on energia jäävuse seaduse järeldus, mille järgi potentsiaali muutus suletud kontuuri läbimisel on null. Seepärast võrdub suletud kontuuris kõikide ahelalõikude allikapingete ja tarbijate potentsiaalilangude summa nulliga:

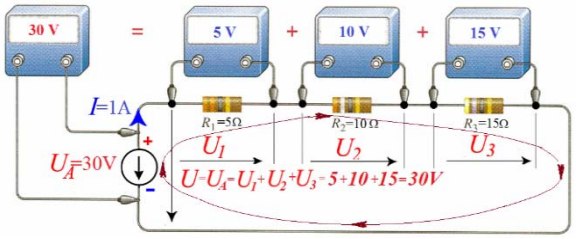
$$\sum U = 0. \qquad (2.11)$$

Allikate ja tarbijate olemasolul võib Kirchhoffi teise seaduse sõnastada nii: suletud kontuuris allikapingete summa võrdub tarbijate potentsiaalilangude summaga:

$$\sum U_A = \sum IR \quad \text{ehk} \quad \sum U_A - \sum IR = 0 \qquad (2.12)$$

Võrrandite koostamisel valemite (2.11) ja (2.12) järgi võetakse liidetavad plussmärgiga juhul, kui kontuuri ringkäigu suund langeb kokku vastava potentsiaalilangu või allikasisepinge suunaga, vastupidisel juhul aga miinusmärgiga.

Joonis 2.42 illustreerib seost (2.12) jadalülituses olevatele tarbijatele. Selles näites võrdub allikapinge (väljundpinge) allikasisepingega ja Kirchhoffi II seaduse alusel saame, et allikapinge on võrdne ka kolmel takistil tekkivate potentsiaalilangude summaga.



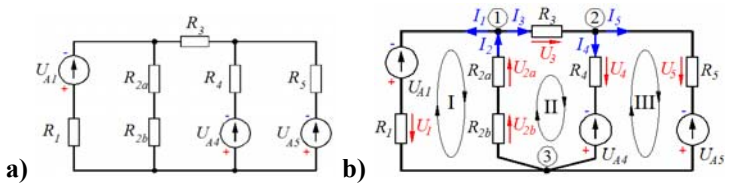
Joonis 2.42. Kirchhoffi pingeseaduse selgitus. Ühe allikaga elektriahela lülitus

Alalisvooluahelate arvutus Kirchhoffi seaduste alusel. Elektriahela arvutusel tuleb konkreetse elektriahela teadaolevate takistuste ja allikapingete alusel leida ahela harude voolud, pinged ja võimsused. Siin vaadeldav arvutusmeetod võimaldab esimeses järjekorras määrata ahela harude voolud. Harude potentsiaalilangud saab määrata voolude kaudu Ohmi seadust kasutades. Harude võimsused leiame voolu ja pingete kaudu Joule'i-Lenzi seaduse abil.

Koosnegu elektriahel ***p* harust** ja olgu tal ***q* sõlme**. Olgu antud ahela kõikide harude takistused ja kõikide allikate sisepinged, tundmatuteks on *p* voolu harudes. Rakendades igale sõlmele Kirchhoffi I seadust, saame voolude jaoks *q* võrrandit. Saab näidata, et neist ainult (q–1) võrrandit on üksteisest sõltumatud. Seoses sellega räägitakse, et *q* sõlmega ahelal on ***q*–1 sõltumatut sõlme**.

Rakendades Kirchhoffi II seadust, võib koostada voolude jaoks niipalju võrrandeid, kuipalju on ahelas suletud kontuure. Saab näidata, et neist ainult $p-(q-1)=p-q+1$ võrrandit on üksteisest sõltumatud. Seoses sellega räägitakse, et *p* haru ja *q* sõlmega ahelal on ainult ***p* – *q* + 1 sõltumatut kontuuri**. Lihtsustatult: **sõltumatud kontuurid** tuleb valida nii, et iga järgnev kontuur erineks eelmistest vähemalt ühe uue haru võrra.

Vaatleme Kirchhoffi seaduste kasutamist joonisel 2.43 esitatud skeemi haruvoolude määramiseks.



Joonis 2.43. Mitme pingeallikaga elektriahela skeem (a). Sama skeem, kus on näidatud valitud positiivsed allikapinge, tarbija potentsiaalilangude ja voolu suunad (b)

Võrrandite koostamisel Kirchhoffi seaduste järgi on soovitatav kinni pidada sellisest järjekorrast: määratakse harude, sõlmede ja sõltumatute kontuuride arv ning tähistatakse need skeemil; tehakse kindlaks Kirchhoffi I seaduse järgi koostatavate sõltumatute võrrandite arv; ülejäänud võrrandid koostatakse Kirchhoffi II seaduse järgi.

Joonise 2.42 skeemil on viis haru ja kolm sõlme, järelikult Kirchhoffi I seaduse järgi saame koostada kaks võrrandit, näiteks sõlmedele 1 ja 2. Sõlme suubuvad voolud on võetud pluss-, väljuvad miinusmärgiga.

Sõlm 1 $\quad -I_1 + I_2 - I_3 = 0$

Sõlm 2 $\quad +I_3 - I_4 - I_5 = 0$

Kirchhoffi II seaduse järgi saab koostada võrrandid kolmele sõltumatule kontuurile. Ringkäigu suunaks võtame kellaosuti liikumise suuna. Siis

I kontuurile $\quad -U_1 - U_{2a} - U_{2b} = +U_{A1}$

II kontuurile $\quad +U_{2a} + U_{2b} + U_3 + U_4 = -U_{A4}$

III kontuurile $\quad -U_4 + U_5 = +U_{A4} - U_{A5}$

Plussmärgiga on võetud need liidetavad, kus voolu, allikapinge või allika potentsiaalilangu vektori suund ühtib kontuuri ringkäigu suunaga.

Potentsiaalilangud $U_1 = I_1R_1$; $U_{2a} = I_2R_{2a}$; $U_{2b} = I_2R_{2b}$; $U_3 = I_3R_3$; $U_4 = I_4R_4$; $U_5 = I_5R_5$ asendame voolu ja takistuse korrutisega. Lahendanud viie võrrandiga süsteemi, saame kõik viis tundmatut voolu. Kui lahendamisel saime negatiivse voolu, siis see tähendab, et voolu tegelik suund harus on vastupidine võrrandite koostamisel oletatud suunaga.

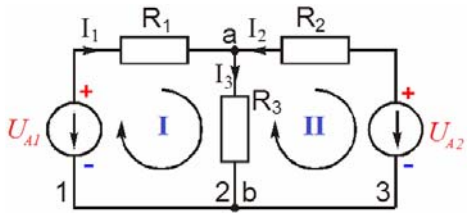
Lahendi õigsuse kontrolliks võib koostada ahelale võimsuste bilansi

$$\sum U_A I = \Sigma R I^2. \qquad (2.13)$$

Võrrandi (2.13) parempoolne osa iseloomustab tarbijate (passiivelementide) summaarset võimsust, aga vasakpoolne – ahela allikate (aktiivelementide) võimsust. Viimaste leidmisel võetakse plussmärgiga need liikmed, kus allikasisepingete ja voolu suund ei lange kokku. Kokkulangevate allikasisepingete ja voolu suuna korral võetakse liidetavad miinusmärgiga võrrandi (2.13) vasakul poolel või kirjutatakse need plussmärgiga võrrandi paremale (tarbijate) poolele. See vastab aktiivtarbija elektrivõimsusele.

NÄIDE 2.6

Joonisel 2.44 kujutatud ahelal on kolm haru ja kaks sõlme, s.o $p = 3$ ja $q = 2$. Sellele ahelale võime Kirchhoffi I seaduse järgi koostada $q - 1 = 1$ võrrandit ükskõik kumma sõlme jaoks. Andes ette voolude positiivsed suunad, saame sõlmele a: 1) $I_1 + I_2 = I_3$.



Joonis 2.44. Kahe allikaga elektriahela arvutus Kirchhoffi seaduste alusel

Kirchhoffi II seaduse järgi võime koostada $p - q + 1 = 2$ võrrandit. Joonisel näidatud kontuuride valiku korral saame järgmised võrrandid:

kontuurile I 2) $-U_{A1} = I_1R_1 + I_3R_3$

kontuurile II 3) $+U_{A2} = -I_2R_2 - I_3R_3$.

Kolmas võimalik kontuur ei ole sõltumatu, sest sellele koostatud võrrandi saab tuletada teisest ja kolmandast võrrandist liikme I_3R_3 eemaldamise teel (näiteks võrrandite 3 ja 2 liitmisel). Ahela harude voolud I_1, I_2, I_3 määratakse kolmest väljakirjutatud võrrandist koosneva süsteemi lahendamisega (ükskõik millisel meetodil).

Sarnaselt koostatakse ja lahendatakse võrrandid kuitahes keeruka lineaarse ahela kohta.

Elektriahelate arvutamisel Kirchhoffi seaduste alusel seisneb raskus *p* lineaarse algebralise võrrandi ühiselt lahendamise vajalikkuses. Seda võimaldavad paljud üldkasutatavad arvutiprogrammid.

Vaatleme joonise 2.44 elektriahela arvutusnäidet, kui $U_{A1} = 4$ V, $U_{A2} = 5$ V, $R_1 = R_2 = R_3 = 1$ Ω.

Korrastame kõiki kolme võrrandit, pannes puuduva liikme asemele nulltakistuse.

$I_1R_1 + I_2 \cdot 0 + I_3R_3 = -U_{A1}$

$I_1 \cdot 0 - I_2R_2 - I_3R_3 = U_{A2}$

$I_1 + I_2 - I_3 = 0$

Lisame arvväärtused

I II III IV

$I_1 \cdot 1 + I_2 \cdot 0 + I_3 \cdot 1 = -U_{A1}$

$I_1 \cdot 0 - I_2 \cdot 1 - I_3 \cdot 1 = U_{A2}$

$I_1 \cdot 1 + I_2 \cdot 1 + I_3 \cdot (-1) = 0$

Koostame determinandid

I II III I II

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \end{vmatrix} =$$

– – – + + +

$= 1 \cdot (-1) \cdot (-1) + 0 \cdot (-1) \cdot 1 + 1 \cdot 0 \cdot 1 - 1 \cdot (-1) \cdot 1 - 1 \cdot (-1) \cdot 1 - 0 \cdot 0 \cdot (-1) = +1 - 0 + 0 + 1 + 1 + 0 = 3$

IV II III IV II

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} -4 & 0 & 1 & -4 & 0 \\ 5 & -1 & -1 & 5 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} =$$

– – – + + +

I IV III I IV

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 1 & -4 & 1 & 1 & -4 \\ 0 & 5 & -1 & 0 & 5 \\ 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{vmatrix} =$$

– – – + + +

I II IV I II

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & -4 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 5 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} =$$

– – – + + +

$= (-4) \cdot (-1) \cdot (-1) + 0 \cdot (-1) \cdot 0 + 1 \cdot 5 \cdot 1 - 1 \cdot (-1) \cdot 0 - (-4) \cdot (-1) \cdot 1 - 0 \cdot 5 \cdot (-1) = -4 - 0 + 5 + 0 - 4 + 0 = -3$ $I_1 = \Delta_1/\Delta = -3/+3 = -1$A	$= 1 \cdot 5 \cdot (-1) + (-4) \cdot (-1) \cdot 1 + 1 \cdot 0 \cdot 0 - 1 \cdot 5 \cdot 1 - 0 \cdot (-1) \cdot 1 - (-4) \cdot 0 \cdot (-1) = -5 + 4 + 0 - 5 + 0 + 0 = -6$ $I_2 = \Delta_2/\Delta = -6/+3 = -2$A	$= 1 \cdot (-1) \cdot 0 + 0 \cdot 5 \cdot 1 + (-4) \cdot 0 \cdot 1 - (-4) \cdot (-1) \cdot 1 - 1 \cdot 5 \cdot 1 - 0 \cdot 0 \cdot 0 = (-0) + 0 + (-0) - 4 - 5 - 0 = -9$ $I_3 = \Delta_3/\Delta = -9/+3 = -3$A

Vastuse kontroll: $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ $(-1) + (-2) - (-3) = 0$. Vastused on õiged.

2.9. Allikate ühendamine jadamisi ja rööbiti

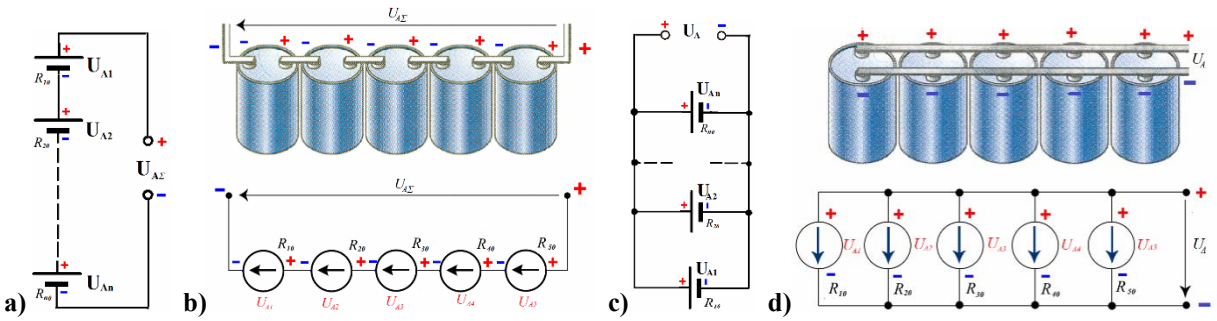
Elektriallikaid iseloomustab nende sisepinge, sisetakistus ja nimivool. Nimivool on maksimaalne vool, millega võib allikat kestvalt koormata tema projekteeritud eluea jooksul.

Allikasisepinge suurendamise eesmärgil võib allikad ühendada jadamisi. Joonisel 2.45a, kui jadamisi on ühendatud *n* allikat, saame jadaallika ekvivalentse sisepinge avaldiseks

$$U_J = U_{A\Sigma} = U_1 + U_2 + \ldots + U_n$$

ja sisetakistuse kahe tähistuse korral $R_{SJ} = R_{S1} + R_{S2} + \ldots + R_{Sn}$ või $R_{J0} = R_{10} + R_{20} + \ldots + R_{n0}$.

Tavaliselt ühendatakse jadamisi ühesuguseid allikaid ning siis $U_J = nU_1$ ja $R_{J0} = nR_{10}$, kusjuures nimivool jääb endiseks.



Joonis 2.45. Allikate jadaühendus (a ja b) ja rööpühendus (c ja d) tava- ja kursuses eelistatud tingmärkide korral

Uue allika nimivoolu suurendamiseks saab allikaid ühendada rööbiti. Joonisel 2.45b on rööbiti ühendatud *n* ühesugust allikat. Sel juhul uue allika ekvivalentne sisepinge

$$U_A = U_{A1} = \ldots = U_{An}$$

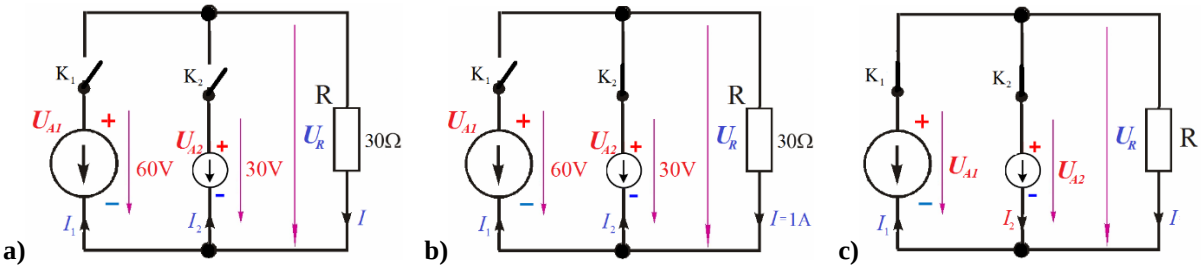
ja sisetakistus

$$R_{rS} = \frac{R_{S1}}{n} \text{ või } R_{r0} = \frac{R_{10}}{n}.$$

Uue allika nimivool on *n* korda suurem ühe allika omast. Allikate rööplülitusel peavad allikate sisepinged olema ühesuurused, sest vastasel korral tekiksid allikas nn tasandusvoolud ka rööpallika tühijooksul.

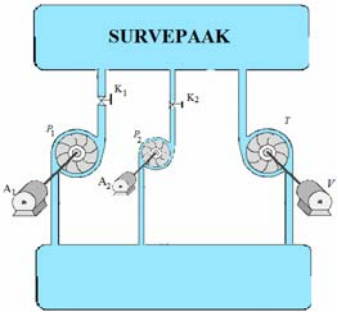
Allikate jadalülitusega on tegemist **akudes** ehk sekundaarelementides, mida kasutatakse alalispingel elektrienergia saamiseks ja salvestamiseks. Akusid iseloomustab peale nimipinge olulise näitajana nende **nimimahtuvus**, mida mõõdetakse tavaliselt ampertundides (1 A·h = 3600 A·s). Kasutatavamad on happe- ehk pliiakud, kus elektrolüüdiks on väävelhappe (H2SO4) vesilahus, mille tihedus on olenevalt temperatuurist ja laetusastmest 1.02...1,28 ning leelis- ehk kaadmiumnikkel- või raudnikkelakud, kus elektrolüüdina kasutatakse kaaliumhüdroksiidi (KOH) või naatriumhüdroksiidi (NaOH) vesilahust tihedusega 1,17...1,28. Happeakude elemendi sisepinge on 1,8...2,1 V, leelisakudel 1,3...1,4 V. Energiatagastus on happeakudel 75...80%, leelisakudel 65...70%. Elektriautode kiire areng mõjutab ka akude arengut. Nii ületavad liitiumioonaku energeetilised näitajad (400 Wh/l ja 200 Wh/kg) oluliselt eespool kirjeldatute omi. Et akud pikka aega töötaksid, on nende hooldamisel ja laadimisel vaja juhinduda aku valmistajatehase juhendeist. Et akus on sööbiv lahus, tuleb akude hooldamisel ja paigaldamisel järgida sellekohaseid ohutusnõudeid. Happeakudel on suurem erimahtuvus (massiühiku kohta) ja nad on leelisakudest odavamad, kuid happeakude iga ja mehaaniline tugevus on väiksemad. Akudele on iseloomulik isetühjenemine, mis seisneb aku laengu vähenemises ka siis, kui akut ei kasutata. Seepärast tuleb ka mittetöötavaid akusid regulaarselt laadida.

Toiteallika töö generaatorina või tarbijana. Joonisel 2.46 vaadeldakse allika tööd nii allika kui ka tarbijana. Olgu kaks allikat, mille allikasisepinge väärtused erinevad kaks korda: 60 ja 30 V. Joonisel 2.46a on ahel katkestatud, lülitid on välja lülitatud. Joonisel 2.46b on lüliti K_2 sisse lülitatud ja allikas 2 on allika talitluses. Sel puhul läbib takistit vool 1 A. Joonisel 2.46c on lülitid K_1 ja K_2 sisse lülitatud. Sel juhul voolu suund allikas 2 muutub ja langeb kokku väljundpinge suunaga, ning nende korrutis on plussmärgiga, seega allikas 2 tarbib esimese allika elektrienergiat. Esimesel allikal sisepinge (ka väljundpinge) ja voolu suund on vastassuunalised ja allikas toimib elektriallikana.



Joonis 2.46. Elektriallika töö allika ja tarbijana: a – allikate tühijooks; b – väiksema allikapingega allikas toidab tarbijat *R*; – suurema allikapingega allikas toidab väiksema allikapingega allikat ja tarbijat *R*

Sarnane olukord võib esineda suruvee energiasüsteemis, kus energiaallikaks on ajamite A1 ja A2 poolt käitatavad pumbad P1 ja P2. Siin täidavad lüliti rolli kraanid K1 ja K2. Arendagu esimene pump 60 atm ja teine 30 atm survet. Kui nendega ükshaaval toita veeturbiini T, siis nad töötavad pumbana ja kannavad suruvee energiat turbiinile, mis käitab näiteks veski V. Kui aga lülitada pumbad tööle üheaegselt, siis esimese pumba kõrgem veesurve paneb pumba P2 pöörlema vastassuunas algsele, seega turbiinina tööle. Ka elektriajam A2 hakkab tööle generaatorina.



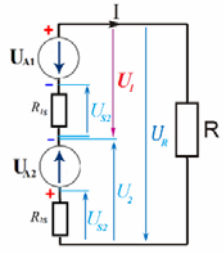
Joonis 2.47. Energiaülekanne kõrgsurve veega. Pumba töö allikana ja tarbijana. A – ajam, K – kraan, P – pump, T – turbiin ja V – veski

NÄIDE 2.7

Vaatame elektriahelat, mis sisaldab kaht toiteallikat, mis on ühendatud joonise 2.48 järgi.

Olgu $U_{A1} > U_{A2}$ ja arvväärtused U_{A1}= 100 V; U_{A2}= 50 V; sisetakistused $R_{S1} = R_{S2} = 1\ \Omega$; ja tarbija (koormustakistus) $R = 8\ \Omega$. Leiame voolu I kahe teineteisest sõltumatult toimiva toiteallika poolt tingitud osavoolu algebralise summana.

Esimese toiteallika korral $I_1 = \dfrac{U_{A1}}{R_{S1} + R_{S2} + R} = \dfrac{100}{1+1+8} = 10\ \text{A}$



Joonis 2.48. Kahe toiteallikaga elektriahel

ja teise toiteallika korral $I_2 = \dfrac{U_{A2}}{R_{S1} + R_{S2} + R} = \dfrac{50}{10} = 5\ \text{A}.$

Siin on vool vastassuunaline allikasisepinge suunaga. Seega osavoolud I_1 ja I_2 on vastassuunalised.

Tegelik vool ahelas $I = I_1 - I_2 = \dfrac{U_{A1} - U_{A2}}{R_{S1} + R_{S2} + R} = \dfrac{100-50}{1+1+8} = \dfrac{50}{10} = 5\ \text{A}$

Kui U_{A1} on suurem U_{A2}-st, siis vool I on vastassuunaline allikasisepingega U_{A1}, mis on suunatud plussklemmilt miinusklemmile. Vooluga samasuunaline allikasisepinge näitab aga, et allikas on tarbijatalitluses.

Viimasest valemist $U_{A1} - U_{A2} = IR_{S1} + IR + IR_{S2}$ ning

$$U_{A1} = U_{A2} + IR_{S1} + IR_{S2} + IR.$$

Allikate klemmipinge

$$U_1 = U_{A1} - IR_{S1} = 100 - 5 \cdot 1 = 95 \text{ V},$$

$$U_2 = U_{A2} + IR_{S2} = 50 + 5 \cdot 1 = 55 \text{ V}.$$

Korrutades väljundpinge vooluga, saame ahela võimsusbilansi

$$U_1 I = U_{A1} I - I^2 R_{S1} \Rightarrow U_1 I + I^2 R_{S1} = U_{A1} I$$
$$95 \cdot 5 + 5^2 \cdot 1 = 100 \cdot 5 \Rightarrow 475 + 25 = 500.$$

Seega võrdub ahelasse antav võimsus $U_1 I$ -ga. Selle tarbivad toiteallikas U_{A2} ja takisti R.

Kui toiteallikas töötab **generaatorina**, siis $U_A \geq U$, kui **tarbijana**, siis $(U > U_A)$. Seega, kui allikas töötab tarbijana, siis ta väljundpinge (potentsiaalilang) on sisepingest suurem ning vooluga samasuunaline (aku laadimine). Suurema sisepingega allikal on ahelavoolu suund vastassuunaline toiteallikasisepingega.

2.10. Siirdeprotsessid alalisvoolu-(AV)-ahelates

Eespool käsitletu põhjal oli vool ahelas konstantne suurus ja ahel oli püsitalitluses. Selle tekkimisele eelneb alati **siirdetalitlus**, mille vältel ahela voolud-pinged-võimsused lähevad ühelt püsitalitluselt üle teisele. Siirdetalitluse vältel muutuvad ahelas voolud ja pinged **mitteperioodilise seaduspära** järgi. Siirdetalitlused tekkivad elektriahela sisse- või väljalülitamisel ja ümberlülitamisel. Neid lülitamisi nimetame **kommuteerimisprotsessiks**.

Teoreetiliselt loetakse **kommuteerimiseks kuluvat** aega lõpmatult väikeseks, s.o $t_{kom} \to 0$. Tegelikkuses see päris nii ei ole – tekkib muutuv kontakttakistus $r_k(t)$. Kommutatsioonile järgnev siirdeprotsess nõuab alati teatud aega, kui elektriahelas on energiat salvestavaid elemente (L või C). Põhjuseks on see, et kui muutuvad potentsiaalilangud L- ja C-elementidel ja seega ka nende energiad $\left(W_L = \frac{Li^2}{2}; W_C = \frac{Cu_C^2}{2} \right)$, siis selline energia muutumine nõuab teatud aega. Kui energia muutumine saaks olla hüppeline, siis peaks sellele vastama lõpmatult suur võimsus:

$$p = \frac{dw}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta w}{\Delta t} = \infty$$, see pole võimalik.

Sellest tulenevad ka nn **kommutatsiooniseadused**.

- **Pooli vool ei saa hüppeliselt muutuda.**
- **Kondensaatori pinge ei saa hüppeliselt muutuda.**

Seega ei saa energia elektriahela reaktiivelementidel hüppeliselt muutuda. Nii toimub üleminek algsest lähtetalitlusest uude püsitalitlusse teatud aja vältel.

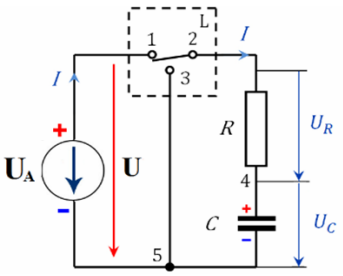
Siirdeprotsesside arvutamise põhimeetodid elektriahelas:

1. **Klassikaline meetod** – siirdetalitlust kirjeldavate integraal-diferentsiaalkujuliste võrrandite lahendamine matemaatiliselt **integreerimise teel**.
2. **Operaatormeetod** – põhineb **Laplace'i teisendustel** elektriahela siirdetalitluse ajalisel kirjeldamisel.

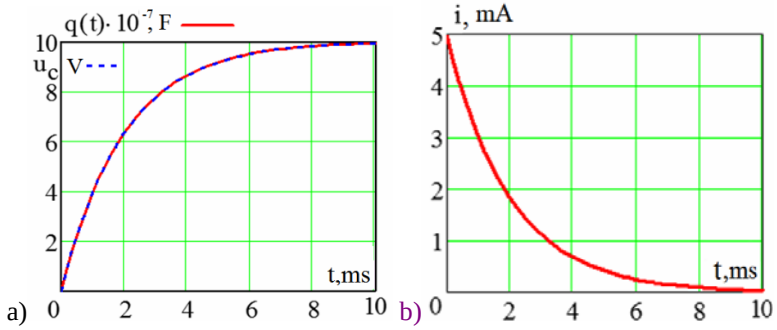
3. **Spektraal-** ehk **sagedusmeetod** – põhineb **Fourier' integraalide** kasutamisel.

Siirdeprotsesside vaatlusel lähtume lineaarsetest elementidest elektriahelas. Siirdeprotsessid muutuvad aga väga keerukaks, kui elektriahelas on mittelineaarseid elemente, elektrikaar või ferromagnetilise südamikuga pool. Siis tugineb lahendus mittelineaarsete diferentsiaalvõrrandite integreerimisele ja leitakse tavaliselt arvutiprogrammide kasutamise teel.

RC-ahel. Kondensaatori laadimine. Kondensaatori laadimise ja tühjakslaadimise füüsikalisi protsesse vaadeldi p. 1.11. Järgnevalt esitatakse ka analüütilised seosed. Vaatleme seda joonise 2.49 lülituse alusel. Laadimiseks lülitatakse ümberlüliti *L* asendisse 1. Siis tekkib voolutõuge, mille suuruse määrab allikapinge ja indikaatorlambi (skeemil on näidatud takistina *R*) takistuse suhe. Sisselülitusmomendil on kondensaator sisuliselt lühistalitluses, potentsiaalilang puudub ($U_C = Q/C = 0$) ja voolu suurus võrdub $i_{\max} = U_A / R$. Täislaetud kondensaatori laengu suurus on $Q = CU_A$. Rakendades joonisel 2.49 esitatud ahelale Kirchhoffi pinge seadust, saame $U_A - U_C - U_R = 0$ ehk $U_A - Q/C - iR = 0$. Keskmine liige $-Q/C$ iseloomustab potentsiaalilangu kondensaatoril. Viimane võrrand sisaldab kahte muutujat *i* ja *Q*. Kuid nad pole sõltumatud, sest $i = dQ/dt$. Asendame voolu laengu muutmiskiirusega, saame kondensaatori laadimistalitluse võrrandi $Rdq/dt + Q/C = U_A$. See diferentsiaalvõrrand iseloomustab kondensaatori laengu muutust ajas (joonis 2.50b). Lähtetingimus ajahetkel *t* = 0 on kondensaatori laeng *Q* = 0. Võrrandi lahend on $Q = CU_{AS}\left(1 - e^{-t/RC}\right)$ (siin *e* on naturaallogaritmi alus $e = \lim_{n\to\infty}\left(1+\frac{1}{n}\right)^n = 2{,}71828...$, mitte elementaarlaeng). Laadimiskõverad on joonisel 2.50. Siit näeme (a), et energia- (laengu)salvestamise ja kondensaatori klemmipinge (potentsiaalide vahe) kasvavad sama graafikut mööda. Seega iseloomustab U_C selle kondensaatori laengute energiavälja (elektrivälja) salvestatud energiat, kondensaatori töötegemise võimet.

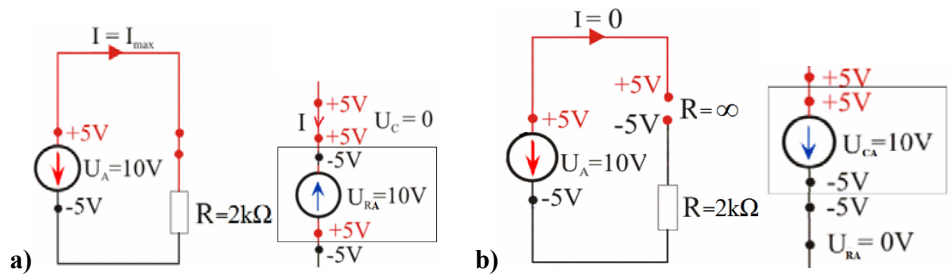


Joonis 2.49. *RC*-ahel. Lüliti asendis 1 toimub kondensaatori laadimine ja asendis 2 tühjakslaadimine



Joonis 2.50. Kondensaatori laadimiskõverad, kui allikasisepinge on 10 V, kondensaatori mahtuvus 1 µF ja indikaatorlambi takistus 2 kΩ

Joonisel 2.51 on kaks joonise 2.49 aseskeemi. Esimene (a) vastab laadimise alguse ajahetkele $t = 0_+$ ja teine (b) ajahetkele $t = \infty$. Algmomendil tekkib kogu potentsiaalilang takistil (10 V), kuna kondensaator on sel hetkel lühistalitluses $U_C = 0$ ja takistil tekkib tasakaalustav allikapinge $U_{RA} = 10\ V$. Ajahetkele $t = \infty$ tekitab kogu tasakaalustava potentsiaalilangu (10 V) kondensaator, takistil allikapinge $U_A = 0\,V$, kondensaatoril $U_{CA} = 10V$.



Joonis 2.51. Kondensaatori haru laadimise algmomendi (a) ja püsitalitluse (b) aseskeem. Algmomendil on kogu potentsiaalilang takistil *R*, püsitalitluses kondensaatori *C* vastuallikal

Lähtudes seosest $Q = CU_C$, leiame potentsiaalilangu muutuse ajas

$$U_C = Q/C = U_A\left(1 - e^{-t/RC}\right).$$

Võrrandist näeme, et ajahetkel $t = 0$ on $U_C = 0$ ja ajahetkel $t = \infty$ on $U_C = U_A$.

Ajakonstant. Korrutist RC nimetatakse vooluringi **mahtuvuslikuks ajakonstandiks**, seda tähistatakse τ ja mõõdetakse sekundites

$$\tau_C = R \cdot C = \Omega \cdot F = \Omega \cdot A \cdot s/V = s.$$

1,0 Ω ·1,0 F = 1,0 s.

Seega, kui meie näites laadimisaeg võrdub ajakonstandiga ($t = \tau = RC$), siis tühja kondensaatori laeng saavutab selle ajaga

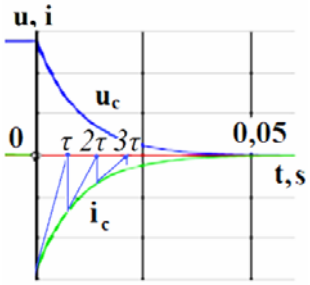
$$Q = CU_A\left(1 - e^{-1}\right) = 0{,}63\ \ CU_A$$

kogulaengu väärtusest. Võime öelda, et ajakonstandi τ vältel saavutab laeng 0 protsendist **63%** lõpplaengu väärtusest, kolme ajakonstandi möödudes **95%** ja 6 τ möödudes **99,8%** kogu laengu väärtusest.

Kondensaatori tühjakslaadimine. Vaatleme olukorda, kus täislaetud kondensaatori korral (joonis 2.49) lülitame lüliti L asendist 1 asendisse 2. Siin ühendatakse ajahetkel $t = 0$ indikaatorlambiga täislaetud kondensaator, mille me joonisel 2.51a asendasime vastuallikaga. Tekkib tühjenemisvool, mille suuna määrab vastuallikas U_C. Seega on tühjenemisvool vastassuunaline laadimisvooluga, vastav diferentsiaalvõrrand

$$R\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0,$$

mille lahend on $Q = Q_0 e^{-t/RC}$. Siin $Q_0 = CU_C$ on kondensaatori alglaeng. Võrrandist nähtub, et laeng Q väheneb eksponenti mööda (joonis 2.52). Mahtuvusliku ajakonstandi möödudes väheneb laeng võrreldes algväärtusega $Q_0 e^{-1}$ ehk ligi 37%-ni. Seega muutub kondensaatori laeng eksponendi järgi: iga ajakonstandi τ vältel väheneb laeng $e^{-1} = 0{,}367879$ korda.



Joonis 2.52. Kondensaatori tühjakslaadimise kõverad, kui allikasisepinge on 10 V, kondensaatori mahtuvus 1 µF ja indikaatorlambi takistus 2 kΩ. Sinine kõver – kondensaatori pinge ja roheline kõver – kondensaatoril vool i_C

Eksponent on väga kiiresti muutuv funktsioon. Aja ja eksponendi väärtuste vahekorda iseloomustab tabel 2.3:

Tabel 2.3

Siirdeprotsessi väärtuse erinevus püsiväärtusest aja jooksul

Ajakonstant, τ	1	2	3	4	5
Laengu väärtus	0,367879	0,135335	0,049787	0,018316	0,006738

Seega erineb siirdeprotsessi väärtus püsiväärtusest kolme ajakonstandi möödudes *ca* **5%** ja **5 τ** möödudes **0,7%**.

Tühjakslaadimise voolu muutuse ajas määrab seos $i = dQ/dt = -\left(\frac{Q_0}{RC}\right)e^{-t/RC}$.

Vool ümberlülitamise ajahetkel i_0 võrdub Q_0/RC. Algvoolu i_0 väärtuse saab ajahetkel t = 0 määrata seosest $i_0 = U_{CV}/R = Q_0/RC$. Miinusmärki võib ignoreerida. See tähendab, et kondensaatori laeng Q väheneb.

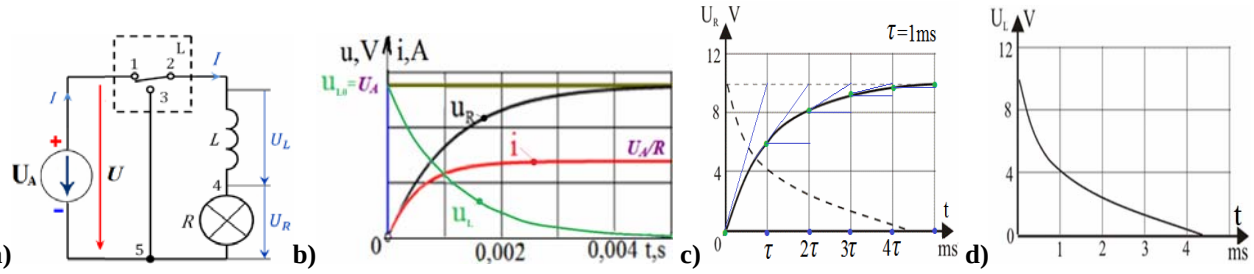
Allikasisepinge iseloomustab energiat, mis muundub lõhestatavate neutraalsete aatomite laengu energiaks. Kui dW on energiahulk, mis kulub positiivse laengu ülekandmisel positiivselt klemmilt negatiivsele, siis allikasisepinge (energialaengu ühiku kohta) on

$$U_A = dW/dQ.$$

***RL*-ahel. Induktiivpooli lülimine alalispingele.** Vaatleme ahelat (joonis 2.53), mis sisaldab alaliselektri-allikat, mille sisepinge on U_A, pooli, mille induktiivsus on L ja lampi takistusega R. Kui sulgeda lüliti L abil kontaktid 1 ja 2, siis ahela vool i hakkab kasvama. Juhul kui pool puudub, siis saavutab ahela vool kohe püsiväärtuse $I = U_A/R$, sest voolu muutusega kaasnev pooli aheldusvoo muutumine ajas muudab pooli toiteallika väljundpinget tasakaalustavaks allikaks. Seetõttu ei kasva vool hüppeliselt.

Voolu suuruse määrab toiteallika ja pooliallika potentsiaalide vahe. Neist U_A = const ja $U_L = Ldi/dt = \text{var}$. Kuni U_L on nullist suurem, seni on vool väiksem kui U_A/R. Ajaga voolu kasv aeglustub ja poolipinge $U_L = Ldi/dt$ muutub väiksemaks. Ahela vool läheneb väärtusele U_A/R asümptootiliselt. Siis

$$U_A - Ldi/dt - iR = 0 \text{ või } U_A = Ldi/dt + iR.$$



Joonis 2.53. *RL*-ahel (a). Lüliti *L* sulgemisel *i* vool hakkab kasvama ja saavutab piirväärtuse U_A/R

Viimane valem sisaldab muutujat i ja tema esimest tuletist.

Leiame voolu

$$i = \frac{U_A}{R}\left(1 - e^{-Rt/L}\right).$$

Kirjutame muudetud kujul

$$i = \frac{U_A}{R}\left(1 - e^{-t/\tau_L}\right).$$

Siin on τ_L **induktiivne ajakonstant** $\tau_L = L/R$.

Ajahetkel $t = 0$ eksponent $e^{-0} = 1$, s.t, et alghetkel vool $i = 0$. Kui aeg t muutub ja $t = \infty$, siis $e^{-\infty} = 0$. Seetõttu vool $i = U_A/R$.

Joonisel 2.53 võime jälgida pingelangusid U_R ka U_L ahelas. Nende kõverate hetkväärtuste summa võrdub allikasisepingega, mis ei muutu ajas. Veendume, et induktiivset ajakonstanti mõõdetakse sekundites. H=Ω∗s ehk

$$1\frac{H}{\Omega} = 1\frac{H}{\Omega}\left(\frac{1V \cdot s}{1H \cdot A}\right)\left(\frac{1\Omega \cdot A}{1V}\right) = 1s \cdot$$

Kui vaadata ajakonstandiga võrdset ajahetke $t = \tau_L = L/R$, siis vool väheneb kuni

$$i = \frac{U_A}{R}\left(1 - e^{-1}\right) = 0{,}63\frac{U_A}{R} \cdot$$

Seega ajakonstandi möödumisel saavutab vool ahelas 63% oma püsiväärtusest U_A/R. Kuna potentsiaalilang takistil on võrdeline vooluga, siis voolu kasvu kõver on võrdeline U_R omaga.

Kui lüliti L joonisel 2.53 lülitada asendist 1→2 asendisse 2→**3, siis suletud ahelasse jäävad pool ja lamp** takistusega R ning allika vool ahela katkestuse tõttu muutub nulliks. Siin on vaja sulgeda klemm 3 veidi varem, enne kui kontaktis 1 vool katkeb. Spetsiaalne ümberlüliti sulgeb enne kontakti 3 ja samal ajahetkel katkestab toiteallika ahela (kontakti 1). See väldib ohtlike liigpingete teket. Sarnased ümberlülitid on kasutusel koormatud jõutrafode väljavõtete ümberlülitamisel. Kui ühendus allikaga katkeb, siis pooli vool läbi lambi R hakkab vähenema. Vool ei muutu hetkeliselt nulliks, vaid mingi aja jooksul. Diferentsiaalvõrrandi, mis kirjeldab voolu vähenemist, saame, kui võrrandis $U_A = Ldi/dt + iR$ võtame allikasisepinge võrdseks nulliga. Seega, $Ldi/dt + iR = 0$.

Võrrandi lahend, mis rahuldab algtingimust $i(0) = i_0 = U_A/R$ on

$$i = \frac{U_A}{R}e^{-t/\tau_L} = i_0 e^{-t/\tau_L} .$$

Näeme, et pooli voolu kasvu- ja kahanemiskiiruse määrab induktiivne ajakonstant τ_L. Ajakonstant τ_L on ajavahemik, mille vältel eksponentsiaalne suurus muutub e korda. Olgu näiteks R = 1 Ω, L = 1 H → τ = 1 s; R = 1 kΩ, L = 1 H, siis τ = 1 ms. Graafiliselt saab τ määrata kas puutuja abil või väärtuse muutumisel e korda

Tabel 2.4

Voolu suhtelise suuruse muutus ajas

t/τ	0	1	2	3	4	…	8
i/I_0	1	0,368	0,135	0,05	0,018		0

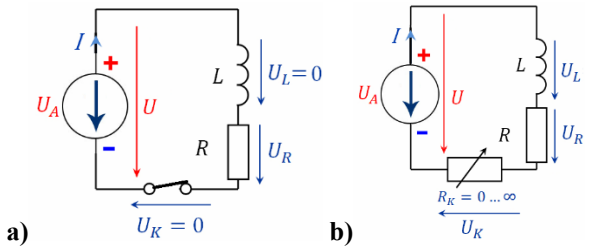
$\frac{A_1}{A_2} = e$.

Siirdeprotsessi käigus kasvab muutuv suurus ühe ajakonstandi vältel nullist 63%-ni püsiväärtusest, kolme ajakonstandi möödudes suureneb 95%-ni ja 6 τ möödudes saavutab 99,8% väljakujunenud püsiväärtusest.

Iga lineaarse alalisvooluahela ülesande korral piisab, kui leida algväärtus, lõppväärtus ning ajakonstant. Nende vahele saab konstrueerida eksponendi. Näitena vaatame joonise 2.53c hõõglambi potentsiaalilangu siirdeprotsessi. Siin on algväärtus 0 V, lõppväärtus – 10 V ja ajakonstant τ – 1 ms. Puutujaalused lõigud on kõik võrdsed ajakonstandiga τ. Siin on ühe ajakonstandi möödudes potentsiaalilang kasvanud 6,3 V-ni, kahe τ möödudes – 8,6 voldini, kolme τ möödudes – 9,5 voldini jne. Praktikas meid huvitav suurus ajahetkel t = 0 ei pruugi omada algväärtust null. Sellel võib olla ka mingi teine algväärtus.

Liigpinged *RL*-ahela katkestamisel. Induktiivpooli voolu katkemise siirdeprotsess on erinev võrreldes sisselülitamisega. Joonisel 2.54 on esitatud ahel, mis sisaldab allikat, lülitit ja induktiivpooli L ning takistit R

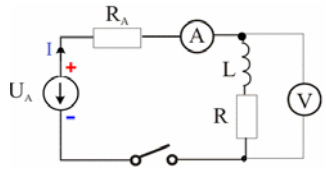
omav reaalne pool. Ahela katkestamisel eemalduvad lüliti kontaktid teineteisest ja ahelasse tekitatakse järjestikku eemalduvate kontaktide vaheline õhupilu. Eeldades, et õhupilu takistus on lõpmata suur, peaks ahela vool hetkeliselt vähenema nullini.



Joonis 2.54. Induktiivpooli sisaldava ahela väljalülitamine: a – lähteolukord, b – ahela siirdeprotsessi aseskeem

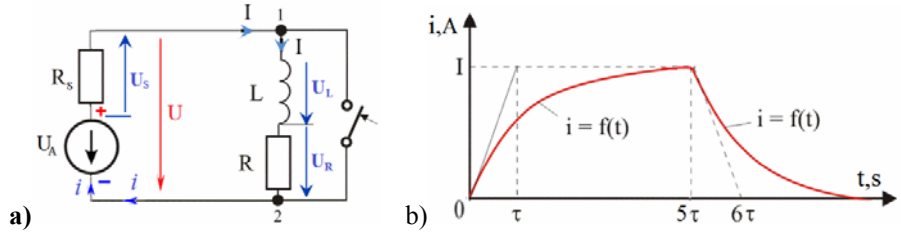
See kutsuks esile pooli aheldusvoo ülisuure muutumise kiiruse $d\psi/dt = U_L \to \infty$ ja põhjustaks lüliti kontaktide vahele väga suure potentsiaalide vahe ja väga tugeva elektrivälja. See põhjustab kontaktide vahel õhu ionisatsiooni. Lüliti kontaktide vahel tekkib vool ja säde või kaarlahendus. Kontaktide vahemik muutub voolu juhtivaks ning vool ei vähene nullini silmapilkselt. Kontaktidevahelise keskkonna takistus muutub nullist lõpmatuseni (joonis 2.50b) ja siirdeprotsessi matemaatiline analüüs on keerukas. Induktiivpooli (kui voolud kümned, sajad või tuhanded amprid) voolu katkestamine tavalise vinnaklülitiga on ohtlik. Kasutama peab spetsiaalseid elektrikaare kustutamise kambritega lüliteid, mis tagavad kaare kiire kustutamise ja voolu väljalülitamise.

Liigpinge ohtu kirjeldab lülitus joonisel 2.55. Suure induktiivsusega pooli takistuse R mõõtmiseks on kasutatud ampermeetrit ja millivoltmeetrit. Lüliti avamise hetkel, ajahetkel $t = 0$, läbib poolist ja millivoltmeetrist koosnevat ahelat vool, mille tugevus võrdub pooli vooluga takistuse mõõtmisel. Millivoltmeetri mähise nimivool on väike ja võib suure voolu tõttu hävida. Et seda vältida, **tuleb enne lüliti avamist millivoltmeeter lahti ühendada.**



Joonis 2.55. Pooli takistuse mõõtmisjärgne ahela katkestamine

Magnetvälja energia. Induktiivpooli sisaldavas alalisvooluahelas tugevneb vool sisselülitamisel sujuvalt nullist püsiväärtuseni. Voolu tugevnedes kasvab pooli ümbritsevas keskkonnas liikuvate elektronide liitenergiaväli (magnetväli). Sinna salvestub osa allika energiast. Selle olemasolu avaldub ahela katkestamisel ja lühistamisel (joonis 2.56).



Joonis 2.56. Reaalse pooli lühistamine: a – lülitus, b – siirdeprotsess pooli sisselülitamisel ja lühistamisel

Pooli lühistamisel punktide 1 ja 2 potentsiaalid võrdsustuvad, allikavool harus 1–L–R–2 lakkab ja kandub lüliti harusse ning pooli energiat ei lisandu. Pooli vool aga ei kao hetkeliselt, vaid sujuvalt. Selle käigus saadakse pooli takistuses soojuseks muunduv energia mähise laengute energiaväljast (magnetväljast). Määrame pooli magnetvälja energia tema ühendamisel allikaga, mille sisepinge on muutumatu. Kirchhoffi II seadusest lähtudes $U_A = I(R + R_S) + L di/dt$. Korrutades võrrandi mõlemad pooled idt-ga, saame allika ja tarbijate (R, R_S) ja salvesti (L) energia tasakaalu võrrandi ajavahemikule dt

$$U_A idt = i^2(R + R_S)dt + Lidi\,.$$

Avaldame $Ldi = d(Li) = d\psi$, saame

$$U_A i dt = i^2 (R + R_S) dt + i d\psi \, .$$

Siin $i^2(R+R_S)dt$ väljendab energiat, mis aja *dt* vältel muundub takistites (tarbijates) soojuseks. Suurus $id\psi$ näitab, et allikas andis ja pool ahelas võttis mingi lisaenergia $dW = Lidi = id\psi$, mis on seotud ahela aheldusvoo suurenemisega, seega magnetvälja muutusega. Siit järeldame, et suurus $id\psi$ väljendab magnetvälja energia kasvu voolu tugevnemisel *di* võrra.

Kogu pooli salvestatud magnetvälja energia voolu tugevnedes nullist püsiväärtuseni *I* on

$$W = \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2} \, .$$

See energia peab siirdeprotsessis muunduma soojusenergiaks takistil *R*:

$$W_R = \int_0^\infty Ri^2 dt = \frac{LI_0^2}{2} \, .$$

Siin on I_0 lüliti sulgemise hetkel, ajahetkel *t* = 0 pooli läbiv vool.

NÄIDE 2.8

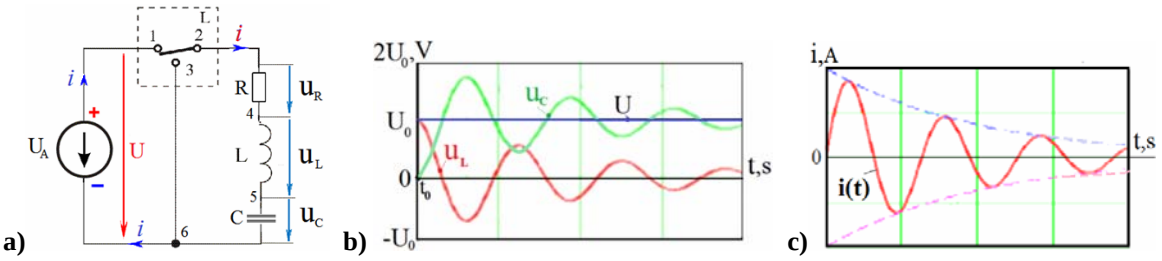
Antud: suletud ahela vool on *I* = 12 A. Aheldusvoog $\Psi = 5 \cdot 10^{-2}$ Wb.

Leida: magnetvälja energia.

Lahendus

Magnetvälja energia $W = \frac{\Psi I}{2} = \frac{5 \cdot 10^{-2} \cdot 12}{2} = 0{,}3$ J.

***RLC*-ahela lülitamine alalispingele [3].** [http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/1121/ Klassikaline meetod.pdf]. Olgu *RLC*-ahel, mis lülitatakse alalispingele. Neil kõigil võivad lülitamishetkel t = 0 olla nii potentsiaalide erinevuse kui ka voolu väärtused, mida nimetatakse **algtingimusteks**. Siin võib siirdeprotsess olla sumbuv, võnkeline ja sumbumatu. Joonisel 2.57a on ahela toitelülitus, kus ahela sõlmedele on omistatud numbrid 1…6. Vaatleme võnkelist siirdeprotsessi (c), mis tekkib, kui sulgeda lülitil *L* kontaktid 1 ja 2. Eristamaks pooli voolu- ja kondensaatori pingeväärtusi ajahetkel, kus lülitamist pole veel toimunud ning hetkel vahetult pärast lülitamist, kasutatakse tähistusi $i_{(0-)}$ ja $i_{(0+)}$ ning $u_{C(0-)}$ ja $u_{C(0+)}$. Lülitamishetkel (b) rakendub ahelale allikaväljundpinge U_0. Eristatakse nn **sundvoolu**, mis tekkib ahelas allikapinge toimel ja **vabavoolu**, mis tekkib kondensaatori „seisva“ laengute ja pooli liikuvate laengute energia ümberjagunemise arvel. Sundvoolu väärtust ei mõjuta kondensaatori elektrivälja ja pooli magnetvälja salvestatud energia.

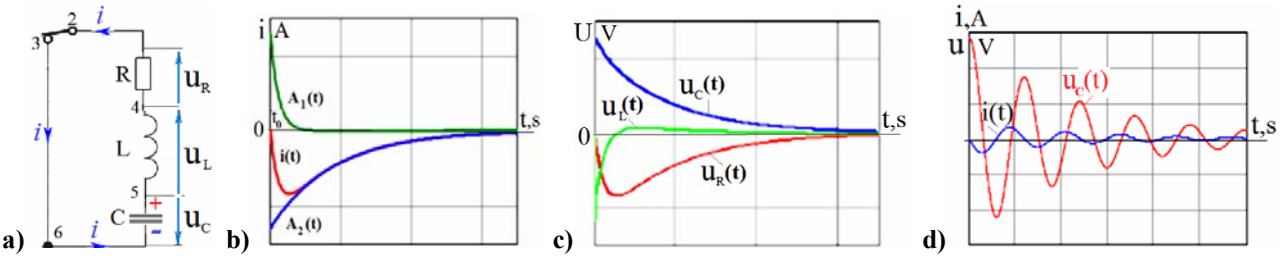


Joonis 2.57. *RLC*-ahela lülitamine alalispingele: a – lülitus, b –potentsiaalilangude ja ahelavoolu (c) sumbuv võnkeline siirdeprotsess

Seega võrdub ahela koguvool vabavooluga. *RLC*-jada ahela püsitalitluse kujundab välja allikaväljundpinge. Lüliti *L* kontaktide 1 ja 2 sulgemisel *RLC*-ahelas algab kondensaatori laadimine (laengute liikumine, seega

vool). Kogu allikaväljundpinget tasakaalustav potentsiaalilang rakendub induktiivpoolile $u_L = -U_0 = U$. Pärast siirdeprotsessi lõppu on uues püsitalitluses vool null (c), sest kondensaatori isoleervahemikul on suur takistus, mida ei läbi vool. Püsitalitluses kondensaatori potentsiaalilang $U_C = U$ on võrdne allikapinge väärtusega, $U_L = U_R = 0$.

***RLC*-jadaahela lühistamine sumbuva võnkumisega.** Kui joonisel 2.58a lahutada ümberlüliti *L* kontakt 1 ja ühendada kontaktiga 3, hakkab laetud kondensaator tühjenema. Siis võivad esineda sumbuvad ja mitte-sumbuvad võnkumised. Joonisel 2.58 on siirdeprotsesside näited. Ahelas muutub voolu suund vastupidiseks laadimisvooluga.



Joonis 2.58. *RLC*-ahela lühistamine: a – lülitus, b ja c – aperioodiline tühjenemine, d – võnkuv siirdeprotsess

Siin kondensaatori pinge ja induktiivpooli voolu avaldised lülimishetkel $\begin{cases} u_{C(0-)} = U_0 = u_{C(0+)} \\ i_{(0-)} = i_{(0+)} = 0 \end{cases}$. Lahendades lineaarse diferentsiaalvõrrandi, saame selle üldlahendist algtingimustest tulenevad konstandid A_1 ja A_2.

Aperioodiline sumbumine (joonis 2.58b, c). Lahendades võrrandisüsteemi, koosneb vool (b) kahest komponendist, millest üks $A_1(t)$ sumbub kiiremini kui teine $A_2(t)$. Aperioodilises siirdetalitluses takisti *R*, pooli induktiivsuse *L* ja kondensaatori mahtuvuse *C* suhe on $R \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Siirdeprotsessis tugevneb pooli vool ja sinna salvestuv energia. Kondensaatori elektrivälja energia väheneb, osa sellest muundub oomtakistis eralduvaks soojusenergiaks. Kondensaator tühjeneb, laeng ja elektrivälja energia vähenevad nullini. Sellist protsessi nimetatakse kondensaatori **aperioodiliseks** tühjenemiseks. Siin muundatakse kondensaatorisse salvestunud energia tarbijas *R* intensiivselt soojusenergiaks ja pooli ei salvestata piisavalt energiat, et pärast kondensaatori tühjenemist seda uuesti täis laadida.

Võnketalitluse korral eristatakse **sumbuva võnkumisega** siirdeprotsessi (joonis 2.58d), mis tekkib siis, kui takisti *R*, pooli induktiivsuse *L* ja kondensaatori mahtuvuse *C* suhe on $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Siin toimub samuti kondensaatorisse salvestunud energia muundamine tarbijas soojusenergiaks. Selle suhte korral salvestatakse pooli piisavalt energiat, et pärast kondensaatori tühjenemist teda uuesti täis laadida.

Sumbumatu võnkumine esineb siis, kui ahelas on ideaalne kadudeta pool ja kondensaator. Seega toimub kontuuris omavõnkesagedusega kondensaatori tühjaks- (energia salvestamine pooli) ja täislaadimine (pooli energia salvestamine kondensaatorisse). Kuna ahela takistus $R = 0$, siis elektritarbimist ahelas pole ja sumbumatu võnkumine toimub ahela omavõnkesagedusega $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

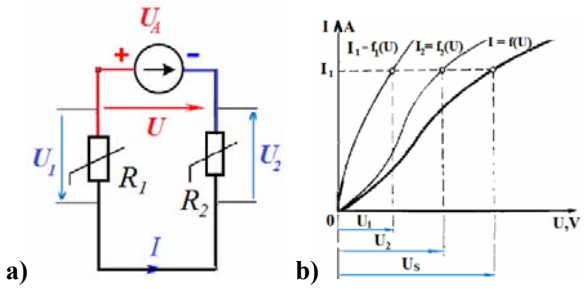
2.11. Mittelineaarsed elemendid alalisvooluahelas

Eespool vaadeldi vaid lineaarseid alalisvooluahelaid, s.o ahelaid, mille takistus ei olene voolust ega pingest. Ahelat, mille takistus oleneb voolust või pingest, nimetatakse **mittelineaarseks**. Mittelineaarsed elemendid on näiteks hõõglambid, elektronlambid, termotakistid, pooljuhtseadised jne, kus vool on tavaliselt halvasti

matemaatiliselt avaldatav mittelineaarne pingefunktsioon. Seda funktsiooni $I = f(U)$ nimetatakse mittelineaarse elemendi pinge-voolu tunnusjooneks või voltamperkarakteristikuks.

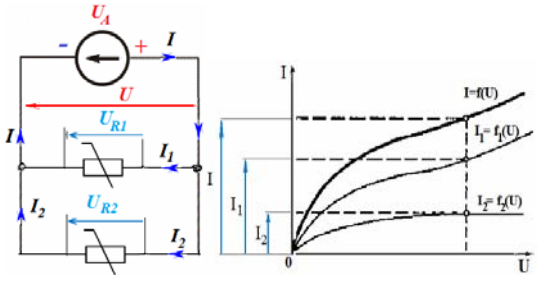
Kuna mittelineaarse elemendi takistus ei ole konstantne, siis ei saa sellist elementi sisaldavat ahelat arvutada Ohmi seaduse alusel. Mittelineaarseid ahelaid arvutatakse arvuti tarkvara abil. Saab arvutada ka graafiliselt, kusjuures peab teada olema mittelineaarse elemendi (elementide) pinge-voolu karakteristik (karakteristikud).

Kahest jadamisi ühendatud mittelineaarsest elemendist koosneva ahela (joonis 2.59a) arvutusnäide on joonisel 2.59b. Mingi pinge U_0 korral saame leida vastava voolu I_0 selle ahela pinge-voolu karakteristikult $I = f(U)$. Viimane on saadud mittelineaarsete elementide R_1 ja R_2 pinge-voolu karakteristikute $I_1 = f_1(U)$ ja $I_2 = f_2(U)$ pinge järgi liitmise tulemusena, sest jadaahelas liituvad potentsiaalilangud: $U_S = U_1 + U_2$.



Joonis 2.59. Mittelineaarne jadaahel (a) ja selle arvutus (b)

Kahest rööbiti ühendatud mittelineaarsest elemendist koosneva ahela (joonis 2.60a) arvutuse näide on joonisel 2.60b. Voolud rööpharudes on määratud elementide R_1 ja R_2 pinge-voolu karakteristikutega $I_1 = f_1(U)$ ja $I_2 = f_2(U)$. Vool ahela hargnemata osas on aga leitav selle ahela pinge-voolu karakteristikust $I = f(U)$, mis on saadud mittelineaarsete elementide pinge-voolu karakteristikute voolu järgi liitmise tulemusena. Mingi pinge U_0 korral Kirchhoffi I seaduse järgi $I = I_1 + I_2$



Joonis 2.60. Mittelineaarne rööpahel (a) ja selle arvutus (b)

2.12. Kordamisküsimused

1. Lihtne elektriahel (reaalne allikas, juhtmed, üks tarbija, mille takistus muutub nullist lõpmatuseni). Kuidas muutuvad erinevate takistuste väärtuste korral ahelas vool, potentsiaalilangud ja kus ning kui palju muundub (eraldub) tarbijas ning allikas ajaühikus energiat teisteks energialiikideks?
2. Potentsiaalide jagunemine lihtsa ahela takistis. (Takistit kujutada pika elemendina ning panna maandused kordamööda erinevatesse kohtadesse.) Milliseks kujuneb inimest läbiv vool, kui ta on voolu juhtival põrandal ja puudutab takistit kahe käega erinevates punktides.
3. Kuidas määrata, millal on keerukas ahelas elemendid jada- või rööplülituses? Selgitada näite varal.
4. Kirchhoffi voolu ja pingeseadus. Selle rakendamise reeglid ja kasutusnäide koos arvutusega kolmeharulise elektriahela korral.
5. Ühe allikaga elektriahela arvutus. Potentsiaalide jagunemine kõikidel allika elementidel.
6. Kahe allikaga elektriahela arvutus. Kirchhoffi voolu ja pingeseadusega arvutusnäide.
7 Mittelineaarsete ahelate arvutusidee.

3. MAGNETAHELAD

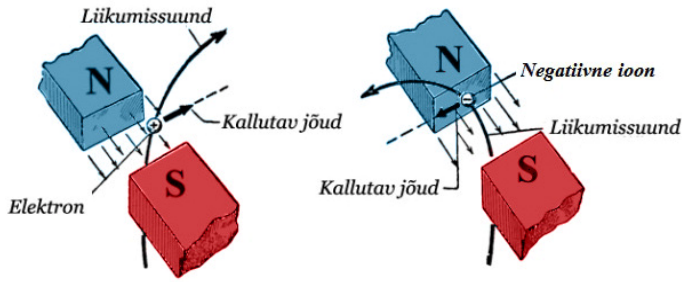
3.1. Magnetväli
3.2. Magnetväljade võimendamise viisid
3.3. Põhilised magnetilised suurused
3.4. Vooluga juhe välises magnetväljas. Elektromagnetiline jõud
3.5. Mitmesuguste ainete magnetilised omadused
3.6. Magnetahelad
3.7. Magnetomotoorjõud ja magnetiline takistus
3.8. Koguvooluseadus
3.9. Elektromagneti külgetõmbejõud
3.10. Elektri- ja magnetahelate sarnasusest
3.11. Kordamisküsimused

3.1. Magnetväli

Elektronide ehk elektrilaengute kulgemisel juhtmes liigub ka iga üksikut elektroni ümbritsev isiklik energiaväli, mis kõik kokku moodustavad juhtme ümber **liikuvate laengute energiavälja** nn **magnetvälja**. Laengute energiaväli avastati alul seisvate laengute korral ja nimetati **elektriväljaks**. Hiljem uuriti liikuvaid laenguid, avastati nende energiaväli, mida nimetati **magnetväljaks**. Üldjuhul moodustab laengute energiaväli ühtse **elektromagnetvälja**, mida loetakse mateeria erivormiks. Laengute energiaväli, elektriväli ja magnetväli sisaldavad hajutatud energiat. See energia avaldub paigalseisvatele ja liikuvatele laetud osakestele (elektronid, ioonid ja nende voog – st elektrivoolule) mõjuvate jõudude näol.

1820. a avastas taani füüsik **Hans Oerstedt**, et voolujuhi lähedal paiknev magnetnõel pöördub voolu mõjul. Prantsuse füüsik **André Ampère** avastas samal aastal, et rööbiti paiknevad vooluga juhid mõjutavad teineteist. Samasuunalise voolu korral nad tõmbuvad, vastassuunalise korral tõukuvad. Avastatud vastasmõju nimetas ta elektrodünaamiliseks vastasmõjuks. Ampère järeldas, et magnetite ja voolude vastasmõju põhineb magnetisisestel molekulaarsetel vooludel. Erilisi magnetlaenguid looduses pole. **Kõik magnetilised nähtused tuginevad liikuvate laengute energiaväljade (magnetväljade) vastasmõjule.**

Magnetvälja jõudude mõjul kalduvad liikuvad laetud osakesed oma esialgsest teest kõrvale väljaga risti olevas suunas (joonis 3.1).

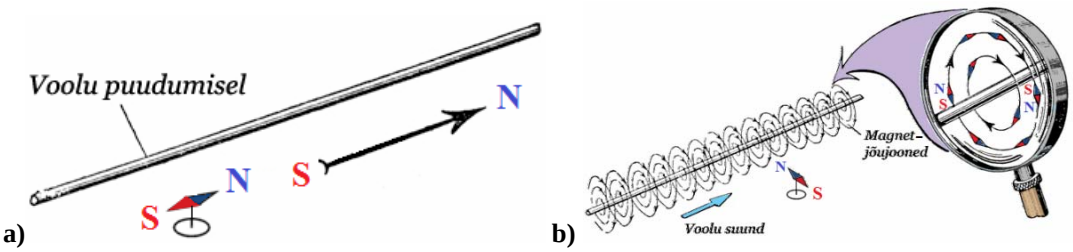


Joonis 3.1. Magnetvälja jõudude mõju laengutele

Seega loetakse magnetväljaks ainult liikuvate laengute energiavälja ja magnetväli mõjutab samuti ainult liikuvaid laenguid. „Seisvate“ laengute energiavälja kirjeldatakse elektriväljana.

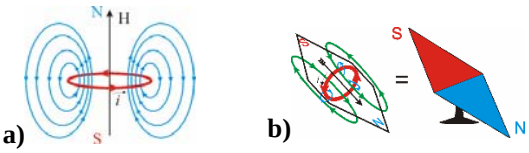
Magnetvälja suund. Magnetvälja suuna võib määrata igas ruumipunktis sellesse punkti asetatud magnetnõela abil (joonis 3.2).

Magnetväljajoonte suunaks loetakse seda suunda, kuhu osutab magnetnõela põhjapoolus välja jõudude mõjul. Graafiliselt kujutatakse magnetvälja suunda magnetiliste väljajoontega. Väljajooned on joonistatud nii, et väljajoone suund igas välja punktis langeks kokku välja jõudude suunaga. Magnetilised väljajooned on alati kinnised (suletud).



Joonis 3.2. Magnetvälja suuna määramine igas ruumipunktis magnetnõela abil: a – kui juhtmes voolu ei ole, siis nõela suund ühtib maa magnetvälja suunaga; b – voolu olemasolul juhtmes pöördub nõel juhtme ümber tekkiva magnetvälja suunas

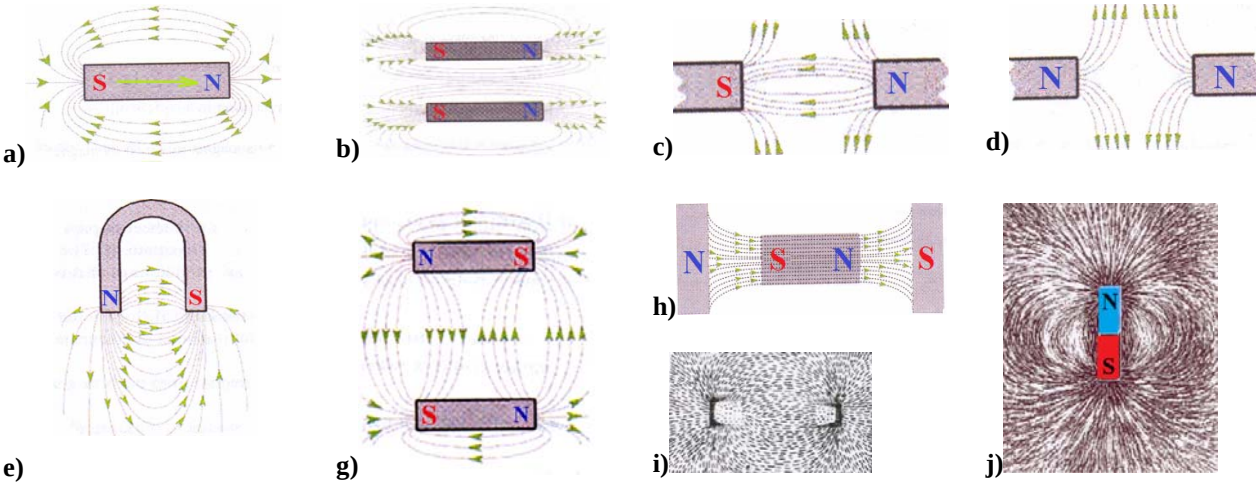
Magnetvoo allikad. Edaspidi nimetame magnetvoo allikaid lühendatult magnetallikateks. Iseloomulikuks magnetallikaks võime pidada vooluga kinnist kontuuri. Tasapinnalist voolukontuuri võime lugeda väga lühikeseks magnetiks (joonis 3.3a), millel on kaks poolust: põhja- ja lõunapoolus. Teise magnetvoo allikana saab kasutada ferromagnetmaterjalide domeene – isetekkelist magnetvoo allikat (isetekkeline suurt arvu aatomeid sisaldav ala, mille magnetmoment on palju suurem kui ühe aatomi oma).



Joonis 3.3. Tasapinnalise voolukontuuri – magnetvoo allika, magnetväli (a). Kontuuris toiteallikat pole näidatud. Domeeni tinglik kujutis ja selle magnetväli (b)

Lihtsustatult võime domeeni kujutada joonisel 3.3b esitatud alana, mille summaarne vool *i* põhjustab magnetvoo. Kontuurist väljuvate väljajoonte suunale jääb põhja- ja vastaspoolele lõunapoolus. Aineid, mis suudavad oma „isiklike“ magnetväljade abil võimendada välist magnetvälja, nimetatakse **ferromagneetikuteks.**

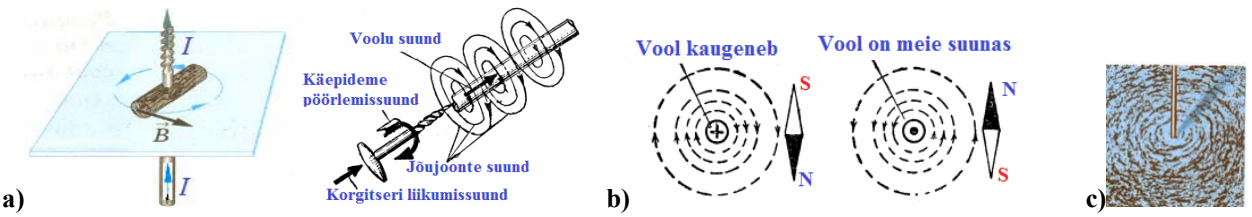
Joonisel 3.4a, b on näidatud lapiku püsimagneti magnetväli. **Seda otsa, millest väljajooned väljuvad, loetakse põhjapooluseks *N*,** vastaspoolset otsa, kuhu väljajooned suubuvad, lõunapooluseks *S*.



Joonis 3.4. Magnetilised väljajooned väljuvad magneti põhjapooluselt ja suubuvad lõunapoolusele: a – lapiku püsimagneti magnetväli; b – väljajoonte jaotumine magneti ümber

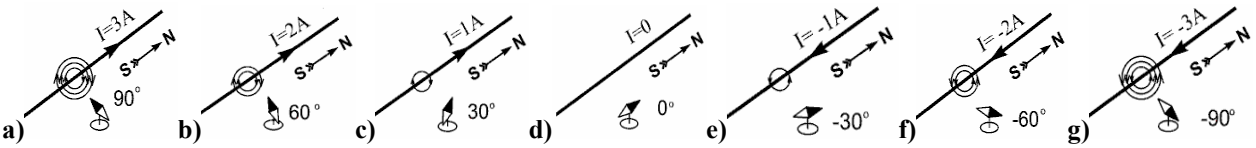
Joonisel 3.4c, d on kahe lapiku püsimagneti otstevaheline liitväli, kui kohakuti on ühe *S*- ja teise *N*-poolus (c) ning kohakuti on ka kaks *N*-poolust (d). Joonisel 3.4e on näidatud *U*-kujulise püsimagneti väljapilt ning joonisel 3.4g on kahe rööbiti paikneva lapiku püsimagneti liitväli, kui vastastikku paiknevad *N*- ja *S*-poolused. Joonisel 3.4h on U-kujulise ja lapiku püsimagneti poolustevahelise liitvälja kujutis. Väljajoonte jaotumise lapiku magneti ümber võib tuua nähtavale rauapuru abil, mis on puistatud poolustele asetatud paberilehele (joonis 3.4i, j). Kui vool kulgeb sirges juhtmes, siis tekkib tema ümber ringikujuline magnetväli (joonis 3.5). Selle välja magnetväljajooned asuvad kontsentrilistel ringjoontel, mille tsentris asub vooluga

juhe (joonis 3.5b). Magnetvälja suund on alati rangelt vastavuses voolu suunaga juhtmes. Seda suunda võib määrata kruvireegli järgi (joonis 3.5a). Kui mõtteliselt keerata kruvi (korgitseri) juhtmesse sisse voolu suunas, siis tema pea pööramise suund langeb kokku välja magnetväljajoonte suunaga.



Joonis 3.5. Vooluga juhtme magnetvälja suund määratakse kruvireegliga: kruvi (korgitseri) keeramisel voolu suunas langeb käepideme ja kruvi pea liikumissuund kokku välja magnetväljajoonte suunaga (a ja b). Väljajoonte jaotumine vooluga juhtme ümber (c)

Näiteks kui vool juhtmes on suunatud meist eemale (joonisel 3.5b on see suund tinglikult näidatud ristikesega), siis juhtme ümber tekkiv magnetväli on kellaosuti liikumise suunas. Kui vool juhtmes on meie suunas (joonisel 3.5b on see suund tegelikult näidatud punktiga), siis magnetväli juhtme ümber on kellaosuti liikumisele vastassuunas. Mida suurem on vool juhtmes, seda suurem on laengute energiavälja tihedus ja tugevam on juhtme ümber tekkiv magnetväli (joonis 3.6). Voolu suuna muutumisel muutub ka magnetvälja suund.

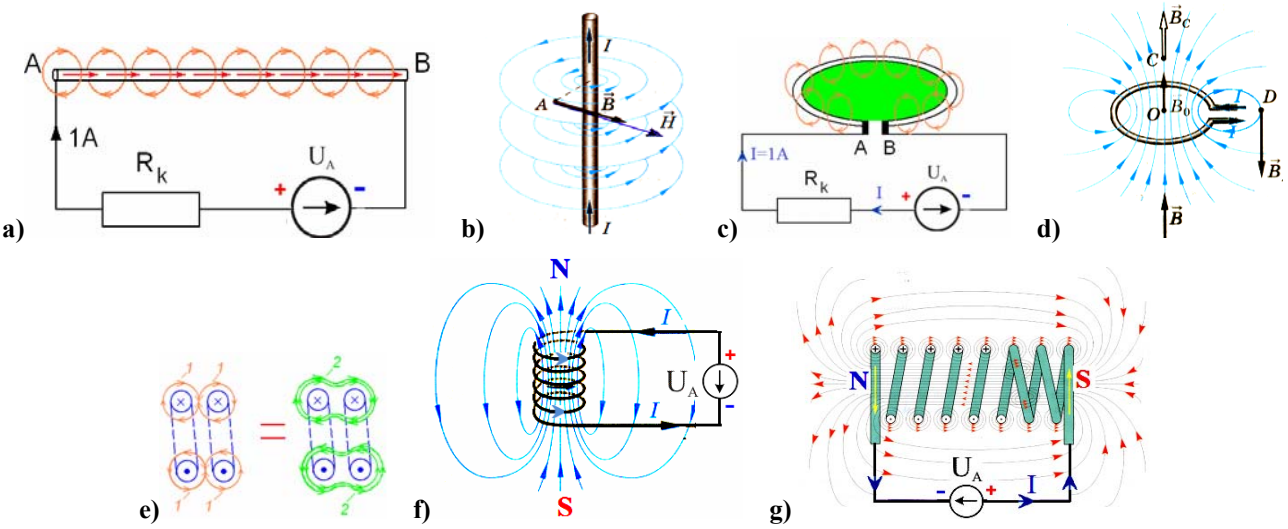


Joonis 3.6. Maa ja vooluga juhtme magnetväljade liitumisel tekkiv liitmagnetväli ning selle mõju magnetnõelale. Voolu suuna muutumisel muutub ka vooluga juhtme magnetvälja suund

3.2. Magnetväljade võimendamise viisid

Jõumagnetväljade saamiseks väikeste voolude korral harilikult suurendatakse vooluga juhtmete arvu, mida tehakse keerdude rea kujul. Niisugust seadet nimetatakse **mähiseks** või **pooliks**.

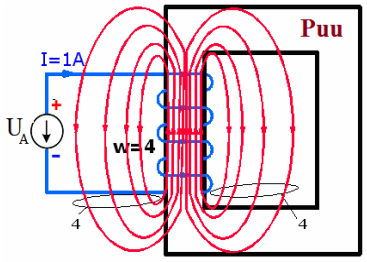
Olgu meil sirgjuhe *A-B*. Joonisel 3.7a on näidatud lihtsustatud ja joonisel (b) täpsem magnetvälja pilt.



Joonis 3.7. Sirgjuhtme A-B magnetväli voolutugevusel 1 A: lihtsustatud (a) ja täpsem väljapilt (b). Sama pika, sama vooluga juhtmekeerumagnetväli: lihtsustatud (c) ja täpsem väljapilt (d). Kahe mähisekeeru magnetväljade liitumine (e). Pooli magnetväli: lihtsustatud (f) ja täpsem väljapilt (g)

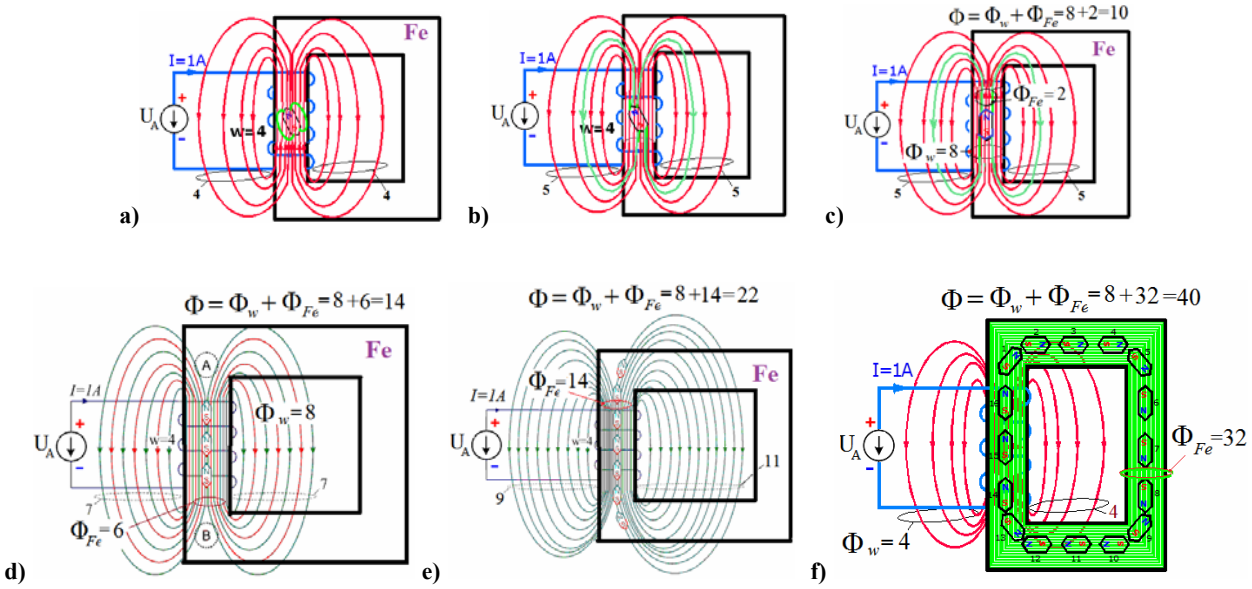
Selle juhtme keeruks keeramisel on keeru sees juhtmeosade magnetväljad ühes suunas (c ja d). Lastes läbi sirgjuhi ja juhtmekeeru voolu tugevusega 1 A, on väljajoonte arv nii juhtme kui ka keeru ümber üks ja seesama. Iga juhtme ümber olev väljajoon iseloomustab magnetväljas sisalduvat hajutatud energia kogust piki juhet. Ainult et juhtme keeru sees väljajoonte tihedus (energiatihedus) kasvab. Seepärast on magnetvälja (energiatihedus) intensiivsus (tugevus) keeru sees suurem kui sirge juhtme ümber (c ja a). Juhtmekeeru täpsem magnetvälja pilt on joonisel (d). Kui kerida juhe mähiseks ja ühe keeru asemele tuleb näiteks kaks keerdu (e), siis mähise sees magnetväljajoonte tihedus (energiatihedus) suureneb veel kaks korda. Kui lisame keerdusid (f ja g), suureneb veelgi. Ka siin on esitatud lihtsustatud (f) ja täpsem (g) pooli magnetvälja pilt. Näeme, et suure keerdude arvuga poolil tekkib tugeva voolu korral pooli sees suure energiatihedusega magnetväli, mida on võimalik kasutada elektromagnetseadmete energiamuundamise piirkonna loomiseks.

Pooli paigaldamine ferromagnetsüdamikule. Vaatleme algul puust südamikule keritud pooli. Olgu poolil 4 keerdu ja läbigu seda vool 1 A (joonis 3.8). Kuna südamik on puust, siis pooli magnetväli on sisuliselt sama nagu õhksüdamiku korral. Vastaku näiteks ühte keerdu läbivale voolule 1 A magnetvoog, mille liikuvate laengute energiakogust iseloomustavad kaks magnetväljajoont. Nelja keeru korral on kokku 8 väljajoont (joonisel punast värvi).



Joonis 3.8. Puu- või õhksüdamikuga pooli magnetvälja kujutis. Poolil on 4 keerdu, mida läbib vool 1 A

Asendades puusüdamiku ferromagnetilisest materjalist südamikuga, hakkavad domeenide nn isiklikud magnetväljad liituma mähise voolust põhjustatud magnetväljaga. Joonisel 3.9a on vaatluse all esimene juhusliku ruumilise paigutusega domeen.



Joonis 3.9. Pooli magnetvälja mõju ferromagnetilisest materjalist südamikule. Esimese domeeni nn isiklike väljajoonte liitumine pooli voolu magnetväljaga (a, b ja c). Magnetvälja pilt, kui kolm (d), kuus (e) ja 16 domeeni (f)* on liitnud isiklikud väljajooned pooli voolu magnetväljaga

---

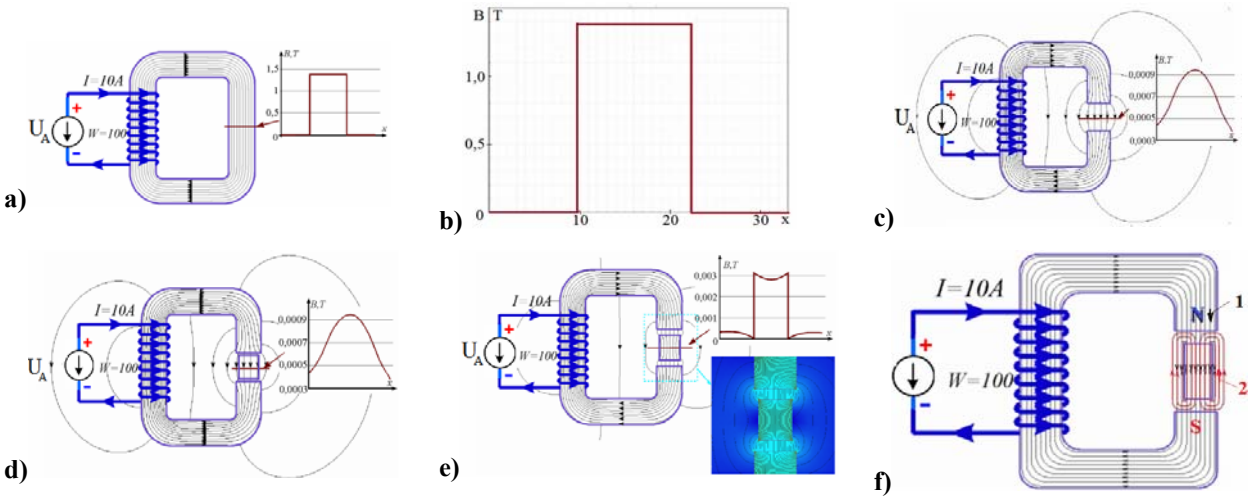
* Joonisel 3.9 on ristuvate magnetväljajoontega eskiise. Väljajooned ei saa põhimõtteliselt ristuda, sest nad kujutavad liikuvate laengute energia jagunemist ruumis. Kus energiatihedus on suur, seal on väljajooni rohkem. Domeenide magnetvoo osa suurenemisega kasvab seal välja energiatihedus. Seega sulguvad mitteristuvad punased väljajooned vooluga mähisele lähemal.

Nagu näeme, suunduvad domeeni kaks rohelist magnetväljajoont *N*-pooluselt *S*-poolusele ülalt alla, vastupidi pooli magnetväljaga. Seetõttu ei saa nad sulguda kõige lühemat teed pidi südamiku sees, vaid pikemat teed pidi väljaspool südamikku (joonis 3.9b). Selle tulemusel on domeeni läheduses magnetvälja pilt moonutatud. Väljajoonte tihedus suureneb domeeni ülaosas vasakul, alaosas paremal pool. See tekitab jõupaari, mis pöörab domeeni joonisel 3.9c näidatud asendisse.

Lõpptulemusena lisandusid südamiku sees algsele, mähise tekitatud 8 punasele väljajoonele 2 rohelist domeeni, nn isiklikku väljajoont, seega kokku 10 väljajoont. Nii toimus tänu ferromagnetmaterjalile magnetvoo võimendumine ühe domeeni kahe isikliku väljajoone arvelt. Selline ongi ferromagnetmaterjalide kasutamise olemus – nad võimaldavad muutumatu mähisevoolu korral võimendada pooli magnetvälja. Joonised 3.9d...f iseloomustavad täiendavalt sellist magnetvälja võimendamist. Lisaks esimesele domeenile sattuvad sarnasesse olukorda ka naaberdomeenid. Nii on joonisel 3.9d kolm domeeni liitnud oma nn isiklikud väljajooned pooli väljaga, lisades 6 rohelist väljajoont, joonisel 3.9e on aga 7 domeeni liitnud oma isiklikud väljajooned pooli magnetväljaga. Protsess ajas on laviinitaoline.

Kui algselt tekitasid domeenide pöördemomenti vaid pooli voolu tekitatud magnetvälja ja domeeni isikliku välja liitumisel tekkivad jõupaarid, siis protsessi arenedes ja kaugenemisel pooliga haaratud südamikuosast täidab välisvälja rolli juba ka domeenide isiklikest magnetväljadest põhjustatud magnetväli. Nii on joonisel 3.9f kuusteist domeeni liitnud oma isiklikud väljajooned pooli väljaga, lisades 32 rohelist väljajoont, mis kulgevad piki magnetahelat. Tegelik domeenide arv on väga suur ja pooli välja võimendavate domeenide magnetväljade osa (rohelised väljajooned) on palju kordi suurem pooli magnetvoost, mistõttu modelleerides muutuvad nad oma väiksuse tõttu „nähtamatuks“.

Joonisel 3.10 on ferromagnetsüdamikuga pool, millel õhupilu puudub (a). Siis tekitab mähises (keerdude arvuga $w = 100$ ja vooluga $I = 10$ A) esile kutsutud magnetomotoorjõud kõnealuse südamiku korral magnetvoo, mille maksimaalne magnetvootiheduse väärtus südamikus on $B_m = 1{,}4T$.



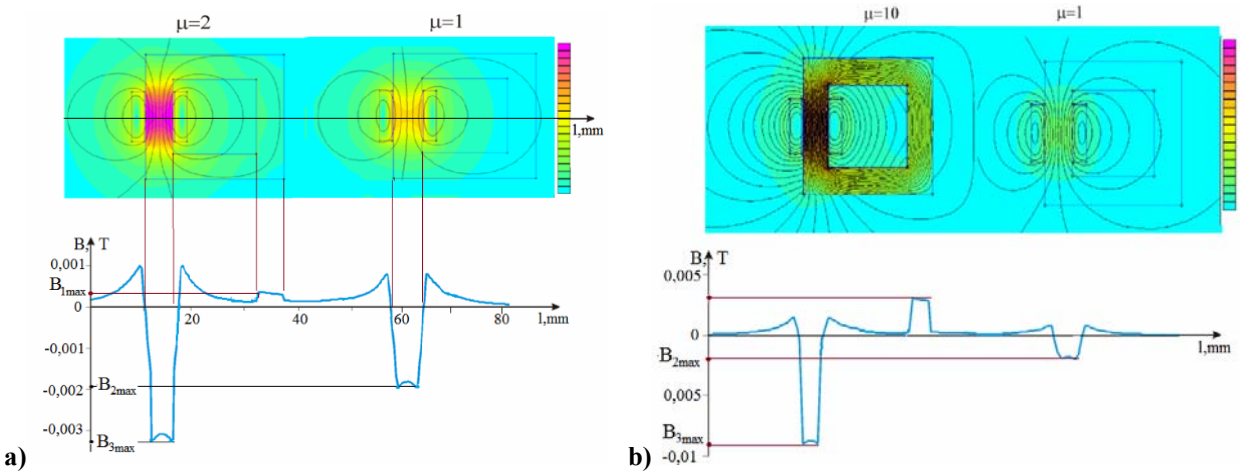
Joonis 3.10. Ferromagnetilisest materjalist südamikuga pooli magnetväli, kui õhupilu puudub (a); kui on suur õhupilu (c); kui õhupilus on tammepuust klots (d); kui õhupilus paikneb ferromagnetklots (e); õhupilus väljaspool ferromagnetklotsi on südamiku väljajoonte suund vastassuunaline klotsidomeenide väljaga (f)

Joonisel 3.10b on modelleerimistulemused, mis on saadud arvutiprogrammi Maxwell abil. Joonisel 3.10c on ferromagnetsüdamiku suure õhupilu korral maksimaalne magenetvootiheduse väärtus $B_m = 0{,}00092$ T. See on *ca* 1522 korda väiksem kui õhupilu puudumise (a) korral. Joonisel 3.10d on õhupilus tammepuust klots. Eelvaadelduga võrreldes ei muutu magnetvoo pilt ja B_m väärtus.

Paigutades õhupilusse ferromagnetklotsi (e), kasvab magnetvootihedus klotsis ($B_m = 0{,}0031$) mainitud geomeetria korral *ca* 3,4 korda. Joonis 3.10f selgitab, miks koonduvad magnetväljajooned klotsi sisse. Südamiku väljajoonte suunda näitab nool väljajoonel 1, klotsi väljajoonte suunda väljaspool klotsi nool väljajoonel 2. Need on vastassuunalised, seega nullivad vastastikku. Klotsi ümber väheneb energiatihedus, magnetsüdamikus aga suureneb klotsi domeenide täiendava energia lisandumise tõttu. Väljajoonte arv joonisel (f) ei vasta tegelikkusele. Kui õhupilus

paikneb ferromagnetmaterjalist klots, siis klotsi magnetväljajooned sulguvad samuti südamikku pidi, mistõttu väljajoonte tihedus suureneb (meie näites) 3,4 korda.

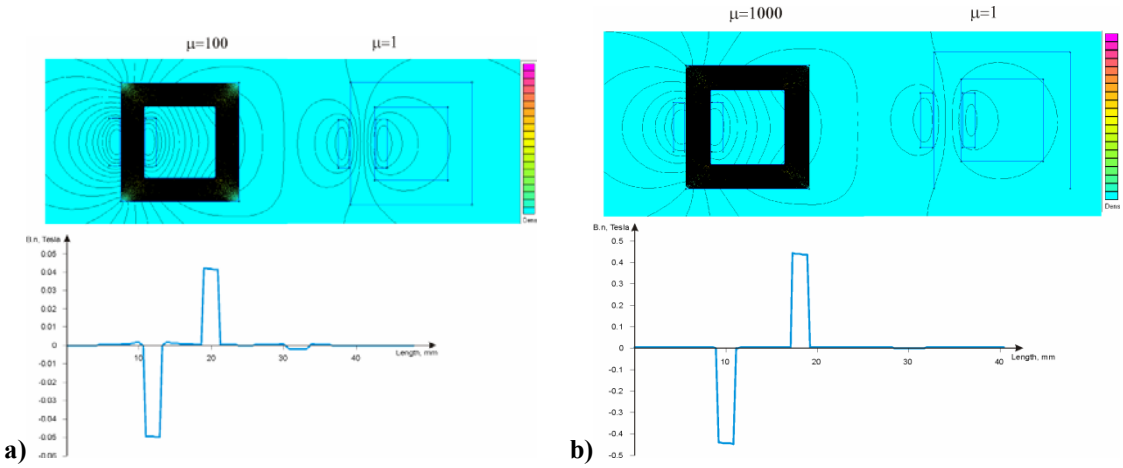
Magnetväljade võimendamine erineva ferromagnetmaterjaliga. Joonisel 3.11a on modelleerimistulemused juhul, kui kahel identsel poolil on erinevast materjalist südamik: esimesel ferromagnetilisest materjalist ($\mu = 2$), teisel õhksüdamik ($\mu = 1$). Jooniselt selgub, et valitud mähise ja südamiku geomeetria korral suureneb esimesel poolil magnetvoo tiheduse väärtus mähisega (vasakpoolses) sambas B_{3max}, mitte 2 korda, vaid *ca* 1,74 korda võrreldes õhksüdamikuga pooliga B_{2max}. Siin $B_{3max}/B_{2max} = 0{,}0033/0{,}0019 = 1{,}74$.



Joonis 3.11. Kahe identsel südamikul paikneva pooli magnetvoo tiheduse jagunemine, kui südamiku materjali suhteline magnetiline läbitavus on vastavalt 2 ja 1 (a) ning 10 ja 1 (b)

Väike osa ($B_{1max} = 0{,}0003$ T) pooli magnetvoost (*ca* 9%) sulgub ferromagnetsüdamiku parempoolse samba kaudu, kus voo tihedus on *ca* 10%, üks kümnendik (0,00035 T) vasakpoolse samba (0,0035 T) omast. Magnetvoo suurust on joonisel hinnatud ligikaudselt, arvestusel on lähtutud asjaolust, et mõlema samba ristlõikepindalad on võrdsed. Joonisel 3.11b on modelleerimistulemused, kus esimese südamiku suhteline magnetiline läbitavus on 10. Sel puhul magnetvootihedus B_{3max} suureneb mitte 10 vaid *ca* 4…5 korda, aga südamiku parempoolse samba ($B_{1max} = 0{,}0025$ T) kaudu sulgub ligikaudselt 28% vasakpoolse samba magnetvoost.

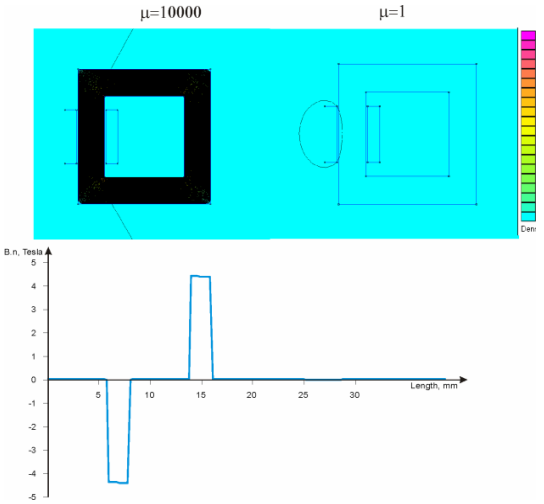
Joonisel 3.12a on esimese südamiku magnetiline läbitavus 100. Sel puhul magnetvoo tihedus suureneb *ca* 25 korda ja südamiku parempoolse samba (0,0025 T) kaudu sulgub ligikaudu 28% vasakpoolse samba (0,009 T) magnetvoost. Joonisel 3.12b on esimese südamiku suhteline magnetiline läbitavus 1000. Sel puhul magnetvoo tihedus suureneb *ca* 230 korda ja südamiku parempoolse samba (0,038 T) kaudu sulgub ligikaudu 76% vasakpoolse samba (0,05 T) magnetvoost.



Joonis 3.12. Kahe identsel südamikul paikneva pooli magnetvoo tiheduse jagunemine, kui südamiku materjali suhteline magnetiline läbitavus on vastavalt 100 ja 1 (a) ning 1000 ja 1 (b)

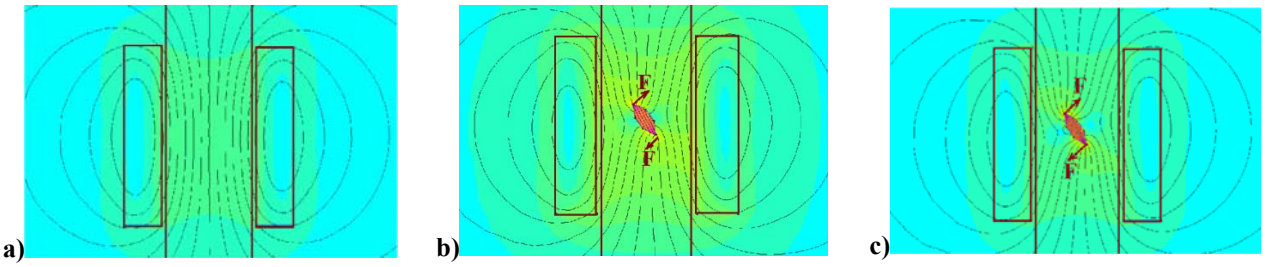
Joonisel 3.13 on esimese südamiku magnetiline läbitavus 10000. Sel juhul kasvab magnetvootihedus mähisega sambas *ca* 2300 korda ja südamiku parempoolse samba kaudu sulgub ligikaudu 95…100% vasakpoolse samba (4,5T) magnetvoost. Kõik need võrdlused on tehtud samade mähise, mähise voolu ja südamiku mõõtmete korral. Erinev on olnud vaid südamiku materjali magnetiline läbitavus, vastavalt: 2, 10, 100, 1000 ja 10 000.

Kui võrrelda modelleerimistulemusi, näeme, et ferromagnetsüdamikuga pooli väljajoonte hulk suureneb, õhksüdamiku korral väheneb ja joonisel 3.13 väljajooned puuduvad. Põhjus on selles, et joonisel kujutab iga väljajoon endast mingi suurusega liikuvate elektronide laengute energiaportsjonit. Kui domeenide laengute energiaportsjonite arv suurema läbitavusega materjalide korral suureneb, siis mähise voolu laengute energiaportsude osa väheneb. Suurema läbitavuse korral väljajoonte arv suureneb, ja et neid joonisel ära mahutada, siis suurendatakse iga väljajoone energiaportsjonit. Joonisel 3.13 on südamikus energiatihedus väga suur, mustad väljajooned on teineteise kõrval nii tihedalt, et värvivad kogu südamiku mustaks.



Joonis 3.13. Kahe identsel südamikul paikneva pooli magnetvoo tiheduse jagunemine, kui südamiku materjali suhteline magnetiline läbitavus on vastavalt 10 000 ja 1

Joonis 3.14 iseloomustab domeeni magnetvälja liitumist pooli magnetväljaga, mille tulemusel toimub laengute energiavälja tiheduse muutumine ja joonisel 3.9b kirjeldatud domeeni pooli sümmeetriatelje suunda pöörava jõupaari teke. Domeen on modelleeritud püsimagnetina, mille koertsitiivjõud (magnetvälja tugevus, mis on vajalik selleks, et südamik muuta täielikult mittemagnetiliseks) joonisel 3.14b on 500 ja joonisel 3.14c vastavalt 1000 A/m. Modelleerimistulemused iseloomustavad magnetväljade liitumisel sümmeetrilise välja (a) moonutamist mittesümmeetriliseks väljaks (b ja c), kus tekkivad energia kõrg- ja madaltihedusalad. See avaldub joonistel väljajoonte tiheduse muutuses ja nende väljavenitamises. Kui kujutada väljavenitatud väljajooni kummipaeltena, mis püüavad lüheneda, siis püsimagneti teraviku külgedele on rakendatud erineva venitusastmega „kummipaelad“. Nad tekitavad püsimagnetile (domeenile) mõjuva jõupaari $F - F$ ning pöördemomendi.



Joonis 3.14. Pooli magnetväli, kui domeen puudub (a); kui pooli magnetväljas on domeeni modelleeriv püsimagnet, mille koertsitiivjõud on 500 (b) ja 1000 A/m (c)

3.3. Põhilised magnetilised suurused

Magnetvoo tihedus (induktsioon) ja magnetvoog. Magnetvälja energiasisaldus, s.o tema võime teha tööd, määratakse suurusega, mida nimetatakse **magnetvoo tiheduseks** (induktsiooniks, tähistatakse tähega B) ja

mis kirjeldab sisuliselt laengute energiavälja tihedust. Mida tugevam on püsimagneti või elektromagneti magnetväli, seda suurem on selle magnetväljajoonte tihedus, s.o väljajoonte arv, mis läbib magnetväljaga risti olevat 1 m^2 suurust pinda. Mingit pinda läbivate magnetväljajoonte koguarvu võib lihtsustatult kujutada **magnetvoona** (tähistatakse tähega Φ). Järelikult võrdub magnetvoo tihedus magnetvoo ja magnetväljajoonte poolt läbitava pinna suuruse S jagatisega:

$$B = \frac{\Phi}{S},\ \text{T (tesla)}.$$

Siit järeldub, et magnetvoog on $\Phi = BS$, Wb (veeber), 1 T = Wb/m^2.

Magnetiline läbitavus. Magnetvälja intensiivsus ei olene ainult juhtme või pooli voolu suurusest, vaid ka sellest, kas keskkond võimendab või nõrgendab lähtevälja. Keskkonna magnetilisi omadusi iseloomustavaks suuruseks on **absoluutne magnetiline läbitavus** (tähistatakse μ või μ_a). Magnetilise läbitavuse ühikuks on henri meetri kohta, H/m.

Suure magnetilise läbitavusega keskkonnas tekitab elektrivool intensiivsema magnetvälja. Katsetest on selgunud, et õhu ja kõikide ainete, välja arvatud nn ferromagnetilised ained (raud, nikkel, koobalt ja nende sulamid), magnetilised läbitavused on ligikaudu sama suured kui vaakumi (μ_0) korral.

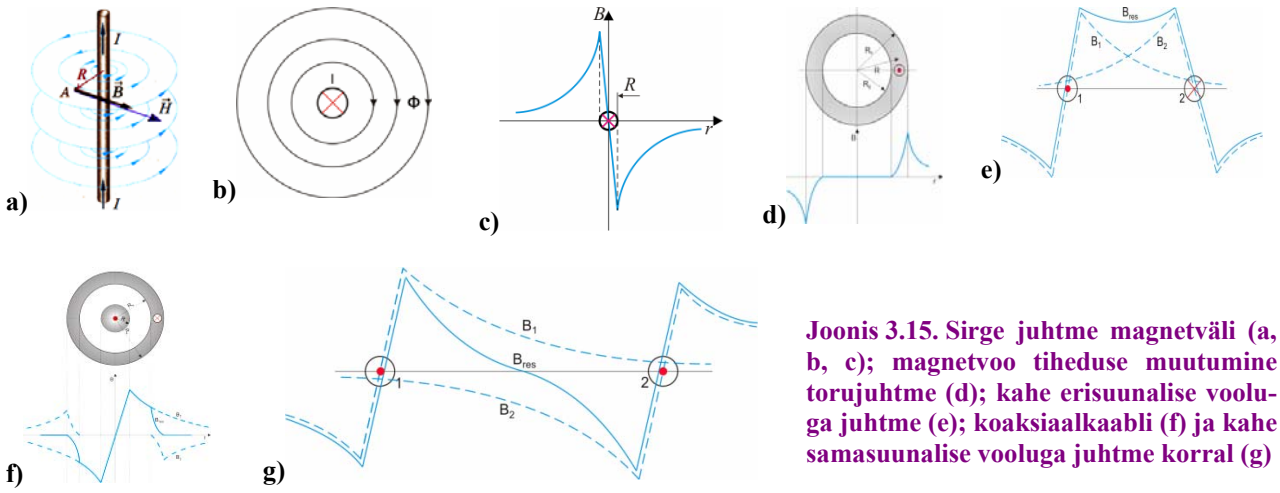
SI-ühikute süsteemis $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

Ferromagnetiliste ainete magnetiline läbitavus on tuhandeid ja isegi kümneid tuhandeid kordi suurem kui mitteferromagnetilistel ainetel. Mingi aine magnetilise läbitavuse suhet vaakumi magnetilisse läbitavusse μ_0 nimetatakse **suhteliseks magnetiliseks läbitavuseks** $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}.\ \mu_r$.

Magnetvälja tugevus. Magnetahelate arvutamisel tuuakse sisse abisuurus – magnetvälja tugevuse vektor (tähistatakse tähega H), mis ei sõltu keskkonna magnetilistest omadustest, kuid arvestab voolu ja juhtmete kuju mõju magnetvälja intensiivsusele selles punktis (**juhtme või pooli loomulik magnetvootihedus ilma võimenduse või nõrgestamiseta**). Magnetiline induktsioon ja väljatugevus on seotud valemiga $B = \mu H$,

millest $$H = \frac{B}{\mu}.$$

Magnetvälja tugevust mõõdetakse amprites meetri kohta (A/m) või amprites sentimeetri kohta (A/cm). Joonisel 3.15a, b iseloomustatakse sirge juhtme magnetvälja väljajoonte jagunemist juhtme ümber. Joonisel 3.15c…g näeme erinevate vooluga juhtide magnetvoo tiheduse muutumist juhtme sees ja selle ümber, kui juhtmeks on sirge juhe (c), torujuhe (d), kaks erisuunalise vooluga juhet (e), koaksiaalkaabel (f) ja kaks samasuunalise vooluga juhet (g). Koaksiaalkaabel (ühise teljega) on kesksoonega elektrijuht, mida ümbritsevad isoleerkiht, ühe- või kahekihiline metallvarje ja välisisolatsiooni kiht. Neid kasutatakse põhiliselt kõrgsagedustehnikas tele- ja andmesignaalide edastamisel. Torujuhtme (d) sees magnetväli puudub.



Joonis 3.15. Sirge juhtme magnetväli (a, b, c); magnetvoo tiheduse muutumine torujuhtme (d); kahe erisuunalise vooluga juhtme (e); koaksiaalkaabli (f) ja kahe samasuunalise vooluga juhtme korral (g)

Sirgjuhtme (a) magnetväljatugevus juhtme telgjoonelt kaugusel R (raadius) oleval ringjoonel avaldub

seosega $$H = \frac{I}{2\pi R}$$

ja magnetvoo tihedus $B = \mu_0 \mu_r H = \mu H$.

NÄIDE 3.1

Antud: vaskjuhtmes raadiusega R = 0,5 cm voolab vool I = 50 A.

Määrata: voolust põhjustatud magnetväljatugevus ja -vootihedus juhtme telgjoonest kaugusel R_1 = 0,2 cm, R_2 = 0,5 cm ja R_3 = 1 cm.

Lahendus

H ja B väärtused leiame magnetväljatugevuse ja -vootiheduse avaldistest, arvestades, et μ_r = 1 nii vaskjuhtme sees kui ka väljaspool. Arvutame väljatugevuse juhtme pinnal.

Siin $R = R_2$. Seega, $$H_2 = \frac{I}{2\pi R_2} = \frac{50}{2\pi \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2}} = 1592{,}3 \text{ A/m},$$

magnetvootihedus $$B_2 = \mu_0 \mu_r H_2 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 1592{,}3 = 2000 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Väljatugevuse juhtme teljest kaugusel R_1 = 0,2 cm = $0{,}2 \cdot 10^{-2}$ m leiame R_1 ja R suhte alusel (R = 0,5 cm = $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ m). $$H_1 = \frac{I}{2\pi R} \cdot \frac{R_1}{R} = \frac{I}{2\pi R^2} R_1 = \frac{50 \cdot 0{,}2 \cdot 10^{-2}}{2\pi (0{,}5 \cdot 10^{-2})^2},$$

$$B_1 = \mu_0 \mu_r H_1 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 636{,}94 = 799 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Leiame suhte alusel ka $$H_2 = \frac{I}{2\pi R^2} R_2 = \frac{50 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-2}}{2\pi (0{,}5 \cdot 10^{-2})^2} = 1592{,}3 \text{ A/m},$$

kus $R_2 = R$ = 0,5 cm = $0{,}5 \cdot 10^{-2}$ m.

Ringjoonel raadiusega R_3 = 1 cm = $1 \cdot 10^{-2}$ m väljatugevus $H_3 = \frac{I}{2\pi R_3} = \frac{50}{2\pi \cdot 1 \cdot 10^{-2}} = 796{,}1$ A/m.

Siin vootihedus $B_3 = \mu_0 \mu_r H_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 796{,}1 = 1000{,}4 \cdot 10^{-6}$ T.

Näitest 3.1 näeme, et suurim laengute energiavälja kontsentratsioon (magnetvoo tihedus) on vooluga juhtme välispinnal. Magnetvälja tugevust juhtme pinnal määrasime kahe võrrandi abil. Tulemus oli mõlemal juhul on sama.

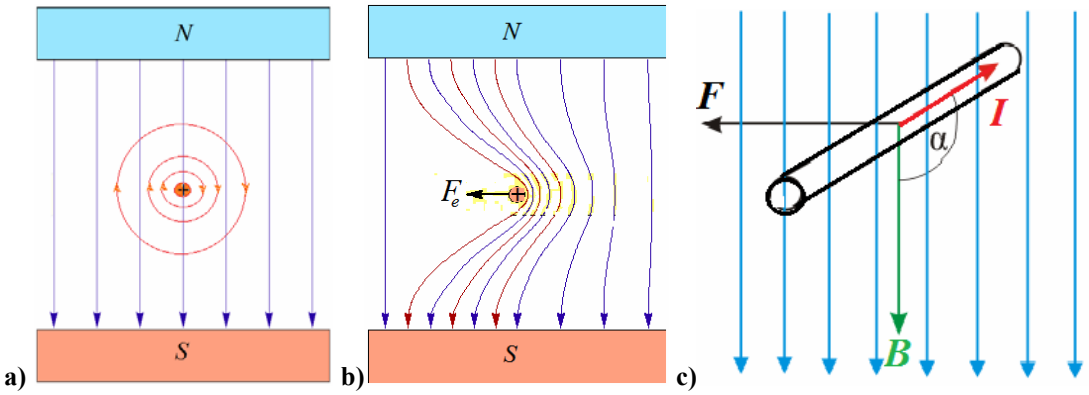
Pooli magnetvälja energia. Magnetvälja energiat tähistame W_m. Pooli magnetvälja energia võrdub pooli induktiivsuse L ja voolutugevuse I ruudu poole korrutisega. Seega $W_m = \frac{LI^2}{2}$. Energiaühikuks on džaul (J) ehk vattsekund (Ws).

3.4. Vooluga juhe välises magnetväljas. Elektromagnetiline jõud

Kui paigutada vooluga juhe välisesse magnetvälja (joonis 3.16), siis väljade liitumise tulemusena tugevneb liitväli juhtme ühel küljel (paremal) ja nõrgeneb teisel (vasemal). Toimub magnetjoonte nagu kummipaelte „väljavenitamine“, mis lüheneda püüdes suruvad juhet vasakule.

Magnetvälja paigutatud vooluga juhtmele mõjuv jõud F sõltub magnetvootihedusest B, voolutugevusest I, juhtme aktiivpikkusest l ja magnetvootiheduse vektori ning voolu suuna vahelise nurga α siinusest

$$F = BIl \sin\alpha .$$

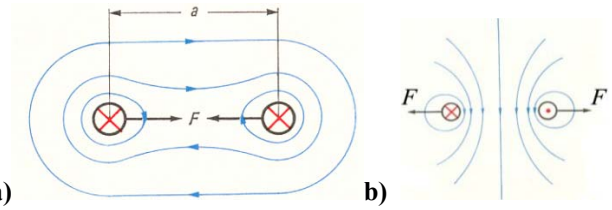


Joonis 3.16. Vooluga juhtme ja magnetvälja vastastikune toime (a), jõu suuna määramine (b). Vooluga juhtme magnetvälja väljajooned sulguvad suures osas sama teed mööda nagu püsimagneti omad. Selles näites suureneb magnetvälja salvestuv energia (7 sinisele väljajoonele lisanduvad 3 punast joont)

Seda jõudu F nimetatakse **elektromagnetjõuks**. Jõuühik ***njuuton*** on seotud magnetvootiheduse ühikuga ***tesla*** järgmiselt:

$$(F) = (B \cdot l \cdot I) = \mathrm{T \cdot m \cdot A} = \frac{\mathrm{V \cdot s \cdot m \cdot A}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{N}\ \text{(njuuton)}.$$

Vooluga juhtmete vastastikune toime. Kui teineteise lähedale paigutada kaks samasuunalise vooluga juhet, siis nende juhtmete laengute energiaväljad kompenseeruvad juhtmetevahelises ruumis, magnetjooned ei saa seal sulguda. Kahe juhtme liitvälja väljajooned haaravad seetõttu mõlemat juhet, sundides juhtmeid omavahel lähenema (joonis 3.17a). Juhtmetele rakenduva jõupaari F suund on suure energiatihedusega alalt väikese energiatihedusega alale. Vastassuunaliste voolude puhul (b) on magnetjooned juhtmete vahel ühes suunas ja võrdsete voolude korral energia tihedus suureneb 2 korda. Seetõttu tõukuvad need juhtmed vastastikku.



Joonis 3.17. Kahe vooluga juhtme vastastikune toime: a – voolud samas suunas, b – voolud vastassuunas

Olgu vooluga juhtmete vahekaugus a ja juhtmete pikkus l. Voolu I_1 tekitatud magnetvoo tihedus B_1 teise juhtme asukohas on $B_1 = \mu_a \dfrac{I_1}{2\pi a}$.

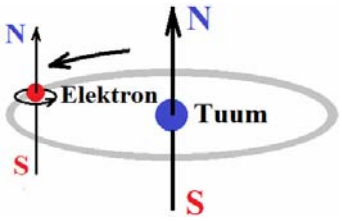
Rööbiti olevale juhtmele mõjub jõud $F_2 = lI_2B_1 = \dfrac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a}$.

Voolu I_2 tekitatud magnetvoo tihedus B_2 esimese juhtme asukohas on $B_2 = \mu_a \dfrac{I_2}{2\pi a}$.

Esimesele juhtmele mõjub jõud $F_1 = BlI_1 = \dfrac{\mu_a I_1 I_2 l}{2\pi a}$, mis on võrdne jõuga F_2.

3.5. Mitmesuguste ainete magnetilised omadused

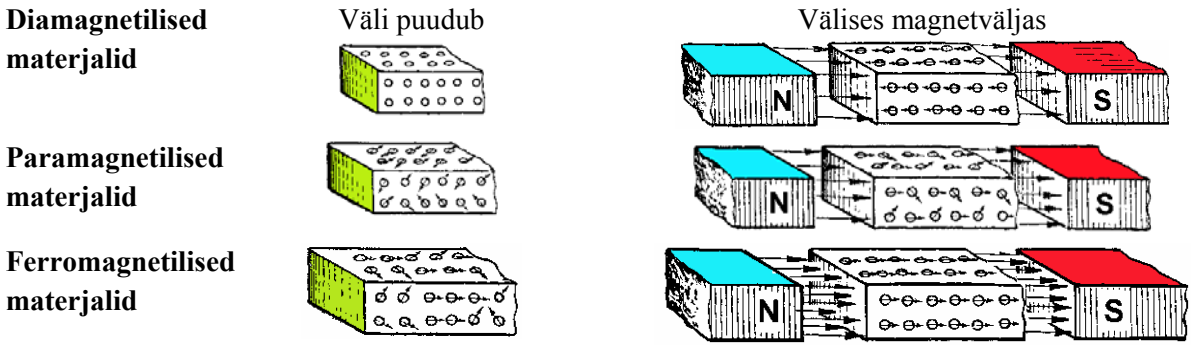
Elektronimagnetväli. Esimeses peatükis nägime, et ühte ja sama laengute energiavälja tajume nende tingliku paigalseisu korral elektriväljana ja liikumise (voolu) korral magnetväljana. Seega on igal elektronil, mis ringleb ümber aatomi tuuma ja samaaegselt pöörleb ümber oma telje, oma isiklik magnetväli, mida on kujutatud lihtsustatult joonisel 3.18. Seega on kõiki elektrone arvestades igal aatomil magnetväli. Aatomi magnetväli võib võimenduda või nõrgeneda olenevalt sellest, kuidas on omavahel orienteeritud aatomi üksikute elektronide magnetväljad. Juhul kui enamik elektrone pöörleb samas suunas ja nende pöörlemisteljed on suunatud rööbiti, siis nende tekitatud väljad liituvad. Vastassuunalise pöörlemise ja pöörlemistelgede erinevate suundade korral nende magnetväljad osaliselt vastastikku kompenseeruvad. Seetõttu nõrgeneb aatomi magnetväli või puudub üldse. Erinevate ainete puhul on erinevate aatomite magnetväljad laengute energiaväljade (jõudude) mõjul suunatud ruumis erinevalt.



Joonis 3.18. Elektroni pöörlemine oma telje ja aatomi tuuma ümber tekitab liikuva laengu energiavälja – magnetvälja

Ferromagnetilised, paramagnetilised ja diamagnetilised materjalid. Kõik tahked, vedelad ja gaasilised ained on magnetilised, kuna saavad välises magnetväljas uusi omadusi. Siiski võib neid aineid magnetiliste omaduste järgi jagada kolme rühma: ferromagnetilised, paramagnetilised ja diamagnetilised materjalid.

Ferromagnetilised materjalid on raud, koobalt, nikkel ja nende sulamid, aga ka haruldane muldmetall gadoliinium. Ferromagnetilistel materjalidel on äärmiselt suur magnetiline läbitavus, nad tõmbuvad magnetite külge ja magneetuvad hästi. Ferromagnetilisest materjalist vardake paigutub magnetväljas piki väljajooni. Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused olenevad keskkonna magnetvälja tugevusest. **Paramagnetilised** materjalid on alumiinium, tina, kroom, mangaan, plaatina, volfram, rauasoolade lahused jt. Nad magneetuvad väga nõrgalt, seepärast tõmbuvad paramagnetilised materjalid magneti külge sadu tuhandeid kordi nõrgemalt kui ferromagnetilised materjalid.



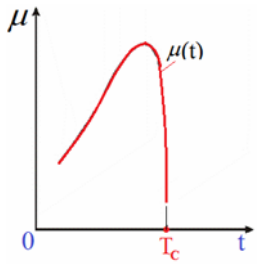
Joonis 3.19. Ainete magnetilised omadused on tingitud ainete elementaarmagnetite erinevast paigutumisest

Diamagnetiliste ainete elektronid pöörlevad nii, et ühtede elektronide pöörlemise magnetväljad kompenseeritakse täielikult teiste poolt. Nende energiaväljad ei liitu, vaid lahutuvad. Selle tulemusena on diamagnetilise aine aatomid ilma magnetväljata ehk magnetiliselt neutraalsed. Siiski diamagnetilise aine viimisel välisesse magnetvälja omandavad aatomite elektronide energiaväljad liitumisel välise väljaga väikeste elementaarmagnetite omadused. Seejuures orienteeruvad nende elementaarmagnetikeste magnetväljad nii, et nende põhjapoolused paigutuvad vastu välise välja põhjapoolust; selle tulemusena aatomi ja teda magneetinud välise välja vahel tekkivad tõukejõud (joonis 3.19). Para- ja ferromagnetiliste ainete aatomite elektronide tekitatud magnetväljad ei tasakaalusta vastastikku teineteist ja iga aatom on iseenesest juba valmis väike elementaarmagnet. Sellises magnetis on elektronide pöörlemisteljed suunatud ühte ja samasse suunda, langevad kokku ka elektronide pöörlemissuunad.

Paramagnetilistes ainetes paiknevad need väikesed magnetid täiesti korrapäratult (joonis 3.19). Välises väljas püüavad nad pöörduda selle välja magnetjoonte suunas, s.o paigutuvad korrapäraselt välise välja suhtes. Kuid seda pöördumist takistab aatomite pidev soojuslik liikumine, mis logistab lahti aatom-magnetikeste korrapärase rivi. Selle tõttu pole võimalik paramagnetilisi materjale magneetida.

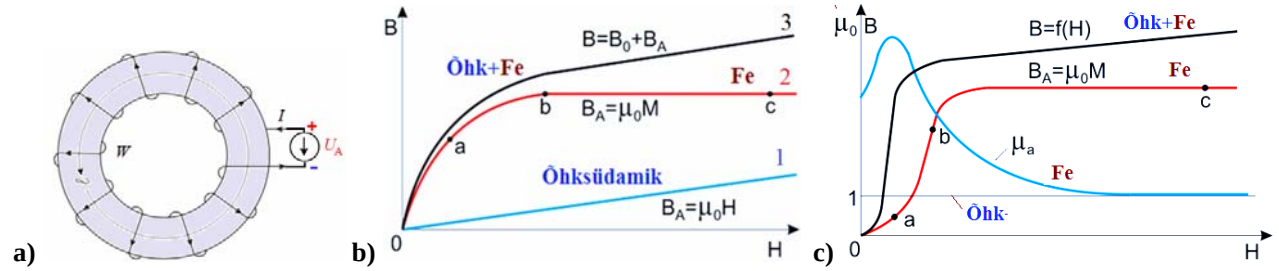
Ferromagnetism tuleneb elektronide eripärast. Elektroni mõju sarnaneb ringvoolu või pöörleva laetud keraga. Seetõttu ümbritseb teda magnetväli. Kristallides on reeglina elektronide magnetväljad paarikaupa vastassuunas orienteeritud, olles antiparalleelsed, mistõttu nende väljad kompenseeruvad. Ferromagnetmaterjalis, rauas, saavad elektronide magnetväljad olla paralleelsed. Nii tekkivad ferromagnetaine kristallides väikesed magneetunud alad, nn **domeenid**. Eri domeenide magnetväljad kristallis on erineva suunaga. Seetõttu puudub tavaoludes väline magnetväli. Kui paigutada ferromagnetmaterjali välisesse magnetvälja, siis liitub domeenide väli välisväljaga, moonutades seda. Tekkivad jõud, mis orienteerivad domeeni välja suunas, ning selle väljaga liitub lähtevälja võimendades domeeni „isiklik" väli. Ferromagnetilistes ainetes on aatomivahelised elektrilised jõud nii suured, et takistavad soojusliikumise purustavat mõju. Nende jõudude tõttu paigutuvad raua, nikli, koobalti ja nende sulamite elementaarmagnetikesed välise magnetvälja mõjul korrastatult, orienteerudes oma poolustega magnetväljajoonte mõju suunas ja sellega tugevdades algset magnetvälja.

Ferromagnetmaterjali magnetilise läbitavuse olenevus temperatuurist. Kui kuumutada ferromagnetilisi materjale, siis teatud temperatuuril T_c kaotavad nad oma magnetilised omadused. Kuumutamisel kasvab elektronide energia. Nad ei „mahu" oma tavaorbiidile, eemalduvad ja algselt paarikaupa paralleelselt orienteeritud elektronide magnetväljad kaotavad oma korrapära. Paarid lagunevad ja materjal kaotab algse ülesehituse. Katkeb aatomite elektronide liikumisest magnetpooluseid moodustav vool ja seetõttu kriitilise temperatuuri T_c saavutamisel aine demagneetub (joonis 3.20). Kaob ka välisvälja võimendamise võime. Temperatuuri T_c nimetatakse **Curie** [kür'ii] **punktiks.** Sellest punktist kõrgemal temperatuuril kaotab ferromagnetmaterjal oma magnetilised omadused täielikult. Curie punkti väärtused: Fe (raual, terasel) – 768 °C; Ni (niklil) – 358 °C ja Co (koobaltil) – 1131 °C. Mida kõrgem on temperatuur, seda kiiremini toimub magnetiliste omaduste kadu. Jahtudes kiirgavad elektronid oma liigse energia kvanthaaval soojuskiirgusena ümbritsevasse keskkonda. Mida kõrgem on lähtetemperatuur, seda suuremal sagedusel toimub kiirgus, seda heledam näib meile materjali värv. Jahtumisel alla Curie punkti taastub aatomite ja kristallide struktuur, taastuvad ka materjali ferromagnetilised omadused. Püsimagnetid vajavad aga uuestimagneetimist tugeva magnetvälja abil.



Joonis 3.20. Ferromagnetmaterjali magnetilise läbitavuse olenevus temperatuurist

Ferromagnetiliste materjalide magneetumine. Et magnetahelad koostatakse põhiliselt ferromagnetilistest materjalidest, siis magnetahelate uurimiseks ja arvutamiseks on vaja tundma õppida ferromagnetiliste materjalide omadusi ja tunnusjooni. Kui pool keerdude arvuga w on keritud kinnisele magnetsüdamikule (joonised 3.21a ja 3.22a) pikkusega l ja seda läbib vool I, siis tekkib poolis magnetväli tugevusega $H = \frac{Iw}{l}$.



Joonis 3.21. Rõngakujulise magnetahela magneetimine (a). Magnetahela magnetvootiheduse komponentide sõltuvus magnetvälja tugevusest (b) ja magnetilise läbitavuse sõltuvus väljatugevusest (c)

Kui magnetsüdamik on mitteferromagnetilisest materjalist, siis magnetvootihedus südamikus $B_0 = \mu_0 H$. Kui pooli südamik on ferromagnetilisest materjalist, siis see materjal magneetub, s.o toimub ferromagnetilise materjali domeenide orientatsioon pooli **magnetomotoorse jõu** Iw tekitatud välise välja suunas. Sellega tekitatakse lisamagnetvoog Φ_{Fe} (joonis 3.21a) vootihedusega B_{Fe}, **mis on tingitud südamiku ferromagnetilise materjali magneetumusest:** $B_{Fe} = \mu_0 M$, kus M on suurus, mis iseloomustab materjali magneetumust. Seega koosneb magnetvootihedus B pooli südamikus kahest osast – pooli magnetomotoorse jõu tekitatud pooli välja vootihedusest B_0 ja lisavoo tihedusest B_{Fe}, mis on tingitud südamiku ferromagnetilise materjali magneetumusest $B = B_0 + B_{Fe} = \mu_0 H + \mu_0 M$.

Magnetvootiheduse B_0, B_{Fe} ja B sõltuvus väljatugevusest H on näidatud joonisel 3.21a. Sõltuvus $B_0 = \mu_0 H$ on koordinaatide algusest algav sirge 1. Lisavoo tiheduse $B_{Fe} = \mu_0 H$ sõltuvuse iseloomu võib seletada järgmisel viisil (kõver 2):

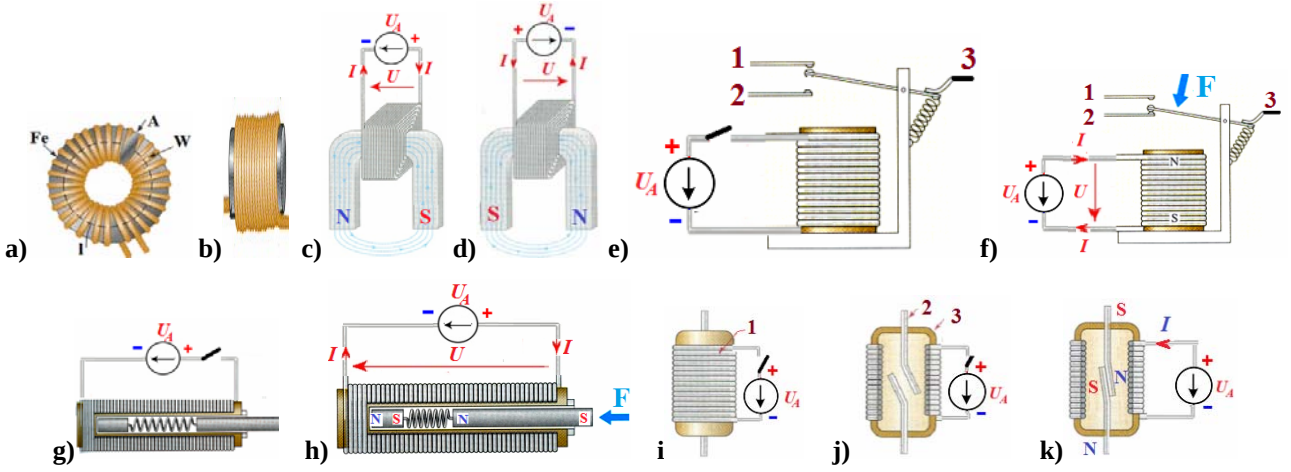
- lõik *Oa* – südamiku magneetuvus M suureneb esimeses lähenduses võrdeliselt pooli magnetvoo-tihedusega, mis õhksüdamikuga pooli korral on võrdne magnetväljatugevusega H;
- lõik *ab* – südamiku magneetuvuse M kasv aeglustub, kuna enamik domeenidest on juba orienteerunud pooli magnetvälja suunas;
- lõik *bc* – südamiku magneetuvuse M kasv lakkab, s.o algab magnetiline küllastus, sest kõik domeenid on orienteerunud välise välja suunas (lõik *bc* on paralleelne abstsissteljega).

Ferromagnetilise materjali summaarse magnetvootiheduse sõltuvust magnetvälja tugevusest (kõver 3) $B = f(H)$ nimetatakse selle **ferromagnetilise materjali magneetimiskõveraks.** Erinevate ferromag-netiliste materjalide magneetimiskõverad on esitatud käsiraamatutes.

Kuna ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõveratel on magnetvootiheduse järsu suurenemisega ala ja küllastuspiirkond, kus kasv on väike, siis need materjalid kuuluvad mittelineaarsete keskkondade hulka. Neist valmistatud magnetahelatel on mittelineaarsed tunnusjooned. Ferromagnetiliste materjalide magnetiline läbitavus ei ole konstantne ja oleneb eelnevast magneetimisest, s.o väljatugevusest materjalis. Selle sõltuvuse iseloom on kujutatud kõveral $\mu_a = f(H)$ (joonis 3.21). Kõver on ehitatud võrrandi $B = B_0 + B_{Fe} = \mu_0 H + \mu_0 M$ järgi avaldisest

$$B = \mu_0 \mu_r H = \mu_a M \ .$$

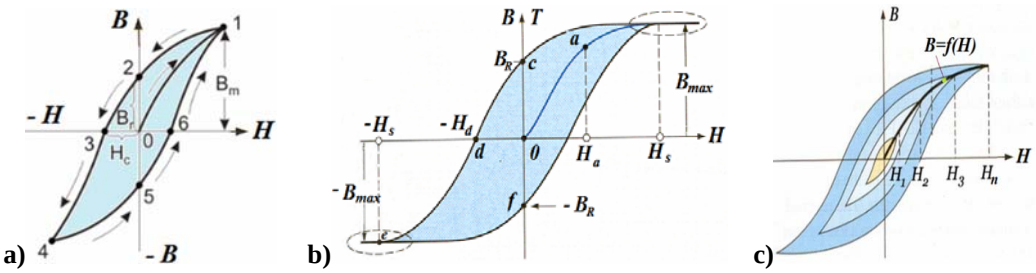
Absoluutse magnetilise läbitavuse μ_a maksimaalne väärtus saavutatakse sõltuvuse $B_{Fe} = f(H)$ (joo-nis 3.21b) lõigul *ab*. Küllastustalitluses (lõik *bc*) jääb magneetuvus M muutumatuks, järelikult väheneb suhe M/H, põhjustades μ_a vähenemise. Edasisel suurenemisel $H \to \infty$ $\mu_0 \to \infty$, s.o ferromagnetiline materjal kaotab oma ferromagnetilised omadused, kuna kõik domeenid on orienteerunud pooli magnetvälja suunas.



Joonis 3.22. Magnetmaterjalide kasutamisnäited: a – toroidsüdamikuga ja b – varrassüdamikuga induktiivpool, c ja d – elektromagnet, näiteks ferromagnetmaterjali sorteerimiseks ja tõstmiseks; e, f, g ja h – relee ja automaatika elemendid; i, j ja k – hermeetiliste kontaktide sisse- ja väljalülitamiseks

Ferromagnetilistel materjalidel on lai kasutusala. Elektrigeneraatorid, mootorid, trafod, elektromagnetid – nende üks põhikoosteosa on elektrotehnilisest terasest magnetahel. Joonis 3.22 iseloomustab magnet-materjalide kasutamist erinevate magnetahelate loomisel.

Tsükliline ümbermagneetimine. Pooli voolu muutmine (joonis 3.21) ja vastavalt ka magnetvälja tugevuse H muutumine mitte ainult suuruse, vaid ka suuna poolest põhjustab ferromagnetilise südamiku magnetvootiheduse suuruse ja suuna muutumist (joonis 3.23). Südamiku magnetvootiheduse B olenevust väljatugevusest H pooli voolu I suuruse ja suuna muutmisel võib jälgida kõveralt joonisel 3.23. Kui poolis on täielikult lahtimagneeditud südamik, siis voolu $I = 0$ puhul $H_0 = \frac{Iw}{l} = 0$. Voolu tugevdamine suurendab väljatugevust H ja ka vootihedust B ferromagnetilises materjalis kuni küllastuseni kõvera 0–1 järgi, s.o mainitud materjali algmagneetumiskõvera järgi. Kui vähendada voolu nullini, siis väljatugevus H väheneb nullini, aga magnetvootihedus väheneb seejuures suuruselt B_m (küllastus) kuni väärtuseni 0–2 kõvera 1–2 järgi.



Joonis 3.23. Pooli ferromagnetilise südamiku tsüklilisel ümbermagneetimisel saadav hüstereesikõver (a ja b); ferromagnetmaterjali sümmeetrilised hüstereesisilmused ning põhimagneetimiskõver $B = f(H)$ (c)

Seda induktsiooni väärtust 0–2, mis jääb pooli südamikku väljatugevuse H vähenemisel nullini, nimetatakse selle ferromagnetilise materjali **jääkinduktsiooniks (jääkmagnetvootiheduseks,** inglise keeles *remanence***)** $\boldsymbol{B_r}$. Südamiku jääkmagnetvootihedus B_r tekkib seetõttu, et mitte kõik materjali domeenid lahtimagneetimisel ei desorienteerunud, vaid osa domeene jäi orienteerituks pooli algse välja suunas.

Kui muuta voolu suunda poolis ning järelikult väljatugevuse suunda südamikus ja suurendada vastassuunas seda väljatugevust, siis võib saavutada magnetvootiheduse vähenemise nullini (kõver 2–3), s.o südamik on täiesti lahtimagneetunud. Väljatugevus 0–3, mis on vajalik ferromagnetilise materjali lahtimagneetimiseks, s.t domeenide täielikuks orientatsiooni kaotamiseks, nimetatakse **koertsitiivjõuks** (kinnipidamisjõuks) H_c.

Kui jätkata väljatugevuse suurendamist, siis magnetvootihedus muudab oma suunda ja selle väärtus suureneb uues suunas nullist kuni küllastuseni kõvera 3–4 järgi.

Kui vähendada väljatugevust nullväärtuseni, siis magnetvootihedus väheneb kõvera 4–5 järgi, lõik 0–5 on jääkinduktsioon B_r vastassuunas. Et südamikku lahti magneetida, s.o vähendada magnetvoo tihedust nullini, on vaja uuesti muuta voolu ja väljatugevuse suunda (esialgsesse suunda) ja seda suurendada. Seejuures väheneb magnetvoo tihedus südamikus nullini kõvera 5–6 järgi, kus lõik 0–6 on koertsitiivjõud H_c esialgses suunas, mis uuesti magneedib lahti südamiku – kaotab jääkinduktsiooni. Edasine väljatugevuse suurendamine viib magnetvoo tiheduse suurenemiseni nullist kuni küllastuseni punkti 1 suunas. Ei sattuta tagasi punkti 1, vaid selle lähedusse. Kui korrata magneetimistsüklit *ca* 10 korda, alles siis hakkavad nad kattuma.

Kõverat 0–1 nimetatakse **algmagneetimiskõveraks**, aga suletud kõverat 1–2–3–4–5–6–1 tsüklilise **ümbermagneetimise kõveraks või hüstereesisilmuseks**. Hüsterees – kreekakeelne sõna, mis tähendab „mahajäämine“, s.o magnetvoo tiheduse muutumine jääb maha väljatugevuse muutumisest: väljatugevus väheneb nullini, aga magnetvoo tihedus ei võrdu veel nulliga või magnetvoo tihedus vähenes nullini, aga väljatugevus juba suureneb vastassuunas.
Tsükliline ümbermagneetimine esineb elektrimasinate, trafode, elektrimõõteriistade, reaktorite (ferromagnet-südamikuga poolide) jt magnetahelates, mille mähiseid läbib vahelduvvool. Tsüklilise ümbermagneetimisega kaasneb elektrienergia kulu, mis muundub soojusenergiaks ja enamikul juhtudest hajub ümbritsevas ruumis. Sellised soojuskaod kuuluvad magnetiliste kadude P_M juurde ja nimetatakse energia (võimsuse) **kadudeks**

tsüklilisele ümbermagneetimisele või **hüstereesikadudeks**. Kõnealuse ferromagnetilise materjali kaovõimsus tsüklilisel ümbermagneetimisel on võrdeline materjali hüstereesisilmuse pindalaga (joonis 3.23b). Selliste kadude vastu kasutatakse mitmesugustes aparaatides ja masinates erinevaid vahendeid, millest peamine on valida südamikuks võimalikult kitsa hüstereesisilmusega ferromagnetiline materjal. Kunstlikku tsüklilist ümbermagneetimist võib kasutada ferromagnetilise materjali lahtimagneetimiseks, s.o jääkinduktsiooni vähendamiseks nullväärtuseni. Selleks lastakse ferromagnetilisest materjalist südamikuga poolist läbi vahelduvvool, mille suurust pidevalt vähendatakse kuni nullini.

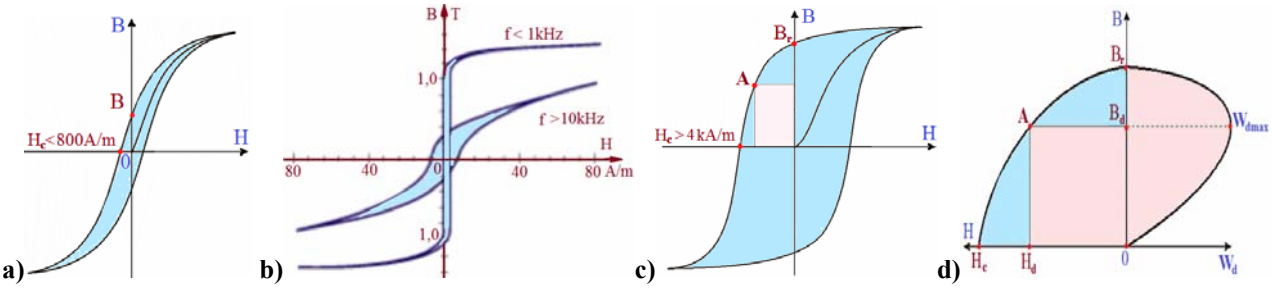
Ferromagnetseadmete projekteerimisel lähtutakse magnetahela materjali **põhimagneetimiskõverast** $B = f(H)$, mis saadakse sümmeetriliste hüstereesikõverate ülesvõtmisel, ühendades silmuste tipud omavahel, nagu see on joonisel 3.23c.

Ferromagnetilised materjalid. Enamikul ferromagnetilistel ainetel on sarnased omadused, kuid nad avalduvad erinevalt olenevalt materjali keemilisest koostisest. Seoses sellega eristatakse kahte peamist ferromagnetiliste materjalide rühma:

- magnetpehmed,
- magnetkõvad.

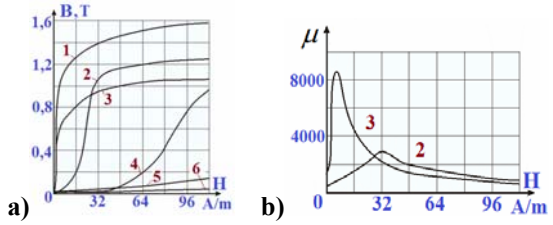
Magnetpehmetel ferromagnetilistel materjalidel on suur magnetiline läbitavus ($\mu_r \approx 10^3 \ldots 10^6$), väike koertsitiivjõud ($H_c \leq 400$ A/m) ja kitsas hüstereesisilmus, s.o väikesed hüstereesikaod.

Magnetpehmete materjalide magneetimine ja lahtimagneetimine toimub kergesti (joonis 3.24a). Seda iseloomustab nende hüstereesisilmuse kujust tulenev ümbermagneetimistsükli energiakulu. Magnetpehmete materjalide hulka kuuluvad metallid ja sulamid: elektrolüütteras, elektrotehniline teras, amorfne metall metglas, permalloi, ferriidid, magnetdielektrikud jt. Raud ja elektrotehniline teras on leidnud laialdast kasutamist elektrimasinate, aparaatide, trafode, elektriliste mõõteaparaatide magnetahelates, s.o seal, kus on vaja võimendada pooli (mähise) magnetvälja, seega tekitada tugevat magnetvälja suhteliselt väikese magnetomotoorse jõuga (Iw).



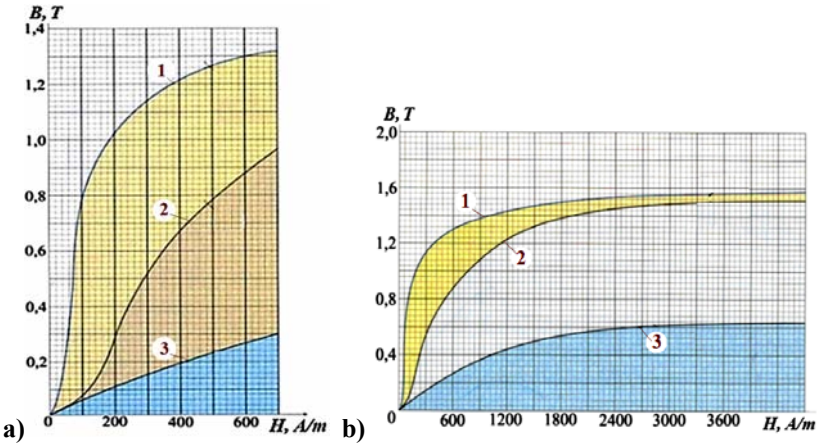
Joonis 3.24. Magnetpehme (a, b) ja magnetkõva (c) ferromagnetilise materjali hüstereesisilmuse kuju. Energia määramine magnetahela õhupilus (d). Metglasi hüstereesisilmus madal- ja kõrgsageduse korral (b)

Ferriite ja magnetodielektrikuid kasutatakse traat- ja raadiosideaparatuuri magnetahelates, magnetvõimendites, arvutites ja teistes tehnikaliikides. Permalloide kasutatakse südamike valmistamiseks, mis on ette nähtud tööks kõrgsageduslikes seadmetes kuni 50 MHz. Permalloidide magnetilised omadused olenevad suurel määral nende valmistamise tehnoloogiast. Amorfne metall – metglas sobib oma suure välja võimendusvõime ja kõrgema küllastusmagnetvootiheduse tõttu (b) jõu- ja kõrgsagedustrafode valmistamiseks. Joonisel 3.25a on võrreldud erinevate ferromagnetmaterjalide põhimagneetimiskõveraid väikeste väljatugevuse väärtuste juures.



Joonis 3.25. Ferromagnetmaterjalide põhimagneetimis- (a) ja magnetilise läbitavuse kõverad (b)

Vaatluse all olevatest materjalidest parim põhimagneetimiskõver on ülipuhtal terasel 1, järgneb 99,98 % Fe sisaldusega teras 2, edasi permalloi (78 % Ni) 3, seejärel tehniline teras (99,92 % Fe) 4, nikkel 5 ja terasnikli sulam (26 % Ni) 6. Suhteline magnetiline läbitavus on parim metglasil: sagedustel 50…100 Hz on üle 200 000, sagedustel 1…100 kHz on kuni 60 000. Materjali saamisel jahutatakse sulametalli kiirusega üle 1 000 000 kraadi sekundis. Jõutrafodel on hüstereesisilmuse väikese pindala tõttu kaod *ca* 80% väiksemad kui tavatrafodel. Joonisel 3.26 on elektroenergeetikas kasutatavate ferromagnetseadmete magnetsüdamike materjalide põhimagneetimiskõverad elektrotehnilisele terasele 1, valuterasele 2 ja malmile 3. Mida suurem on magnetvoo kasvukiirus magneetimiskõvera algosas, seda suurem on materjali magnetvoo võimendusvõime.



Joonis 3.26. Kolme erineva (1, 2, 3) materjali põhimagneetimiskõverad (magnetvoo tiheduse *B* sõltuvus magnetvälja tugevusest *H*): a – kõverate algosa, b – kõverad koos küllastusalaga. 1 – elektrotehniline teras, 2 – valuteras, 3 – malm

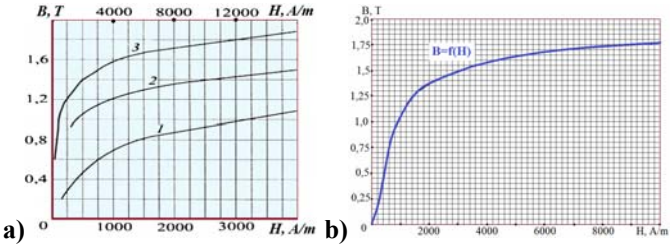
Magnetiliselt kõvadel ferromagnetilistel materjalidel on tunduvalt väiksem magnetiline läbitavus (μ_r – suurusjärgus mõnisada), suhteliselt suur jääkinduktsioon $B_r \approx$ (0,3…1,25) T, suur koertsitiivjõud $H_c \approx$ (5000…240 000) A/m, ja neil on lai hüstereesisilmus (joonis 3.24b). Magnetkõvadest materjalidest valmistatakse püsimagneteid, mida kasutatakse tuulegeneraatorites, mootorites, sidetehnikas, elektrimõõtetehnikas jm. Magnetkõva materjali võimendusvõimet iseloomustav välja energia magnetahela õhupilus leitakse seosest: $W_{d\max} = \dfrac{B_d H_d}{2}$. Magnetvälja tugevusel H_d on energia õhupilus $W_{d\max}$ maksimaalne (joonis 3.24d). Magnetkõvamaterjali saab seega kasutada püsimagnetite valmistamiseks. Parimad magnetkõvad materjalid on erinevad sulamid: alni, alnisi, alniko jt.

NÄIDE 3.2

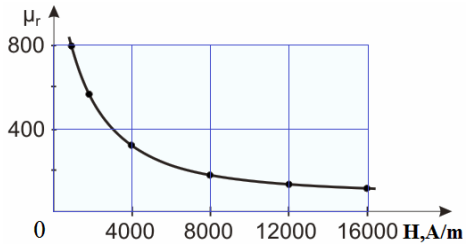
Määrata ja kujutada graafiliselt elektrotehnilise terase suhtelise magnetilise läbitavuse μ_r sõltuvus väljatugevusest järgmistel väljatugevuste väärtustel: H = 1000; 2000; 4000; 8000; 12 000 ja 16 000 A/m.

Lahendus

Lähtudes elektrotehnilise terase magneetimiskõverast (joonis 3.27) kanname iseloomulikud punktid tabelisse 3.1. Joonisel on kaks mõõtkava: alumine ja ülemine. Ülemine on väljatugevuse vahemikule 4000…16000 A/m. Kasutades järgmisi avaldisi: $\mu_a = \dfrac{B}{H}$; $\mu_r = \dfrac{\mu_a}{\mu_0}$, teeme arvutused.



Joonis 3.27. a – Malmi (1), terase (2) ja elektrotehnilise terase (3) magneetimiskõverad; b – trafopleki magneetimiskõver



Joonis 3.28. Suhtelise magnetilise läbitavuse μ_r sõltuvus magnetvälja tugevusest

Leitud magnetilise läbitavuse väärtused on kantud tabelisse 3.1. Selle tabeli andmetel on koostatud graafik (joonis 3.28). Näeme, et elektrotehniline teras on magnetilise küllastuse talitluses. Suhteline läbitavus μ_r väheneb järsult, kuid mitte õhu tasemele, nagu eespool lihtsustatult väitsime.

Tabel 3.1

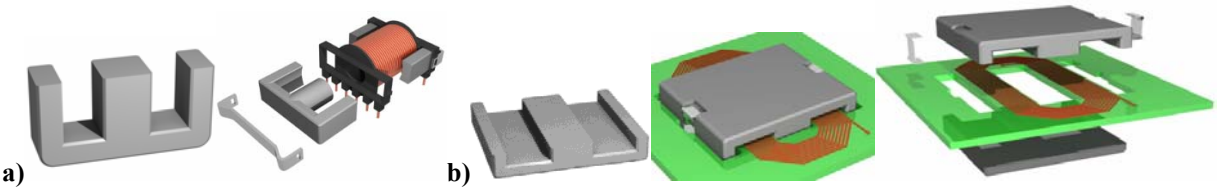
Elektrotehnilise terase põhimagneetimiskõver ja magnetilise läbitavuse muutumine

H (A/m)	B (T)	μ_a (H/m)	μ_r
1000	1	10^{-3}	796,2
2000	1,4	$0{,}7 \cdot 10^{-3}$	557
4000	1,6	$0{,}4 \cdot 10^{-3}$	318
8000	1,7	$0{,}21 \cdot 10^{-3}$	167
12000	1,8	$0{,}15 \cdot 10^{-3}$	119
16000	1,88	$0{,}12 \cdot 10^{-3}$	95,5

3.6. Magnetahelad

Suure välisvälja võimendamisvõimega (magnetilise läbitavusega) ferromagnetiliste materjalide tõttu on võimalik koostada nn magnetjuhte, milles kulgeb (sulgub) püsimagneti või vooluga pooli poolt esilekutsutud magnetvoog. Kui ferromagnetiliste materjalide magnetiline läbitavus oleks lõpmata suur, siis kulgeks kogu magnetvoog magnetjuhis, mitte aga osaliselt ka õhus.

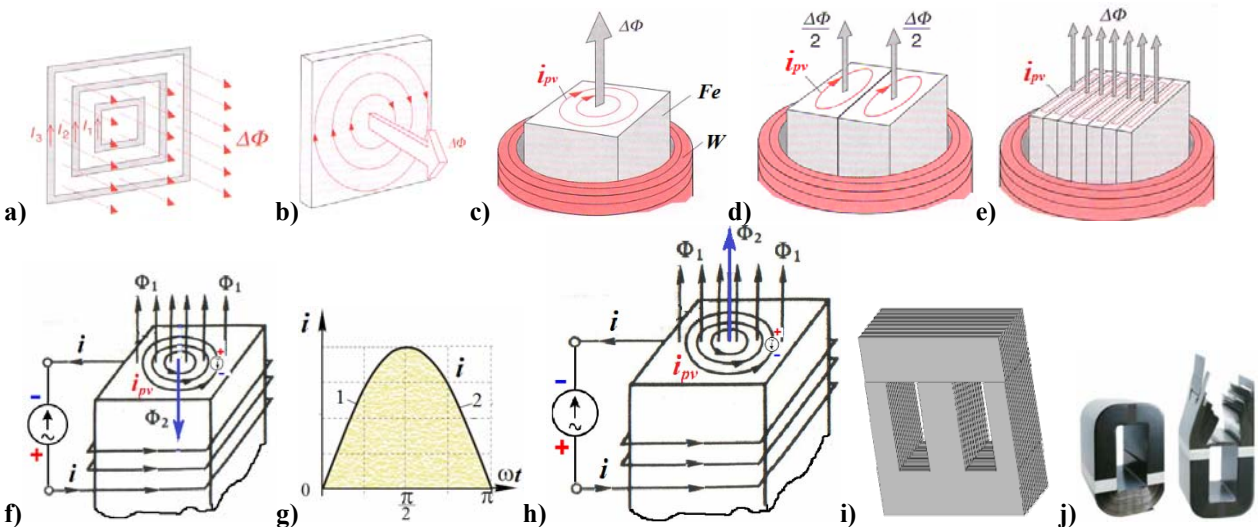
Lihtsaimateks magnetjuhtideks – magnetahelateks – on homogeensest ferromagnetilisest materjalist toroid-südamikud (joonis 3.22a). Selliseid magnetjuhte kasutatakse mitmemähiselistes trafodes, varem magnet-võimendites, elektronarvutite elementides ja teistes elektrotehnilistes seadmetes. Joonisel 3.29a on näidatud väikese võimsusega trafo III-kujuline magnetahel, mille keskmisel sambal paiknevad mähised. Mähiste algused ja lõpud on ühendatud isoleerplaadile kinnitatud klemmidega. Joonise 3.29b piltidel on trükiplaadile söövitatud mähistega trafo, mille magnetahel koosneb kahest ühesugusest poolest. Üks pool on trükiplaadi all, teine peal.



Joonis 3.29. Trafode pulbermetallurgia tehnoloogiaga magnetahelad: a – tavaline III-kujuline, b – trükiplaadile paigaldatav magnetahel koos trükiplaadile söövitatud mähistega

Võimsamate vahelduvvoolu ferromagnetseadmete korral valmistatakse magnetahelad elektrotehnilise terase plekkidest, mitte massiivsest materjalist. Eesmärk on vähendada nn **pöörisvoolu kadusid**. Rakendades mähisele vahelduva allikapinge (joonis 3.30f, h), tekkib mähisest vahelduvvool (g). Viimase suurus ja suund muutuvad perioodiliselt. See vool põhjustab ferromagnetsüdamikus vahelduvmagnetvoo Φ_1 tekke. See voog, aheldudes reaalsete (a) või massiivses voolujuhtivas terassüdamikus (b, c, d, f, h) mõtteliste, joonisel nelinurksete või ringikujuliste vooluniitidega (-torudega), tekitab (indutseerib) neis allikasisepinge. Viimane põhjustab voolutorus nn **pöörisvoolude** (ringvoolude) i_{pv} tekke.

Pöörisvool ehk **Foucault' vool** on elektrivool, mille tekke põhjuseks elektrijuhis on ajas muutuva aheldusvoo ψ poolt indutseeritud allikasisepinge $u_A = d\psi/dt$. Viimase potentsiaalide vahe tekitab juhtivas kehas elektronide suunatud liikumise – pöörisvoolu i_{pv}. **Pöörisvool** tekitab omakorda magnetvoo Φ_2, mis on vastassuunaline mähise voolu poolt tekitanud magnetväljaga Φ_1. Kokkuvõttes pöörisvoolu magnetväli nõrgendab või tugevdab teda tekitanud magnetvälja Φ_1. Seda iseloomustavad joonis 3.30f ja h. Jooniselt f näeme, et vool (ka magnetvoog) suureneb esimese veerandperioodi 1 vältel, sellele perioodile vastab joonisel f kujutatu. Siin on voo vektorid vastassuunalised. Järgmisel veerandperioodil 2, kui vool ja magnetvoog Φ_1 kahanevad (joonis h), on vektorid samasuunalised.



Joonis 3.30. Pööris- (ring-)voolude (g) teke reaalsetes (a) ja massiivse magnetahela mõttelistes voolutorudes (b, c, d, f, h) ja trafoplekis (e). Trafoplekkidest koostatud magnetahel (i). Üliõhukesest metglaslindist südamik trafole (j)

Pöörisvoolude tõttu tekkivad massiivsetes magnetahelates energiakaod. Nende vähendamiseks kasutatakse oksiidikihi või lakiga üksteisest isoleeritud elektrotehnilisest terasest (suure eritakistusega) plekke.

Eespool vaadeldud magnetahelad, nagu ka teised võimalikud konstruktsioonid, võib jagada **mitte-hargnevateks magnetahelateks**, kus ahela igas ristlõikes on ühesugune magnetvoog, ja **hargnevateks magnetahelateks**, kus ahela eri ristlõigetes on erinevad magnetvood. Üldjuhtumil võivad hargmagnetahelad olla keerulise kujuga, näiteks elektrimootorites, -generaatorites ja teistes seadmetes. Enamikul juhtudel tuleb magnetahelat lugeda mittelineaarseks, vaid teatud lihtsustuste ja talitluste korral võib magnetahelat lugeda lineaarseks.

3.7. Magnetomotoorjõud ja magnetiline takistus

Magnetahelas on magnetvoo suurus Φ, mille tekitavad pooli vool I koos magnetahela domeenide „isiklike“ magnetvoogudega

$$\Phi = \frac{Iw}{R_m}, \tag{3.1}$$

kus I – vool poolis või voolujuhis, w – pooli keerdude arv, R_m – magnetvoo sulgumise teekonnal oleva magnetahela magnetiline takistus.

Suurust Iw **nimetatakse magnetomotoorjõuks (MMJ)** või **magneetimisergutuseks**. See kujutab endast mähise voolu ja keerdude arvu korrutist. Mõõdetakse amprites, igapäevaelus amperkeerdudes. MMJ toime on sarnane allikasisepinge toimele. Nii nagu voolu tekke algpõhjus on allikasisepinge (potentsiaalide vahe), põhjustab MMJ (liikuvate laengute energiaväli) magnetahelas tekkiva magnetvoo. Mida suurem on magnetahela mähise magnetomotoorjõud, seda suuremaks kujuneb magnetvoog. Magnetilise takistuse R_m suurus on leitav

$$R_m = \frac{l}{\mu S}. \tag{3.2}$$

Siin on l ja S vastavalt magnetahela pikkus ja ristlõike pindala,
μ – magnetahela materjali magnetiline läbitavus.

Magnetahela takistuse kujunemine sarnaneb elektriahela takistusega. Nii nagu väheneb takistuse kasvades vool elektriahelas, nii väheneb ka magnetvoog magnetahelas.

Magnetahela arvutuse põhimõtted. Magnetvoo suuruse saame määrata magnettakistuse (3.2) alusel:

$$\Phi = Iw\frac{\mu S}{l}. \tag{3.3}$$

Siit näeme, et magnetvoo suurendamiseks mingis seadmes või elektrimasinas on vaja:

- suurendada voolu seadme või masina mähises;
- suurendada mähise keerdude arvu;
- kasutada magnetahelas suurema magnetilise läbitavusega materjali;
- vähendada õhupilude arvu ja pikkust.

Kõiki neid võtteid kasutatakse elektrimasinate ja seadmete kujundamisel. Selle tulemusel tagatakse seadme magnetahelas vajaliku suurusega magnetvoog.

Elektriseadmete väljatöötajad tavaliselt magnetvoogu valemi (3.3) abil ei määra. Seadmete magnetahela kujundamisel ja magnetvoo arvutamisel lähtutakse koguvoolu seadusest.

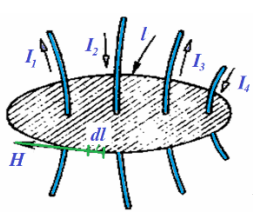
3.8. Koguvooluseadus

Koguvooluseadus on saadud rohkearvuliste katsete alusel. See seadus annab seose magnetvälja tugevuse ja voolu (koos energiaväljaga liikuvad laengud) kui magnetvälja põhjuse vahel:

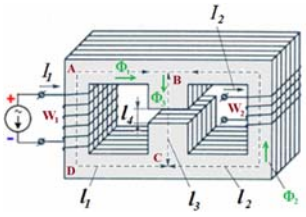
$$\oint Hdl = \sum I\,. \tag{3.4}$$

Seega **on magnetvälja tugevuse vektori joonintegraal mööda kinnist kontuuri *l* võrdne voolude algebralise summaga ehk selle kontuuriga aheldunud koguvooluga**. Seejuures tuleb lugeda positiivseks need voolud, mille suund vastab kontuuri ringkäigu suunale kellaosuti liikumise suunas (kruvireegel). Seega saame joonisel 3.31a kujutatud kontuurile koguvooluseaduse järgi

$$\oint Hdl = -I_1 + I_2 - I_3 + I_4$$



a)



b)

Joonis 3.31. Koguvooluseaduse selgituseks

Suurust $\sum I$ valemis (3.4) nimetatakse sarnaselt Iw võrrandis (3.1) samuti **magnetomotoorseks jõuks** või ka magneetimisergutuseks.

Magnetomotoorse jõu põhiline mõõtühik SI-süsteemis on amper (A). Magnetvälja tugevuse põhilisel mõõtühikul – amper meetri kohta (A/m) – ei ole SI-süsteemis oma erinimetust. Sageli kasutatakse ka magnetvälja tugevuse põhiühikuga kordset ühikut amper sentimeetri kohta, 1 A/cm = 100 A/m.

Enamiku elektrotehniliste seadmete magnetahelat võib kujutada koosnevana osadest (joonis 3.31b), millest igaühe ulatuses saab magnetvälja lugeda homogeenseks, s.o konstantse tugevusega, mis võrdub magnetvälja tugevusega H_k selle osa keskmisel joonel pikkusega l_k. Sellistel magnetahelatel võib integreerimise valemis (3.4) asendada summeerimisega. Kui seejuures tekitatakse magnetväli vooluga I pooli poolt, millel on w keerdu, siis magnetahela kontuurile, mis on keerdudega aheldunud ja koosneb n osast, võib (3.4) asemel kirjutada

$$\sum_{k=1}^{n} H_k\, l_k = I\, w \tag{3.5}$$

Joonisel 3.31b kujutatud magnetahelale, arvestades vaid mähist w_1, saame koguvoolu seaduse (3.5) alusel:

$$\sum_{k=1}^{3} H_k\, l_k = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = I_1\, w_1.$$

Kui kontuur aheldub m vooluga pooli keerdudega, siis

$$\sum_{k=1}^{n} H_k\, l_k = \sum_{p=1}^{m} I_p\, w_p = \sum_{p=1}^{m} F_p\,, \qquad (3.6)$$

kus $F_p = I_p w_p$ on pooli p **magnetomotoorjõud**. Seega koguvoolu seaduse järgi võrdub magnetahela kontuuri MMJ F magnetvälja tugevuste ja vastavate lõikude pikkuste korrutiste summaga; korrutist $H_k\, l_k = U_{mk}$ nimetatakse sageli magnetahela osa (lõigu) **magnetiliseks pingeks**.

Seadmete projekteerimisel lähtutakse ferromagnetmaterjalide põhimagneetimiskõveratest (joonis 3.26). Kõigepealt määratakse magnetvootihedused magnetahela erinevates ristlõigetes (põiklõigetes) B_1; B_2; B_3 jne. Seejärel määratakse materjali põhimagneetimiskõveralt magnetvälja tugevuse väärtused H_1; H_2; H_3 jne. Leitud suuruste ja magnetahela vastavate osade pikkuste l alusel, nagu see on näidatud joonisel 3.31b, arvutatakse mähise vajalik amperkeerdude arv $Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \ldots$ jne,

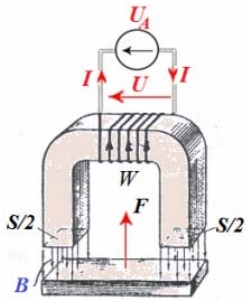
kus l_1; l_2; l_3 – erineva ristlõikega magnetahela voo keskmine teepikkus.

3.9. Elektromagneti külgetõmbejõud

Kui paigutame ferromagnetilisest materjalist keha näiteks pooli magnetvälja, siis see keha magneetub ja omandab elektromagneti omadused. Seetõttu püsi- või elektromagnet tõmbavad enda poole ferromagnetilisest materjalist kehi. Seda nähtust kasutatakse edukalt tõmbe- ja tõsteelektromagnetite loomisel. Jõud F, millega elektromagnet tõmbab enda poole ferromagnetilisest materjalist keha (joonis 3.32), oleneb magnetvoo tihedusest õhupilus ja elektromagneti pooluste pindalast.

Jõu suurus on $$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0} = \frac{B^2 S}{8\pi \cdot 10^{-7}}\ \text{N}, \qquad (3.7)$$

kus F – jõud njuutonites, N; B – magnetvoo tihedus teslades, T, S – pooluste ristlõikepindala, m^2, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m – vaakumi magnetiline läbitavus.



Joonis 3.32. Tõmbejõud *F* oleneb magnetvootihedusest *B* õhupilus ja südamiku pooluste pindalast *S*

NÄIDE 3.3

Määrata: elektromagneti tõmbejõud F, kui magnetvoo tihedus B = 1 T ja pooluse põiklõige on 5·5 cm ehk $S = 2{,}5 \cdot 10^{-3}$ m^2.

Lahendus

Leiame tõmbejõu $$F = \frac{B^2 S}{8\pi \cdot 10^{-7}} = \frac{1^2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-3}}{8\pi \cdot 10^{-7}} = 995{,}223\ \text{N}.$$

Kuna 1 N = 0,101971621 kg, siis F = 995,223·0,101971624 = 101,48 kg.

NÄIDE 3.4

Leida: elektromagneti tõmbejõud, kui magnetvoo tihedus on 1,2 T ja pooluste ristlõige on 31,62 cm·31,62 cm pindalaga 1000 cm^2 = 0,1 m^2.

Valemit (3.7) võib viia teisele kujule

$$F = 4B^2S \cdot 10^5 \text{, N.} \qquad (3.8)$$

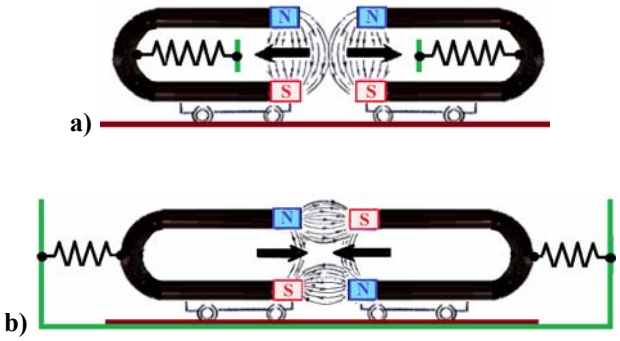
Lahendus

$F = 4 \cdot 1{,}2^2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^5 = 57600$ N.

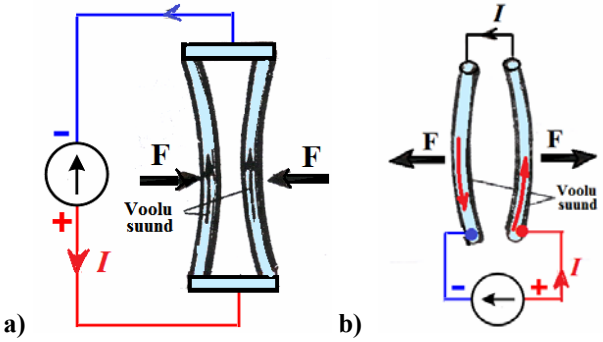
Leiame jõu kilogrammides: F = 57600 · 0,101971621 = 5873,6 kg.

Järeldus: elektromagnetid võivad arendada väga suurt jõudu. See jõud võib halvasti kavandatud kasutuse korral osutuda purustavaks nii tehnikale kui ka personalile.

Magnetväljade poolt põhjustatud mehaanilised jõud. Kahe magnetvälja liitumisel tekkivad mehaanilised jõud. Need jõud tekkivad nii püsi- kui ka elektromagnetite korral. Püsimagnetite puhul (joonis 3.33) samanimelised poolused tõukuvad (a), erinimelised tõmbuvad (b).

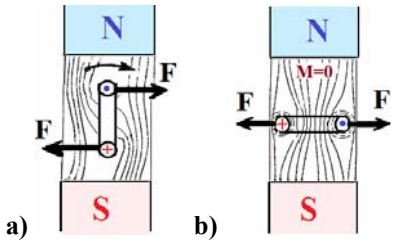


Joonis 3.33. Püsimagnetite samanimelised poolused tõukuvad (a), erinimelised tõmbuvad (b)



Joonis 3.34. Samasuunalise (a) vooluga juhid tõmbuvad, vastassuunalise vooluga tõukuvad (b)

Vooluga juhtide puhul (joonis 3.34) samasuunaliste voolude korral juhid tõmbuvad (a), erisuunaliste voolude korral tõukuvad (b). Asetame joonisel 3.35 kujutatud magnetvälja mitte voolujuhi, vaid vooluga juhtmekeeru või mähise ja paigutame selle vertikaalselt, nagu joonisel 3.35a. Väljade liitumisel tekkiv erineva energiakontsentratsiooniga liitväli tekitab pöördemomendi, mis pöörab juhtmekeeru päripäeva asendisse 3.35b.



Joonis 3.35. Vooluga juhtmekeerd või mähis magnetväljas. Väljade liitumisel tekkib pöördemoment (a), mis püüab pöörata mähist ristisuunas (b)

Pöördemomendi M väärtus

$$M = FD \text{, N,}$$

kus F on juhtmekeeru mõlemale küljele mõjuv jõud, N; D – juhtmekeeru külgede vahekaugus, m.

Tekkiv moment pöörab juhtmekeeru joonisel 3.35b näidatud asendisse, mille puhul keeru magnetvälja suund ühtib püsimagneti magnetvälja suunaga. Liitmagnetvälja väljajoonte arv on suurem püsimagneti omast juhtmekeeru väljajoonte võrra. Seetõttu on liitvälja salvestatud magnetvälja energia samuti suurem. Vooluga juhtmekeeru või mähise omadust pöörata end magnetväljas kasutatakse nii elektrimõõteriistades kui ka masinates. Momendi suurendamiseks kasutatakse juhtmekeeru asemel mitmekeerulist mähist.

NÄIDE 3.5

Määrata: elektrimootori ankru pöördemoment. Ankrumähis koosneb 570 magnetväljas paiknevast elementaarjuhtmest. Magnetvoo tihedus on 1 T. Elementaarjuhtme aktiivosa (paikneb magnetväljas) on 0,30 m. Aktiivosa kaugus ankru teljest $D/2 = 0{,}3$ m. Vool mähises $I = 75$ A.

Lahendus

Leiame jõu, mis mõjub igale elementaarjuhtmekeeru aktiivosale.

$$F = BlI \sin\alpha = 1{,}0 \cdot 0{,}3 \cdot 75 \cdot 1 = 22{,}5\ \text{N},$$

$$F = 22{,}5 \cdot 0{,}101972 = 2{,}29\ \text{kg}.$$

Pöördemoment $M = FD = 2{,}29 \cdot 0{,}6 = 1{,}38$ kgm.

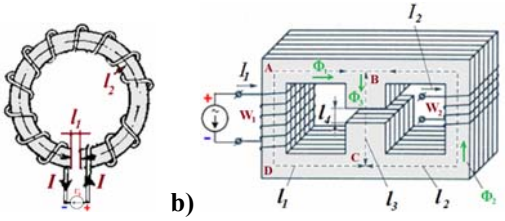
Mähise pöördemoment 285 juhtmepaarist on $M_m = 285 \cdot M = 285 \cdot 1{,}38 = 394$ kgm.

3.10. Elektri- ja magnetahelate sarnasusest

Lihtsate magnetahelate arvutus. Arvutus tehakse magnetahela kahe Kirchhoffi seaduse abil.

Esimene seadus ehk magnetvälja pidevuse põhimõte. Seda kasutatakse hargahelate puhul. Sõlme magnetvoogude algebraline summa võrdub nulliga (joonis 3.36) $\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$.

Teist seadust ehk koguvoo seadust kasutatakse magnetahela kontuuri korral. Magnetpingete algebraline summa kontuuris võrdub magneetimisjõudude summaga.



Joonis 3.36. Magnetahel (a) ja hargahel (b)

Kontuurile *ABCD* (joonis 3.36b) saame

$$I_1 w_1 = H_1 l_{DA} + H_1 l_{AB} + H_3 l_{BC} - H_2 l_2 + H_1 l_{CD},$$

ehk

$$I_1 w_1 = U_{мDA} + U_{мAB} + U_{мBC} - U_{м2} + U_{мCD}.$$

Siin $U_{мDA}$, $U_{мAB}$, $U_{мBC}$, $U_{м2}$, $U_{мCD}$ – magnetahela eri osade magnetiline pinge.

Magnetilise pinge $U_m = Hl$ mõõtühikuks on amper, A.

Magnetahelate arvutuse puhul kasutatakse sageli **Ohmi seadust magnetahela osale**. Sarnaselt elektriahelale avaldatakse magnetiline takistus seosest $R_m = U_m / \Phi$. Joonise 3.36a lähteandmete järgi on magnetiline takistus

$$R_m = \frac{U_m}{\Phi} = \frac{Hl}{BS} = \frac{Hl}{\mu_r \mu_0 HS} = \frac{l}{\mu_r \mu_0 S}.$$

Sama ahela õhupilu jaoks magnetiline takistus

$$R_{m1} = \frac{U_1}{\Phi} = \frac{H_1 l_1}{BS} = \frac{H_1 l_1}{\mu_0 H_1 S} = \frac{l_1}{\mu_0 S}.$$

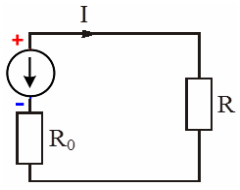
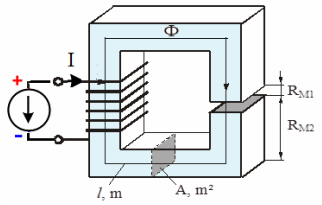
Siin U_m, U_l – magnetahela ja õhupilu magnetiline pinge; S – magnetsüdamiku ristlõike pindala. Magnetilise hargahela arvutusel eristatakse kahte otse- ja pöördülesannet. Otseülesande puhul on teada magnetahela geomeetrilised mõõtmed, magnetilised omadused ja magnetvoo tiheduse B või magnetvoog Φ väärtus.

Vaatame otseülesannet joonisel 3.36a kujutatud toroidikujulisele magnetahelale. Koguvoolu seadusest $Iw = H_1 l_1 + H_2 l_2$, kus väljatugevus õhupilus $H_1 = \frac{B}{\mu_0} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} = 8 \cdot 10^5 B$.

Magnetvoo ja tema tiheduse avaldisest $\Phi = BS$ leiame magnetvoo tiheduse väärtuse B. Seejärel leiame südamiku magneetimiskõverast $B(H)$ magnetvälja tugevuse H ja lõpuks vajaliku magnetomootoorjõu Iw. Põhiseosed elektri- ja magnetahelate arvutuseks on tabelis 3.2.

Tabel 3.2

Elektri- ja magnetahelate arvutuse põhiseosed

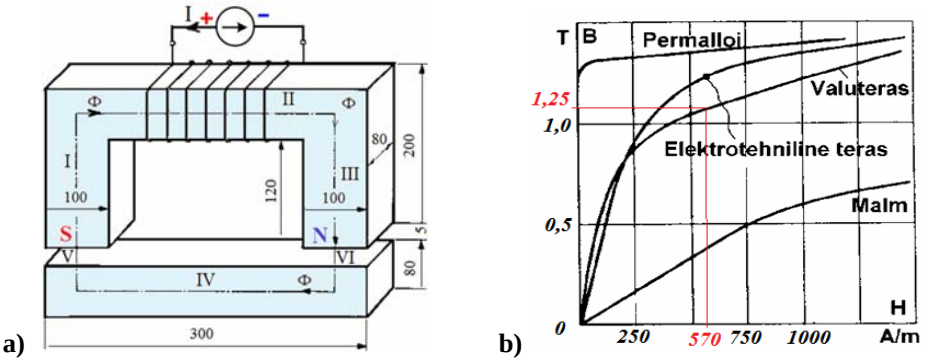
Elektriahel	Magnetahel
elektrivool I, A	magnetvoog Φ, Wb
allikasisepinge U_A, V	magnetomotoorjõud Iw, A e amperkeerd
elektriline potentsiaalilang $U = IR$, V	magnetiline pinge $U_{mk} = H_k l_k$, A
erijuhtivus, γ (S/m)	magnetiline läbitavus, μ_a, H/m
elektriline takistus $R = \frac{l}{\gamma S}$, Ω	magnetiline takistus $R_M = \frac{l}{\mu S}$, 1/H
Ohmi seadus $I = \frac{U_A}{R_\Sigma} = \frac{U}{R}$; R_Σ – ahela tarbijate takistuste summa	Ohmi seadus $\Phi = \frac{Iw}{R_{M_\Sigma}} = \frac{Hl}{R_M}$, Wb R_{M_Σ} – magnetahela osade takistuste summa
Kirchhoffi seadused $\sum I_{suubuv} = \sum I_{väljuv}$; $\sum U_A = \sum U$	Kirchhoffi seadused $\sum \Phi_{suubuv} = \sum \Phi_{väljuv}$; $\sum Iw = \sum Hl$
Voolutihedus Δ = I/A, A/m^2	Vootihedus $B = \Phi$/A, Wb/m^2 = T
	

NÄIDE 3.6

Leida: mähise keerdude arv, kui vajalik magnetvoog on 0,08 Wb ja vool mähises on 10 A. Südamik on valmistatud elektrotehnilisest terasest.

Lahendus

Jagame magnetahela kuueks osaks (joonis 3.37a). Esimesed neli osa on elektrotehnilises terases pikkusega l_1 = 16 cm, l_2 = 26 cm, l_3 = 16 cm, l_4 = 28 cm ja kaks õhupilu $l_5 = l_6$ = 0,5 cm. Osade ristlõike pindalad on $S_1 = 8 \cdot 10^{-2} \cdot 10 \cdot 10^{-2} = 8 \cdot 10^{-3}$ m^2. Kanname kõik mõõtmed tabelisse 3.3 ja arvutame magnetvälja näitajad.



Joonis 3.37. Terassüdamikuga pooli magnetahela geomeetrilised mõõtmed (a) ja magnetmaterjalide magneetimiskõverad (b).

Tabel 3.3

Magnetahela mõõtmed ja magnetvälja näitajad

Lõik	**Keskkond**	**Magnet-voog**	**Ristlõige**	**Magnetvoo tihedus**	**Magnetvälja tugevus**	**Keskmine teepikkus**	**Magneeti-misergutus**
		***Φ*, Wb**	***S*, m^2**	***B*, T**	***H*, A/m**	***l*, m**	***V*, A**
I	Ferro-magnetiline materjal	0,008	$8{,}0\cdot10^{-3}$	1,00	300	$16\cdot10^{-2}$	48
II		0,008	$6{,}4\cdot10^{-3}$	1,25	570	$20\cdot10^{-2}$	114
III		0,008	$8{,}0\cdot10^{-3}$	1,00	300	$16\cdot10^{-2}$	48
IV		0,008	$6{,}4\cdot10^{-3}$	1,25	570	$28\cdot10^{-2}$	160
V	Õhk	0,008	$8{,}0\cdot10^{-3}$	1,00	800 000	$0{,}5\cdot10^{-2}$	4000
VI	Õhk	0,008	$8{,}0\cdot10^{-3}$	1,00	800 000	$0{,}5\cdot10^{-2}$	4000
Kokku:							8370

Magnetvoo tihedus esimeses osas $B_1 = \Phi/S_1 = 0{,}008/8{,}0 \cdot 10^{-3} = 1{,}0$ T.

Sarnaselt leiame magnetvoo tihedused ka teistes osades ja kanname tabelisse. Jooniselt *b* saame vootihedusele $B_1 = 1{,}0$ T vastava magnetvälja tugevuse $H_1 = 310$ A/m.

Esimese osa magnetiline pinge $H_1 l_1 = 300 \times 16 \cdot 10^{-2} = 48$ A. Samal viisil toimime ka tabeli teise, kolmanda ja neljanda osa näitajatega.

Viiendas ja kuuendas osas (õhupilus) magnetvoo tihedus $B_5 = B_6 = 0{,}008/8{,}0 \cdot 10^{-3} = 1{,}0$ T.

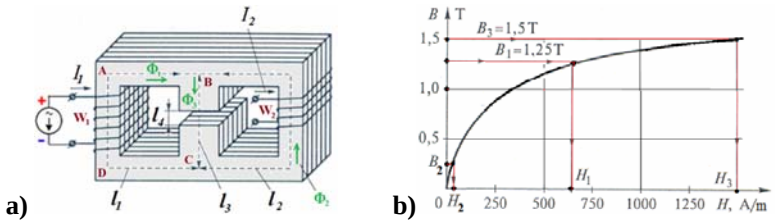
Väljatugevus õhupilus $H_5 = H_6 = 0.8 \cdot 10^6 \cdot B_5 = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 1{,}0 = 0{,}8 \cdot 10^6$ A/m.

V ja VI osa magnetiline pinge $H_5 l_5 = H_6 l_6 = 800\,000 \times 0{,}5 \cdot 10^{-2} = 4000$ A. Liidame kuue osa magnetilised pinged ja koguvoolu seaduse (3.5) alusel leiame **vajaliku keerdude arvu:** $w = \frac{\sum_1^6 H_k l_k}{I} = \frac{8370}{10} = 837\,\text{keerdu}.$

NÄIDE 3.7

Arvutada: joonisel 3.38a kujutatud magnetahela ja mähistega w_1 ja w_2 seadme voolud I_1 ja I_2.

Antud: $l_1 = 80$ cm; $l_2 = 60$ cm; $l_3 = 20$ cm; $l_B = 1$ mm; $S_1 = S_2 = S_3 = 10$ cm^2; $\Phi_1 = 1{,}25\cdot10^{-3}$ Wb; $\Phi_2 = 0{,}25\cdot10^{-3}$ Wb; $w_1 = 500$ keerdu; $w_2 = 200$ keerdu; elektrotehniline teras. Sõltuvus $B(H)$ on esitatud joonisel 3.36b.



Joonis 3.38. Elektrotehnilisest terasest südamiku ja kahe mähisega seade (a) ja terase põhimagneetimiskõver (b)

Lahendus

Leiame magnetvoo Φ_3. Kirchhoffi seaduse järgi $\Phi_3 = \Phi_1 + \Phi_2 = 1{,}25 \cdot 10^{-3} + 0{,}25 \cdot 10^{-3} = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$Wb.

Arvutame magnetvoo tihedused sammastes ja õhupilus

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S_1} = \frac{1{,}25 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1{,}25 \text{ T}; \quad B_2 = \frac{0{,}25 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 0{,}25 \text{ T}; \quad B_3 = \frac{1{,}5 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-4}} = 1{,}5 \text{ T}; \quad B_4 = B_3 = 1{,}5 \text{ T}.$$

Graafikult $B(H)$ leiame magnetvälja tugevused sammastes

$$H_1 = 625 \text{ A/m}; \quad H_2 = 40 \text{ A/m}; \quad H_3 = 1500 \text{ A/m}; \quad H_4 = 8 \cdot 10^5 B = 1{,}2 \cdot 10^6 \text{ A/m}.$$

Määrame magnetomotoorse jõu eraldi mähistele

$$F_1 = I_1 w_1 = H_1 l_1 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = 625 \cdot 0{,}8 + 1500 \cdot 0{,}2 + 1{,}2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} = 2000 \text{ A}.$$

$$F_2 = I_2 w_2 = H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_4 l_4 = 40 \cdot 0{,}6 + 1500 \cdot 0{,}2 + 1{,}2 \cdot 10^6 \cdot 10^{-3} = 1524 \text{ A}.$$

Arvutame voolud mähistes

$$I_1 = \frac{F_1}{w_1} = \frac{2000}{500} = 4 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{F_2}{w_2} = \frac{1524}{200} = 7{,}62 \text{ A}.$$

NÄIDE 3.8

Antud: sirget lõpmata pikka juhet läbib vool I = 100 A.

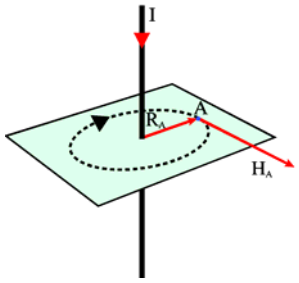
Arvutada: magnetvälja tugevus ja induktsioon kaugusel $R_A = 0{,}5$ m juhtme teljest (joonis 3.39).

Leida: magnetvälja konfiguratsioon ja suund.

Lahendus

1. Leiame magnetvälja kuju ja suuna. Sel juhul on magnetvälja väljajooned kontsentrilised ringjooned. Välja suund määratakse paremkeermelise kruvi reegliga.

2. Leiame magnetvälja tugevuse ja magnetvootiheduse punktis A. Väljatugevuse määramiseks tuleb kasutada valemit, mis tuleneb koguvoolu seadusest: $H_A = I/2\pi \cdot 0{,}5 = 31{,}8$ A/m.



Joonis 3.39. Sirge juhtme magnetväli

Magnetvälja tugevuse H_A vektor langeb ühte ringi puutujaga punktis A. Induktsiooni määramiseks samas punktis kasutame valemit

$$B_A = \mu_r \mu_0 H_A,$$

kus $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m on magnetiline konstant,

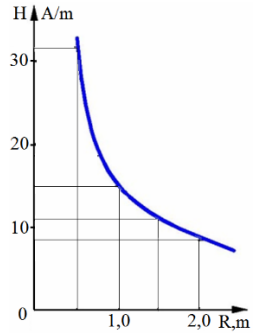
μ_r – keskkonna suhteline magnetiline läbitavus.

Kõnealusel juhul asub juhe õhus ja seepärast võtame $\mu_r = 1$ ning

$$B_A = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 31{,}8 = 40 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Tuleb märkida, et kõikide mitteferromagnetiliste keskkondade puhul võetakse arvutustes $\mu_r \approx 1$. Rangelt võttes $\mu_r = 1$ ainult vaakumi puhul, kõikidel teistel juhtumitel $\mu_r \neq 1$ näitab, mitu korda on magnetväli selles keskkonnas tugevam või nõrgem kui vaakumis. Erisugune asend on ferromagnetilistel materjalidel, mille puhul $\mu_r \neq$ const ja võib ulatuda väga suurte väärtusteni suurusjärguga $10^2 ... 10^6$.

3. Joonistame H sõltuvuse graafiku kaugusest R (juhtme teljeni). B sõltuvuse graafik on täiesti sarnane ja vastava mõõtkava valimisel langeb H graafikuga kokku (joonis 3.40).



Joonis 3.40. Magnetvälja tugevuse sõltuvus juhtme telje kaugusest

NÄIDE 3.9

Antud: rõngakujulise pooli vool $I = 1{,}57$ A. Pooli keerdude arv $w = 1000$. Südamiku keskmise joone raadius $R_k = 5$ cm.

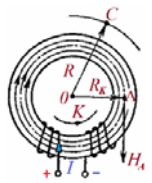
Määrata: magnetvälja kuju ja suund.

Arvutada: väljatugevus ja magnetvootihedus punktis A, mis asub tsentrist 0 kaugusel R_k. Näidata, et väljaspool pooli väli puudub. Ülesande lahendamisel võtta $\mu_r = 1$.

Lahendus

1. Määrame magnetvälja konfiguratsiooni ja suuna.

Väljajooned on kontsentriliste ringjoonte kujulised, nagu on näidatud joonisel 3.41. Välja suund määratakse kruvireegliga.



Joonis 3.41. Toroidikujulise pooli magnetväli

2. Leiame väljatugevuse ja induktsiooni punktis A.

Väljatugevus määratakse valemiga, mis on saadud koguvoolu seaduse alusel:

$$H_A = I \cdot w / 2\pi R_k = 1{,}57 \cdot 1000 / 2\pi \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 5 \cdot 10^3 \text{ A/m}.$$

Vektor H_A on suunatud mööda väljajoone puutujat punktis A. Induktsiooni punktis A leiame valemiga

$$B_A = \mu_0 H_A = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 10^3 = 6{,}28 \cdot 10^{-3} \text{ T}.$$

3. Tõestame, et väljaspool pooli väli ei eksisteeri.

Tõestuseks lähtume vastupidisest eeldusest. Oletame, et väli eksisteerib. Sümmeetria tõttu on selle välja jooned kontsentrilised ringjooned. Üks neist läbib suvaliselt võetud punkti C (vt joonis 3.41).

Rakendame koguvoolu seadust kontuurile, mis langeb kokku raadiuse R ringjoonega ja piirab vastavat pindala

$$\sum I = H_R \cdot 2\pi R .$$

On ilmne, et koguvool $\sum I$ sellele pindalale võrdub nulliga. Järelikult $2\pi R H_R = 0$. Kuna $2\pi R \neq 0$, siis $H_R = 0$. Samal viisil võib tõestada välja puudumise ükskõik millises vabalt valitud punktis (näiteks K).

NÄIDE 3.10

Antud: poolil pikkusega l = 25 cm ja läbimõõduga D = 4 cm on w = 2000 keerdu, mis on keritud ühes kihis (joonis 3.42a). Pooli vool I = 0,1 A.

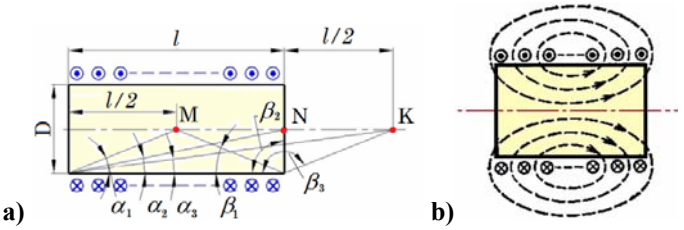
Määrata: magnetvälja kuju ja suund.

Arvutada: magnetvälja tugevus ja magnetvootihedus punktides M, N ja K (μ_r = 1).

Lahendus

1. Määrame magnetvälja kuju ja suuna.

Magnetvälja väljajooned on näidatud joonisel 3.42b. Näeme, et välja kuju on samasugune kui sirgel pikal püsimagnetil. Välja suund määratakse kruvireegliga.



Joonis 3.42. Silinderpooli skeem (a) ja magnetvälja väljajooned (b)

2. Leiame väljatugevuse ja magnetvootiheduse punktis M.

Kuna suhe l/D on poolil suurem kui viis ja punkt M asub pooli otstest kaugel, siis võib kasutada ligikaudset valemit

$$H_M \approx Iw/l = 0{,}1 \cdot 2000/0{,}25 = 800 \text{ A/m}.$$

Magnetvootihedus punktis M:

$$B_M = \mu_0 H_M = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 800 = 10^{-3} \text{ T}.$$

Veendume ligikaudse valemi kasutamise otstarbekuses H_M määramiseks. Selleks leiame H_M väärtuse ja võrdleme seda ligikaudsega:

$$H_M = \frac{I \cdot w}{2l}(\cos\alpha_1 + \cos\beta_1) .$$

Kuna $\alpha_1 = \beta_1$, siis $$H_M = \frac{I \cdot w}{l} \cdot \cos\alpha_1 = \frac{0{,}1 \cdot 2000}{0{,}25} \cdot 0{,}985 \approx 790 \text{ A/m}.$$

Ligikaudse valemiga määratud H_M viga on

$$\gamma_{H_M} = \frac{800 - 790}{790} \cdot 100\% \approx 1{,}26\% .$$

3. Leiame väljatugevuse ja magnetvootiheduse punktis N.

Sel juhul on vaja kasutada ainult valemit $$H_N = \frac{I \cdot w}{2l}(\cos\alpha_2 + \cos\beta_2);$$

kuna $\beta_2 = \frac{\pi}{2}$, siis valem võtab kuju $H_N = \frac{Iw}{2l}\cos\alpha_2$; $\cos\alpha_2 \approx 1$ ja

$$H_N = \frac{0{,}1 \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}25} = 400 \text{ A/m}.$$

$$B_N = 0{,}5 \cdot 10^{-3} \text{ T}.$$

4. Leiame väljatugevuse ja magnetvootiheduse punktis *K*.

$$H_K = \frac{Iw}{2l}(\cos\alpha_3 + \cos\beta_3), \text{ kuna } \cos\beta_3 \approx 1;$$

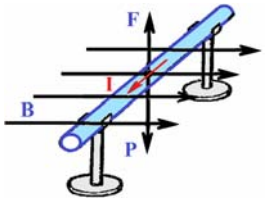
$$H_K = \frac{Iw}{2l}(1 - 0{,}985) = \frac{0{,}1 \cdot 2000}{2 \cdot 0{,}25} \cdot 0{,}015 = 9 \text{ A/м},$$

$$B_K = \mu_0 H_K = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 9 = 11{,}3 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

Saadud tulemused näitavad, et väljaspool pooli väheneb magnetvälja intensiivsus järsult.

NÄIDE 3.11

Antud: homogeenses magnetväljas magnetvootihedusega 1,0 T asub kahele toele paigutatud juhe pikkusega l = 50 cm (joonis 3.43). Millise voolutugevuse juures toimub juhtme lahtirebimine tugedelt, kui juhtme mass on 1 kg ning magnetvootiheduse vektor *B* ja vooluga juhe on omavahel risti?



Joonis 3.43. Homogeenses magnetväljas asuvale sirgele vooluga juhtmele mõjuv jõud

1. Määrame juhtme raskusjõu:

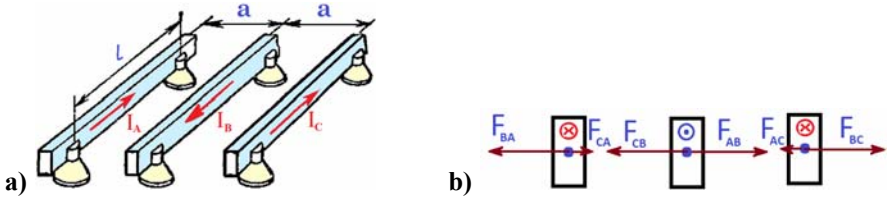
$$P = mg = 1 \cdot 9{,}8 \text{ N}.$$

2. Vooluga juhtmele mõjub magnetväljas jõud *F*, mille suund määratakse vasaku käe juhise järgi, jõu väärtus leitakse valemiga $F = BIl$. Elektromagnetiline jõud tasakaalustab raskusjõu kui $F = P$.

Sellest tingimusest leiame voolu minimaalse väärtuse, mida on vaja juhtme lahtirebimiseks tugedelt: $P = BIl$, millest $I = P/Bl = 9{,}8/1 \cdot 0{,}5 = 19{,}6$ A.

NÄIDE 3.12

Antud: lühise tõttu olid elektrijaama lattidel voolud I_A = 10000 A, I_B = 20000 A, I = 10000 A. Leida tugiisolaatoritele mõjuvad jõud, kui lattidevaheline kaugus a = 10 cm ja isolaatoritevaheline kaugus l = 100 cm (joonis 3.44a).



Joonis 3.44. Elektrijaama lattide paigutus ja mõõtmed (a) ja lattidele mõjuvate jõudude suunad (b)

Lahendus

Iga isolaator võtab vastu poole jõust, mis mõjub temast mõlemal pool paiknevate lattide visangutele. Seega võib arvestada, et isolaatorile mõjub jõud, mis tuleb kogu isolaatoritevahelisele visangule pikkusega l. Meie juhtumil töötavad koos kolm voolu ja tundmatute jõudude määramiseks tuleb vaadelda voolude koosmõju (koostööd) paariti. Seejärel on vaja leida igale latile mõjuv resulteeriv jõud (joonis 3.44b).

Jõu suund leitakse etteantud voolusuundade alusel. Leiame jõu F_{AB}.

$$F_{AB} = \mu_0 \frac{I_A I_B}{2\pi\alpha} l = \frac{\mu_0 l}{2\pi\alpha} I_A I_B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2\pi \cdot 0{,}1} I_A I_B;$$

$$F_{AB} = 200 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^4 = 400 \text{ N}.$$

Newtoni kolmanda seaduse järgi $F_{BA} = F_{AB} = 400$ N. Leiame jõu

$$F_{AC} = \frac{200 \cdot 10^{-8}}{2} I_A I_C = 100 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4 \cdot 10^4 = 100 \text{ N}.$$

$$F_{CA} = F_{AC} = 100 \text{ N}.$$

Leiame jõu F_{BC}: $F_{BC} = 200 \cdot 10^{-8} I_B I_C = 200 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^4 = 400$ N.

$F_{CB} = F_{BC} = 400$ N.

Nüüd määrame joonise 3.44b alusel resulteeriva jõu.

$F_A = F_{BA} - F_{CA} = 400 - 100 = 300$ N;

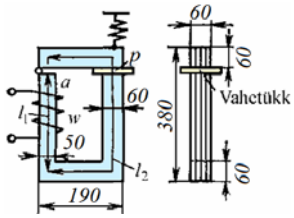
$F_B = F_{CB} - F_{AB} = 400 - 400 = 0$;

$F_C = F_{BC} - F_{AC} = 400 - 100 = 300$ N.

Ülesandes vaadeldud olukord võib tekkida suure võimsusega kolmefaasilistes seadmetes (elektrijaamades). Märgime, et ülesandes on esitatud voolude väärtused sel ajahetkel, kui vool I_B on maksimaalne ning voolud I_A ja I_C on ühesuurused ja määratakse, kui $I_B \cos 60^\circ = 0{,}5 I_B$. Kui arvestada, et voolud muutuvad sagedusega 50 Hz, siis järelikult muutuvad ka tugiisolaatoritele mõjuvad jõud suunalt ja suuruselt. Seega on vaja ära tunda tugiisolaatoritele ohtlikud mehaanilised koormused.

NÄIDE 3.13

Määrata: elektromagneti südamikul oleva pooli magnetomotoorjõud, kui südamik on tehtud elektrotehnilisest terasest, magnetvootihedus pilus (messingist vahetükk) B_p = 1,4 T ja liikuv südamik on külgetõmbunud asendis. Pilu laius 0,2 mm (joonis 3.45).



Joonis 3.45. Elektromagneti skeem ja mõõtmed

Lahendus

1. Tõmbame mõõtmete järgi keskmise joone, nagu on näidatud joonisel 3.45 ja määrame keskmise joone pikkuse igale lõigule (l_1; l_2, pilu a jaoks Δ_a; pilu p jaoks Δ_p); $l_1 = 26$ cm; $l_2 = 65$ cm, $\Delta_a = 0{,}2$ mm; $\Delta_p = 0{,}2$ mm.

2. Määrame magnetvootiheduse magnetahela kõikides lõikudes.

Kuna magnetvoog on ühesugune kõikides lõikudes (kui puistevooge mitte arvestada), siis $B_a S_1 = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_p S_2$. Siit $B_1 = B_a = B_p \cdot S_2 / S_1 = 1{,}4 \cdot 36/30 \approx 1{,}68$ T.

3. Väljatugevused leiame teadaolevate magnetvootiheduste järgi lõikudes.

Elektrotehnilise terase magneetimiskõvera järgi:

$H_1 = 17{,}5$ A/cm; $H_2 = 5$ A/cm; $H_a = B_a/\mu_0 = 1{,}7/4\pi\cdot 10^{-7} = 1{,}35\cdot 106$ A/m = 13500 A/cm;
$H_p = B_p/\mu_0 = 1{,}4/4\pi\cdot 10^{-7} = 11300$ A/cm.

4. Leiame magnetilised pinged ahela lõikudel:

$U_{M1} = H_1 l_1 = 17{,}5 \cdot 26 = 455$ A; $U_{M2} = H_2 l_2 = 5 \cdot 65 = 325$ A; $U_{Ma} = H_a \Delta_a = 13500 \cdot 0{,}02 = 270$ A;
$U_{Mp} = H_p \Delta_p = 11300\cdot 0{,}02 = 226$ A.

5. Leiame pooli magnetomotoorjõu: $F = U_{M1} + U_{M2} + U_{Ma} + U_{Mp} = 455 + 325 + 270 + 226 = 1276$ A.

Niisiis $F = Iw$. Voolu ja keerdude arvu valik tehakse elektromagneti konstruktsiooniandmete (südamiku aken) ja pooli elektriliste andmete (traadi ristlõige, lubatud voolutugevus) alusel.

3.11. Kordamisküsimused

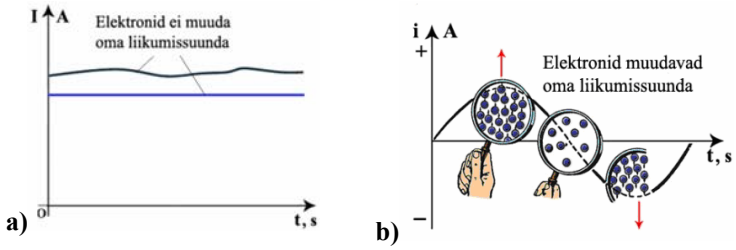
1. Magnetvoo allikad ja magnetvoo võimendamise viisid.
2. Põhilised magnetilised suurused.
3. Vooluga juhe välises magnetväljas. Elektromagnetiline jõu tekke idee.
4. Ferromagnetmaterjalid. Kuidas kujutate ette pooli magnetvälja võimendamist ferromagnetmaterjali poolt?
5. Kuidas kujutate ette mehhanismi, mis paneb magnetvoo sulguma magnetahela ferromagnetsüdamikus?
6. Kuidas kujutate ette lihtsa elektri- ja magnetahela sarnasust?
7. Koguvooluseadus ja selle rakendamisnäide ülesande lahendamisel.

4. ÜHEFAASILISED VAHELDUVVOOLUAHELAD

4.1. Vahelduvvoolu saamine
4.2. Vahelduvvoolu, -sisepinge ja -pinge parameetrid
4.3. Oomtakistus e aktiivtakistus (lühidalt takistus) vahelduvvooluahelas. Pinnanähtus
4.4. Induktiivpool vahelduvvooluahelas
4.5. Kondensaator (mahtuvus) vahelduvvooluahelas
4.6. Vahelduvvoolu *RLC*-jadaahel
4.7. Vahelduvvoolu rööpahel
4.8. Vahelduvvoolu võimsus ja võimsustegur
4.9. Juhtivused vahelduvvooluahelas
4.10. Vahelduvvoolu hargahelad
4.11. Pinge- ja vooluresonants
4.12. Vektorite kujutamine kompleksarvude abil
4.13. Sümboli- ehk kompleksmeetod
4.14. Voolud, pinged ja takistused sümbolkujul
4.15. Kompleksvõimsus
4.16. Kordamisküsimused

4.1. Vahelduvvoolu saamine

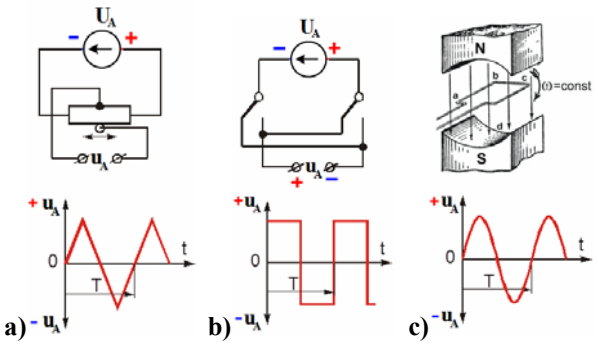
Vahelduvvoolu muutumise iseloom. Eristatakse alalisvoolu, mis kulgeb elektriahelas kogu aeg ühes suunas. Selle voolu sõltuvust ajast võib graafiliselt kujutada sirge või kõvera joonena (joonis 4.1a).



Joonis 4.1. Alalisvool ei muuda aja jooksul oma suunda (a). Vahelduvvoolu korral muudavad elektronid perioodiliselt oma liikumissuunda, ka ristlõiget ajaühikus läbivate elektronide hulk muutub kogu aeg (b)

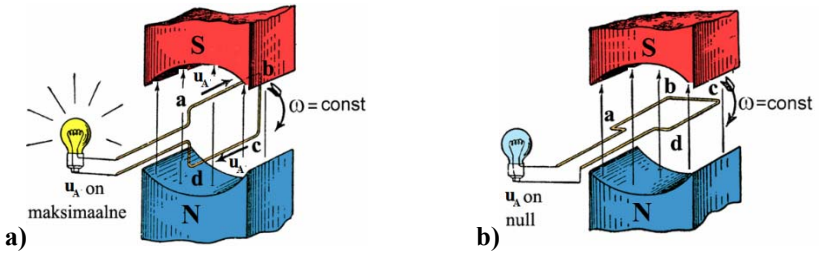
Praegu kasutatakse tööstuses ja kodumajapidamises sagedamini vahelduvvoolu. Erinevalt alalisvoolust muudab vahelduvvool pidevalt oma suurust ja suunda, kusjuures need muutused toimuvad perioodiliselt, s.o võrdsete ajavahemike järel (joonis 4.1b). **Füüsikaliselt kujutab vahelduvvool elektronide liikumissuuna muutumise perioodilist protsessi**. Voolu saamiseks kasutatakse elektrienergia allikaid, mis tekitavad perioodiliselt suuruselt ja suunalt muutuva vahelduvallikasisepinge – vahelduvvoolu toiteallikaid ja generaatoreid. Joonisel 4.2 on kujutatud kolme lihtsa vahelduvvoolu toiteallika eskiisid ja nende sisepingete muutused ajas.

Tehnikas on tähtsal kohal siinussisepingeallikad.



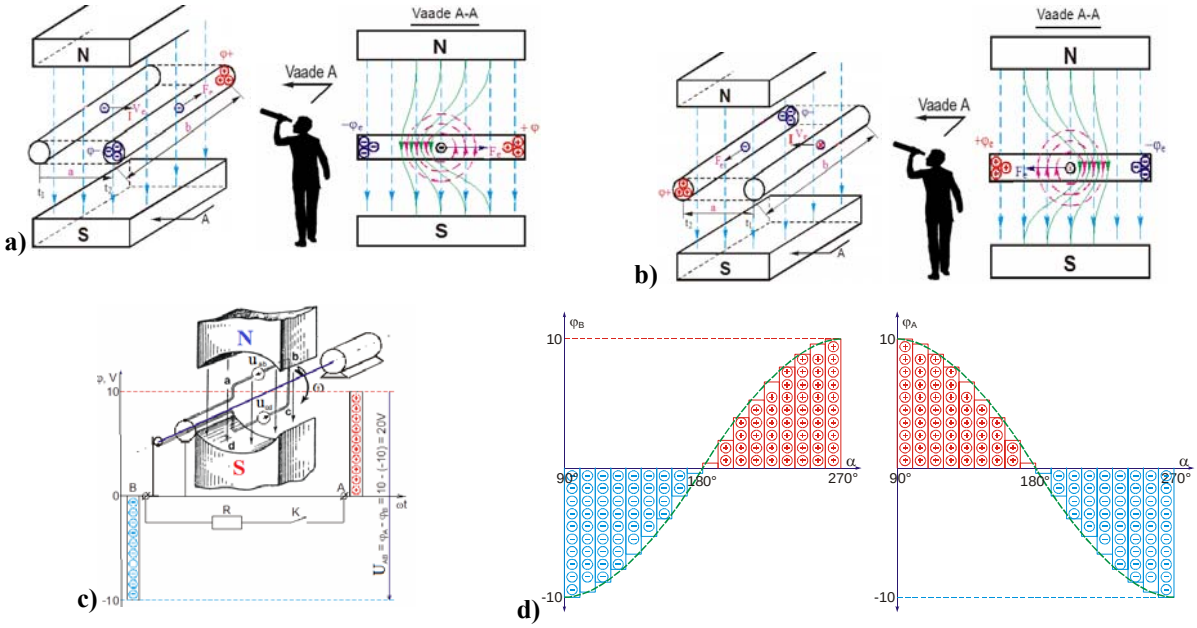
Joonis 4.2. Kolm lihtsat vahelduvvoolu toiteallikat: a – kolmnurksisepinge; b – nelinurksisepinge; c – siinussisepinge

Siinuselise vahelduvvoolu saamise põhimõte. Lihtsaim siinuselise vahelduvvoolugeneraator on magnetväljas muutumatu nurkkiirusega ω pöörlev juhtmekeerd. Pöörlemise käigus muutuvad pidevalt keeru töölõikudes *ab* ja *cd* indutseeritud allikasisepinge suurus ja suund, seega järelikult ka suletud ahelas kulgeva voolu suurus ja suund.



Joonis 4.3. Lihtsaim vahelduvvoolugeneraator. Keeru vertikaalasendi puhul (a) lõikavad tema töölõigud *ab* ja *cd* väljajooni ja neis indutseeritakse allikasisepinge. Keeru horisontaalasendis libisevad töölõigud piki väljajooni ja neis ei indutseerita allikasisepinget

Keeru töölõikudes *ab* ja *cd* tekkiva sisepinge füüsikalist olemust selgitab joonis 4.4. Joonisel 4.4a on näidatud töölõigu *ab* liikumine püsimagneti magnetväljas. Vaatleme ühte elektroni töölõigu *ab* keskel, mis liigub koos töölõiguga kiirusega v_e vaatleja suunas.

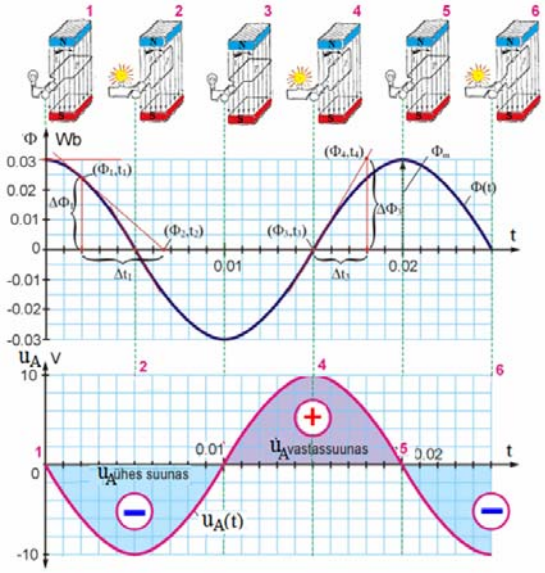


Joonis 4.4. Sisepinge tekkimine keeru töölõikudes ab (a) ja cd (b): V_e – töölõigu ja vaadeldava elektroni liikumiskiirus, I – elektroni liikumisest põhjustatud tinglik voolusuund, F_e – elektronile mõjuv jõud, φ+ ja φ– – töölõigu otste positiivne ja negatiivne potentsiaal

Elektroni pöörlemine oma telje ja aatomi tuuma ümber (joonis 3.18) tekitab liikuva laengu energiavälja – magnetvälja. Selle elektroni liikumist koos energiaväljaga võime vaadelda kui mikrovoolu I, mille suund langeb kokku elektroni liikumissuunaga v_e. Vaatleja näeb vaatel A–A kujutatud pilti. Et vool on suunatud vaatleja poole, siis vaatel A–A on voolu suund näidatud punktiga. Liikuva elektroni energiavälja kontsentrilised magnetväljajooned sulguvad vastu kellaosuti suunda. Püsimagneti esialgse magnetvälja ja liikuva elektroni välja liitumise tulemusena deformeeruvad magnetilised väljajooned ja tekkib elektronile mõjuv jõud F_e. See jõud liigutab elektroni töölõigu paremasse otsa. Niisugune jõud mõjub ka teistele elektronidele, mis samuti liiguvad töölõigu paremasse otsa. Elektronide laengute kogunemine põhjustab seal potentsiaali φ_+. Töölõigu vasakus otsas tekkib elektronide puudujääk, mille tõttu on sellel otsal vastasmärgiline e negatiivne potentsiaal φ_-. Joonisel 4.4b eemaldub töölõik vaatlejast, s.o „elektroni vool“ on suunatud vaatlejast eemale. Seepärast on vaatel A–A voolu suund näidatud „x“. Tekkiv jõud F_e paigutab elektroni töölõigu *cd* vasakusse otsa. Edasi vaatleme mõningaid erinevaid keeru asendeid (joonis 4.5).

Hetkel 1, kui keerd on horisontaalasendis, libiseksid tema töölõigud justkui piki magnetväljajooni neid lõikamata. Seepärast ei indutseerita sel hetkel neis allikasisepinget. Graafikul, mis kujutab allikasisepinge $u_A(t)$ muutumist keeru pöörlemisel (vt joonis 4.5), on allikasisepinge väärtus hetkel $t = 0$ (graafikul punkt 1) võrdne nulliga. Selles asendis liigub keerd väljajoone suunas väljajooni lõikamata. Seega aheldusvoo muutumise kiirus $d\psi/dt = 0$. Keeru edasisel pöördumisel hakkavad selle küljed lõikama magnetväljajooni.

Pöördenurga suurenemisel suureneb ka keeru külgede poolt lõigatavate väljajoonte arv ajaühikus ja vastavalt suureneb ka keerus indutseeritud allikapinge. Graafikul on see allikasisepinge suurenemine märgitud sujuva, allapoole suunduva kõveraga.



Joonis 4.5. Keeru ühe pöörde jooksul muutub temas indutseeritud allikapinge siinuselise kõvera järgi

Hetkel 2 lõikab keerd suurimat arvu magnetväljajooni, kuna selle töölõigud 1 ja 2 liiguvad risti magnetvälja väljajoontega. Sel hetkel saavutab allikasisepinge oma maksimaalväärtuse. Graafikul vastab see allikasisepinge väärtus punktile 2. Keeru edasisel pöörlemisel väheneb lõigatavate väljajoonte arv ja vastavalt väheneb ka keerus indutseeritud allikasisepinge. Hetkel 3 keeru töölõigud just kui libisevad piki magnetväljajooni, mille tulemusena on allikasisepinge jälle null (punkt 3 $u_A(t)$ graafikul).

Seejärel hakkavad töölõigud 1 ja 2 lõikama magnetväljajooni, kuid juba teises suunas ning seepärast tekkib keerus vastassuunaline allikasisepinge. Graafikul arvestatakse allikasisepinge suuna muutust nii, et sisepinge kõver lõikab ajatelge ja paikneb sellest teljest allpool. Hetkel 4 on keeru vertikaalasendis allikasisepinge maksimaalse väärtusega (punkt 4 allikasisepinge graafikul), seejärel väheneb see uuesti ja hetkel 5 muutub jälle nulliks (punkt 5 allikasisepinge kõveral), nagu see oli pöörlemise alguses.

Edasisel keeru pöörlemisel eespool kirjeldatud protsess kordub. Järelikult on allikasisepinge ja vaadeldava keeruga ühendatud ahela vool vahelduvad.

Sel viisil saadud allikasisepinge graafik on joonisel 4.5.

Indutseeritud allikasisepinge suuruse määramine. Keerus indutseeritud allikasisepinge suurus võrdub tema aheldusvoo muutumise kiirusega

$$u_A = d\psi / dt .$$

Ühe keeru korral ($w = 1$) on aheldusvoog $\psi = w\Phi = \Phi$. Seega indutseeritud allikasisepinge

$$u_A = \frac{d\Phi}{dt} .$$

Oletame, et keerd pöörleb muutumatu nurkkiirusega ω. Siis muutub keerust läbiminev magnetvoog ajas koosinusseaduse järgi (vt joonis 4.5). Ajahetkel 1 on keerd horisontaalasendis. Keerdu läbiva magnetvoo amplituudväärtus on Φ_m. Edasisel pöörlemisel muutub voo hetkväärtus koosinusseaduse järgi

$$\Phi(t) = \Phi_m \cos \omega t\,.$$

Olgu $\Phi_m = 0{,}03$ Wb ja keeru pöörlemissagedus 50 pööret sekundis, siis ühele pöördele kulub 0,02 s. Kanname need suurused graafikute telgedele. Leiame graafiliselt allikasisepinge väärtuse hetkel $t_1 = 0{,}002$ s. Selleks arvutame ligikaudselt keerdu läbiva magnetvoo muutumise kiiruse (funktsiooni puutuja kaldenurga tegur)

$$u_{At_1} = \frac{d\Phi_1}{dt_1} \approx \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{0 - 0{,}024}{0{,}0066 - 0{,}002} = -\frac{0{,}024}{0{,}0046} \approx -5{,}22 \text{ V},$$

kus $\Delta\Phi$ ja Δt on magnetvoo ja aja juurdekasvud.

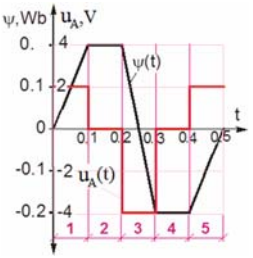
Puutuja järgi leiame funktsiooni tuletise punktis (Φ_3, t_3)

$$u_{At_3} \approx \frac{\Delta\Phi_3}{\Delta t_3} = \frac{\Phi_4 - \Phi_3}{t_4 - t_3} = \frac{0{,}03 - 0{,}0}{0{,}018 - 0{,}015} = \frac{0{,}03}{0{,}003} = 10 \text{ V}.$$

Sarnaselt talitades võime arvutada allikasisepinge väärtuse mistahes hetkel ja saada allikasisepinge pideva graafiku. Sellist kõverat nimetatakse sinusoidiks; voole, allikasisepingeid ja pingeid, mis muutuvad sinusoidi järgi, nimetatakse siinuselisteks.

NÄIDE 4.1

Leida: poolis indutseeritud allikasisepinge $u_A(t)$, kui pooli aheldusvoog $\Psi(t)$ muutub ajas joonisel 4.6 esitatud graafiku järgi.



Joonis 4.6. Aheldusvoo ja allikasisepinge muutumine

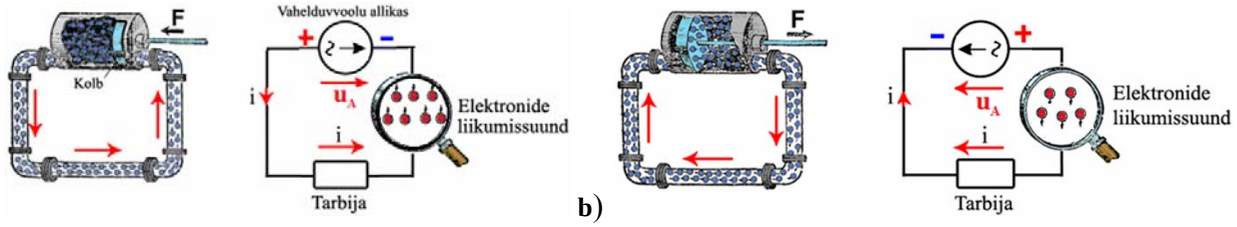
Lahendus

Allikasisepinge lõigul 1:

$$u_{A1} = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} = \frac{\Psi_{0,1} - \Psi_0}{t_{0,1} - t_0} = \frac{0{,}2 - 0}{0{,}1 - 0} = 2 \text{ V}.$$ Edasised tulemused esitame tabelina

Ajavahemik	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
e, V	2,0	0	–4,0	0	2,0

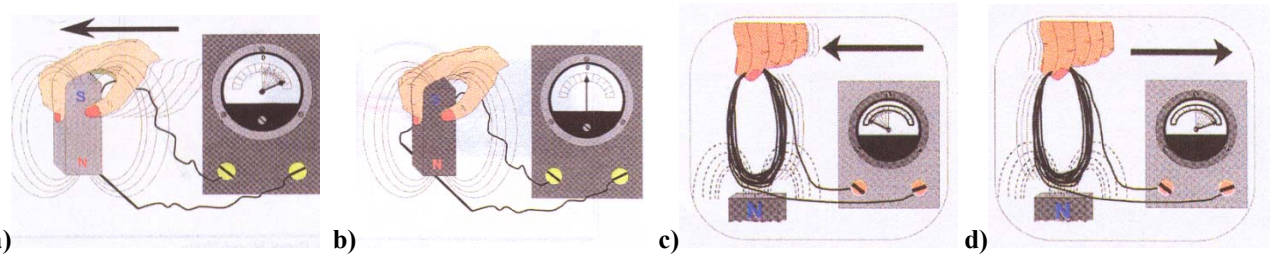
Nüüdisaegsetes vahelduvvoolugeneraatorites paigutatakse magnetid või elektromagnetid harilikult masina pöörlevale osale – rootorile; aga keerud, kus indutseeritakse vahelduv allikasisepinge, paigutatakse generaatori liikumatule osale – staatorile. Vahelduvvooluallikat võib võrrelda kolbpumbaga (joonis 4.7), mis pidevalt pumpab vett kord ühele, kord teisele poole. Sarnaselt liiguvad elektronid pidevalt vahelduva allikasisepinge mõjul suletud elektriahelas kord ühes, kord teises suunas, kusjuures juhtme ristlõiget ajaühikus läbivate elektronide hulk muutub pidevalt.



Joonis 4.7. Vee liikumine kolbpumbas ja elektronide liikumine vahelduvvoolu ahelas

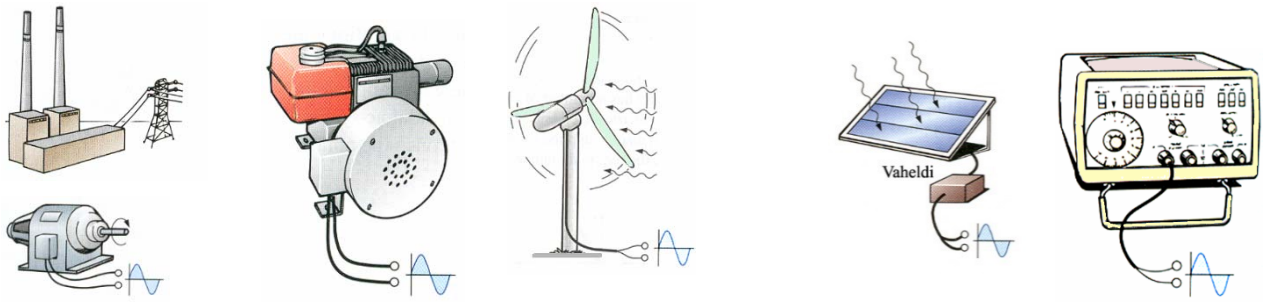
Vahelduvvoolu töö tarbijates (tarvitites). Tekkib küsimus, kuidas toimub tarbijate töö (energia muundumine) vahelduvvoolu korral? Kui lülitada vahelduvvoolugeneraatori klemmidele elektrilambike (joonis 4.3), siis selle niit hakkab perioodiliselt hõõguma ja kustuma. Siiski, kui vahelduvvoolu sagedus on piisavalt suur, siis lambikese niit ei jõua jahtuda ja inimsilm ei märka lambi hõõgumise muutust. Joonisel 4.8 on täiendavalt näidatud mehaanilise energia muundamist elektrienergiaks liikuva (a) ja paigalseisva (b, c, d) püsimagneti

ning liikuva (c, d) ja paigalseisva (a, b) juhtmekeerdude korral. Kui mehaanilist energiat ei rakendata (b) , siis energiamuundumist ei toimu.



Joonis 4.8. Allikasisepinge indutseerimine magneti liigutamisega juhtme suhtes (a) või pooli liigutamisega püsimagneti suhtes (c ja d). Kui juhe ja magnet on liikumatud (b), s.o aheldusvoo muutumine võrdub nulliga, siis allikasisepinget ei indutseerita

Järgnevatel piltidel (joonis 4.9) on elektriallikaid (seadmeid ja süsteeme), mille abil tekitatakse allikasisepinget – genereeritakse elektrienergiat. Vasakult: elektrijaam oma sünkroongeneraatoriga, vedelkütusel töötav mootorgeneraator, tuulegeneraator, päikesepaneel, võrgutoitega sagedusgeneraator (muudab generaatori väljundpinge erineva sagedusega seadmete toitepingeks).



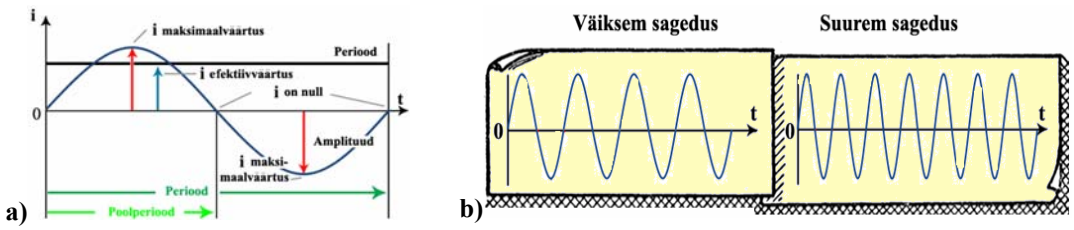
Joonis 4.9. Elektriallikad: elektrijaam, generaator, mootorgeneraator, päikesepaneel, muundurtoiteallikas

4.2. Vahelduvvoolu, -sisepinge ja -pinge parameetrid

Vahelduvvoolu iseloomustavad järgmised põhiparameetrid: **periood, sagedus, amplituud, efektiiv- (ruutkeskmine või tegev-), kesk- ja hetkväärtus.**

Periood. Perioodiks nimetatakse ajavahemikku, mille vältel teeb allikasisepinge või vool läbi oma muutumise täieliku tsükli (joonis 4.10a). Mida kiiremini keerd või vahelduvvoolugeneraatori rootor pöörleb (joonis 4.3), seda väiksem on voolu või allikasisepinge muutumise periood.

Valemites tähistatakse perioodi tähega *T* ja mõõdetakse sekundites. Ajavahemikku, mille vältel toimub pool allikasisepinge või voolu täisvõnkest, nimetatakse **poolperioodiks**.



Joonis 4.10. Ühe perioodi vältel teeb allikasisepinge või vool läbi oma võnkumise täieliku tsükli (a). Mida suurem on voolu muutumise sagedus, seda rohkem on voolu tsükleid ajaühikus ja seda väiksem on tema võnkumisperiood (b)

Sagedus. Allikasisepinge või voolu muutumise täisperioodide arvu ühes sekundis nimetatakse sageduseks. Järelikult, mida kiiremini pöörleb keerd või vahelduvvoolugeneraatori rootor, seda suurem on voolu muutumise sagedus (joonis 4.10b).

Valemites tähistatakse sagedust tähega f: $$f = \frac{1}{T}.$$

Seda mõõdetakse perioodide arvuga sekundis või hertsides (Hz). Üks herts võrdub ühe perioodiga sekundis.

Vahelduvvoolu elektrijaamad annavad voolu, mis muutub sagedusega 50 perioodi sekundis, s.o voolu sagedusega 50 Hz (mõningates maades 60 Hz).

Automaatikas ja raadiotehnikas kasutatakse ka suurema sagedusega voolu, mida mõõdetakse kilohertsides (kHz) või megahertsides (MHz) ja gigahertsides (GHz). Suuremad sagedused ulatuvad kuni 400 GHz, harva kuni 1 THz.

Raadiotehnikas kasutatakse lainepikkuse mõistet. Lainepikkust tähistatakse kreeka tähega λ (lambda) ja lainepikkus on kaugus, mille läbib elektromagnetiline laine ühe perioodi T vältel

$$\lambda = cT = c / f .$$

Siin λ – lainepikkus, m; c – elektromagnetlainete levikiirus vaakumis, $c \approx 300\,000$ km/s.

NÄIDE 4.2

Leida: generaatori sisepinge periood, kui sagedus f = 50 ja 60 Hz.

Lahendus

Periood $$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ s} \quad \text{ja} \quad T = \frac{1}{60} = 0{,}0166 \text{ s}.$$

NÄIDE 4.3

Leida: lainepikkus, kui sagedus on 1 kHz ja 50 Hz.

Lahendus

Lainepikkus $$\lambda = cT = \frac{c}{f} = \frac{300000}{1000} = 300 \text{ km} \quad \text{ja} \quad \lambda = \frac{300000}{50} = 6000 \text{ km}.$$

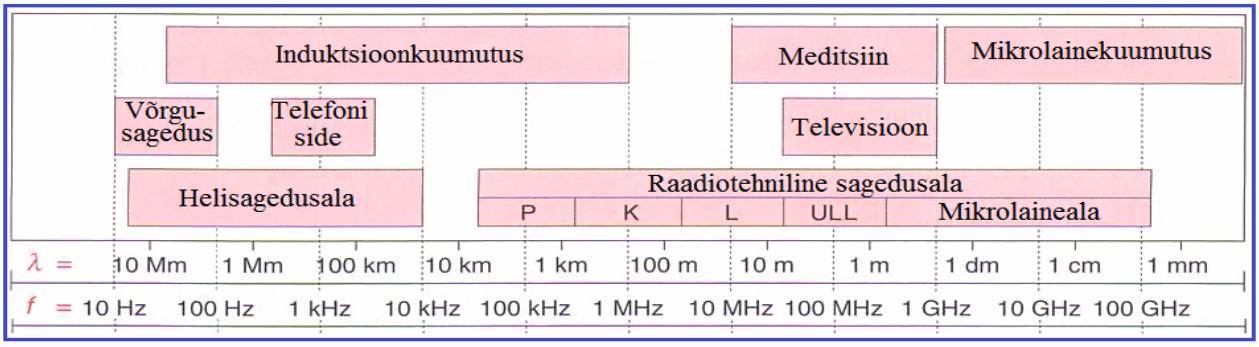
Tehnikas kasutatavaid elektromagnetilisi sagedusi vaadeldakse kahes järgnevas tabelis.

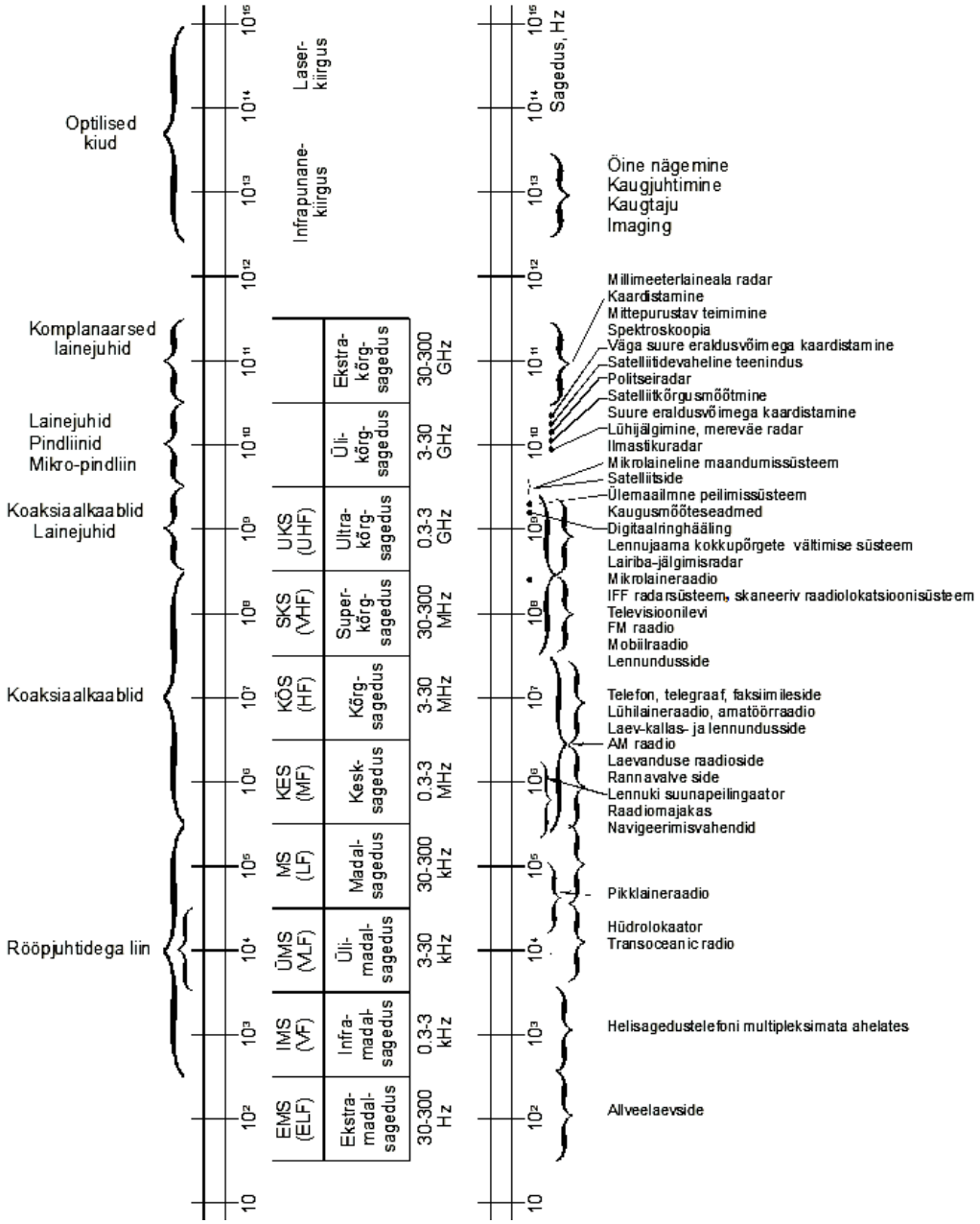
Iseloomustame tabelis 4.1 esitatud sagedusalasid. Eristatakse: 3 Hz...3 kHz – ekstra madal, 3...30 kHz – väga madal, 30...300 kHz – madal-, 300 kHz...3 MHz – kesk-, 3...30 MHz kõrgsagedus, 30...300 MHz – väga kõrge, 300 MHz...3 GHz – ultrakõrge, 3...30 GHz – superkõrge ja 30...300 GHz äärmuslikult kõrge sagedus. Audiosagedusalaks loetakse sagedusi 15 Hz...20 kHz, raadiosageduslikeks 3 kHz...300 GHz. Neile järgneb infrapunakiirguse sagedusala.

Raadio, televisiooni ja side alal jagunevad sagedused järgnevalt: 88...108 MHz – sagedusmodulatsioon; telekanali numbrid: 2...6 sagedused 54...88 MHz, 7...13 f = 174...216 MHz, 14...83 sagedused 470...890 MHz; avalik sagedusala – 26,9...27,4 MHz; mikrolaineahjud – 2,45 GHz; lühilained – 1,5...30 MHz; mobiiltelefonid – 46...49 MHz; väga kõrgsageduslikud piiparid – (**Piipar** on väikene raadiovastuvõtja, mis töötab kindlal sagedusel (146,325 MHz). Igal piiparil on ka oma number, mille järgi teated õige adressaadini jõuavad. Olenevalt piiparitüübist võib sellele edastada teksti-, numbri- või tooniteateid) – 30...50 MHz ja ultrakõrgsageduslikud piiparid 405...512 MHz. Mobiilside kiire arengu tõttu piipareid enam ei kasutata. Lisas 3 vaadeldakse elektriülekannet voolujuhtide ja antennide kasutamise korral. Mõlemal juhul kandub tarbijale edastatav energia üle elektromagnetvälja vahendusel: voolujuhtide korral piki voolujuhte ümbritsevat keskkonda (juhid täidavad väga suure dipoolantenni ülesannet), antennide korral vastavalt antenni kiirguse suuna tunnusjoonele.

Tabel 4.1

Sagedusalade kasutusvaldkonnad





Nurksagedus. Allikapinge sagedus oleneb juhtmekeeru pöörlemise nurkkiirusest (pöörlemissagedusest) (joonis 4.5), aga mitme magnetpooluspaari p korral ka pooluspaaride arvust. Kui pooluspaaride arv $p = 1$ (nagu joonisel 4.5), siis indutseeritakse keeru iga täispöördega allikasisepinge üks periood, $p = 2$ korral kaks perioodi jne. Seega indutseeritakse iga pooluspaaride arvu p korral p perioodi allikasisepinget. Seega on **elektriline nurk** α (joonis 4.11b) geomeetrilisest **juhtmekeeru pöördenurgast** α_{geom} pooluspaaride arvu p korda suurem $\alpha = p\alpha_{geom}$.

Elektrilise nurga α ja aja t suhet nimetatakse **vahelduvvoolu nurksageduseks** $\omega = \alpha / t$. Siit elektriline nurk

$$\alpha = \omega t .$$

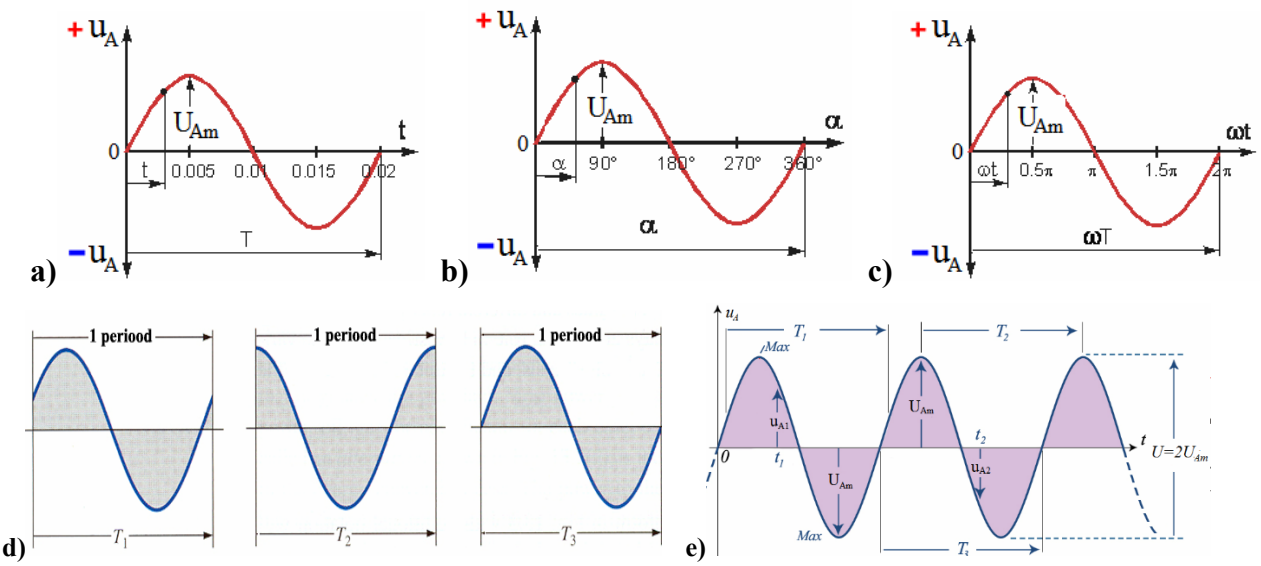
Juhtmekeeru ühe pöörde puhul geomeetriline nurk $\alpha_{geom} = 360 = 2\pi$ radiaani. Vastav elektriline nurk

$$\alpha = p\alpha_{geom} 2\pi \text{ radiaani.}$$

Juhtmekeeru ühele pöördele kuluva aja vältel indutseeritakse p perioodi allikasisepinget, seega $t = pT$. Siit nurksagedus

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{p2\pi}{pT} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f .$$

Nurksageduse mõõtühik on rad/s = 1/s = s^{-1}.



Joonis 4.11. Siinuseline allikasisepinge: abstsissteljeks on ajatelg (a), elektrilise nurga telg elektrilistes kraadides (b) ja radiaanides (c). Perioodi määramisnäited (d ja e)

Amplituud. Vahelduvallikasisepinge, voolu või potentsiaalilangu maksimaalset väärtust (joonis 4.11) nimetatakse tema **amplituudväärtuseks** või **amplituudiks**. Valemites märgitakse neid indeksiga m vastava tähise juures, s.o U_{Am}, I_m, U_m.

Vahelduvvoolu efektiivväärtus (tegevväärtus). Elektriahelas oleva allikasisepinge, voolu või potentsiaalilangu väärtust igal erineval ajahetkel nimetatakse **hetkväärtuseks** ja tähistatakse väikeste tähtedega u_A, i, u.

Vahelduvallikasisepinge või -voolu üle on tema hetkväärtuse järgi otsustada ebamugav, sest need väärtused pidevalt muutuvad. Seepärast **hinnatakse vahelduvvoolu tõhusust nn efektiivväärtuse järgi.**

Vahelduvvoolu efektiivväärtuse all mõistetakse niisugust alalisvoolu väärtust, mis juhet läbides eraldab mingi aja (näiteks sekundi) jooksul **juhtmes niisama suure soojushulga (või teeb niisama suure töö) kui mainitud vahelduvvool**. Allikasisepinge, voolu ja potentsiaalilangu efektiivväärtust tähistatakse vastavalt U_A, I ja U.

Siinusvoolu efektiivväärtuse I ja amplituudväärtuse I_m vahel eksisteerib seos, mis avaldub valemiga

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$ millest

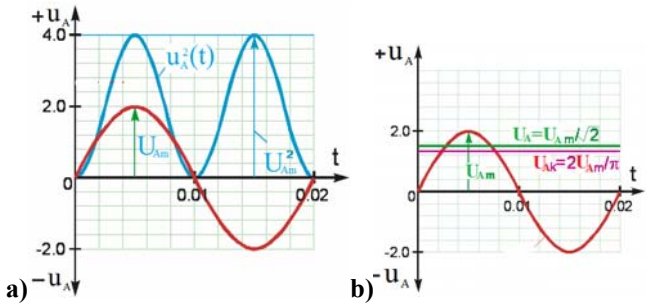
$$I_m = \sqrt{2}I \text{ või } I = 0{,}707 I_m.$$

Sarnaselt $U_m = \sqrt{2}U$ ja $E_m = \sqrt{2}E$

$U = 0{,}707 U_m$ ja $E = 0{,}707 E_m$.

Efektiivväärtust nimetatakse ka ruutkeskmiseks väärtuseks või tegevväärtuseks.

Joonisel 4.12a on esitatud allikasisepinge u_A ja allikasisepinge ruudu u_A^2 muutumine ajas. Kui allikasisepinge muutub siinuseliselt $u_A = U_{Am} \sin \omega t$ ja U_{Am} = 2,0 V ning sagedus f = 50 Hz, siis $\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314$. Allikasisepinge ruut u_A^2 muutub ajas sagedusega f = 100 Hz. Joonisel 4.12b on vaadeldud allikasisepinge efektiiv-, kesk- ja amplituudväärtust, kui U_{Am} = 2 V. Praktikas kasutatakse peamiselt allikasisepinge, voolu ja potentsiaalilangu efektiivväärtusi. Kui näiteks öeldakse, et pinge (allikaväljundpinge) on vahelduvvoolu valgustusvõrgus 230 V ja ahelas kulgeb vool 10 A, siis selles võrgus on pinge efektiivväärtus 230 V ja ahela voolu efektiivväärtus on 10 A.



Joonis 4.12. Siinusallikapinge ja selle ruutväärtuse sõltuvus ajast (a); allikapinge kesk- ja efektiiv- (ruutkeskmine) väärtus, kui $u_A = U_{Am}$ sin ωt ja U_{Am} = 2,0 V ning f = 50 Hz (b)

NÄIDE 4.4

Leida: siinuselise vahelduvvoolu efektiivväärtus, kui maksimaalväärtus on 100 A.

Lahendus

$$I = 0{,}707 I_m = 0{,}707 \cdot 100 = 70{,}7 \text{ A}.$$

NÄIDE 4.5

Leida: inimesel tekkiv maksimaalne potentsiaalilang, kui ta puutub vastu vahelduvvoolu elektrivõrgu kahte elektrijuhet 230 V pinge efektiivväärtuse puhul.

Lahendus

$$U_m = \sqrt{2} = 1{,}41 \cdot 230 = 324 \text{ V}.$$

Erinevates elektriseadmetes on vahelduvvoolu tekitatud elektrienergia ja mehaaniline töö võrdelised voolu ja pinge efektiivväärtustega. Enamik mõõteriistu mõõdavad voolu ja pinge efektiivväärtust.

NÄIDE 4.6

Leida: 50 Hz sagedusega vahelduvallikapinge hetkväärtused ajamomentidel t_1 = 0,01 s; t_2 = 0,001 s; t_3 = 0,000125 s ja t_4 = 0,015 s, kui pinge efektiivväärtus on U = 230 V.

Lahendus

Siinuspinge võrrand on $u = U_m$ sin ωt. Nurksagedus $\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314$ s^{-1}. Pinge amplituudväärtus $U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 230 = 324$ V. Seega ajahetkel t_1

$$u_1 = 324 \cdot \sin(314 \cdot 0{,}01) = 324 \cdot \sin\pi = 0 \text{ V}.$$

Edasise arvutuse tulemused esitame tabelina.

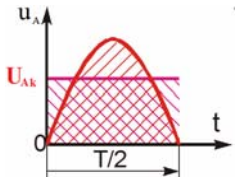
Tabel 4.2

Vahelduvallikapinge hetkväärtused

t, s	$t_1 = 10^{-2}$	$t_2 = 10^{-3}$	$t_3 = 1{,}25\cdot10^{-4}$	$t_4 = 1{,}5\cdot10^{-2}$
Nurk	180º	18º	2,25º	270º
u, V	0	100,1	12,7	–324

Siinusvoolu poolperioodi keskmine väärtus väljendub graafiliselt ristküliku kõrgusega, mille alus võrdub poolperioodi pikkusega $T/2$ ja ristküliku pindala võrdub voolukõvera poolt piiratud pindalaga (joonis 4.13)

$$I_k = \frac{1}{T/2}\int_0^{T/2} I_m \sin\omega t dt \approx \frac{2}{\pi} I_m \approx 0{,}638 I_m .$$



Joonis 4.13. Siinuselise allikapinge keskväärtuse selgitamine

Sarnaselt leitakse siinusallikasisepinge ja potentsiaalilangu keskväärtus $U_{Ak} = 2U_{Am}/\pi$ ja $U_k = 2I_m/\pi$. Keskväärtust mõõdavad alaldiga varustatud elektromehaanilised või numbrilised mõõteriistad.

NÄIDE 4.7

Antud: pistikupessa lülitatud voltmeeter näitab 230 V.

Leida: toitepinge poolperioodi keskväärtus.

Lahendus

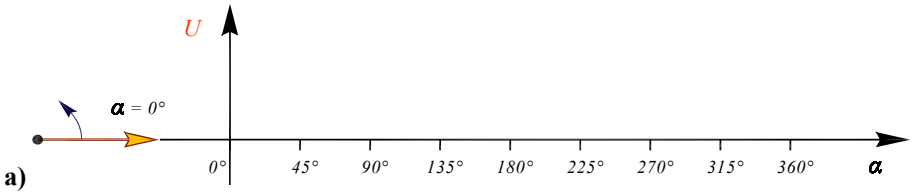
Voltmeeter näitab vahelduvpinge efektiivväärtust. Pinge amplituudväärtus $U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2}\cdot 230 = 325{,}3$ V. Keskväärtus $U_k = 2U_m/\pi = 207{,}2$ V.

Siinuselise elektromotoorjõu, voolu ja pinge kujutamine. Siinusseaduse järgi muutuvad allikasisepinged, voolud ja potentsiaalilangud esitatakse järgmiselt:

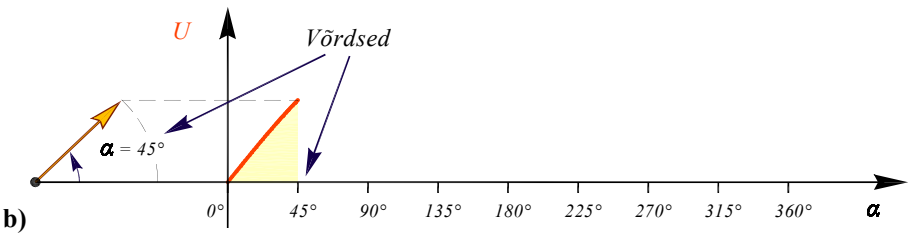
$$u_A = U_{Am}\sin(\omega t + \psi_{u_A}),\quad i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \text{ ja } u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

kus ψ_{u_A}, ψ_i ja ψ_u on **faasinurgad** hetkel $t = 0$ ehk **algfaasid.** Mitme ühesuguse sagedusega siinuselise suuruse koosvaatlemisel huvitavad meid nende faasinurkade vahed – **faasinihked. Pinge ja voolu faasinihet** tähistatakse $\varphi = \psi_u - \psi_i$. Ajas φ ei muutu ja on muutumatu koormuse puhul ahela parameetrite funktsioon.

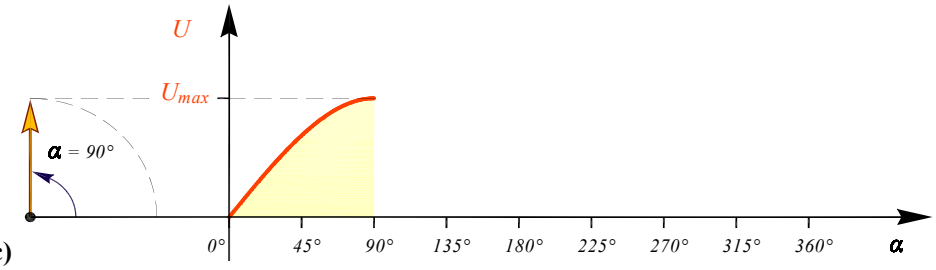
Siinussuuruste kujutamine raadiusvektorite (diagrammvektorite) abil. Vaatleme kahte raadiusvektorit pikkusega U_m ja I_m, mis pöörlevad Cartesiuse koordinaatsüsteemis vastu kellaosuti liikumissuunda (nurk)sagedusega ω = const ja ühele pöördele kuluva aja T (periood) jooksul pöörduvad nad nurga 2π võrra (joonis 4.14). Sel juhul muutub raadiusvektori projektsioon vertikaalteljele siinusseaduse järgi:



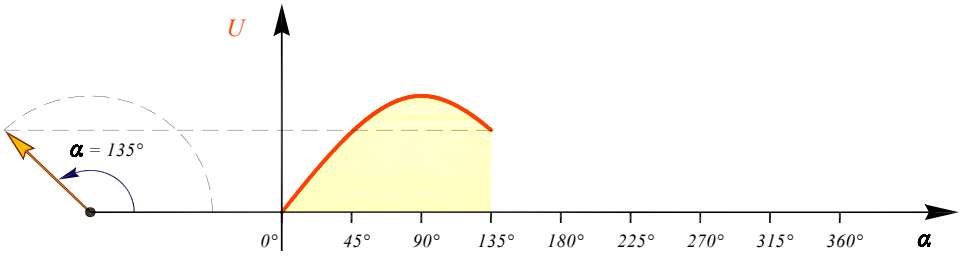
a)


U
Võrdsed
α = 45°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α

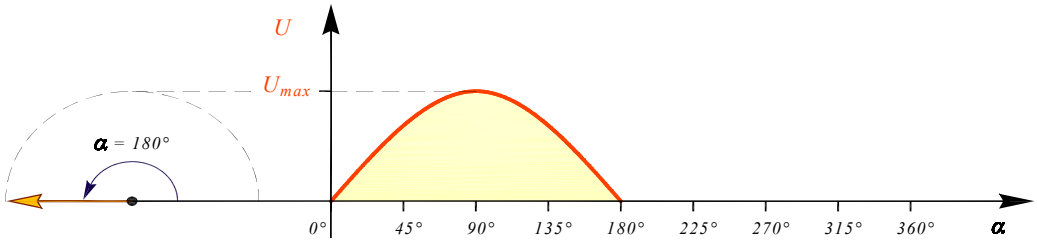
b)


U
Umax
α = 90°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α

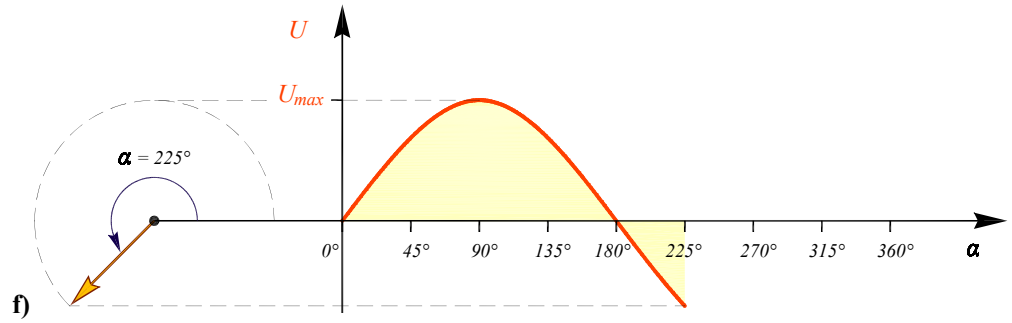
c)


U
α = 135°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α

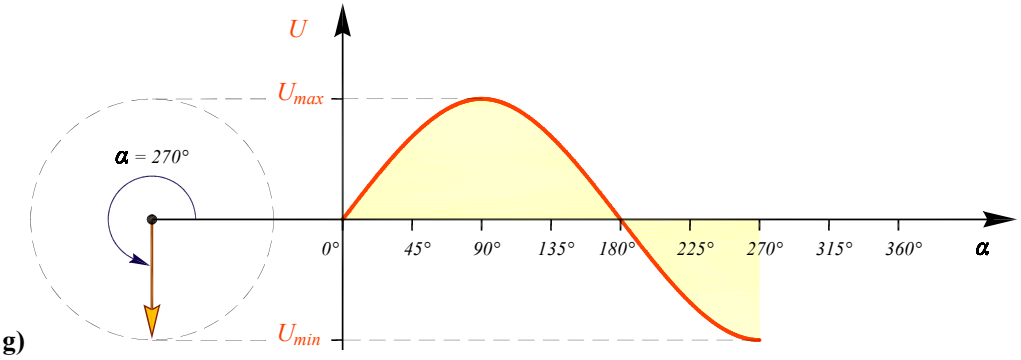
d)


U
Umax
α = 180°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α

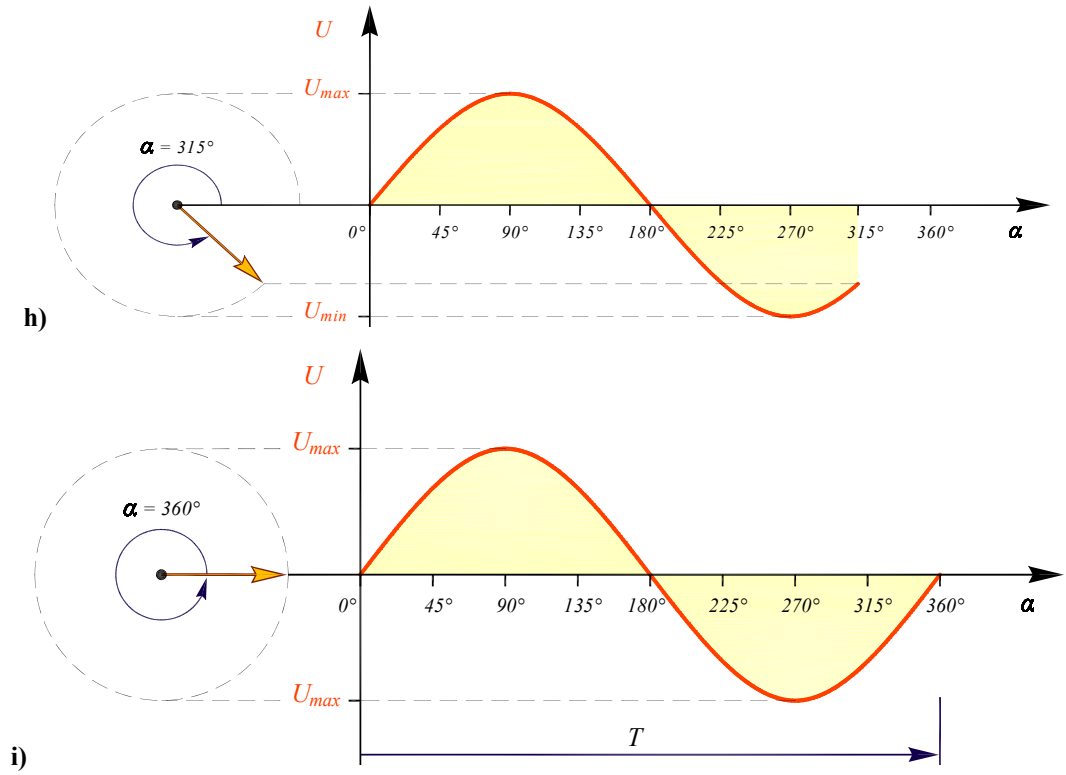
e)

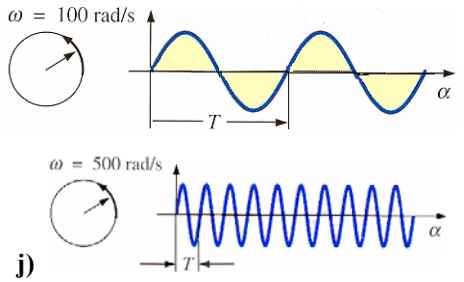

U
Umax
α = 225°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α

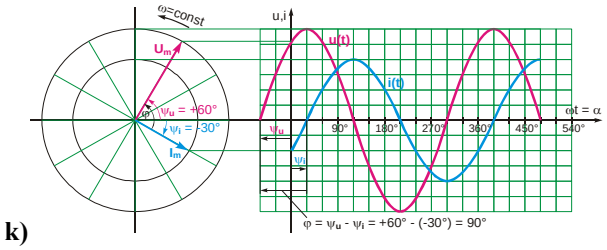
f)


U
Umax
α = 270°
0°
45°
90°
135°
180°
225°
270°
315°
360°
α
Umin

g)







Joonis 4.14. Siinussuuruste kujutamine raadiusvektorite abil

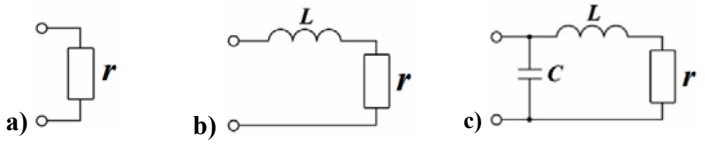
$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$, ja $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$. Seejuures on ajahetkel t_1 raadiusvektorid asendis, kus nurk $\alpha_u = \psi_u + \omega t_1$ ja $\alpha_i = \psi_i + \omega t_1$.

Joonisel 4.14k on pinge algfaas positiivne ($\psi_u = +60°$, kõver lõikab horisontaaltelge vasakul pool koordinaatide algust), aga voolu algfaas negatiivne ($\psi_i = -30°$, kõver lõikab horisontaaltelge paremal pool koordinaatide algust). Faasinihke nurk on positiivne ja võrdub $\varphi = \psi_u - \psi_i = 60 - (-30) = 90°$. Kuna siinussuurustel on harilikult teada nende efektiivväärtused, mis on $\sqrt{2}$ korda amplituudväärtustest väiksemad, siis raadiusvektorid pikkusega U ja I joonistavad (nurk)sagedusega $\omega = \text{const}$ pöörlemisel siinuselise pinge ja voolu, mille mõõtkava tegur erineb $\sqrt{2}$ korda. Siinussuuruste raadiusvektorite (diagrammvektorite) kogumit nimetatakse **vektordiagrammiks.**

4.3. Oomtakistus e aktiivtakistus (lühidalt takistus) vahelduvvooluahelas. Pinnanähtus

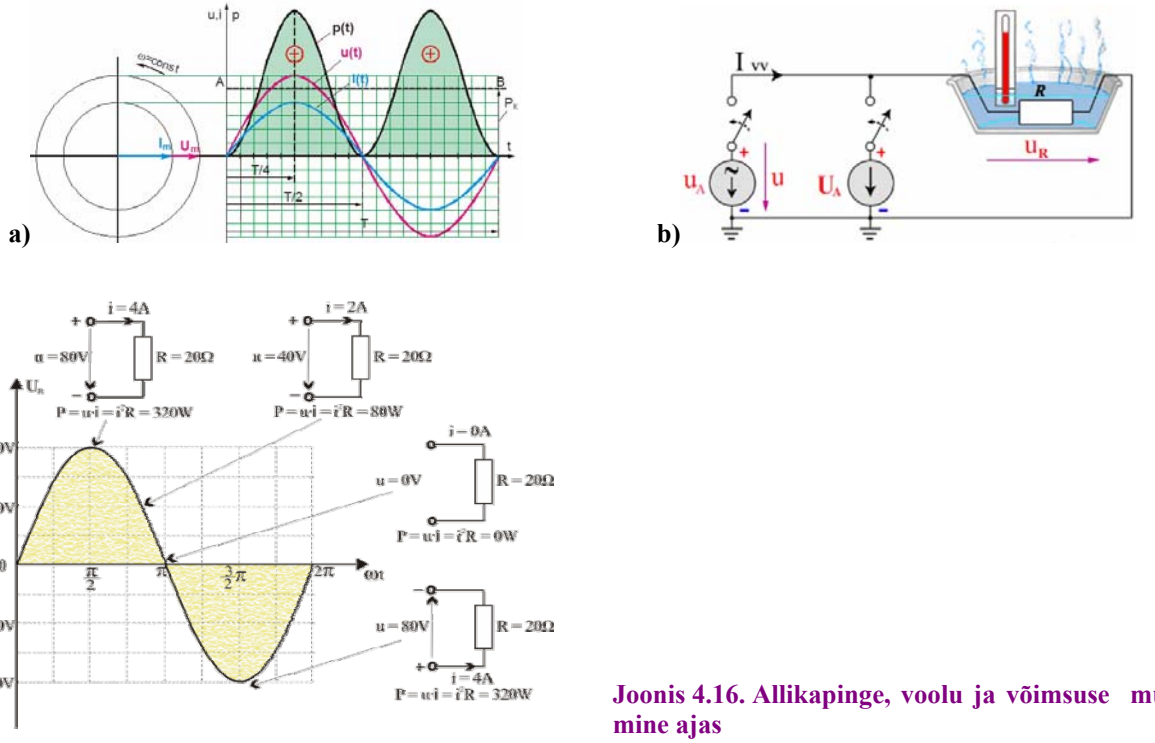
Vahelduvvooluahelas võib kõik takistid jagada kahte rühma. Takisteid, mis vahelduvvooluahelasse lülitatuna tarbivad elektrienergiat (muundavad elektrienergia teiseks energialiigiks) nimetatakse **aktiivtakistiteks** e oomtakistiteks. Takisteid, mis vahelduvvooluahelas ei tarbi elektrienergiat, nimetatakse **reaktiivtakistusteks**.

Aktiivtakistus on kõigil elektritarbijatel, kus elektrienergia muundatakse teisteks energialiikideks: juhtmed, lahused ja gaasid (neil on oomiline takistus). Reaktiivtakistus iseloomustab elektri- ja magnetväljaga ahelaelemente, nagu induktiivpoolid, kondensaatorid jt. Füüsikaliselt realiseeritav aktiivtakistus on reostaat – isoleermaterjalist alusele keritud takistustraadist pool. Selle aseskeem aga oleneb sagedusest (joonis 4.15). Madalatel sagedustel (a) piisab ainult oomtakistuse r arvessevõtmisest, keskmistel (b) arvestatakse ka reostaadi keerdusid haaravat ajas muutuvat aheldusvoogu ehk induktiivsust (L) ja kõrgetel (c) tuleb arvestada ka pooli keerdudevahelisi elektrivälju (mahtuvust C).



Joonis 4.15. Reostaadi aseskeem madalatel (a), keskmistel (b) ja kõrgetel (c) sagedustel

Voolu ja pinge muutumine ajas. Aktiivtakisti lülitamisel vahelduvvooluahelasse (joonis 4.16b) muutub takistis kulgev vool sama seaduspärasuse järgi kui vahelduvvooluallikasisepinge. Järelikult muutuvad **vool** ja **allikaväljundpinge** siinuseliselt, neil on ühesugune periood, nad saavutavad üheaegselt maksimaalväärtuse ja läbivad üheaegselt nulli (joonis 4.16b). Niisuguse iseloomuga kahte siinuseliselt muutuvat suurust nimetatakse **faasilt kokkulangevaks e faasis olevateks**. Seega aktiivtakistuse lülitamisel vahelduvvooluahelasse on allikapinge U ja vool I faasis. Samuti langevad kokku vool I ja potentsiaalilang U_R tarbija takistil r. Kui voolu ja allikapinge vektorite suund erineb 180º võrra, on nad **vastasfaasis**.



Joonis 4.16. Allikapinge, voolu ja võimsuse muutumine ajas

Seos voolu I ja allikapinge U efektiivväärtuste (võrdub tarbija potentsiaalilanguga) vahel leitakse Ohmi seadusega, s.o $I = \frac{U}{r}$. Siin on r oomtakistus, Ω. Joonisel 4.16a on võetud allikapinge ja voolu algfaas nulliks, s.o $u = U_m \sin \omega t$ ja $i = I_m \sin \omega t$. Jooniselt 4.16b on näha, **et oomtakistit *R* läbiv näiteks 1 A suurune alalisvool kuumutab vett täpselt samapalju kui 1 A suuruse efektiivväärtusega vahelduvvool.** Joonis 4.16c iseloomustab, kuidas muutub ajas oomtakistis eralduv võimsus, mis muundub soojusenergiaks. Allikast tarbijasse kandub energia kaks korda suurema sagedusega kui toitepinge sagedus. Võimsuse hetkväärtused joonisel 4.16a muutuvad siinuseliselt, kusjuures siinuse telgjoon AB on amplituudväärtuse võrra ajateljest ülalpool.

Elektrivõimsus. Aktiivtakistil muundatava (kulutatava) elektrivõimsuse võib leida voolu ja **potentsiaalilangu** hetkväärtuste korrutisest $p = ui$ (nn hetkvõimsus). Nullalgfaaside korral hetkvõimsus

$$p = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t) .$$

Näeme, et see võimsus ei ole konstantne suurus, nagu alalisvoolu korral, vaid muutub joonisel 4.16a näidatud kõvera järgi. Sellelt kõveralt on näha, et hetkvõimsus muutub oma keskmise väärtuse P_k ümber siinusseaduse järgi. Kõik hetkvõimsuse väärtused on positiivsed ja muutuvad voolu ja pinge sageduse suhtes kahekordse sagedusega.

Füüsikaliselt tähendavad võimsuse positiivsed väärtused seda, et elektrienergia antakse toiteallikalt tarbijale. Erinevalt alalisvoolust saabub vahelduvvoolu korral energia allikast tarbijasse ebaühtlase kiirusega, kasvades nullist maksimumini ja kahanedes nullini. Võrreldes toitepingega toimub selline impulsijadataoline energiaülekanne kaks korda suurema sagedusega. Võimsuse maksimaalväärtus on määratud pinge ja vooluamplituudide korrutisega $P_m = U_m I_m = \sqrt{2}U\sqrt{2}I = 2UI$.

Praktiliselt otsustatakse elektrivoolu poolt tehtava töö A üle mitte maksimaalvõimsuse, vaid keskmise võimsuse P_k järgi, kuna seda tööd võib avaldada keskmise võimsuse P_k ja voolu kulgemise aja t korrutisena $A = P_k t$. **Aktiivtakistil muundatav (kulutatav) keskmine võimsus võrdub potentsiaalilangu ja voolu efektiivväärtuste korrutisega**

$$P_k = UI .$$

Praktikas nimetatakse aktiivtakistusel muundatavat keskmise võimsuse väärtust harilikult aktiivvõimsuseks või ka lihtsalt võimsuseks ja tähistatakse tähega P ilma indeksita.

NÄIDE 4.8

Antud: vahelduvvooluahelasse pingega $U = 230$ V (efektiivväärtus) on lülitatud elektrilamp takistusega $r = 500\ \Omega$.

Leida: lambi vool ja tarbitav võimsus.

Lahendus

Lambi vool (efektiivväärtus) $I = \dfrac{U}{r} = \dfrac{230}{500} = 0{,}46$ A.

Voolu maksimaalväärtus (hetkel, kui pingel on maksimaalväärtus) $U_m \sqrt{2}U = 1{,}41U = 324{,}3$ V.

$$I_m = \sqrt{2}I = 1{,}41I = 0{,}65 \text{ A}.$$

Lambi poolt tarbitav võimsus (keskväärtus) $P = UI = 230 \cdot 0{,}46 = 105{,}8$ W.

Võimsuse maksimaalväärtus (hetkel, kui vool ja potentsiaalilang on maksimaalsed)

$$P_m = U_m I_m = 324{,}3 \cdot 0{,}65 = 210{,}8 \text{ W}.$$

NÄIDE 4.9

Antud: välklamp töötab kondensaatorilt mahtuvusega 500 µF pingel 1000 V.

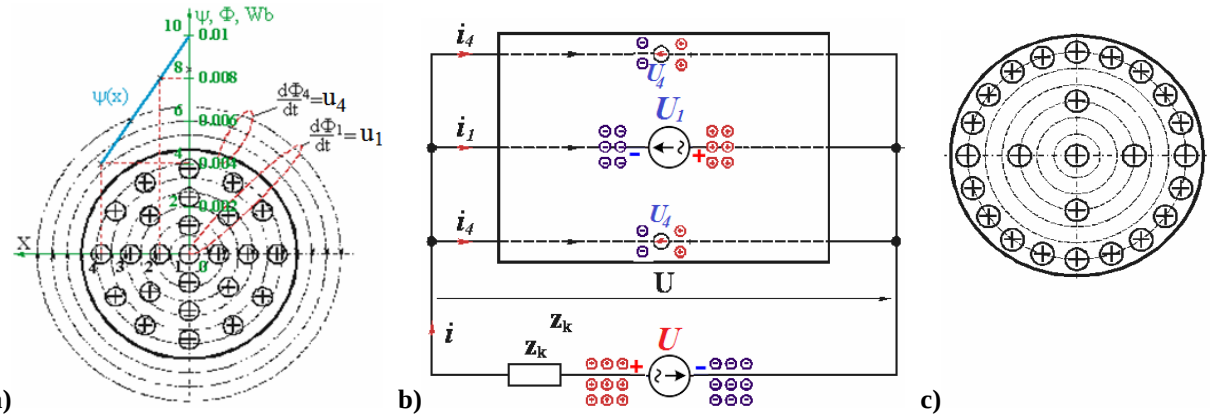
Leida: milline on välklambis eralduv energia?

Lahendus

Kondensaatoris salvestatud energia $W = CU^2/2 = 500 \cdot 10^{-6}\text{F}(10^3)\text{V}^2 = 250$ Ws.

Pinnanähtus ehk pinnaefekt. Märgime, et juhtmete aktiivtakistus on vahelduvvooluahelas alati nende oomilisest takistusest (mõõdetud alalisvooluga) suurem. Vahelduvvool ei jagune nagu alalisvool (joonis 4.17a) ühtlaselt kogu oma

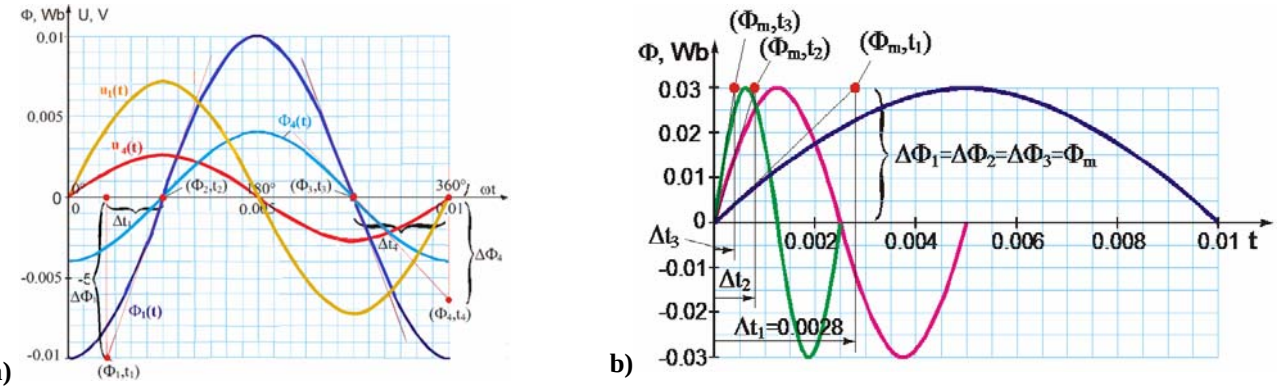
ristlõike ulatuses, vaid on osaliselt tõrjutud juhtme pinnale (joonis 4.17b). Seetõttu väheneb juhtme kasulik ristlõige ja suureneb tema takistus vahelduvvoolule. See **nähtus kannab pinnanähtuse nime.**



Joonis 4.17. Alalisvool jaguneb ühtlaselt kogu juhtme ristlõike pindalal (a). Vahelduvvool on tõrjutud juhtme pinnale ja kulgeb peamiselt juhtme välikihis (b, c)

Vahelduvvoolu ebaühtlast jaotumist juhtme ristlõikes saab selgitada tasakaalustavate allikapingete (nende vastassuunalise elektrivälja) mõjuga, mille indutseerib juhtmes kulgeva voolu tekitatud magnetväli. See magnetväli mõjub mitte ainult juhet ümbritsevas ruumis, vaid ka juhtme enese sees. Seepärast on juhtme telgjoonele lähemal olevad mõttelised vooluniidid (voolutorud) aheldunud suurema magnetvooga kui juhtme pinnale lähemad voolutorud ja sisemistes kihtides indutseeritud allikapinged on suuremad kui välimistes. Joonis 4.17 iseloomustab voolu jagunemist alalis- ja vahelduvvoolu korral. Olgu juhtmes alalisvool (a). Siis jaguneb vool ühtlaselt kogu ristlõike ulatuses. Vaadeldud näites on keskmine vooluniit 1 aheldunud kümne, niit 2 kaheksa, niit 3 kuue ja niit 4 magnetväljajoonega. Kui üks magnetväljajoon vastab tinglikult näiteks magnetvoole 0,001 Wb, siis niiti 1 haarav magnetvoog on 10·0,001 = 0,01 Wb, aga niiti 4 – 0,004 Wb.

Tekkiv allikasisepinge on võrdeline vooluniidiga aheldunud magnetvoo muutumise kiirusega. Ajas muutumatu alalisvoolu korral on magnetvoo muutumiskiirus null. Seepärast võrdub nulliga ka vastav juhtmesisene allikapinge. Kui meie näites vooluniidiga ahelduv magnetvoog muutub koosinusseaduse järgi sagedusega 100 Hz, siis joonisel 4.18 on aheldusvoo muutumise kõverad $\Phi_1(t)$ ja $\Phi_4(t)$ esimesele ning neljandale vooluniidile. Leiame amplituudväärtused sarnaselt joonisega 4.5.



Joonis 4.18. Allikasisepinge indutseerimine voolutorukeses 1 ja voolutorukeses 4 juhtme pinna lähedal (a). Allikasisepinge amplituudväärtuse sõltuvus toitepinge (voolutorukese aheldusvoo) sagedusest (b). f_1 = 50 Hz, f_2 = 200 Hz, f_3 = 400 Hz

$$u_{t_1} = \frac{d\Phi_1}{dt} \approx \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{0 - 0{,}01}{0{,}0025 - 0{,}001} = \frac{-0{,}01}{0{,}0015} = -6{,}7 \text{ V}.$$

Vooluniidil 1 on allikasisepinge amplituudväärtus U_{m1} = -6,7 V. Edasi

$$u_{t_4} \approx \frac{\Delta\Phi_4}{\Delta t_4} = \frac{\Phi_4 - \Phi_3}{t_4 - t_3} = \frac{0{,}0063 - 0}{0{,}01 - 0{,}0075} = \frac{0{,}0063}{0{,}0025} = 2{,}52\ \text{V},$$

s.o $U_{m4} = 2{,}52$ V, mis mainitud näite korral on 2,7 korda väiksem kui U_{m1} ehk siin $U_{m1} \approx 2{,}7\ U_{vm4}$. Tinglikult illustreerib seda ka joonis 4.17b, kus allikasisepinge u_1 korral on allika klemmidel kolm korda rohkem laenguid kui u_4 korral. Sellele vastavalt toimub torukese 1 voolu i_1 nõrgenemine võrreldes torukese 4 vooluga i_4.

Kuna voolujuhi endainduktsiooni allikasisepinge takistab voolu muutumist, siis vool püüab kulgeda seal, kus tasakaalustav allikasisepinge on väiksem, s.o kulgeb peamiselt juhtme pinnakihtides. Mida suurem on voolu sagedus, seda suurem allikasisepinge indutseeritakse juhtme sisekihtides ja seda enam tõrjutakse vool pinnale (vt. joonis 4.18b).

Indutseeritud allikasisepinge amplituudväärtus määratakse magnetvoo muutumise maksimaalse kiiruse (funktsiooni puutuja nurgateguri (kaldenurga tangensi) suuruse) järgi, mis on magnetvoo funktsiooni nulli läbimise hetkel. Vaatleme amplituudväärtuse avaldist kolmel juhtumil, kui neist kõigil on magnetvoo amplituudväärtused võrdsed, kuid sagedused erinevad, kusjuures $f_1 < f_2 < f_3$. Joonis 4.18b on võetud $f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 200$ Hz ja $f_3 = 400$ Hz. Tõmmates kolm puutujat kuni lõikumiseni abijooneni Φ_m, saame kõigile kolmele juhtumile

$$\Delta\Phi_1 = \Delta\Phi_2 = \Delta\Phi_3 = \Phi_m - \Phi_0 = \Phi_m - 0 = \Phi_m.$$

Leiame vastavad aja juurdekasvud Δt.

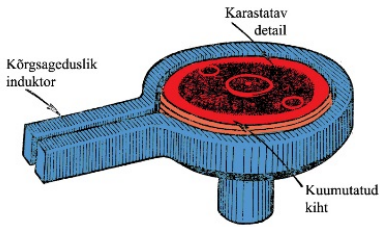
Siin $\Delta t_1 = t_1 - t_0 = 0{,}0028 - 0 = 0{,}0028$ s; $\Delta t_2 = t_2 - t_0 = 0{,}0008 - 0 = 0{,}0008$;

$\Delta t_3 = t_3 - t_0 = 0{,}00035 - 0 = 0{,}00035$ s. Kui $\Phi_m = 0{,}003$ Wb, siis

$$U_{m1} \approx \left|\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1}\right| = \left|\frac{0{,}003}{0{,}0028}\right| = 1{,}07\,\text{V}, \qquad U_{m2} \approx \left|\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t_2}\right| = \left|\frac{0{,}003}{0{,}0008}\right| = 3{,}75\,\text{V},$$

$$U_{m3} \approx \left|\frac{\Delta\Phi_3}{\Delta t_3}\right| = \left|\frac{0{,}003}{0{,}00035}\right| = 8{,}6\,\text{V}.$$

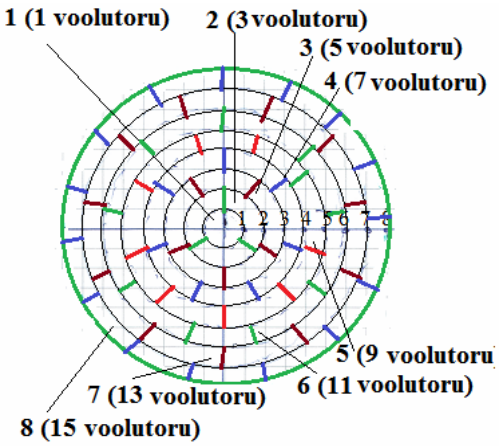
Tööstusseadmetes kasutatava madala sageduse (50 Hz) korral on juhtmete takistuse suurenemine praktiliselt tühine ja nende aktiivtakistuse võib lugeda oomtakistusega võrdseks. Kuid raadiotehnikas, televisioonis ja kõrgsageduslikes seadmetes kasutatavate kõrgsageduste korral suureneb aktiivtakistus sedavõrd, et tuleb rakendada spetsiaalseid meetmeid selle vähendamiseks. Sel eesmärgil ei valmistata kõrgsageduslike seadmete juhtmeid mitte traadist, vaid tehakse need õõnsatest torudest (nn lainejuhid). Kõrgsagedusliku vahelduvvoolu omadusel kulgeda peamiselt juhtmete pinnal põhinevad mitmesugused kõrgsagedusliku karastamise ja termotöötluse meetodid (joonis 4.19). Pinnanähtus ilmneb ka alalisvooluelektrimasinate töös, eriti veomootorites, põhjustades lisakadusid ankrujuhtmetes.



Joonis 4.19. Kõrgsageduse korral indutseeritakse allikasisepinged ja nendest põhjustatud pöörisvoolud peamiselt metalli pinnakihis

Voolu jagunemine ja voolujuhi aseskeem. Võtame voolujuhi telgjoonel ühe silindrilise voolutorukese, mida vaatame õõnesvoolutorukesena, mille siseraadius $R_0 = 0$. Selle voolutorukese välisraadius on R_1 ja ristlõike pindala on S_1. Alalisvoolu (AV) puhul on seal voolutihedus j_1. Jaotame juhi telgjoonel paikneva voolutoru ümbritseva ümara silindrilise voolujuhi mõtteliselt järgnevateks kontsentrilisteks õõnessilindrilisteks kihtideks, kusjuures telgjoonepoolse kihi välispind moodustab järgmise kihi sisepinna. Iga järgmise õõnessilindri raadius on telgjoonel paikneva ümara voolutoru raadiuse R_1 võrra suurem. Seega on teise õõnessilindri välisraadius $2R_1$, kolmandal $3R_1$, neljandal $4R_1$ jne (joonis 4.20). Siis saame leida keskmise, telgjoonel paikneva, voolutoru ja seda ümbritsevate õõnessilindriliste kihtide ristlõikepindalad. Seega keskmisel on $S_1 = \pi R_1^2$; teise õõnessilindri ristlõike pindala

$S_2 = \pi(2R_1)^2 - \pi R_1^2 = 3\pi R_1^2 = 3S_1$; kolmandal $S_3 = \pi(3R_1)^2 - S_2 = 6\pi R_1^2 = 6S_1$; neljandal $S_4 = \pi(4R_1)^2 - S_3 = 10\pi R_1^2 = 10S_1$ jne. Tabelis 4.3 on kaheksast õõnessilindrist koosneva voolujuhi raadiused, ristlõikepindalad ja voolutorude arv igaühes.



Joonis 4.20. Silindrilise voolujuhi jagamine kontsentriliste ringide abil mõttelisteks kontsentrilisteks kihtideks – õõnessilindriteks

Tabel 4.3

Voolutorude jagunemine kontsentrilistes õõnessilindrites

n	Raadius	Õõnessilindri ristlõikepind	Õõnessilindri ristlõike suhteline pindala	Voolutorukeste arv kihis *m = n + 2*
I	R_1	$S_1 = \pi R_1^2$	$S_{K1} = S_1$	1
II	$2R_1$	$S_2 = 4S_1$	$S_{K2} = S_2 - S_1 = 4S_1 - S_1 = 3S_1$	3
III	$3R_1$	$S_3 = 9S_1$	$S_{K3} = (9-4)S_1 = 5S_1$	5
IV	$4R_1$	$S_4 = 16S_1$	$S_{K4} = S_4 - S_3 = (16-9)S_1 = 7S_1$	7
V	$5R_1$	$S_5 = 25S_1$	$S_{K5} = S_5 - S_4 = (25-16)S_1 = 9S_1$	9
VI	$6R_1$	$S_6 = 36S_1$	$S_{K6} = S_6 - S_5 = (36-25)S_1 = 11S_1$	11
VII	$7R_1$	$S_7 = 49S_1$	$S_{K7} = S_7 - S_6 = (49-36)S_1 = 13S_1$	13
VIII	$8R_1$	$S_8 = 64S_1$	$S_{K8} = S_8 - S_7 = (64-49)S_1 = 15S_1$	15
n	nR_1	$S_n = n^2 S_1$	$S_{Kn} = S_n - S_{n-1} = \left[n^2 - (n-1)^2\right]S_1$	n + 2

Leiame igale õõnessilindrile mahtuva voolutorukeste arvu *m*, eeldades, et iga sinna mahutatava voolutorukese ristlõike pindala on võrdne keskmise silindrilise voolutorukese ristlõike pindalaga S_1. Seega mahub teisele õõnessilindrile 3 voolutorukest, kolmandale 5, neljandale 7 jne (joonis 4.20 ja tabel 4.3).

Vaatleme kolme erineva kontsentriliste õõnessilindrite (kihtide) arvuga (nimivooluga) silindrilist voolujuhti. Keskmine voolutoruke on võetud tabelis 4.4 tinglikult esimeseks õõnessilindriks, mille sisesilindri raadius *R* = O. Esimeses voolujuhis on 8, teises 10 ja kolmandas 15 mõttelist juhisisest kontsentrilist silindrit, millel kõikide seina paksus on võrdne telgjoonel paikneva mõttelise voolutorukese raadiusega R_1. Teise õõnessilindri välisraadius on $2R_1$, kolmandal $3R_1$ ning *n*-dal nR_1.

Tabelist 4.3 on näha, mitu keskmise voolutorukese ristlõikepindalaga voolutorukest igasse õõnessilindrisse mahub ja ka voolujuhi voolutorukeste koguarv. Kui eeldada, et igas voolutorukeses on voolutihedus võrdne ja iga voolutoru ristlõige on 1 mm² ning voolutorukese nimivool on 1 A, siis esimese voolujuhi nimivool on 64 A, teisel 100 A ja kolmandal 225 A ning ristlõiked vastavalt 64, 100 ja 225 mm². Seega on kogu voolujuhi ristlõige võrdne kõikide voolutorukeste ristlõigete summaga. Seega on näitena vaadeldavate silindriliste voolujuhtide läbimõõdud: 9, 11,3 ja 17,1 mm.

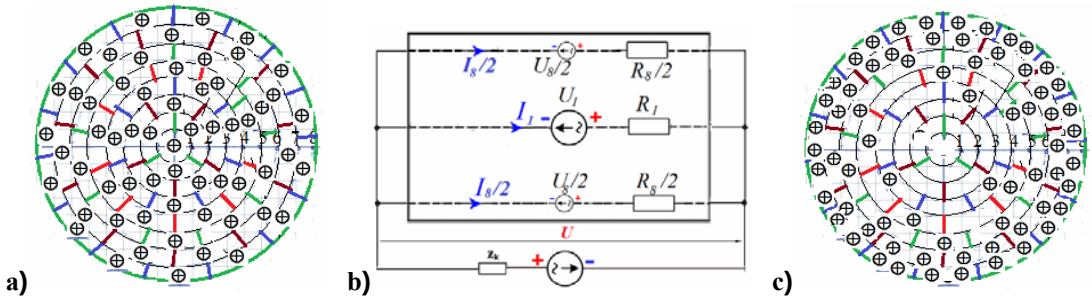
Märkus: *n* – mõttelisest õõnessilindrilist koosneva voolujuhi voolutorude koguarv võrdub n^2.

Tabel 4.4

Kolme erineva nimivooluga (64, 100 ja 225A) voolujuhi voolutorude arv kihtides ja keskmise voolutoru ning iga õõnessilindri (kihi) aheldusvoo jagunemine voolujuhis

Kihi jrk	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**
Voolutorukeste arv	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
Voolujuht, kui *n* = 8	64	63	60	55	48	39	28	15							
Voolujuht, kui *n* = 10	100	99	96	91	84	75	64	51	36	19					
Voolujuht, kui *n* = 15	225	224	221	216	209	200	189	176	161	144	125	104	81	56	29

Kui eeldame, et vool 1A tekitab magnetvoo Φ_1, mida saame kujutada ühe väljajoonega, siis 8 kihi korral haarab telgjoonel paiknevat voolutoru 64 jõujoont ehk selle voolutorukese aheldusvoo moodustavad kõik 8 voolutorude kihti ehk $\Psi_{n=(1\ldots8)} = 64\Phi_1$ (joonis 4.21), 10 kihi korral 100 jõujoont ehk aheldusvoog $\Psi_{n=(1\ldots10)} = 100\Phi_1$ ning 15 kihi korral 225 väljajoont ehk aheldusvoog $\Psi_{n=(1\ldots15)} = 225\Phi_1$.



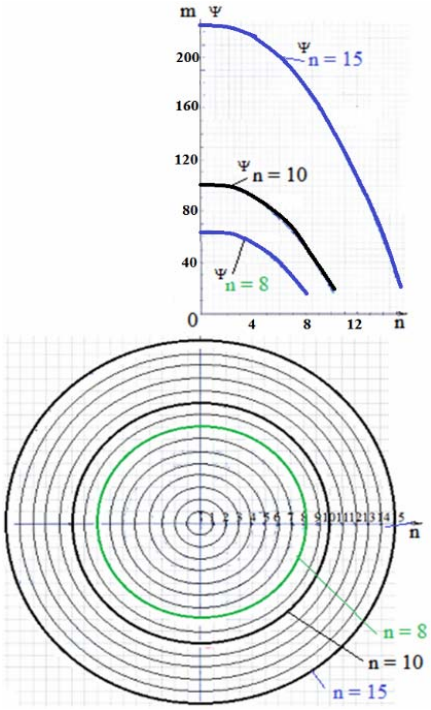
Joonis 4.21. Silindrilise voolujuhi jagamine kontsentriliste ringide abil mõttelisteks kontsentrilisteks kihtideks – õõnessilindriteks. Voolutorude jagunemine õõnessilindrites alalisvoolu (a) ja vahelduvvoolu (c) korral. Voolupiiravad mõjurid voolujuhis (b)

Valime alalisvoolust lähtudes keskmise voolutorukese raadiuse sellise, et voolutorukeses oleks vool 1 A. Olgu nimivoolutiheduseks j = 1 A/mm². Vool 1 A põhjustab magnetvoo Φ_1. Teises õõnessilindris on 3 voolutorukest ja vool 3A ning voolu tekitatud magnetvoog $3\Phi_1$, kolmandas vool 6A ja voog $6\Phi_1$; neljandas vool 10 A ja voog $10\Phi_1$ jne.

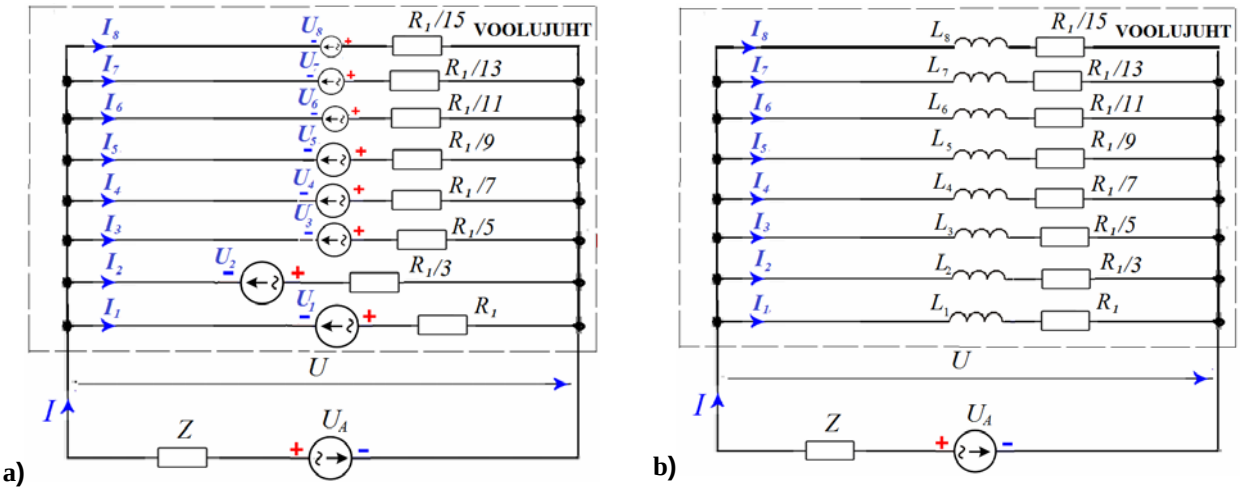
Kaheksandas 15 A ja voog $15\Phi_1$. Kui võrdleme kolme varianti, siis 8 kihi korral haarab väliskihti (õõnessilindrit) 15 väljajoont, 10 kihi korral 19 väljajoont ning 15 kihi korral 29 väljajoont (joonis 4.21). Joonis 4.21 iseloomustab voolu jagunemist alalis- ja vahelduvvoolu korral. Kui juhtmes on alalisvool (a), siis jaguneb vool ühtlaselt kogu ristlõike ulatuses. Vahelduvvoolu ebaühtlast jaotumist (c) juhtme ristlõikes võib siin samuti seletada juhtme allikapingete mõjuga, mille indutseerib juhtmes kulgeva voolu tekitatud ajas muutuv magnetväli. Juhtme telgjoonele lähemal olevad mõttelised voolutorud (vooluniidid) on aheldunud suurema aheldusvooga, suurema arvu magnetvoo väljajoontega, kui juhtme pinnale lähemad voolutorud ja sisemistes kihtides indutseeritud allikasisepinged on suuremad kui välimistes (b). Kui üks magnetväljajoon vastab tinglikult näiteks magnetvoole 0,001 Wb, siis keskmist voolutorukest 1 haarav magnetvoog 8 kihi korral on 64·0,001 = 0,064 Wb, aga väliskihi voolutorukesi haarab 4,3 korda väiksem voog – 0,015 Wb. Järgnevalt on 10 kihi korral keskel 0,1 Wb, aga väliskihi voolutorusid haarab 5,3 korda väiksem voog – 0,019. Lõpuks 15 kihi korral keskel 0,225 Wb, aga väliskihi voolutorusid haarab 7,8 korda väiksem voog – 0,029 Wb.

Õõnessilindrite aheldusvoo jaotust iseloomustab joonis 4.22. Igas õõnessilindris on indutseeritud allikapinge võrdne õõnessilindrit aheldava magnetvoo muutumise kiirusega. Ajas muutumatu alalisvoolu korral on magnetvoo muutumiskiirus null. Seepärast võrdub nulliga ka vastav allikasisepinge. Silindrilise voolujuhi aseskeemi võib kujutada nii, nagu joonisel 4.23 näidatud. Kuna igas kihis on erinev voolutorude arv, siis takistus on igal kihil niipalju kordi väiksem keskmise voolutoru takistusest r_1, kui palju mahub sinna voolutorusid. Seega on kaheksa kontsentrilise õõnessilindrilise voolutoru korral iga järgneva õõnessilindri takistus võrreldes keskmise voolutoru takistusega R_1 vastavalt 3, 5, 7, 9, 11, 13 ja 15 korda väiksem. See iseloomustab aseskeemi õõnessilindrite oomilise takistuse muutust kihilt kihile. Teine olulisem õõnessilindri aseskeemi element on endainduktsiooni allikapinged $U_1 \ldots U_8$ (joonis 4.23a).

Endainduktsiooni allikapinge u_1 hetkväärtus on määratud iga õõnessilindri voolutorukesi haarava aheldusvoo muutumiskiirusega.



Joonis 4.22. Kolme erineva silindrilise voolujuhi mõtteliste kontsentriliste õõnessilindrite aheldusvoo jaotus olenevalt nende kaugusest keskmisest voolutorust. Voolujuhi õõnessilindrite arv on 8, 10 ja 15



Joonis 4.23. Silindrilise voolujuhi elektriline aseskeem: a – allikasisepinge indutseerimine joonisel kujutatud kaheksas kontsentrilises õõnessilindris ja nende silindrite takistused alalisvoolule; b – ideaalsete *RL*-elementidega silindrilise voolujuhi elektriline aseskeem

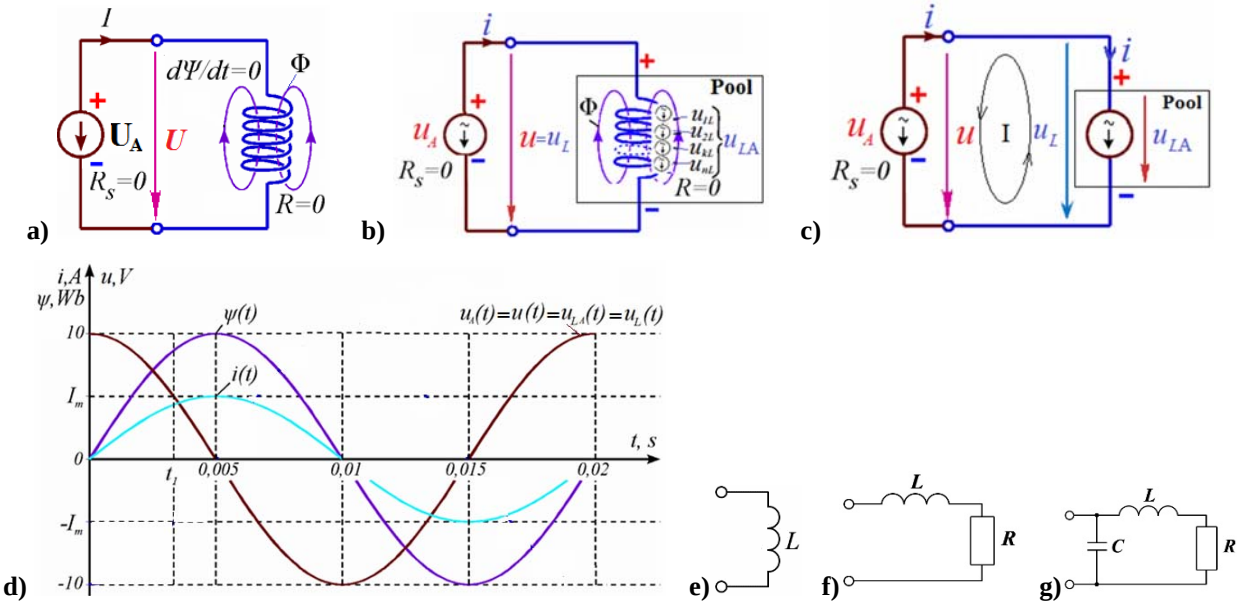
Keskmise voolutoru avaldis on $u_1 = \frac{d\Psi_{1...8}}{dt} = w\frac{d\Phi_{1...8}}{dt}$. Siin $d\Psi_{1...8}$ on juhi keskel paikneva kõigi kaheksa õõnessilindri vooludest põhjustatud aheldusvoog. Järgnevate õõnessilindrite jaoks on avaldised sarnased. Näiteks teise õõnessilindri puhul $u_2 = \frac{d\Psi_{2...8}}{dt} = w\frac{d\Phi_{2...8}}{dt}$ jne. Lisaks aheldusvoo suurusele on määrava tähtsusega toiteallika töösagedus: mida suurem sagedus, seda suurem on aheldusvoo muutumise kiirus ja vastavalt ka n-kihi u_n väärtus.

Kasutades **juhi induktiivsuse** L mõistet, mis näitab, kui suur endainduktsiooni allikapinge tekib selles juhis voolu ühikulisel muutumisel ajaühiku jooksul, saame joonisel 4.23b kujutatud *RL*-elementidega aseskeemi. Kasutades juhi induktiivsuse *L* mõistet, saab avaldada allikapinge hetkväärtuse järgneva võrrandi abil: $u_1 = \frac{d\Phi}{dt} = L\frac{di}{dt}$.

Induktiivsus *L* ehk **endainduktsiooni tegur** võrdetegur magnetvoogu Φ põhjustava voolu *I* vahel. Seega, $\Phi = LI$.

4.4. Induktiivpool vahelduvvooluahelas

Ideaalse pooli tööpõhimõte. Olgu meil idealiseeritud pool, mille oomtakistus võrdub nulliga ($r = 0$). Kui me ühendaksime selle pooli alalisvooluallikaga (joonis 4.24a), siis tekiks ahelas püsitalitluses lõpmata suur vool $I = \frac{U_A}{r_\Sigma} = \frac{U_A}{0} = \infty$ (eeldusel, et toiteallikas on samuti ideaalne – sisetakistus $r_S = 0$). Kui me sama pooli ühendame vahelduva sisepingeallikaga (joonis 4.24b), siis pole vool enam lõpmata suur, vaid oleneb allika sagedusest ja omab mingit kindlat väärtust. Mis põhjustab voolu vähenemise poolis, kui allikasisepinge väärtus mõlema lülituse korral on võrdne? Igas elektriahelas valitseb igal hetkel tasakaal. Jälgime tasakaalu teket joonisel 4.24b, c kujutatud lülituses. Muutugu allikasisepinge hetkväärtused siinuseliselt. Olgu näiteks hetkel $t = 0$ $u_A = U_{Am} = 10$ V ning allikasisepinge sagedus 50 Hz. Allikasisepinge muutumine ajas u_A (t) on kujutatud joonisel 4.24d.



Joonis 4.24. Induktiivpool alalisvoolu (a) ja vahelduvvoolu (b, c) korral. Lülituses b ja c on fikseeritud vahelduva toiteallikasisepinge, voolu, magnetvoo ja pooli allikasisepinge suund positiivse pooleperioodi ajal. Allika u_A, pooli voolu i ja aheldusvoo Ψ ning pooli allikasisepinge u_{Ls} muutumine ajas (d). Induktiivpooli aseskeemid madalatel (e), keskmistel (f) ja kõrgetel (g) sagedustel

Toiteallikasisepinge muutumise kiirus, mis kutsub esile laengu muutumise kiiruse ajahetkel $t = 0$, võrdub nulliga (puutuja on paralleelselt ajateljega) $du_A/dt = 0$ ning laengu muutumiskiirus $dQ/dt = 0$ ehk voolu hetkväärtus võrdub nulliga $i = dQ/dt = 0$. Järgneva 0,005 s möödudes saavutab allikasisepinge muutumise kiirus maksimaalse väärtuse, maksimaalne on ka elektriväljatugevuse muutumise kiirus. See tingib ka maksimaalse laengute liikumise kiiruse ehk voolu amplituudväärtuse $\frac{dQ}{dt} \Rightarrow \max \Rightarrow I_m$.

Ajas muutuv vool tekitab igas pooli keerus ajas muutuva magnetvoo, mis haarab kõiki pooli keerde. Seega muutub pooli aheldusvoog $\Psi = \Phi w$ samuti pidevalt ajas ning indutseerib igas mähise keerus toiteallikapingele u_A vastassuunalised allikasisepinged u_{1L}, u_{2L}… u_{nL}. Keerdude jadalülituse tõttu need pinged liituvad ning moodustavad pooli allikasisepinge u_{LA}. Jooniselt 4.22c näeme, et ideaalsel toiteallikal võrdub allikasisepinge allikavälispingega e klemmipingega ja pooli potentsiaalilanguga $u = u_L$. Rakendades kontuurile I Kirchhoffi pingeseadust, saame toiteallika ja pooli allikasisepingete summa $u_A - u_{LA} = 0$. Siit **$u_A = u_{LA}$.**

Vaadates pooli tööd määravaid seoseid, näeme:

$$u_A \rightarrow i \rightarrow \Phi \rightarrow w\Phi = \psi \rightarrow \frac{d\psi}{dt} = u_{LA}.$$

Seega tekitab allikasisepinge poolis täpselt sellise voolu hetkväärtuse, mis omakorda tekitab täpse suurusega magnetvoo, mis aheldub pooli kõigi w keeruga, moodustades täpse suurusega aheldusvoo Ψ,

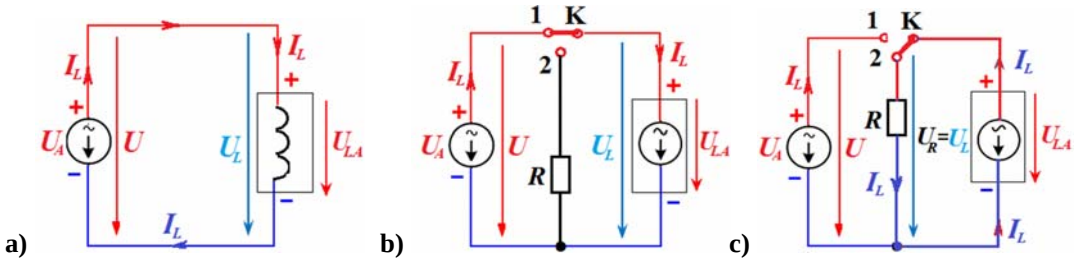
mille muutumine ajas toimub täpselt sellise kiirusega, et poolis indutseeritakse voolu põhjustavale toiteallikasisepingele vastassuunaline pooli allikasisepinge u_{LA}, mille suurus igal hetkel võrdub täpselt toiteallikasisepinge u_A väärtusega.

Alalisvoolu korral (joonis 4.24a) ei muutu pooli aheldusvoo suurus ajas. Seega, $d\Psi / dt = 0$ ja poolis allikasisepinget ei indutseerita ning pool ei piira voolu suurust, mistõttu takistusvabas ahelas kasvaks vool lõpmata suureks. Vahelduvvoolu korral (joonis 4.24b) muutub pooli aheldusvoo suurus pidevalt ajas $d\Psi / dt = \text{var}$. Allika algmõju u_A tasakaalustatakse mingi kindla voolu väärtuse juures ($i < \infty$), mis tagab aheldusvoo sellise muutumiskiiruse, et **igal ajahetkel $u_A = u_{LA}$**.

Voolu suurus, mille puhul näiteks hetkel t_1 tekkiv tasakaal $u_A = u_{LA}$ oleneb sellest, milline on pool – kui suur on keerdude arv w ning pooli pikkus l ja ristlõikepindala S. Mida suurem on keerdude arv, seda väiksema voolu korral tekkib tasakaal, et $u_A = u_{LA}$.

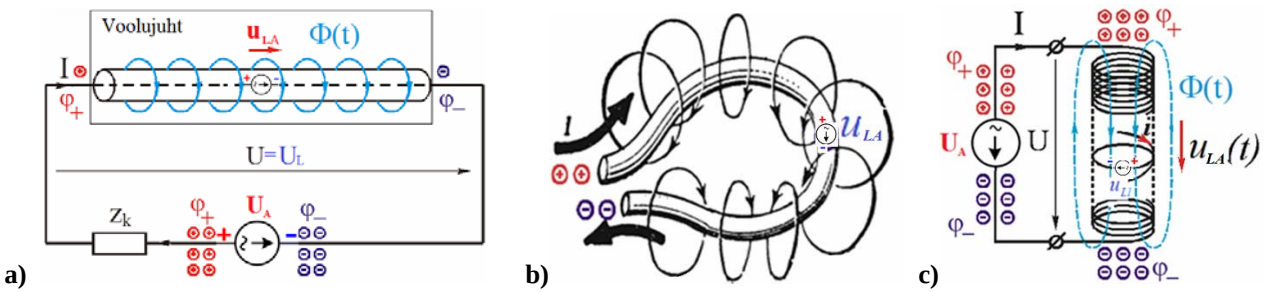
Analüüsime täiendavalt toiteallika ja induktiivpooli vastastikmõju. Kui induktiivpool ühendada toiteallikaga, siis tekkib poolis allikas, mille sisepinge U_{LA} on samasuunaline pooli voolu ja **potentsiaalilangu U_L** suhtes (joonis 4.24c) ning $U_L = U_{LA}$. Seega toimib pool toiteallikaga rööplülituses oleva allikana, mis on **tarbija talitluses**. Siin muundatakse toiteallika elektriväljaenergia pooli magnetvälja salvestuvaks elektrienergiaks. Pooli voolu suurus iseloomustab elektrienergia salvestamise intensiivsust pooli magnetvälja.

Kui lahutada pool toiteallikast nii, et pooli vool ei katkeks, siis läheb pool tarbija talitluselt kohe üle allika talitlusse. Voolu katkestamise korral tekkivad liigpinged. Joonisel on seda lihtsustatult kujutatud lüliti K ümberlülitamisega asendist 1 asendisse 2 (joonis 4.25c). Voolu suund allikas U_{LA} muutub algsele vastupidiseks ja see suurus väheneb eksponentsiaalselt. Koos ümberlülitamisega muutub potentsiaalilangu $\boldsymbol{U_L}$ vektor pooli allikapinge (allikaväljundpinge) vektoriks, mille suund langeb kokku algse potentsiaalilangu $\boldsymbol{U_L}$ suunaga (enne allikast lahutamist).



Joonis 4.25. Allika teke tarbijas, kui tarbijaks on induktiivpool: a – pooli allikasisepinge ja potentsiaalilangu teke, b – induktiivpooli asendamine allikaga, c – pooli allikasse salvestatud energia muundamine takistis soojusenergiaks

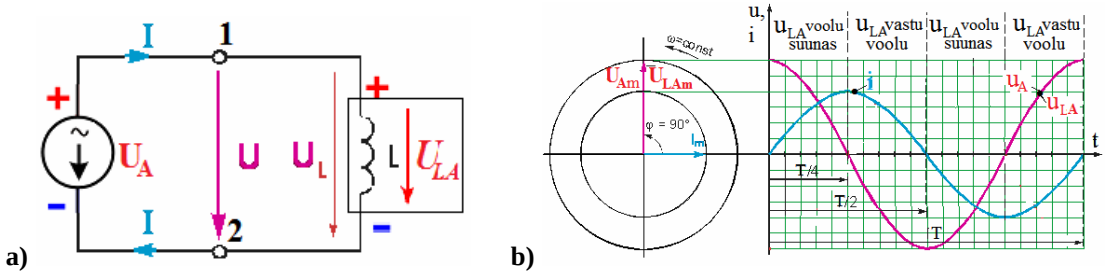
Induktiivtakistus. Induktiivpooli lülitamisel vahelduvvooluahelasse (joonis 4.25a) indutseerib poolis tekkiv vahelduv magnetvoog allikasisepinge u_{LA} ehk lühidalt pooli allikapinge. Seega tekkib toiteallikapinge ning tarbija allikapinge tasakaal konkreetse voolu hetkväärtuse juures, mis iseloomustab allika elektrienergia salvestamise intensiivsust pooli magnetvälja. See on ruutsõltuvus. Olenevalt pooli salvestusvõimest on see protsess kas rohkem või vähem intensiivne. Seda salvestusvõime erinevust iseloomustatakse induktiivsuse ja induktiivtakistuse mõistetega. Öeldakse, et induktiivpool osutab teatud takistust vahelduvvoolu kulgemisele. Sirge juhtme korral voolule takistuse osutamise mehhanismi selgitab lihtsustatult joonis 4.26a.



Joonis 4.26. Allikapinge indutseerimine sirges vooluga juhtmes (a), juhtmekeerus (b) ja induktiivpoolis (c)

Arendagu toiteallikas sisepinget U_A, mille mõjul tekkib sirgjuhtmes vool I. Vooluga juhtme ümber tekkib magnetväli $\Phi(t)$, mis ajas pidevalt muutub. Selle voo muutumine indutseerib juhtmes endainduktsiooni allikasisepingega u_{LA}, mis on rööbiti toiteallika sisepingega u_A. Niisugust indutseeritud allikapinget nimetame juhtme **allikasisepingeks**, mis on **vastassuunaline** juhtme vooluga (allikas on tarbija talitluses). Juhtmes toimub allika elektrienergia muundamine liikuvate laengute vahendusel juhtme nn magnetvälja energiaks. Kui sirge juhe keerata rõngaskeeruks (joonis 4.26b), siis keeru sees magnetväljajoonte tihedus kasvab ja magnetvoog suureneb. Lisades keerde, tekkib pool keerdude arvuga w, mille sees keerdude magnetvood moodustavad üldise pooli magnetvoo Φ, mis kõiki keerde haarates tekitab aheldusvoo $\Psi = \Phi w$. See ajaliselt muutuv aheldusvoog indutseerib igas keerus allikapinge (vt joonis 4.26c), mis liitudes tekitavad üksteisele pooli summaarse allikapinge u_{LA}.

Kokkuvõttes suureneb pooli vool ja selle tekitatud magnetvoog Φ seni, kuni muutuvast magnetvoost indutseeritud allikapinge u_{LA} saab võrdseks toiteallikasisepingega u_A (joonis 4.27b) ja tekkib tasakaal. See tähendab, et vool i tekitab sellise magnetvoo Φ, mille ajalisel muutumisel tekkib täpse suurusega pooli allikapinge, et pooli klemmi 1 potentsiaali φ_{+1} ja klemmi 2 potentsiaali φ_{-2} vahe saab täpselt võrdseks toiteallikapingega.



Joonis 4.27. Induktiivpooli lülitamisel vahelduvvooluahelasse jääb vool faasilt pingest maha veerandperioodi võrra (90° nurga võrra). Toiteallikasisepinge U_A on faasis pooli allikasisepingega U_{LA}

Olgu pool **ideaalne**, s.o selle **aktiivtakistus võrdub nulliga** ja energiamuundumist poolis teisteks energialiikideks ei toimu. Kui poolis poleks tekkinud tarbija talitluses olevat allikat, siis kasvanuks vool lõpmata suureks. Pooli allikapinge u_{LA} tõttu tekkib mingil voolu i väärtusel tasakaal, mil $u_A = u_{LA}$. Tasakaalu teke takistab voolu edasist kasvamist. Poolis oleneb u_{LA} aheldusvoo muutumise kiirusest $d\Psi/dt$. Viimane on võrdne pooli keerdude arvu w ja pooli magnetvoo muutumise kiiruse $d\Phi/dt$ korrutisega.

$$u_{LA} = \frac{d\Psi}{dt} = w\frac{d\Phi}{dt} = L\frac{di}{dt}.$$

Pooli aheldusvoo ja voolu suhet $L = \psi / I$ nimetatakse **induktiivsuseks** ja mõõdetakse henrides, H.

Induktiivpooli takistust vahelduvvoolule nimetatakse **induktiivtakistuseks** ja tähistatakse x_L. Induktiivtakistust mõõdetakse oomides ja see oleneb pooli induktiivsuse L suurusest ja voolu muutumise sagedusest. On ilmne, et mida kiiremini vool muutub (mida suurem on sagedus), seda suurem allikapinge indutseeritakse poolis ja seda suurem on pooli induktiivtakistus.

Pooli või eraldi juhtme induktiivtakistuse võib leida valemiga $x_L = \omega L$,

kus L on induktiivsus henrides, H; ω – nurksagedus; $\omega = 2\pi f = 6{,}28f$ ja f on sagedus hertsides, Hz.

Voolu ja pinge efektiivväärtuste vaheline seos. Induktiivsust sisaldavale ahelale laieneb Ohmi seadus. Sel juhul vool $I = \frac{U}{x_L} = \frac{U}{\omega L}$,

kus I ja U on voolu ja pinge efektiivväärtused.

NÄIDE 4.10

Antud: induktiivpoolile L = 0,5 H (oomtakistus võrdub nulliga, R = 0) on rakendatud pinge U = 230 V.

Leida: tarbitava voolu efektiivväärtused toitepinge sageduste $f_1 = 0$ Hz; $f_2 = 16\ 2/3$ Hz; $f_3 = 50$ Hz; $f_4 = 60$ Hz; $f_5 = 100$ Hz; $f_6 = 1$ MHz korral.

Lahendus

Määrame x_L suuruse sagedusel f_1. $x_L = 2\pi f_1 L = 2\pi \cdot 0$ Hz $= 0$.

Leiame voolu I väärtuse $I = U/x_L = 230/0 = \infty$.

Edasise arvutuse tulemused esitame tabelis 4.5.

Tabel 4.5

Pooli induktiivtakistuse ja voolu väärtused erineva toitepinge sageduse korral

f, Hz	0	16 2/3	50	60	$100 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^6$
x_L, Ω	0	52,25	157	188	$314 \cdot 10^3$	$314 \cdot 10^4$
I, A	∞	4,40	1,46	1,22	$0{,}73 \cdot 10^{-3}$	$0{,}73 \cdot 10^{-4}$

NÄIDE 4.11

Antud: tühise aktiivtakistusega induktiivpool induktiivsusega $L = 200$ mH on lülitatud vahelduvvooluahelasse pingega $U = 230$ V sagedusel $f = 50$ Hz. Leida pooli vool.

Lahendus

Nurksagedus on $\omega = 2\pi f = 6{,}28f = 6{,}28 \cdot 50 = 314$ 1/s.

Pooli induktiivtakistus $x_L = \omega L = 314 \dfrac{200}{1000} = 62{,}8\ \Omega$.

Pooli vool $I = \dfrac{U}{x_L} = \dfrac{230}{62{,}8} = 3{,}66$ A.

Toiteallikapinge, tarbija potentsiaalilangu ja voolu muutumine vahelduvvoolu korral induktiivpoolis.

Vaatleme olukorda induktiivpoolis, kui allikapinge on maksimaalne (joonis 4.27) ning pinge hetkväärtus avaldub valemiga $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \cos \omega t$.

Siis tekkib poolis vool, mis ei kasva hetkeliselt, sest koos voolu suurenemisega poolis tekkib voolu suurenemisele vastu toimiv pooli allikapinge. Voolu kasvamine maksimaalväärtuseni hilineb veerand perioodi, s.o voolu avaldis on $i = I_m \sin \omega t$.

Nagu teada, ei olene endainduktsiooni allikapinge väärtus mitte voolu (magnetvoo) absoluutväärtusest, vaid selle **muutumise kiirusest.** Alghetkel, kui vool muutub väga kiiresti, on pooli allikapinge maksimaalne. Voolu maksimumilähedaste väärtuste juures kasv aeglustub. Järelikult hakkab pinge vähenema ja ligineb nullile.

Teise veerandperioodi alguses (joonis 4.27b) muudab toiteallikapinge oma suunda ja seetõttu hakkab ikka veel endises suunas kulgev vool vähenema. Selle tulemusena tekkib poolis uuesti allikapinge, mis püüab hoida ahelas endist voolusuunda.

Teise veerandperioodi vältel allikapinge absoluutväärtuselt suureneb ja saavutab lõpuks maksimaalväärtuse. Samal ajal jätkab vool ahelas vähenemist, algul väikese ja seejärel üha kasvava kiirusega ja teise veerandperioodi lõpuks võrdub nulliga. Et voolu (magnetvoo) muutumise kiirus on sel hetkel suurim, siis pooli pinge saavutab oma maksimaalväärtuse, kusjuures selle suund jääb endiselt vastupidiseks toiteallikapingega.

Jätkates toiteallikasisepinge, poolipinge ja voolukõverate vaatlust (joonis 4.27b), võime veenduda, et voolu muutumise ühe perioodi jooksul muutub ka pooli pinge ühe perioodi võrra. Seejuures voolu suurenemisel on allikasisepinge vastassuunaline ja voolu vähenemisel langeb selle suunaga kokku.

Faasinihe. Joonisel 4.27b esitatud graafiku vaatlemisel on näha, et voolu muutumise kõver on nihutatud pinge muutumise kõvera suhtes veerandperioodi võrra. Allikapinge läbib maksimaal- ja nullväärtusi varem kui vool. **Seda allikapinge ja voolu null- ja maksimaalväärtuste saavutamise eriaegsust nimetatakse faasinihkeks.**

Sel juhtumil jääb induktiivtakistuse lülitamisel vahelduvvooluahelasse vool faasilt allikapingest ja potentsiaalilangust maha veerand perioodi ehk allikapinge on faasilt voolust veerand perioodi ees.

Vahelduvvoolutehnikas ei kasutata faasinihke arvutamiseks harilikult mitte perioodi osi, vaid nurgaühikuid. Seejuures lähtutakse asjaolust, et voolu muutumise ühele perioodile vastab kahepooluselise vahelduvvoolugeneraatori rootori pöördumine ühe pöörde või 360º võrra. Seda faasinihke arvutusviisi kasutades saame vaadeldud juhul, et vool jääb allikapingest ja potentsiaalilangust maha 90º nurga võrra, aga pooli allikapinge ja toiteallikapinge on faasis ning võrdsed.

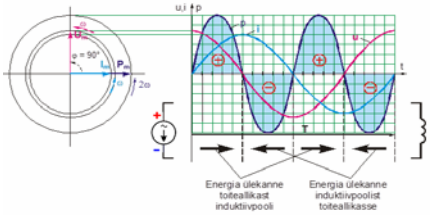
Elektrivõimsus. Vaatleme, kuidas muutub induktiivpooli poolt vahelduvvooluallikast tarbitav võimsus.

Induktiivpooli poolt tarbitav võimsus on igal hetkel võrdne voolu ja allikapinge kõnealuse hetke hetkväärtuste korrutisega $p = ui$. Pinge ja voolu valitud algfaaside korral

$$p = U_m I_m \sin(\omega t + \pi/2)\sin\omega t = UI(\cos\pi/2 - \cos(2\omega t + \pi/2)) = UI\sin 2\omega t\,.$$

Kuna vool ja pinge on siinuseliselt muutuvad vahelduvsuurused, siis ka võimsus on vahelduvsuurus. Selle võib ka graafiliselt kergesti leida, kui korrutada voolu ja pinge hetkväärtused – graafikute vastavad lõigud (loetud ajateljest).

Hetkvõimsuse kõver on joonisel 4.28, s.o siinusfunktsioon, mis muutub pinge ja voolu sagedustega võrreldes kahekordse sagedusega.



Joonis 4.28. Induktiivpooli korral vahelduvvooluahelas võngub elektrienergia pidevalt toiteallika ja pooli vahel. Kogu perioodi kohta induktiivpool ei tarbi ega anna toitevõrku elektrivõimsust.

Joonisel 4.28 esitatud graafikult ilmneb, et esimese veerandperioodi vältel on vool ja pinge positiivsed. See tähendab, et nende korrutis, s.o võimsus on ka positiivne suurus. Teisel veerandperioodil on vool positiivne, pinge aga negatiivne. Järelikult on võimsus, s.o voolu ja pinge korrutis, negatiivne. Kolmandal veerandperioodil on võimsus uuesti positiivne, aga neljandal – negatiivne.

Füüsikaliselt positiivse ja negatiivse elektrivõimsuse mõiste määrab energiavoo suuna. **Võimsuse positiivne märk tähendab, et elektrienergia antakse toiteallikast tarbijasse.** Võimsuse negatiivne märk tähendab, et elektrienergia läheb tarbijast toiteallikasse. Sel juhul tekib induktiivpooli lülitamisel vahelduvvooluahelasse pidev võnkeprotsess energia ülekandmisel toiteallikast induktiivpooli ja tagasi poolist toiteallikasse.

Esimesel veerandperioodil vool kasvab, pool saab allikast energiat (positiivne hetkvõimsus) ja salvestab selle oma magnetvälja. Teisel veerandperioodil hakkab pool oma salvestunud energiat toiteallikale tagasi andma (negatiivne hetkväärtus). Seejuures toetab voolu kulgemist ahelas pooli allikasisepinge. Kolmandal ja neljandal veerandperioodil see protsess kordub.

Seega ei anna ega tarbi induktiivtakistus elektrienergiat terve perioodi jooksul. Sellele viitab samuti asjaolu, et **perioodi keskmine võimsus võrdub nulliga**. Toimub vaid katkematu elektrienergia ringlemine (vahetus) toiteallika ja induktiivtakistuse vahel. Formaalselt kasulikku tööd ei toimu, elektrienergiat teisteks energialiikideks ei muundata.

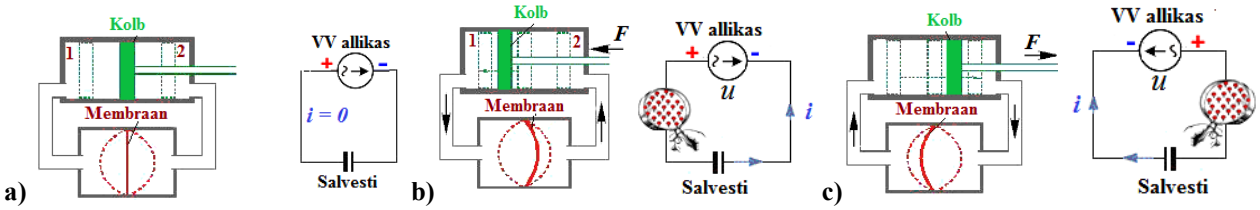
Et rõhutada induktiivtakistuse iseärasust, kantakse ta **reaktiivtakistuste rühma. Need on takistused, mis vahelduvvooluahelas ühe perioodi vältel elektrienergiat ei tarbi ega genereeri (veerandperioodi vältel toimib tarbijana, järgneva veerandperioodi vältel allikana).**

Tuleb märkida, et reaalsed induktiivpoolid tarbivad vahelduvvooluallikast teatud väikest võimsust, seda võimsuskadude tõttu pooli mähise oomtakistusel.

Induktiivtakistuste lülitusviisid. Vahelduvvooluahelates saab induktiivtakistusi nagu aktiivtakistusigi ühendada järjestikku, paralleelselt või segalülitusse.

4.5. Kondensaator (mahtuvus) vahelduvvooluahelas

Mahtuvuslik takistus. Alalisvooluahelas käitub kondensaator lõpmata suure takistusena, kuna pärast laadimisprotsessi lõppemist ta voolu läbi ei lase. Ainult kondensaatorit sisaldava ahela sisselülitamise siirdeprotsessi (katkestatud ahela üleminek suletud ahelaks) käigus voolab ahelas vool. Sisselülitamise alghetkel on ahela takistus sarnane lühistalitlusele ja praktiliselt null, mistõttu alghetke vooluimpulss on väga suur. Kondensaatori plaatidele kogunevad vastasmärgilised laengud, moodustades vastuallika, mille sisevastupinge on vastassuunaline allikapingega ja vähendab laadimisvoolu suurust seni, kuni kondensaatori potentsiaalilang on võrdne allikapingega. Selle saavutamisel muutub kondensaatori laadimisvool nulliks. Kui aga ühendada kondensaator vahelduvvooluahelasse, siis toimub tema laadimise ja tühjenemise pidev protsess ning kondensaatoriahelas on vahelduvvool (joonis 4.29).



Joonis 4.29. Kolbpump pumpab vett suletud torustikus membraaniga anumasse kord ühele, kord teisele poole, samamoodi liigutab ka vahelduvvooluallikas pidevalt kondensaatorit laadides ja tühjendades elektrone suletud elektriahelas kord ühes, kord teises suunas

Vahelduvvoolu tekke eelduseks kondensaatorit sisaldavas ahelas on tingimus, et toiteallikapinge on suurem kui kondensaatori vastuallikapinge. See on alati suunatud vastu toiteallikapingele ja viimase poolt tekitatud voolule. Järelikult osutab kondensaator vahelduvvoolule teatavat takistust. Kondensaatori takistust vahelduvvoolule nimetatakse **mahtuvuslikuks takistuseks** ehk mahtuvustakistuseks ja tähistatakse x_C. Mahtuvustakistust mõõdetakse oomides ja see oleneb kondensaatori mahtuvusest C ja voolu muutumise sagedusest.

Mida suurem on kondensaatori mahtuvus, seda suuremat elektrihulka (laengut) on vaja selle laadimiseks ja seda suurem on kondensaatori laadimise ja tühjenemise vool. Järelikult, mida suurem on mahtuvus, seda väiksemat takistust osutab kondensaator vahelduvvoolule.

Mida suurem on kondensaatorile rakendatud vahelduvpinge sagedus, seda suurem on kondensaatori laadimiste ja tühjenemiste arv ning seda suurem elektrihulk läbib ahelat ajaühikus.

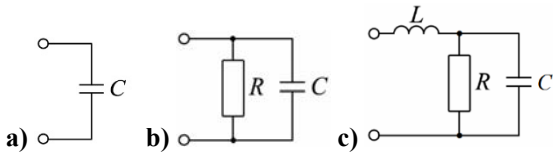
Järelikult, mida suurem on voolu muutumise sagedus, seda suurem on kondensaatorit läbiv vool ja väiksem kondensaatori mahtuvustakistus.

Kondensaatori mahtuvustakistuse võib arvutada valemiga $x_C = \frac{1}{\omega C}$, kus C on mahtuvus faradites, F.

Kondensaatori ja induktiivpooli eripära on selles, et nad kujutavad **energiasalvestit** ja toimivad vaheldumisi **tarbijana laadimise ajal** ning **allikana tühjakslaadimise ajal**. Samamoodi nagu kondensaator, toimib ka joonisel 4.29 kujutatud kolbpumbast ja elastse membraaniga eraldatud veeanumast koosnev süsteem. Kui kolb liigub jõu F mõjul keskasendist (a) vasakule (b), siis kolvi liikumapanev mehaaniline energia muundatakse membraani elastsusjõudude energiaks. Membraan toimib mehaanilise energia salvestina. Kui aga kolb asendis 1 vabastada, siis elastsusjõudude mõjul liigub see algasendisse tagasi. Selles faasis toimib membraan mehaanilise energia allikana. Elektronide liikumine sarnaneb veeosakeste liikumisega. Nad ei läbi membraani ja ka plaatidevahelist isoleermaterjali, vaid liiguvad paremalt plaadilt (siia jäävad tühjad pesad) vasakule ja vastupidi.

Reaalne mahtuvuslik element – kondensaator valmistatakse kahest juhtivast plaadist, mis on eraldatud dielektrikuga. Reaalsete dielektrikute elektritakistus on väga suur ja seepärast võib lugeda kondensaatorit ideaalseks mahtuvuslikuks elemendiks.

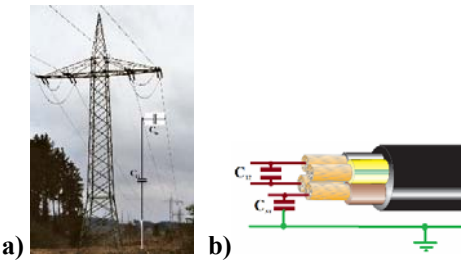
Madalatel sagedustel kujutatakse kondensaatorit skeemil kui ideaalset elementi (joonis 4.30a). Keskmistel sagedustel lisatakse skeemi oomtakisti (resistor), mis arvestab dielektriku kadusid (joonis 4.30b), aga kõrgetel sagedustel lisaks veel ka induktiivpool, mis arvestab kondensaatori metallosade ja väljaviikude induktiivsust (joonis 4.30c), et nende ümber on magnetväli. Kondensaatori tööparameetriks on mahtuvus, aga parasiitparameetriteks takistus ja induktiivsus.



Joonis 4.30. Kondensaatori aseskeem madala (a), keskmise (b) ja kõrge (c) sageduse korral

Kondensaatori omadused on mitte ainult spetsiaalselt tehases valmistatud seadmetel, vaid ka igal dielektrikuga eraldatud kahel erineva laenguga laetud juhtival kehal (juhtmel), mille ümber on laengu energiaväli – elektriväli. See kehadevaheline elektriväli võetakse elektriskeemides arvesse kondensaatoriga.

Näiteks on kondensaatoriks ka kaks paralleelselt paigutatud elektriliini juhet (joonis 4.31a), juhe ja maapind, elektrikaabli soone paarid (joonis 4.31b) ja kaabli metallkest jt. Kõigil neil on teatav mahtuvus, mis avaldab vahelduvvoolu korral märgatavat mõju elektriseadmete tööle.



Joonis 4.31. Teatavat mahtuvust omavaks kondensaatoriks on kaks elektrijuhet: juhe ja maa, kaablisoone paarid, kaabli sooned ja metallkest ning teised elektriseadmete osad

Voolu ja pinge vaheline seos. Mahtuvusliku takistusega ahelale laieneb ka Ohmi seadus. Ahela vool

$$I = \frac{U}{x_C} = \frac{U}{1/\omega C},$$

kus I ja U on voolu ja toiteallikapinge efektiivväärtused.

NÄIDE 4.12

Antud: vahelduvvooluahelasse pingega 230 V ja sagedusega 50 Hz on lülitatud kondensaator mahtuvusega 10 µF.

Leida: kondensaatori vool.

Lahendus

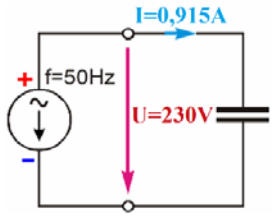
Nurksagedus $\omega = 2\pi f = 6{,}28f = 6{,}28 \cdot 50 = 314$ 1/s.

Mahtuvuslik takistus $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \cdot 0{,}00001} = 318\ \Omega.$

Kondensaatori vool $I = \frac{U}{x_C} = \frac{230}{318} = 0{,}72$ A.

NÄIDE 4.13

Antud: kondensaator on lülitatud 230 V võrku (joonis 4.32). Kondensaatori vool $I = 0{,}915$ A. Võrgu toitepinge sagedus on 50 Hz.



Joonis 4.32. Kondensaatori toitelülitus

Leida: kondensaatori mahtuvustakistus ja mahtuvus.

Lahendus

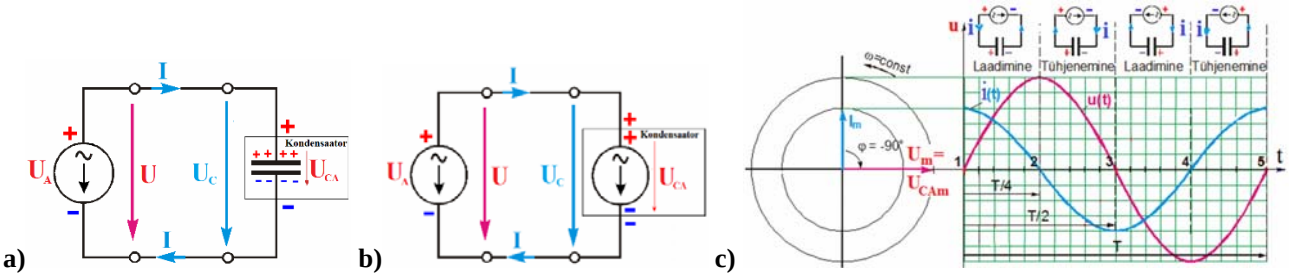
Leiame kondensaatori takistuse $x_C = U/I = 230\ \text{V}/0{,}915\ \text{A} = 251{,}4\ \Omega$.

Kondensaatori takistus $x_C = 1/\omega C$

$$C = \frac{1}{\omega x_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 s^{-1} \cdot 251{,}4\Omega} = \frac{1}{314 \cdot 10^2 s^{-1} \cdot 2{,}514 \cdot 10^2 \Omega} =$$

$$= 0{,}127 \cdot 10^{-4}\,\text{F} = 12{,}7\,\mu\text{F}.$$

Allikapinge, voolu ja vastuallikapinge muutumine ajas. Vaatleme, kuidas muutuvad allikapinge, vool ja kondensaatori vastuallikapinge mahtuvuse lülitamisel vahelduvvooluahelasse (joonis 4.33a). Oletame, et kondensaator lülitati ahelasse hetkel, kui toiteallikapinge alles hakkas suurenema. Siis hakkab kondensaator laaduma. Vaatamata sellele, et kondensaatorile rakendatud potentsiaalide vahe on sel hetkel väike, on laadimisvool maksimaalse väärtusega. Seda seletatakse alghetkel elektrilaengute puudumisega kondensaatori plaatidel, seepärast ei kohta allikalt plaatidele tulevad laengud kondensaatorisisese elektrivälja nõrgestavat jõudu (laadimisvoolule vastu mõjuv kondensaatori vastuallika elektriväli võrdub veel nulliga).



Joonis 4.33. Kondensaatori lülitamisel vahelduvvooluahelasse on vool *I* faasilt allikapingest U_A ees veerandperioodi (90° nurga) võrra ja kondensaatori vastuallikasisepinge U_{CA} on faasis ja võrdne allikapingega U_A

Allikast kondensaatorisse kulgeva laadimisvoolu väärtus oleneb elektrilaengute muutumise kiirusest $i = dq/dt$. Viimase määrab allikapinge muutumise kiirus. Seepärast on esimese veerandperioodi alguses, kui allikapinge muutub kiiresti (punkt 1 joonis 4.33b), vool maksimaalse väärtusega $i = Cdu/dt$. Toiteallikapinge (võrdub kondensaatori allikapinge ja potentsiaalilanguga) ja kondensaatorivoolu hetkväärtused:

$$u = U_m \sin \omega t\,, \quad i = I_m \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \cos \omega t\,.$$

Toiteallikapinge kasvamisega kondensaator laadub. Kuid pinge kasvamise kiirus väheneb ja laadimisvoolu väärtus langeb pidevalt. Esimese veerandperioodi lõpus kondensaatori plaatide vahel mõjuv vastuallikasisepinge saab maksimaalseks (nagu toiteallika pingegi). Pinge maksimumilähedastel väärtustel muutumisprotsess aeglustub ja vool läheneb nullväärtusele (punktis 2 pinge muutumiskiirus $du/dt = 0$ ja vool võrdub nulliga). Teise veerandperioodi alguses hakkab toiteallikapinge vähenema. Kondensaator hakkab

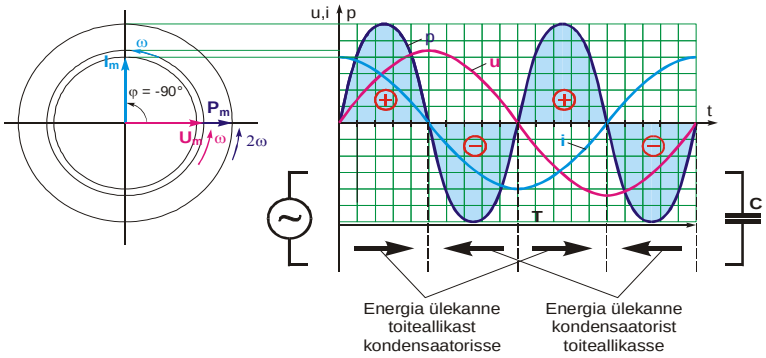
seejuures tühjenema ja selle laengud liiguvad plaatidelt allikasse. Allikapinge vähenemisel kondensaatori tühjenemiskiirus kasvab ja tühjenemisvool ahelas suureneb. Tühjenemisel on voolu suund ahelas vastupidine laadimisvooluga. Sellele vastavalt paikneb voolu kõver pärast nulli läbimist ajateljest allpool. Teise veerandperioodi lõpus võrduvad toiteallikapinge ja kondensaatori vastupinge nulliga. Seejuures allikapinge muutumise kiirus kasvab ja tühjenemisvool saavutab maksimaalse väärtuse.

Kolmanda veerandperioodi alguses (punkt 3 joonis 4.33b) muutub allikapinge suunalt vastupidiseks ja hakkab uuesti kasvama. Kondensaator hakkab laaduma, kuid nüüd vastassuunas (muutub plaatide polaarsus). Kolmanda veerandperioodi lõpus (punkt 4) katkeb allikapinge kasvamise katkemishetkel ka vool kondensaatoris ($du/dt = 0$). Neljandal veerandperioodil allikapinge uuesti väheneb ja kondensaator hakkab tühjenema. Seega allikapinge muutumise ühe perioodi vältel laadub kondensaator kaks korda ja tühjeneb kaks korda. Järelikult kulgeb kondensaatoriga ahelas pidevalt vahelduvvool, elektronid liiguvad läbi allika ühelt plaadilt teisele ning seejärel vastupidi.

Allikasisepinge, kondensaatori vastupinge ja voolu kõverate vaatlusest (joonis 4.33) järeldub, et vool kondensaatori ahelas on faasilt allikapingest ja temaga võrdsest kondensaatori vastuallikapingest ees veerandperioodi (nurga 90º) võrra või allikapinge jääb faasilt voolust maha veerandperioodi (90º nurga) võrra. Kondensaatori plaatide vahel mõjuv vastuallikapinge on faasilt poolperioodi (nurga 180º) võrra allikapingest ees.

Elektrivõimsus. Ideaalne kondensaator, nagu ka ideaalne induktiivpool, ei tarbi aktiivvõimsust vahelduvvooluahelas. Esimese ja kolmanda veerandperioodi vältel toimib kondensaator vastuallikana tarbija talitluses, salvestades allikalt ülekantavat elektrienergiat kondensaatori elektrivälja. Teise ja neljanda veerandperioodi jooksul toimib kondensaator allikana, tagastades tühjenemisel täielikult salvestatud elektrienergia. Allikapinge kasvades esimesel ja kolmandal veerandperioodil suureneb elektrivälja energia allikalt saadava energia arvel nullist maksimaalväärtuseni $W_m = \frac{CU_m^2}{2} = CU^2$ ning pinge vähenemisel maksimaalväärtusest tagasi nullini, tagastades energiat toiteallikale. Järelikult toimub kondensaatori lülitamisel vahelduvvooluahelasse vaid pidev energia ülekandmise võnkuv protsess vooluallikalt kondensaatorisse ja vastupidi. See ilmneb ka hetkvõimsuse $p = ui$ muutumise graafikult (joonis 4.34), mis on saadud samamoodi kui joonisel 4.24. Hetkvõimsus

$$p = U_m I_m \sin\omega t \sin(\omega t + \pi/2) = UI(\cos\pi/2 - \cos(2\omega t + \pi/2)) = UI\sin 2\omega t\,.$$



Joonis 4.34. Kondensaatorit sisaldavas vahelduvvooluahelas võngub elektrienergia pidevalt allika ja kondensaatori vahel. Kondensaatori ühe perioodi keskmine võimsus võrdub nulliga

Graafikult on näha, et kondensaatori poolt tarbitav võimsus muutub kahekordse sagedusega, võrreldes voolu ja pinge muutumise sagedusega. Perioodi jooksul võngub võimsus nullväärtuse ümber. Järelikult võrdub kondensaatori poolt perioodi jooksul tarbitav keskmine võimsus nulliga.

Elektrienergia pideval võnkumisel vooluallikast kondensaatorisse ja tagasi ei muundata elektrienergiat teisteks energialiikideks (ei tehta kasuliku tööd). Seepärast kuulub mahtuvustakistus, nagu ka induktiivtakistus, reaktiivtakistuste gruppi. Tuleb märkida, et reaalsed kondensaatorid tarbivad vahelduvvooluallikast mõningat aktiivvõimsust tingituna kaovõimsusest kondensaatori sees. Neid võimsuskadusid tekitavad nihkevoolud (joonis 1.47) kondensaatori dielektrikus, kuumutades dielektrikut. Kuumutamiseks kuluv energia tuleb kondensaatorisse toiteallikast.

Mida suurema sagedusega toimub kondensaatori dielektrikus dipoolide teke, seda suuremad on võimsuskaod kondensaatoris. Kuid need kaod on märgatavad vaid kõrgsageduslikes seadmetes kasutatavates kondensaatorites. Vahelduvvoolu elektrivõrkudes kasutatava standardsageduse 50 Hz puhul on kaod kondensaatoris nii väikesed, et harilikult võib neid mitte arvestada.

Kondensaatorite lülitusviisid. Kondensaatoreid võib ühendada järjestikku (jadamisi), paralleelselt (rööbiti) ja segalülitusse. **Kondensaatorite jadalülituse** korral nende summaarne mahtuvus väheneb, võrreldes iga kondensaatori mahtuvusega.

Mitme kondensaatori (näiteks kolme) kogumahtuvuse C_{kogu} võib leida valemiga

$$\frac{1}{C_{kogu}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3},$$

kus C_1, C_2 ja C_3 on üksikute jadalülituses kondensaatorite mahtuvused.

Kogu mahtuvustakistus $x_{C\,kogu}$ võrdub üksikute mahtuvustakistuste summaga

$$x_{C\,kogu} = x_{C1} + x_{C2} + x_{C3},$$

kus x_{C1}, x_{C2}, x_{C3} on üksikute kondensaatorite mahtuvustakistused.

n ühesuguse mahtuvusega C kondensaatori jadalülituse korral on nende kogumahtuvus

$$C_{kogu} = C / n,$$

aga kogu mahtuvustakistus

$$x_{C\,\mathrm{kogu}} = nx_C.$$

Kondensaatorite rööplülituse korral võrdub kogumahtuvus üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga

$$C_{kogu} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Kogu mahtuvustakistus on seejuures

$$\frac{1}{x_{C\,kogu}} = \frac{1}{x_{C_1}} + \frac{1}{x_{C_2}} + \frac{1}{x_{C_3}}.$$

Kokkuvõte: soovitusi potentsiaali, pinge ja voolu mõistete kasutamisel

Elektriallikate ja *RLC*-tarbijate vastastikmõju vaatluse alusel võib kokkuvõtvalt soovitada järgmist: elektriallika puhul kasutada mõisteid allikasisepinge, vool, välis-(väljundpinge), sisetakistus ning sisepotentsiaalilang. Poolil ja kondensaatoril: vastuallikasisepinge poolil U_{LA} ja kondensaatoril U_{CA}, lühidalt pooli ja kondensaatori pinge, mille vektor on suunatud ahela voolusuunale vastu. Kõigil *RLC*-tarbijatel tekkib aga vooluvektorisuunaline potentsiaalilang U_R, U_L ja U_C.

Pingelangu mõistet **ei soovitata** kasutada, sest see ei kirjelda ahelas toimuva protsessi füüsikalist sisu. Erinevalt *R*-tarbija tasakaalustavast allikast tekkib *L*- ja *C*-tarbijal, kondensaatoril ja poolil, toiteallika mõjul tarbija talitluses olev (energiat salvestav) vastuallikas. Selle toiteallikast lahtiühendamisel ja tarbijaga ühendamisel muutub nende välisahela voolusuund vastupidiseks algsega. *R*-tarbijate lahtiühendamisel juhtivuslik vool muutub hetkeliselt nulliks. Toiteallika elektrivälja tasakaalustavate dipoolallikate elektronid liiguvad aga tagasi oma „tühjadesse pesadesse“. Seega hetkeliselt tekkiva nihkevoolu suund on algse nihkevoolusuunaga vastupidine. Siin on U_{LA} ja U_{CA} pooli ning kondensaatori vastuallikasisepinge, lühidalt pooli ja kondensaatori pinge, mille vektori suund on toiteallika sisepinge U_A vektoriga vastassuunaline ja langeb kokku voolu I ja pooli ning kondensaatori potentsiaalilangu U_L ja U_C vektori suunaga. *R*-tarbija allikasisepinge U_{RA} on toiteallika sisepinge U_A vektoriga samasuunaline ja on vastassuunaline vooluga I ning *R*-tarbija potentsiaalilanguga U_R.

Eespool käsitletud suurusi on reeglina otstarbekas vaadelda vektorsuurustena. Siis on lihtsam jälgida, mis mida põhjustab ja kuidas.

4.6. Vahelduvvoolu *RLC*-jadaahel

Vahelduvvoolu elektriahelate arvutus erineb oluliselt alalisvooluahelate arvutusest, kuna vahelduvvoolu korral on aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistustes erinevad faasinihked voolude ja potentsiaalilangude vahel.

Vool ja potentsiaalilangud. Kui siinuspinge generaator lülitada aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistit sisaldavasse ahelasse (joonis 4.35), siis ahela vool on ka siinuseline. Olgu hetkel $t = 0$ vool ahelas null, s.o vool $i = I_m \sin \omega t$.

Siis takisti R potentsiaalilangu hetkväärtus $u_R = U_{Rm} \sin \omega t$.

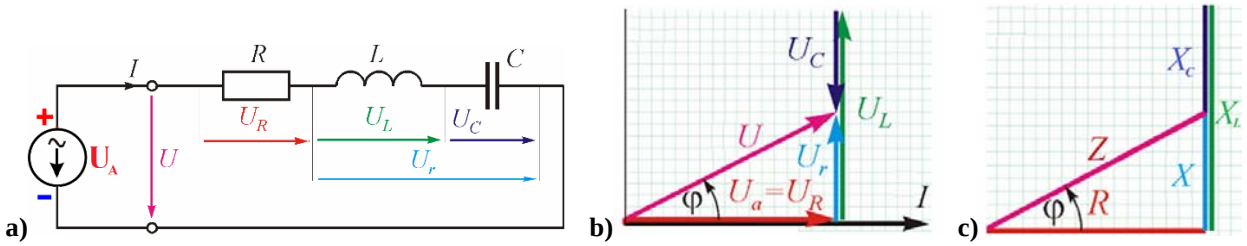
Amplituudväärtus on $U_{Rm} = I_m R$ ja efektiivväärtus $U_R = IR$.

Potentsiaalilangu hetkväärtus poolil on voolust 90º ees $u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90°)$.

Amplituudväärtus on $U_{Lm} = I_m \omega L = I_m x_L$ ja efektiivväärtus $U_L = I\omega L = Ix_L$.

Potentsiaalilangu hetkväärtus kondensaatoril $u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2) = U_{Cm} \sin(\omega t - 90°)$.

Potentsiaalilangu amplituud on $U_{Cm} = I_m / \omega C = I_m x_C$ ja efektiivväärtus $U_C = I/\omega C = Ix_C$.



Joonis 4.35. Aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistust sisaldav vahelduvvooluahel (a) ja selle vektordiagramm (b) ning takistuskolmnurk (c)

Jadamisi lülitatud *RLC*-ahela iseloomulik omadus: kõikides ahela elementides on üks ja sama vool *I* ja tarbijate potentsiaalilangude summa võrdub igal hetkel allikaväljundpingega.

$$u = u_r + u_L + u_C = U_{rm} \sin \omega t + U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) + U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2)$$

u_L ja u_C summa on reaktiivne potentsiaalilang.

Joonisel 4.35b on *RLC*-jadaahela vektordiagramm. Toitepinge vektor on saadud elementide *RLC*-potentsiaalilangude vektorite summeerimise teel.

$$\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C.$$

Vektordiagrammi koostamine. Soovitatav on alustada vektorist, mis on kõikide ahela elementide jaoks ühine – „alus- või baasvektorist" – vooluvektorist. Valitakse mõõtkava voolu- ja pingevektoritele (näiteks, mitu millimeetrit vooluvektori pikkusest vastab ühele amprile). Vooluvektori võib joonisele kanda suvalises suunas. Mugavam on kanda see kas horisontaalselt vasakult paremale või vertikaalselt alt ülesse. Allikaväljundpinge vektori $\dot{U}$ määramiseks tuleb summeerida vektorid $\dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C$.

Aktiivtakistil langevad voolu- ja pingevektori suunad kokku. Paigaldame vektori $\dot{U}_r$ alguse vooluvektori – $\dot{I}$ algusesse ja suuname samas suunas. Vektori $\dot{U}_r$ pikkuse saame potentsiaalilangu suuruse korrutamisel mõõtkava teguriga. Järgmisena liidame potentsiaalilangu vektori $\dot{U}_L$. Potentsiaalilangu vektor poolil edestab vooluvektorit 90º. Selleks et liita vektorile $\dot{U}_r$ vektor $\dot{U}_L$, paigutame vektori $\dot{U}_L$ alguse vektori $\dot{U}_r$ lõppu ja suuname 90º all vertikaali mööda ülesse (joonis 4.35). Edasi liidame kahele vektorile kolmanda $\dot{U}_C$. Potentsiaalilangu vektor kondensaatoril jääb voolust 90º maha, olles seega $\dot{U}_L$ vastassuunaline. Kolmanda

vektori liitmiseks paneme ta alguse teise vektori lõppu ja suuname ülalt alla. Ühendades esimese vektori $\dot{U}_r$ alguse kolmanda vektori $\dot{U}_C$ lõpuga saame kolme vektori summa $\dot{U}_A$.

Pinge- ja vooluvektorite vaheline **nihkenurk** on φ. Kui vektordiagrammist ära jätta vooluvektor, tähistada potentsiaalilang $\dot{U}_r = \dot{U}_a$ (potentsiaalilangu aktiivkomponent) ja summeerida potentsiaalilangu induktiivne ja mahtuvuslik reaktiivkomponent $\dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}_r$, tekkib **täisnurkne pingekolmnurk**. Siis $U_a^2 + U_r^2 = U^2$ ja $U = \sqrt{U_a^2 + U_r^2}$.

Näivtakistus (kogutakistus). Kui lülitame aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistused jadamisi vahelduvvooluahelasse (joonis 4.35a), **ei võrdu kogu ahela üldine takistus eri takistuste aritmeetilise summaga, nagu alalisvoolu korral.** Niisuguse ahela kogutakistus (näivtakistus) arvutatakse vahelduvvoolu korral valemiga

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

kus r, x_L ja x_C on vastavalt aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistus.

Suurust z nimetatakse **näivtakistuseks**, inglise keeles *impedance*. Seda mõõdetakse oomides.

Suurust $x_L - x_C$ nimetatakse **reaktiivtakistuseks** ja tähistatakse tähega x ning mõõdetakse samuti oomides.

Järelikult võrdub ahela näivtakistus ruutjuurega aktiiv- ja reaktiivtakistuse ruutude summast $z = \sqrt{r^2 + x^2}$.

Need näivtakistuse valemid tulenevad takistuskolmnurgast (joonis 4.35c), mille me saame pingete kolmnurgast (joonis 4.35b), kui jagada pingete kolmnurga küljed vooluga.

Takistuskolmnurgast cos $\varphi = r/z$ ja sin $\varphi = x/z$.

Ohmi seadus vahelduvvoolu jadaahelale avaldub valemiga $I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{z^2 + (x_L - x_C)^2}}$,

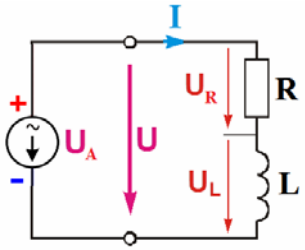
kus I ja U on voolu ja allikapinge efektiivväärtused; z – ahela näivtakistus.

Elektrivoolu kulgemisel aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistusega elektriahelas (joonis 4.24a) tekkivad potentsiaalilangud avalduvad $U_R = Ir;\ U_L = Ix_L;\ U_C = Iz_C$.

Nende potentsiaalilangude algebraline summa on alati suurem kui mainitud ahelale rakendatud allikapinge U. See on tingitud faasinihkest nende potentsiaalilangude vahel.

NÄIDE 4.14

Antud: induktiivpool r = 1 Ω ja L = 20 mH saab toite generaatorilt (joonis 4.36), mille väljundpinge U = 230 V ja sagedus on 50 Hz.



Joonis 4.36. *RL*-ahela toitelülitus

Leida: x_L, x ja ahela vool.

Lahendus

Pooli induktiivtakistus $x_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}02 = 6{,}28\ \Omega$.

Näivtakistus $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{1 + 6{,}28^2} = \sqrt{40{,}4} = 6{,}36\ \Omega$.

Vool $I = U/z = 230 : 6{,}36 = 36{,}2$ A.

NÄIDE 4.15

Antud: induktiivpooli ja aktiivtakistiga ahel (joonis 4.36), mille lähtesuurused on: $r = 100\ \Omega$; $L = 0{,}6$ H; $U = 230$ V ja $f = 50$ Hz.

Leida: x_L, U_R, U_L; φ. Koostada potentsiaalilangude ja voolu vektordiagramm ning takistuskolmnurk.

Lahendus

Leiame pooli induktiivtakistuse $x_L = \omega L = 314 \cdot s^{-1} H = 188{,}4\ \Omega$.

Ahela näivtakistus $z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{100^2 + 188{,}4^2} = 213{,}5\ \Omega$.

Ahela vool $I = U/z = 230\ V/213{,}5\ \Omega = 1{,}08$ A.

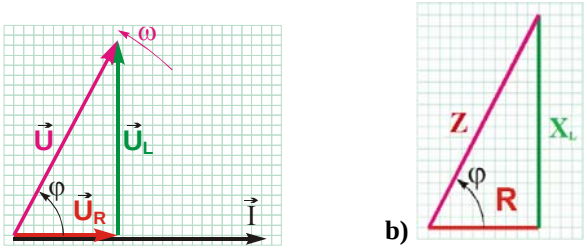
Potentsiaalilang takistil $U_R = Ir = 1{,}031\ A \cdot 100\ \Omega = 108$ V.

Leiame pinge-voolu nihkenurga tangensi: $\mathrm{tg}\varphi = x_L/r = 188{,}4/100 = 1{,}884$. Leiame nihkenurga $\varphi = 62°$.

Koostame vektordiagrammi. Valime mõõtkava tegurid. Kui pinge mõõtkava tegur $m_U = 5\frac{V}{mm}$ ja potentsiaalilang $U_R = 108$ V, siis vektordiagrammile (joonis 4.37a) kantava vektori $\dot{U}_R$ pikkus on $l_{U_R} = \frac{U_R}{m_U} = \frac{108}{5} = 21{,}6mm$. Vektordiagrammilt potentsiaalilangu suuruse määramiseks mõõdame vektori pikkuse ja, kasutades mõõtkava tegurit, saame $U_R = l_U m_U = 21{,}6 \cdot 5 = 108V$, ehk $mm \cdot \frac{V}{mm} = V$.

Vektordiagrammi koostamist alustame vooluvektorist $\vec{I}$. Valime voolu mõõtkava teguriks näiteks $m_I = 0{,}02\frac{A}{mm}$. Siis vooluvektori pikkus $l_I = \frac{I}{m_I} = \frac{1{,}08}{0{,}02} = 54mm$.

Potentsiaalilangu vektori $\dot{U}_R$ pikkusega $l_{U_R} = 21{,}6$ mm kanname vooluvektoriga samas suunas. Potentsiaalilangu vektori $\dot{U}_L$ pikkus $l_{U_L} = \frac{U_L}{m_U} = \frac{203{,}5}{5} = 40{,}7mm$. Vektor $\dot{U}_L$ edestab vektorit $\vec{I}$ 90° võrra. Liidame nüüd $\dot{U}_R + \dot{U}_L = \dot{U}$. Selleks ühendame vektori $\dot{U}_R$ alguse $\dot{U}_L$ lõpuga. Kontrolliks mõõdame, kas vektori pikkus on õige. Pikkuse l_{U_L} ja l_{U_R} alusel leiame pingekolmnurgast l_U pikkuse $l_U = \sqrt{l_{U_R}^2 + l_{U_R}^2} = \sqrt{40{,}7^2 + 21{,}6^2} = 46mm$. See on õige, sest $l_U = \frac{U}{m_U} = \frac{230}{5} = 46mm$.



a) b)

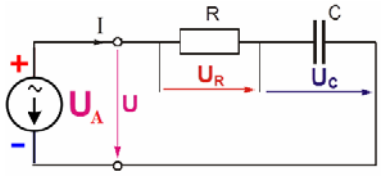
Joonis 4.37. *RL*-ahela vektordiagramm (a) ja takistuste kolmnurk (b)

Takistuse mõõtkavateguriks valime $m_Z = 5\frac{\Omega}{mm}$.

Koostame takistuskolmnurga. Aktiivtakistile vastav küljepikkus $l_R = \frac{R}{m_Z} = \frac{100}{5} = 20mm.$ Induktiivtakistile vastav küljepikkus $l_{X_L} = \frac{x_L}{m_Z} = \frac{188,4}{5} = 37,7mm.$ Näivtakistil $l_Z = \frac{z}{m_Z} = \frac{213,5}{5} = 42,7mm.$

NÄIDE 4.16

Antud: aktiivtakistit ja kondensaatorit sisaldav jadaahel (joonis 4.38). $r = 100\ \Omega$ ja kondensaatori mahtuvus on 8 µF. Toitepinge $U = 230$ V, sagedus 50 Hz.



Joonis 4.38. *RC*-ahela lülitus

Leida: x_C; z; I; U_r; U_C; φ ja koostada vektordiagramm ning takistuskolmnurk.

Lahendus

Leiame $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314s^{-1} \cdot 8 \cdot 10^{-6} F} = 398\,\Omega.$

Näivtakistus $z = \sqrt{r^2 + x_C^2} = \sqrt{100^2 + 398^2} = 410\Omega.$

Vool $I = U/Z = 230\text{V}/410\ \Omega = 0,56$ A.

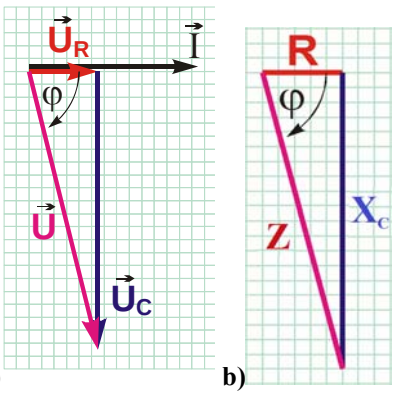
Potentsiaalilang takistil $U_r = Ir = 0,56\text{ A} \cdot 100\ \Omega = 56$ V.

Potentsiaalilang kondensaatoril $U_C = Ir_C = 0,56\text{ A} \cdot 398\ \Omega = 222,9$ V:

$$tg\varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{-x_C}{r} = \frac{-398\Omega}{100\Omega} = -3,98.$$

Pinge ja voolu vaheline nihkenurk $\varphi = -75,9°$.

Koostame vektordiagrammi (joonis 4.39a). Valime mõõtkavad: vooluvektorile $m_I = 0,02\frac{A}{mm}$, pingevektorile $m_U = 5\frac{V}{mm}$ ja takistile $m_Z = 10\frac{\Omega}{mm}$.



Joonis 4.39. *RC*-ahela vektordiagramm (a) ja takistuste kolmnurk (b)

Vooluvektori pikkus $l_I = 0,56/0,02 = 28$ mm.

Potentsiaalilangu vektorid $l_{UR} = 56/5 = 11,2$ mm.

$l_{UC} = U_C/m_U = 222,9/5 = 44,6$ mm.

$l_U = U/m_U = 230\text{V}/5 = 46$ mm.

Koostame takistuskolmnurga (joonis 4.39b). Oomtakistile vastav küljepikkus
$l_R = r/m_Z$ = 100/10 = 10 mm.
Mahtuvustakistile vastav küljepikkus $l_C = x_C/m_Z$ =3 98/10 = 39,8 mm.
Näivtakistil $l_Z = Z/m_Z$=410/10=41 mm.

NÄIDE 4.17

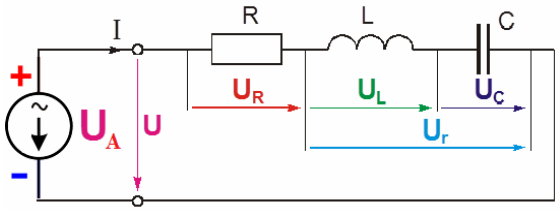
Vahelduvvoolu jadaahelasse toitepingega 230 V on järjestikku lülitatud (joonis 4.40) oomtakisti r = 8 Ω, induktiivpool takistusega x_L = 10 Ω ja kondensaator mahtuvustakistusega x_C = 4 Ω.

Leida: kogu ahela reaktiiv- ja näivtakistus, ahela vool ja potentsiaalilangud ahela erinevatel osadel. Joonistada vektordiagramm.

Lahendus
Ahela reaktiivtakistus $x = x_L - x_C$ = 10 – 4 = 6 Ω.

Näivtakistus $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10$ Ω.

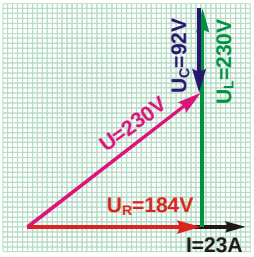
Vool $I = \frac{U}{z} = \frac{230}{10} = 23$ A.



Joonis 4.40. *RLC*-jadaahela lülitus

Potentsiaalilangud ahela osadel: aktiivtakistusel $U_r = Ir$ = 23 · 8 = 184 V; induktiivpoolil $U_L = Ix_L$ =2 3 · 10 = 230 V; kondensaatoril $U_C = Ix_C$ = 23 · 4 = 92 V.

Vektordiagrammi konstrueerimist (joonis 4.41) alustame nn **alusvektorist** – vooluvektorist (kõikides elementides on üks ja sama vool). Valime voolu mõõtkava: $m_I = 0{,}5\frac{A}{mm}$. Siis vastab 10 A-le vektori pikkus 20 mm, 23 A-le pikkus 46 mm. Edasi valime potentsiaalilangu vektorite mõõtkava $m_U = 5\frac{V}{mm}$. Siis vastab 100 V-le vektori pikkus 20 mm. Takisti potentsiaalilangule 184 V vastab vektor $\vec{U}_R$ pikkusega 36,8 mm. Takisti vool ja potentsiaalilang on faasis. Pooli potentsiaalilangu vektor on voolu I vektorist 90º ees. Vektori pikkus 230 : 5 = 46 mm.

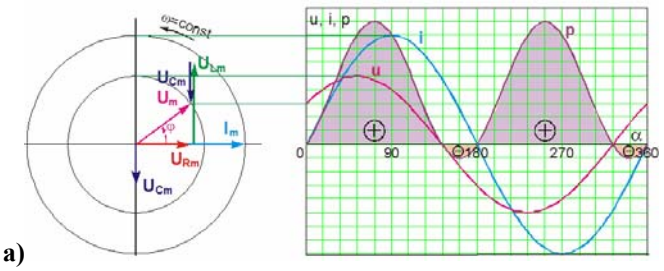


Joonis 4.41. *RLC*-jadaahela vektordiagramm

Seejärel liidame kondensaatori potentsiaalilangu vektori (jääb vooluvektorist 90º maha). Vektori pikkus 92 : 5 = 18,4 mm. Kolme vektori summa saamiseks ühendame esimese vektori $\dot{U}_r$ alguse kolmanda vektori $\dot{U}_L$ lõpuga ja saame vastavalt $\dot{U} = \dot{U}_r + \dot{U}_L + \dot{U}_C$ toitepinge U vektori, mille pikkus on samuti 230 : 5 = 46 mm.

Voolu ja potentsiaalilangu muutumine. Vaatleme, kuidas muutuvad potentsiaalilangud ja vool vahelduvvoolu jadaahelas.

Nagu eespool on selgunud, langeb potentsiaalilang ja vool faasilt kokku ainult aktiivtakistust sisaldavas ahelas; induktiivtakistuse korral on potentsiaalilang voolust ees 90º ja mahtuvustakistuse korral jääb potentsiaalilang voolust maha 90º. Kõiki kolme liiki takistusi sisaldavas ahelas on faasinihe allikapinge ja voolu vahel väiksem kui 90º ja suurem kui 0º. Sel juhul on pinge- ja vooluvektor faasilt nihutatud mingi faasinihke nurga φ võrra (joonis 4.35b). Selle nurga suurus määratakse mainitud ahelasse lülitatud erinevate takistite vastastikuse suhtega. Kui näiteks aktiivtakistus on tunduvalt suurem induktiiv- ja mahtuvustakistusest, siis φ on võrdlemisi väike. Kui ahelas on suur induktiivtakistus või mahtuvustakistus, siis faasinihke nurk φ kasvab ja läheneb 90º. Seejuures, kui induktiivtakistus on mahtuvustakistusest suurem, siis pinge on voolust ees nurga φ võrra, kui aga mahtuvustakistus on induktiivtakistusest suurem, siis pinge jääb voolust maha nurga φ võrra. Joonisel 4.42a on võetud voolu algfaasiks null, s.o $i = I_m \sin \omega t$.



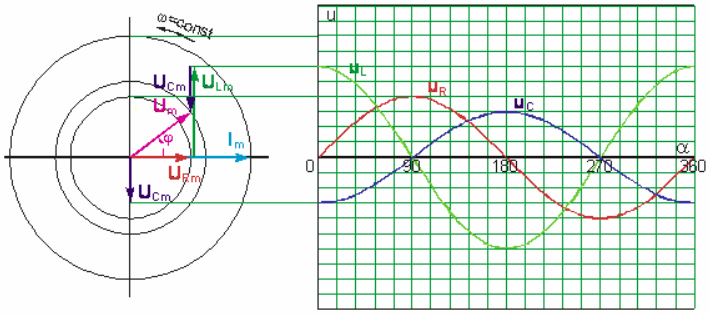
a)

Siis toitepinge $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

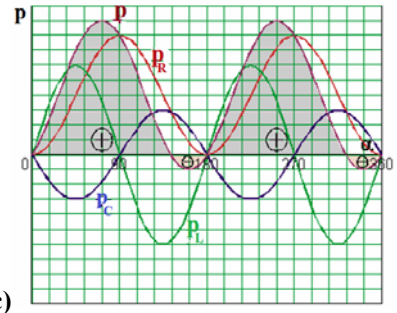
Potentsiaalilangud: $u_R = U_{Rm} \sin(\omega t)$

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) = U_{Lm} \sin(\omega t + 90°).$$

$$u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \pi/2) = U_{Cm} \sin(\omega t - 90°).$$



b)

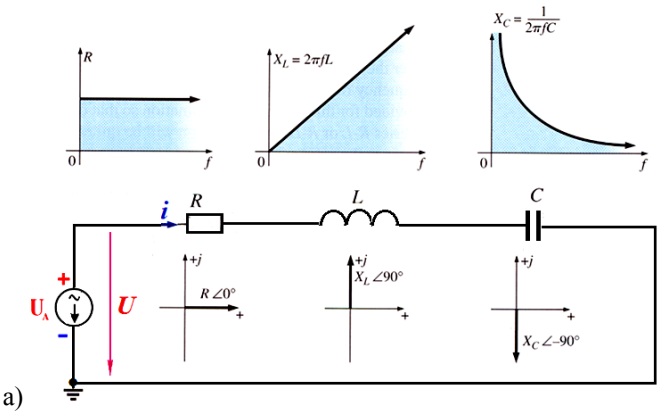


c)

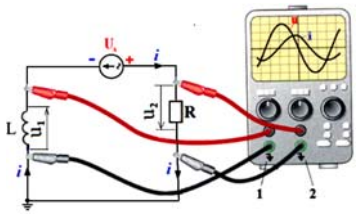
Joonis 4.42. Voolu, pinge, potentsiaalilangude ja hetkvõimsuse muutumine *RLC*-jadaahelas olenevalt ajast (a), potentsiaalilangude sõltuvus ajast poolil, takistil ja kondensaatoril (b) ning hetkvõimsuste muutumine (c)

Hetkvõimsused (joonis 4.28 ja 4.34):
summaarne $p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = UI[(\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)]$;
aktiivtakistil $p_R = u_R i = I^2 R(1 - \cos 2\omega t)$; induktiivsusel $p_L = u_L i = I^2 X_L \sin 2\omega t$ ja
mahtuvusel $p_C = u_C i = -I^2 x_C \sin 2\omega t$. Võimsuse reaktiivne osa $p_X = p_L + p_C = I^2 x \sin 2\omega t$.

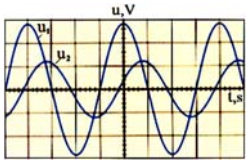
Joonisel 4.43a on jadalülituse olevate *RLC*-elementide (takisti, pooli, kondensaatori) takistuse sõltuvused toitepinge sagedusest.



a)



b)



c)

Joonis 4.43. *RLC*-jadaahel. Elementide takistuse olenevus sagedusest (a). Pinge hetkvõimsuse mõõtmine ostsillograafiga ja allika- ja *RLC*-elementide pingekõverad, nende muutumine ajas (b)

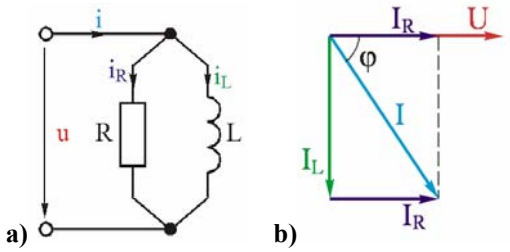
Joonisel on tinglikult nooleotsaga näidatud takistuse muutumise suund, kui sagedus suureneb. Oomtakisti takistus ei olene sagedusest. Pooli induktiivtakistus suureneb lineaarselt ja kondensaatoril väheneb pöördvõrdeliselt. Samuti on tinglikult näidatud aktiiv, induktiiv- ja mahtuvustakistuse suund reaal- ja imaginaarteljestikus.

Joonisel 4.43b on näidatud, kuidas ostsillograafi abil saab vaadelda näiteks induktiivpooli ja takisti potentsiaalilangu (sellega faasis ning võrdelises seoses olevat voolu). Joonisel 4.43c on näidatud, kuidas näeksid välja ostsilloskoobi sisend 1 ja sisend 2 signaalina. Siin u_1 on induktiivpooli ja u_2 takisti potentsiaalilang, mis on võrdeline ahela vooluga.

4.7. Vahelduvvoolu rööpahel

Takisti ja pooli paralleel- ehk rööplülitus. Olgu takisti ja induktiivpool L rööplülituses (joonis 4.44a). Sellisele ahelale on iseloomulik, et harude pinged on võrdsed ja üldine vool võrdub haruvoolude summaga, s.o potentsiaalilangud võrduvad toitepingega u, aga vool i jaguneb kaheks osaks: läbi takisti R voolab voolu aktiivkoosteosa (-komponent) i_R ja läbi induktiivelemendi L – voolu reaktiivkomponent i_L. Nende kahe voolu summa võime leida vektordiagrammi abil. (joonis 4.44b).

Sellel diagrammil on pinge U valitud alus- (baassuuruseks), seega allikaväljundpinge $u = U_m \sin \omega t$. Jooniselt on näha, et voolu aktiivkomponent I_R langeb faasilt kokku pingega U, aga reaktiivkomponent jääb faasilt pingest U maha 90°.



Joonis 4.44. Takisti ja induktiivpooli rööplülitus: a – *r* ja *L* lülitus; b – potentsiaalilangu ja voolude vektordiagramm

Potentsiaalilangu ja voolu efektiivväärtused on seotud ahela parameetritega Ohmi seaduse kaudu

$$U = rI_r = \omega L I_L .$$

Vektordiagrammilt (joonis 4.44b) on näha, et summaarse voolu efektiivväärtus

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_L^2} = \sqrt{(U/r)^2 + (U/\omega L)^2} . \qquad (4.1)$$

Valemist (4.1) järeldub, et vahelduvvooluahela näivtakistus takisti ja induktiivpooli rööplülitusel avaldub

$$Z = \frac{r\omega L}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} . \qquad (4.2)$$

Summaarne vool I jääb faasilt pingest U maha nurga φ võrra, kusjuures

$$tg\varphi = \frac{I_L}{I_r} = \frac{r}{\omega L} . \qquad (4.3)$$

Vahelduvtoitepinge $u = U_m \sin \omega t$ korral voolude hetkväärtused on

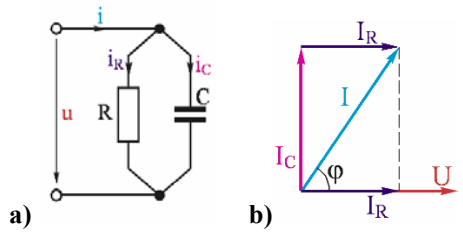
$$i_r = \frac{U_m}{r}\sin \omega t,\ i_L = \frac{U_m}{\omega L}\sin(\omega t - \pi/2) .$$

Summaarne vool $$i = \frac{U_m}{Z}\sin(\omega t - \varphi) ,$$

kus nurk φ määratakse valemiga (4.3).

Igal ajahetkel $i = i_r + i_L$. Summaarse voolu leidmiseks tuleb voolude efektiivväärtused I_R ja I_L liita geomeetriliselt.

Takisti ja kondensaatori rööplülitus. Joonisel 4.45a oleva skeemi kohta kehtib samuti väide, et koguvool I on haruvoolude $I_r = U/r$ ja $I_C = U\omega C$ geomeetriline summa.



a) b)

Joonis 4.45. Takisti ja kondensaatori rööplülitus: a – skeem, b – potentsiaalilangu ja voolude vektordiagramm

Joonisel 4.45b on näidatud vektordiagramm, millelt näeme, et vool I on potentsiaalilangust U faasilt ees, kusjuures

$$tg|\varphi| = \frac{I_C}{I_R} = \omega Cr\,. \tag{4.4}$$

Ahela näivtakistus vahelduvvoolule

$$z = \frac{U}{I} = \frac{U}{\sqrt{I_r^2 + I_C^2}} = \frac{R}{\sqrt{1 + (\omega Cr)^2}}\,. \tag{4.5}$$

Haruvoolude hetkväärtused saab leida sarnaselt takisti ja induktiivpooli rööplülitusega.

NÄIDE 4.18

Antud: joonisel 4.45a esitatud ahelale on antud järgmised parameetrid: U = 230 V, f = 50 Hz, r = 1100 Ω, C = 10 μF.

Määrata: vool I, faasinihe φ ja rööplülituse näivtakistus.

Lahendus

Haruvoolud leiame Ohmi seaduse järgi

$$I_r = \frac{U}{r} = \frac{230}{1100} = 0{,}21\,\text{A};\quad I_C = U\omega C = 230 \cdot 314 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 0{,}63\,\text{A}.$$

Koguvool $I = \sqrt{I_r^2 + I_C^2} = 0{,}66\,\text{A}.$

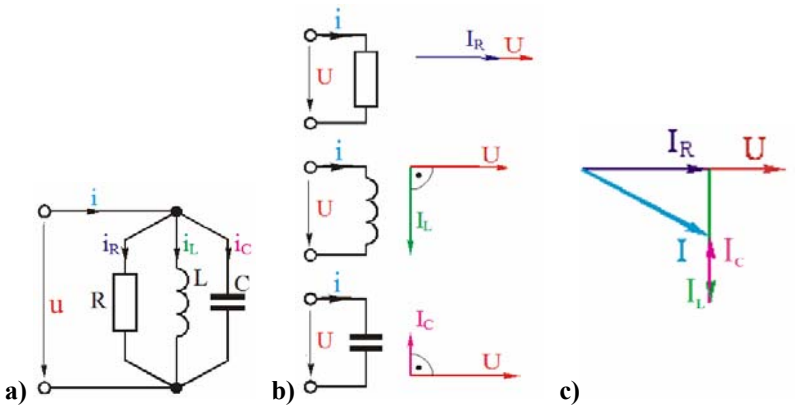
Joonise 4.45b järgi on vool I faasilt pingest U ees nurga φ võrra, mille väärtus määratakse valemi (4.4) järgi:

$$|\varphi| = arctg\frac{I_C}{I_r} = 73°51'\,.$$

Näivtakistus $Z = \frac{U}{I} = \frac{230}{0{,}66} = 348\,\Omega.$

Takisti, pooli ja kondensaatori rööplülitus. Skeemis joonisel 4.46 võrdub koguvool I haruvoolude vektorsummaga $\vec{I} = \vec{I}_r + \vec{I}_L + \vec{I}_C$, kus $I_r = U/r$, $I_L = U/x_L = U/\omega L$ ja $I_C = U/x_C = U\omega C$.

Vektordiagrammi võib joonistada järgmiselt: võtame allikaväljundpinge algfaasi võrdseks nulliga ja joonistame vektori U. Joonisel 4.46b on näidatud vektordiagrammid harudele R, L ja C, aga joonisel 4.46c kogu RLC-ahela vektordiagramm.



Joonis 4.46. Elementide *r, L* ja *C* rööplülitus: a – skeem; b – harude *r, L, C* vektordiagrammid; c – kogu ahela vektordiagramm

Haruvoolude geomeetriline summa annab koguvoolu *I* vektori. Vektordiagrammilt saab määrata koguvoolu faasinihke nurga iga *RLC*-elemendi potentsiaalilanguga võrduva allikaväljundpinge suhtes.

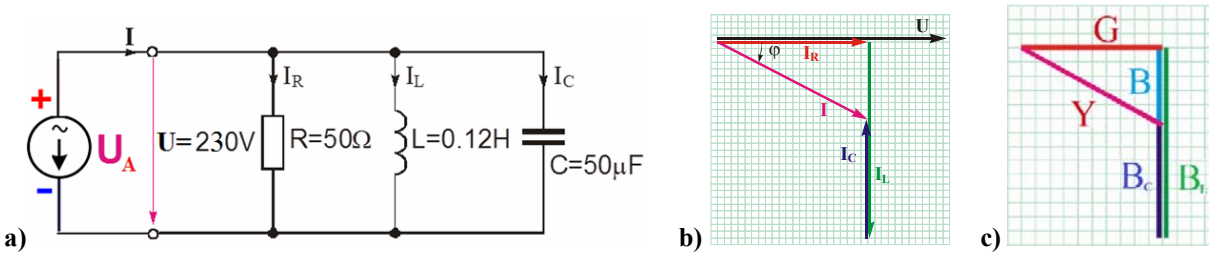
NÄIDE 4.19

Antud: *RLC*-rööpahel (joonis 4.47) parameetritega $r = 50\ \Omega$, $L = 0{,}12$ H, $C = 50\ \mu$F, $U = 230$ V, $f = 50$ Hz.

Leida: $x_L, x_C, z, g, b_L, b_C, y, I_r, I_L, I_C, I, \varphi$. Koostada vektordiagramm ja juhtivuste diagramm.

Lahendus

Leiame induktiivse reaktiivtakistuse $x_L = \omega L = 314 \cdot s^{-1} \cdot 0{,}12\ \text{H} = 37{,}7\ \Omega$.



Joonis 4.47. *RLC*-rööpahela lülitusskeem (a), vektordiagramm (b) ja juhtivuskolmnurk (c)

Kondensaatori takistus $x_C = \dfrac{1}{\omega C} = \dfrac{1}{314 \cdot s^{-1} \cdot 50 \cdot 10^{-6} F} = 63{,}7\ \Omega.$

Leiame näivjuhtivuse $Y = \sqrt{\dfrac{1}{r^2} + \left(\dfrac{1}{x_C} - \dfrac{1}{x_L}\right)^2} = \sqrt{\dfrac{1}{50^2} + \left(\dfrac{1}{63{,}7} - \dfrac{1}{37{,}7}\right)^2} = 22{,}7 \cdot 10^{-3}\ \text{S}.$

Ahela näivtakistus $Z = \dfrac{1}{Y} = \dfrac{1}{22{,}7 \cdot 10^{-3}\ \text{S}} = 44\ \Omega.$

Vool takistis $I_R = U/r = 230\ \text{V}/50\ \Omega = 4{,}6\ \text{A}.$

Vool poolis $I_L = U/x_L = 230\ \text{V}/37{,}7\ \Omega = 6{,}1\ \text{A}.$

Vool kondensaatoris $I_C = U/x_C = 230\ \text{V}/63{,}7\ \Omega = 3{,}61\ \text{A}.$

Ahela koguvool $I = U/z = 230\ \text{V}/44\ \Omega = 5{,}23\ \text{A}.$

$$\tan\varphi = \frac{\dfrac{1}{x_C} - \dfrac{1}{x_L}}{\dfrac{1}{r}} = \frac{\dfrac{1}{63{,}7\Omega} - \dfrac{1}{37{,}7\Omega}}{\dfrac{1}{50\Omega}} = -0{,}54.$$

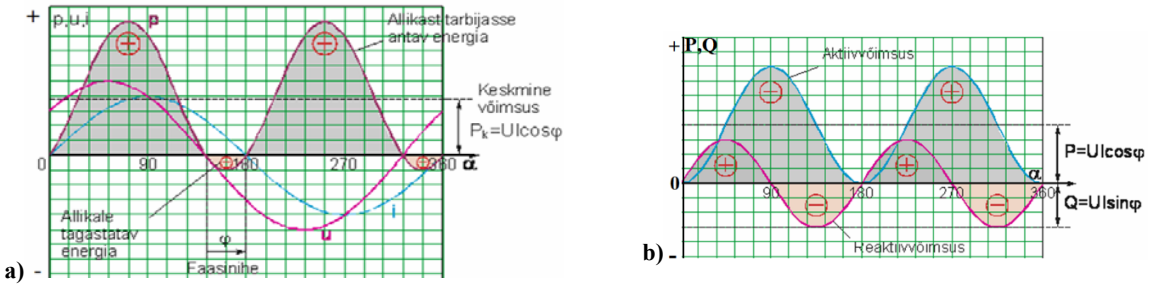
Siit pinge ja voolu vaheline nihkenurk $\varphi = -28{,}25°$.

Aktiivjuhtivus $g = 1/r = 1/50\Omega = 20$ mS. Induktiivjuhtivus $b_L = 1/X_L = 1/37{,}7\ \Omega = 26{,}5$ mS. Mahtuvuslik juhtivus $b_C = 1/X_C = 1/63{,}7\ \Omega = 15{,}7$ mS.

Koostame vektordiagrammi (joonis 4.47b) ja juhtivuste kolmnurga (joonis 4.47c).

4.8. Vahelduvvoolu võimsus ja võimsustegur

Võimsuse muutumine. Joonisel 4.48 on näidatud aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistust sisaldava vahelduvvoolu tarbija hetkvõimsuste graafikud. Võimsuse graafiku võib saada ka voolu ja pinge hetkväärtuste korrutisena erinevatel ajahetkedel.



Joonis 4.48. *RLC*-ahela hetkvõimsuse muutumine ajas. Negatiivse võimsuse ajal tagastatakse elektrienergia tarbijalt allikale (a). Allikas annab üheaegselt tarbijale nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust (b)

Graafikult näeme, et teatud ajahetkedel on vool ja pinge vastasmärgilised ja hetkvõimsus negatiivne. Negatiivse võimsuse tarbimine elektriahelas on kahjulik. See tähendab, et sellistel ajavahemikel tarbija (näiteks vahelduvvoolumootor) tagastab osa saadud elektrienergiast toiteallikale. Selle tõttu väheneb toiteallikalt tarbijale antava võimsuse osa.

On ilmne, et mida suurem on faasinihke nurk φ, seda suurem on ajavahemik, mille vältel tagastatakse osa elektrienergiast allikale ja seda suurem on tagasiantav võimsus. Teiste sõnadega, mida suurem on pinge ja voolu vaheline faasinihe, seda väiksem on antud elektriseadmes tarbitava võimsuse osakaal.

Vahelduvvoolu korral leitakse elektriseadmetes tarbitav keskmine võimsus valemiga $P_k = UI\cos\varphi$,

kus I ja U on voolu ja pinge efektiivväärtused.

Seda suurust nimetatakse harilikult vahelduvvoolu **aktiivvõimsuseks *P***, s.o $P = UI\cos\varphi$.

Suurust cos φ (koosinus fii) nimetatakse **võimsusteguriks**, selle väärtuse järgi võib otsustada, kuidas antud elektriahel või elektriseade kasutab toiteallika saadavat võimsust.

Võimsusteguri võib leida ka valemiga $\cos\varphi = \dfrac{r}{z}$,

kus r on aktiivtakistus; z – näivtakistus.

Aktiiv- ja reaktiivvõimsus. Vahelduvvoolu võimsust võib kujutada kahe koostisosa summana (joonis 4.48b). Üks neist muutub nagu aktiivtakistuses tarbitav võimsus (joonis 4.16) ja seda nimetatakse **aktiivhetkvõimsuseks.** Teine koostisosa muutub nagu reaktiivtakistuses (induktiivses või mahtuvuslikus – joonis 4.28 ja 4.34) tsirkuleeriv võimsus ja seda nimetatakse **reaktiivhetkvõimsuseks.** Aktiivhetkvõimsuse keskmine väärtus (perioodi kohta) võrdub kogu võimsuse keskmise väärtusega

$$P = P_k = UI\cos\varphi.$$

Mainitud suurust nimetatakse vahelduvvoolutehnikas harilikult **aktiivvõimsuseks** või lihtsalt vahelduvvoolu võimsuseks.

Reaktiivhetkvõimsuse keskmine väärtus (perioodi kohta) võrdub nulliga. Seepärast kasutatakse praktikas reaktiivvõimsuse suuruse hindamiseks selle maksimaalväärtust ja tähistatakse seda tähega Q:

$$Q = UI \sin \varphi ,$$

kus I ja U on voolu ja pinge efektiivväärtused.

Reaktiivvõimsuse maksimaalväärtust nimetatakse vahelduvvoolutehnikas harilikult **reaktiivvõimsuseks.**

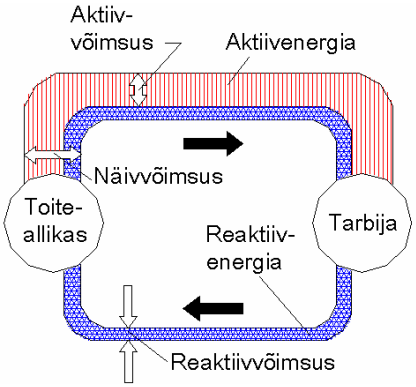
Suurust sin φ (siinus fii), mis määrab reaktiivvõimsuse väärtuse, võib arvutada valemiga

$$\sin \varphi = \frac{x}{z},$$

kus x on antud elektriahela reaktiivtakistus; z – selle näivtakistus.

Joonise 4.48b võimsusgraafikutest näeme, et ainult aktiivvõimsus muundub tarbijas mingiks teiseks energialiigiks. Seega toimub elektrienergia sihipärane kasutamine. Aktiivvõimsus on kogu perioodi jooksul positiivne, s.o talle vastav elektrienergia (nn aktiivenergia) kandub pidevalt allikast tarbijasse (joonis 4.48). Reaktiivvõimsus ei saa formaalselt teha mingit kasulikku tööd, sest selle keskmine väärtus perioodi kohta on null. Nagu näha jooniselt 4.48b, on see võimsus kord positiivne, kord negatiivne, s.o sellele võimsusele vastav elektrienergia (nn reaktiivenergia) ringleb pidevalt elektriahelas, liikudes allikalt tarbijasse ja tagasi (joonis 4.49), ei muundu tarbijas ja tagastatakse vooluallikale.

Nii nagu võimsus jagatakse aktiiv- ja reaktiivvõimsuseks, jagatakse ka ahelas kulgev vahelduvvool aktiiv- ja reaktiivkomponentideks. Seejuures **annab voolu aktiivkomponendi korrutis potentsiaalilanguga aktiivvõimsuse, aga voolu reaktiivkomponendi korrutis potentsiaalilanguga – reaktiivvõimsuse.**



Joonis 4.49. Aktiiv- ja reaktiivenergia ülekanne allikalt tarbijale

Aktiivvõimsust mõõdetakse vattides (W) või kilovattides (kW), reaktiivvõimsust – varrides (var) või kilovarrides (kvar).

Reaktiivvõimsus avaldab elektrivarustussüsteemi tööle kahjulikku mõju ja seepärast püütakse tööstustingimustes (suure tarbimise korral) seda võimalikult vähendada. Reaktiivvõimsuse pidev ringlemine vooluallika ja tarbijate vahel koormab vahelduvvoolugeneraatoreid ja elektrivõrke (trafosid, liinijuhtmeid ja muud) voolukomponentidega, mis ei tee kasulikku tööd, ja sellega ei lase kasutada neid täiendava võimsuse tootmiseks ja tarbijatele edastamiseks.

Näivvõimsus. Vahelduvvoolugeneraatorid on arvutatud teatud nimivoolule I (mähise traadi ristlõikele) ja teatud nimipingele U (mähise isolatsioonile), mis määravad masina aktiivosa kujunduse ja nende mõõtmed. Generaatori nimivoolu või nimipinget oluliselt suurendada ei saa, kuna see võib põhjustada masina mähiste lubamatu liigkuumenemise või isolatsiooni läbilöögi. Seepärast võib generaator kestvalt ilma avariiohuta arendada vaid kindlat võimsust, mis on määratud tema nimivoolu ja nimipinge korrutisega.

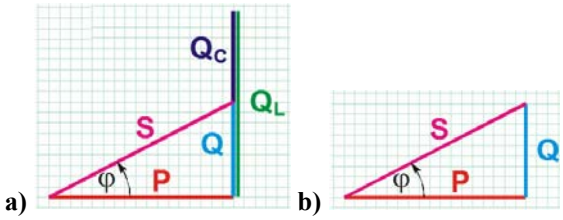
Nimivoolu ja nimipinge efektiivväärtuste korrutist nimetatakse **näivvõimsuseks** (tähistatakse tähega S), s.o $S = UI$. Pidevalt nimivõimsusel töötav elektriseade töötab projekteeritud eluea piires, milleks elektriseadmete kujundamisel valitakse ligikaudu 25...50 aastat. Eeldatakse, et nimivooluga töö korral mähisetraat nimijahutustingimustel ei kuumene üle ja isolatsioon ei rikne. Seadme eluea lõpp saabub tavaliselt isolatsiooni riknemise

tõttu, mis võib juhtuda ootamatult avariilise talitluse korral, mil mähistes tekkivad mähiste temperatuuri tõstvad lubamatud suured liigvoolud, liigpinged (mittesümmeetrilises avariitalitluses, äikese ja lülitusliigpinged), mis rakendavad isoleermaterjalide dipoolidele lubamatult suured elektrivälja jõud ja moonutatud siinuspinge kõrgemad harmoonilised, mis panevad dipoole võrgusagedusest (nimisagedusest) suurema sagedusega „tantsima“ (laenguid ringi paigutama). Nende eritingimuste korral seadme eluiga oluliselt kahaneb. Seadme jooksvat seisundit hinnatakse isolatsiooni takistuse ja temperatuuri mõõtmise teel. Seadmel on „palavik“, kui ta temperatuur kasvab üle mähiste poolt määratud nimitemperatuuri (isolatsiooni nimitemperatuuri). Tähtis on mõõta temperatuuri halbade jahutustingimustega seadmeosades. Hinnalised seadmed varustatakse termokaitsmetega, mis ohtliku kuumenemise korral lülitavad viivitamatult seadme välja.

Järelikult kujutab näivvõimsus võimsuse suurimat väärtust etteantud voolu ja pinge korral. Näivvõimsust mõõdetakse voltamprites (VA) või kilovoltamprites (kVA).

Näivvõimsuse seos aktiiv- ja reaktiivvõimsusega: $S^2 = P^2 + Q^2$.

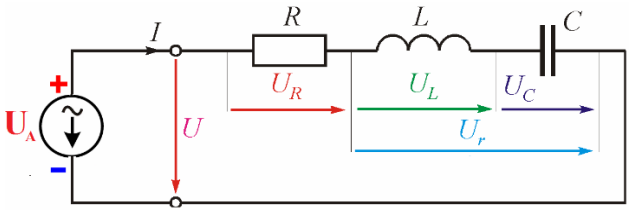
Kui korrutada pingekolmnurga (joonis 4.41) kõiki külgi vooluga I, siis saame sellega sarnase võimsuskolmnurga (vt joonis 4.50). Võimsuskolmnurgast võib leida $\cos\varphi = P/S$ ja $\sin\varphi = Q/S$.



Joonis 4.50. Võimsuskolmnurk, mis sisaldab reaktiivvõimsuse Q mõlemat komponenti: induktiivset Q_L ja mahtuvuslikku Q_C (a) ning aktiiv-, reaktiiv- ning näivvõimsust sisaldav võimsuste kolmnurk (b)

NÄIDE 4.20

Antud: vahelduvvooluahelasse (joonis 4.51) pingega 230 V on jadamisi lülitatud aktiivtakistus $r = 8\ \Omega$, induktiivtakistus $x_L = 12\ \Omega$ ja mahtuvustakistus $x_C = 6\ \Omega$.



Joonis 4.51. *RLC*-jadaahel

Leida: selles ahelas tarbitav aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsus ning võimsustegur.

Lahendus

Ahela reaktiivtakistus $x = x_L - x_C = 12 - 6 = 6\ \Omega$.

Ahela näivtakistus $z = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\ \Omega$.

Vool $I = \dfrac{U}{z} = \dfrac{230}{10} = 23\ \text{A}$.

Võimsustegur $\cos\varphi = \dfrac{r}{z} = \dfrac{8}{10} = 0{,}8$

Aktiivvõimsus $P = UI\cos\varphi = 230 \cdot 23 \cdot 0{,}8 = 4232\ \text{W}$.

Sin φ väärtus $\sin\varphi = \dfrac{x}{2} = \dfrac{6}{10} = 0{,}6$

Reaktiivvõimsus $Q = UI\sin\varphi = 230 \cdot 23 \cdot 0{,}6 = 3174\ \text{var}$.

Näivvõimsus $S = UI = 230 \cdot 23 \cdot = 5290$ VA.

Valem $S^2 = P^2 + Q^2$ näitab, et mida suurem on nimikoormusel vahelduvvoolugeneraatoris reaktiivvõimsus, seda väiksemaks jääb tema poolt tarbijale antav aktiivvõimsus. Teiste sõnadega, reaktiivvõimsus ei lase täielikult ära kasutada vahelduvvoolugeneraatori kogu arvutuslikku võimsust kasuliku elektrienergia genereerimiseks.

Sama kehtib ka elektrivõrkude kohta. Voolu väärtus, mida võib ohutult lasta läbi selle elektrivõrgu elementide, on põhiliselt määratud nende voolujuhtivate osade ristlõikega. Seega, kui osa võrgu voolust läheb reaktiivvõimsuse ülekandeks, siis sellega väheneb ka ahelasse antava ja aktiivvõimsuse tarbimist tagava voolu aktiivkomponendi osa.

Tuleb märkida, et vahelduvvoolugeneraatorite, elektrivõrkude ja tarbijate juhtmetes kulgevad reaktiivvoolud põhjustavad neis võimsuskadusid. Seega nõuab reaktiivvõimsuse võnkumine vahelduvvooluallika ja tarbijate vahel täiendavat kaoenergiat. See muundub tarbija ja allika vahelistes elektriülekande osades soojusenergiaks, põhjustades nende kuumenemist.

Võimsustegur. Aktiivvõimsuse suhe näivvõimsusse võrdub võimsusteguriga:

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

Järelikult iseloomustab cos φ suurus selle allika näivvõimsuses teisteks energialiikideks muundatava võimsuse osa. Mida suurem on cos φ, seda suurem on aktiivvõimsus ja seda väiksem on reaktiivvõimsus, cos φ suurenemisel ja tarbija konstantse aktiivvõimsuse korral väheneb allikast tulev vool

$$I = \frac{P}{U\cos\varphi},$$

kus P on tarbija aktiivvõimsus, W; U – toiteallikaväljundpinge ehk tarbija potentsiaalilang, V.

Voolu I vähenemisel vähenevad ka võimsuskaod elektriülekande juhtmetes, võimaldades täiendavalt koormata vooluallikat ja elektrivõrku, s.o võimaldades nende sihipärast paremat kasutamist.

Kui tarbija võtab allikast muutumatut koormusvoolu, siis cos φ suurendamine viib tarbija aktiivvõimsuse P suurenemisele, cos φ = 1 puhul on reaktiivvõimsus null ja kogu allikast tulev võimsus on aktiivvõimsus. Seepärast püütakse ettevõtetes suurendada võimsustegurit ja viia see ühele võimalikult lähedale.

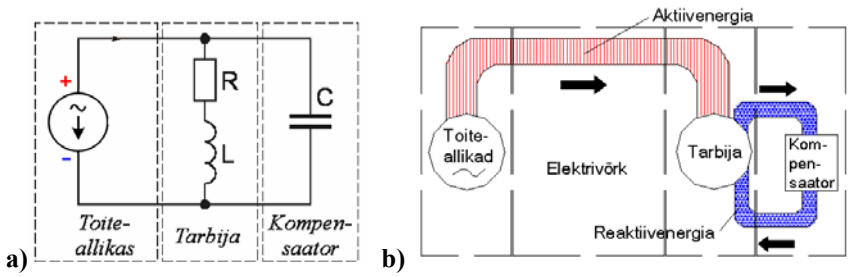
Vahelduvvoolu elektriseadmete võimsustegurid on erinevad. Hõõglambid kujutavad enesest põhiliselt aktiivtakistust, seepärast nende lülitamisel voolu ja pinge vaheline faasinihe praktiliselt puudub. Järelikult võib hõõglampidega valgustuskoormuse jaoks võimsusteguri lugeda võrdseks ühega. Hõõglampides muundatakse valdav osa soojusenergiaks, väiksem valguskiirguse energiaks. See on nende lampide puudus.

Vahelduvvoolumootorite puhul oleneb võimsustegur koormusest. Mootori arvutusliku nimikoormuse korral võrdub võimsustegur cos φ harilikult 0,8...0,9, võimsatel mootoritel on see tegur isegi suurem. Mootori alakoormusel langeb tema võimsustegur järsult (tühijooksul kuni 0,25...0,3).

Võimsusteguri suurendamine. Võimsusteguri suurendamine (parendamine) saavutatakse mitmesuguste võtetega. Neist põhiline on eriseadmete (nn reaktiivvõimsuse kompensaatorite) lülitamine paralleelselt vahelduvvoolu seadmetega (joonis 4.52).

Kompensaatoritena kasutatakse kõige sagedamini kondensaatoreid (staatilised kompensaatorid), varem kasutati ka spetsiaalseid elektrimasinaid, pöörlevaid kompensaatoreid, nn sünkroonkompensaatoreid ja sünkroonmootoreid, reguleerides vastavalt nende ergutusvoolu (kasutatakse harva).

Elektromagnetväljade kasutamisega toimiv, seega induktiivtakistust sisaldav vahelduvvoolu elektriseade tarbib alati reaktiivenergiat. Kompensaatori lülitamisel vabanevad toiteallikas ja elektrivõrk reaktiiv-energiast, kuna see ringleb ahelas „tarbija – kompensaator“ (joonis 4.52b).

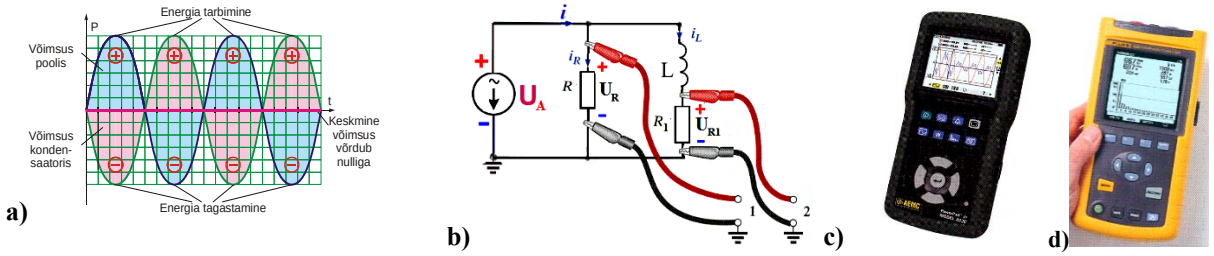


Joonis 4.52. Kondensaatori lülitamisel (a) vabanevad vahelduvvooluallikas ja elektrivõrk reaktiivenergiast (b). See ringleb vaid ahelas „tarbija – kompensaator“ (tarbija reaktiivvõimsuse allikas)

Sellega saavutatakse oluliselt parem vahelduvvoolugeneraatorite ja elektrivõrkude kasutamine ja energiakadude vähenemine, mis oleksid tekkinud reaktiivenergia ringlemisel toiteallika ja tarbija vahel. Sel juhtumil täidab kompensaator kohapealse reaktiivenergiageneraatori rolli. Seda seletatakse asjaoluga, et voolud kondensaatoris ja induktiivpoolis on teineteise vastu suunatud (esimene on pingest 90° ees, teine jääb pingest 90° maha) ning seepärast vähendab kondensaatori lülitamine üldist reaktiivvoolu (induktiiv- ja mahtuvustakistuse summaarset voolu) ja faasinihet pinge ning voolu vahel.

Faasilt vastupidised on ka kondensaatori ja induktiivpooli võimsuste muutumise kõverad (joonis 4.53). Ja kui valida kondensaatori võimsus nii, et see on võrdne induktiivpooli võimsusega (täpne kompensatsioon), siis saame joonisel 4.53 kujutatud olukorra. Kui pool tarbib elektrienergiat (võimsus on positiivne), siis kondensaator annab seda (võimsus on negatiivne). Kui kondensaator tarbib energiat, siis pool annab seda.

Niisuguse reaktiivvõimsuse kompensaatori valikul võib veenduda, et kogu induktiivtakistust sisaldavas elektriseadmes tuleb tarbitav reaktiivenergia kompensaatorist; generaator ja võrk selles ei osale. Nendel tingimustel on elektriseadme ja kompensaatori ühine cos φ võrdne ühega, s.o vooluallikast antakse tarbijasse ainult aktiivvõimsust.



Joonis 4.53. Kondensaatoris ja induktiivpoolis tarbitavad elektrivõimsused on vastasfaasis. Seepärast ringleb nende lülitamisel paralleelselt (võimsuste võrdsuse korral) reaktiivenergia ahelas „induktiivpool – kondensaator“ ja võrgust reaktiivvoolu ei tarbita. Potentsiaalilangude mõõtmine-registreerimine kaasaskantava analüsaatori abil (b ja c) ning moonutatud pingekõvera kõrgemate harmooniliste määramine analüsaatoriga (d)

Et veenduda, missugune on tarbija ahelate tegelik olukord, saab selleks eesmärgiks kasutada olemasolevaid mõõteriistu ja analüsaatoreid. Nii on joonisel 4.53 esitatud reaktiivvõimsuse kompensatsiooniidee ja kahekanalilise registreeriva mõõteriista sisendi ühendamise näide (b) ning mõõtetulemus (c), samuti ka moonutatud pingekõvera kõrgemate harmooniliste sisalduse määramine analüsaatoriga (d).

4.9. Juhtivused vahelduvvooluahelas

Näivtakistuse z pöördväärtust $Y = \frac{1}{z}$ nimetatakse **näivjuhtivuseks** ja mõõdetakse siimensites (S). Näivjuhtivuse kaudu saame Ohmi seaduse väljendada järmiselt:

$$I = UY \tag{4.6}$$

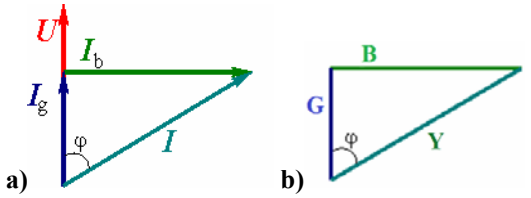
ning voolukomponendid (joonis 4.54a)

$$I_g = I\cos\varphi = UY\cos\varphi = Ug \text{ ja} \tag{4.7}$$

$$I_b = I\sin\varphi = UY\sin\varphi = Ub, \tag{4.8}$$

kus $g = Y\cos\varphi$ on **aktiivjuhtivus** ja $b = Y\sin\varphi$ **reaktiivjuhtivus**. Jagades need seosed U-ga, saame voolude kolmnurgaga sarnase nn **juhtivuskolmnurga** (joonis 4.54b), mille põhjal

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2} \text{ ja } \tan\varphi = \frac{b}{g}.$$



a) **b)**

Joonis 4.54. Voolukomponendid (a) ja juhtivuskolmnurk (b)

Arvestades varem saadud seoseid, saame juhtivused avaldada järgmiste takistuste kaudu:

$$g = Y\cos\varphi = \frac{1}{z}\cdot\frac{r}{z} = \frac{r}{z^2}, \tag{4.9}$$

$$b = Y\sin\varphi = \frac{1}{z}\cdot\frac{x}{z} = \frac{x}{z^2}. \tag{4.10}$$

Jadaahela reaktiivjuhtivus võib üldjuhul sisaldada induktiiv- ja mahtuvusjuhtivust ning siis (sarnaselt reaktiivtakistusega) $b = b_L - b_C$,

kusjuures $b_L = \frac{x_L}{z^2}$ ja $b_C = \frac{x_C}{z^2}$.

Sarnaselt seostega (4.9) ja (4.10) kehtivad ka vastupidised – ahela takistuse võib leida selle juhtivuse kaudu:

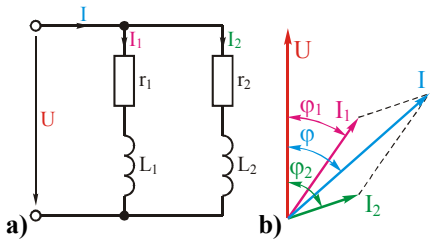
$$R = \frac{g}{Y^2} \quad \text{ja} \quad X = \frac{b}{Y^2}.$$

4.10. Vahelduvvoolu hargahelad

Lihtsaima kahe haruga ahela arvutus. Aktiiv- ja induktiivtakistust sisaldava kahe rööpharuga ahelat (joonis 4.55) toidetakse siinuspingega $u = U_m \sin \omega t$. Leiame ahela voolud.

Vool esimeses rööpharus $i_1 = \dfrac{U_m}{z_1}\sin(\omega t - \varphi_1) = I_{m1}\sin(\omega t - \varphi_1).$

Vool teises rööpharus $i_2 = \dfrac{U_m}{z_2}\sin(\omega t - \varphi_2) = I_{m2}\sin(\omega t - \varphi_2).$



Joonis 4.55. Hargahel (a) ja selle vektordiagramm (b)

Nende voolude efektiivväärtused $I_1 = \dfrac{U}{z_1} = UY_1$ ja $I_2 = \dfrac{U}{z_2} = UY_2$, (4.11)

kus $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L_1}^2}$ ja $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L_2}^2}$ – rööpharude näivtakistused.

Suurusi $Y_1 = 1/z_1$ ja $Y_2 = 1/z_2$, (4.12)

mis on näivtakistuste pöördväärtused, nimetatakse **harude näivjuhtivusteks**.

Voolud I_1 ja I_2 jäävad pingest faasilt maha nurkade φ_1 ja φ_2 võrra, mille tangensid on $\tan\varphi_1 = x_{L_1}/r_1$ ja $\tan\varphi_2 = x_{L_2}/r_2$.

Ahela hargnemata osa koguvool $i = i_1 + i_2 = I_{m1}\sin(\omega t - \varphi_1) + I_{m2}\sin(\omega t - \varphi_2) = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. Selle efektiivväärtuse I saame voolude I_1 ja I_2 efektiivväärtuste geomeetrilise summana, mille leiame vektordiagrammi abil (joonis 4.56b)

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}\,. \tag{4.13}$$

Vool ahela hargnemata osas jääb pingest maha nurga φ võrra, mille tangens

$$\tan\varphi = \frac{I_1 \sin\varphi_1 + I_2 \sin\varphi_2}{I_1 \cos\varphi_1 + I_2 \cos\varphi_2}\,. \tag{4.14}$$

NÄIDE 4.21

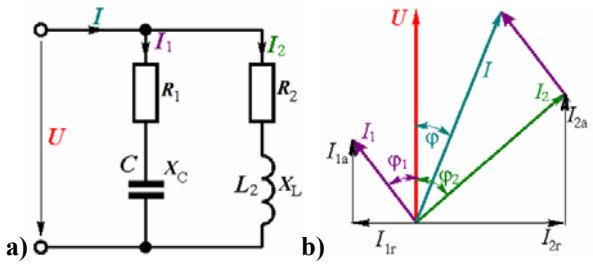
Antud: rööpahelale (joonis 4.56a) on rakendatud allikapinge $U = 50$ V. Ahela parameetrid on järgmised: $r_1 = 8\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$, $x_C = 6\ \Omega$ ja $x_L = 4\ \Omega$.

Leida: vool I ahela hargnemata osas ja faasinihe φ.

Esimese haru näivtakistus $z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_C^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = 10\ \Omega$

ja teise haru näivtakistus $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\Omega.$

Esimese ja teise haru voolud on vastavalt



Joonis 4.56. Hargahel (a) ja selle vektordiagramm (b)

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{50}{10} = 5\text{A}, \quad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{50}{5} = 10\text{A}$$

ning nende voolude faasinihkenurgad

$$\varphi_1 = \arctan\frac{-x_C}{r_1} = \arctan\frac{-6}{8} \approx -37^\circ,$$

$$\varphi_2 = \arctan\frac{x_L}{r_2} = \arctan\frac{4}{3} \approx 53^\circ.$$

Voolude aktiivkomponendid

$$I_{1a} = I_1\cos\varphi_1 = 5\cos 37^\circ = 4\text{ A},$$

$$I_{2a} = I_2\cos\varphi_2 = 10\cos 53^\circ = 6\text{ A}$$

ja reaktiivkomponendid

$$I_{1r} \equiv I_{1C} = I_1\sin\varphi_1 = 5\sin 37^\circ = 3\text{ A},$$

$$I_{2r} \equiv I_{2L} = I_2\sin\varphi_2 = 10\sin 53^\circ = 8\text{ A}.$$

Ahela hargnemata osas oleva voolu komponendid on seega

$$I_a = I_{1a} + I_{2a} = 4 + 6 = 10\text{A}, \; I_r = I_{2r} - I_{1r} = 8 - 3 = 5\text{ A}$$

ja otsitav vool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{10^2 + 5^2} = 11{,}2\text{ A}.$$

Faasinihe voolu I ja allikaväljundpinge U vahel $\varphi = \arcsin\frac{I_r}{I} = \arcsin\frac{5}{11{,}2} = 26°30'.$

Vaadeldavat hargahelat kirjeldav vektordiagramm on joonisel 4.56b.

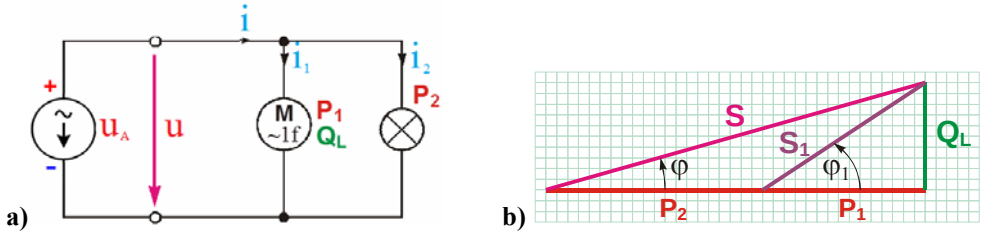
NÄIDE 4.22

Antud: ühefaasiline vahelduvvoolu asünkroonmootor nimivõimsusega 2 kW, kasuteguriga η = 0,75, reaktiivvõimsusteguriga tan φ_1= 0,754 on lülitatud tööle (joonis 4.57a) toitevõrgust allikapingega U = 230 V, sagedusega 50 Hz. Rööbiti mootoriga on lülitatud valgustid koguvõimsusega 3 kW, cos φ = 1.

Leida: ahela näivvõimsus S, reaktiivvõimsus Q, kogu aktiivvõimsus P, koguvool I ja võimsustegur. Koostada võimsuskolmnurgad.

Lahendus

Leiame mootori tegeliku aktiivvõimsuse $P_1 = P_M/\eta$ = 2 kW/0,75 = 2,67 kW.



Joonis 4.57. Tarbijate toitelülitus (a) ja selle võimsuste kolmnurgad (b)

Kogu tarbitav aktiivvõimsus $P = P_1 + P_2 = 2{,}67$ kW + 3 kW = 5,67 kW.

Mootori poolt tarbitav induktiivne reaktiivvõimsus $Q_L = P_1 \tan \varphi_1 = 2{,}67$ kW · 0,754 = 2,01 kvar.

Kogu ahela näivvõimsus $S = \sqrt{P^2 + Q_L^2} = \sqrt{5{,}67^2 + 2{,}01^2} = 6{,}01$ kVA.

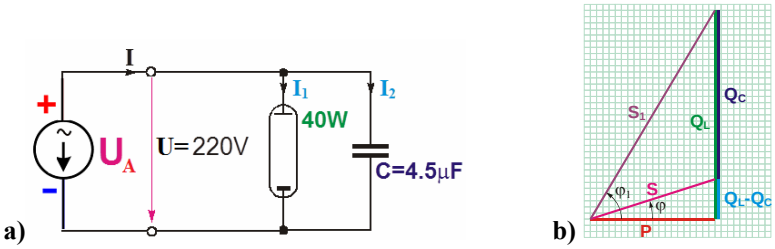
Ahela võimsustegur $\cos \varphi = P/S = 5{,}67$ kW/6,01 kVA = 0,943.

Ahela koguvool $I = S/U = 6010$ VA/230 V = 26,1 A.

Ahela tarbijate võimsuste kolmnurk on koostatud joonisel 4.57b.

NÄIDE 4.23

Antud: päevavalguslampi (tarbitav aktiivvõimsus P = 40 W) soovitatakse lülitada 230 V, 50 Hz toitevõrku (joonis 4.58a) koos rööplülituses oleva kondensaatoriga 4,5 µF, et võimsustegur võrgus paraneks 0,95-ni.



Joonis 4.58. Päevavalguslambi toitelülitus (a) ja võimsuste kolmnurgad

Leida: kondensaatori reaktiivvõimsus, kompenseerimata päevavalguslambi näivvõimsus S_1 ja võimsustegur cos φ_1. Koostada võimsuskolmnurgad.

Lahendus

Kondensaatori reaktiivvõimsus $Q_C = UI \sin \varphi$. Siin φ = 90º. Kondensaatori vool $I_C = I_2 = U/X_C = U\omega C$. Seega, $Q_C = U^2\omega C = 220^2$ V^2 · 314 s^{-1} · 4,5 · 10^{-6} F = 68,4 var.

Kondensaatori olemasolul võrgust tarbitav reaktiivvõimsus $Q = P \tan \varphi$ =40 W · 0,325 = 13 var.

Lambi loomulik reaktiivvõimsus $Q_L = Q - (-Q_C) = 13$ var – (–68,4 var) = 81,4 var.

Lambi näivvõimsus $S_1 = \sqrt{P^2 + Q_L^2} = \sqrt{40^2 + 81{,}4^2} = 90{,}5VA.$

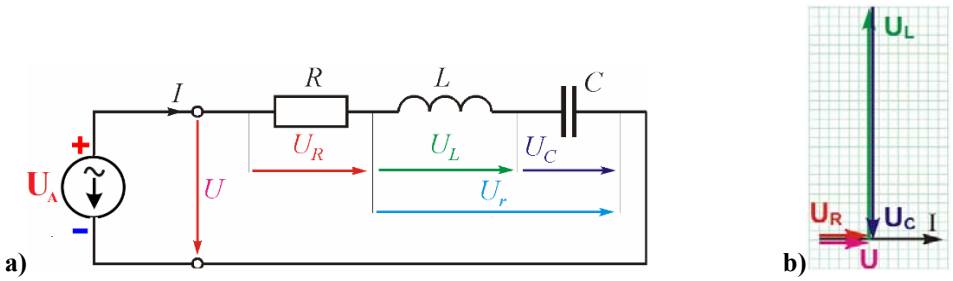
Kompenseerimata päevavalguslambi võimsustegur cos $\varphi_1 = P/S_1 = 40\,\mathrm{W}/90{,}5\,\mathrm{VA} = 0{,}442.$
Päevavalguslambi toiteahela võimsuste kolmnurk on esitatud joonisel 4.58b.

4.11. Pinge- ja vooluresonants

Nagu eespool on kindlaks tehtud, olenevad induktiivpooli induktiiv- ja kondensaatori mahtuvustakistus sagedusest. Seepärast muutub vahelduvvoolu jadaahelas sageduse muutumisel ka ahela näivtakistus z.

Nii on suurte sageduste f korral (s.o suure $\omega = 2\pi f$ korral) mahtuvustakistus $x_C = \dfrac{1}{\omega C}$ väike, samal ajal kui induktiivtakistus $x_L = \omega L$ on suur. Madalatel sagedustel on vastupidiselt mahtuvustakistus suur ja induktiivtakistus väike.

Pingeresonants. Vaatleme joonisel 4.59a *RLC*-elemente (takistit, pooli, kondensaatorit) sisaldavat jadaahelat. Suvalise muutumatu L ja C väärtuse korral saab induktiivtakistus ωL võrdseks mahtuvusliku takistusega $1/\omega C$ mingil konkreetsel allikapinge sageduse väärtusel. Siis muutub ahela näivtakistus z võrdseks aktiivtakistusega R. Seega, $z = \sqrt{z^2 + \left(\omega L - \dfrac{1}{\omega C}\right)^2} = r$.



Joonis 4.59. Pingeresonants *RLC*-jadaahelas (a) ja vektordiagramm (b)

Nii mõjutab voolu suurust joonisel 4.59a jadaahelas kondensaatori ja pooli takistuste võrdsuse korral ainult aktiivtakistus *r*. Sellistel tingimustel on pooli ja kondensaatori potentsiaalilangud mitte üksnes vastasfaasides, vaid ka suuruselt võrdsed ning seepärast kompenseerivad nad vastastikku teineteist, vool ahelas kasvab järsult. Seda nähtust nimetatakse **pingeresonantsiks.** Voolu suurenemist seletatakse sellega, et resonantsi puhul ei pea toiteallikas ületama ei endainduktsiooni allikapinget ega laetud kondensaatori vastuallikapinget, sest need kompenseeruvad ise vastastikku. Voolu teele jäävad vaid aktiivtakistused, mis tavaliselt pole suured.

Seega kutsub väikese aktiivtakistuse korral r << $x_L = x_C$ ahela voolu järsk suurenemine esile sama järsu pingete U_L ja U_C suurenemise induktiivpoolil ja kondensaatoril (joonis 4.59b), kusjuures need võivad mitu korda ületada ahelat toitva vahelduvvoolu allikaväljundpinget U.

Pingeresonantsil läheb kord induktiivpooli või kondensaatorisse salvestatud elektrienergia perioodiliselt poolist kondensaatorisse ja vastupidi. Generaatorist võetakse vaid energiat, mis on vajalik ahela aktiivtakistuse ületamiseks. Järelikult on generaatorist ja järjestikku ühendatud induktiivpoolist ning kondensaatorist koosnev ahel võnkesüsteem, mis osutub teatud tingimustel ($x_L = x_C$) häälestatuks resonantsi.

Resonantsitingimustele vastav sagedus arvutatakse võrdusest $\omega L = \dfrac{1}{\omega C}$,

millest $\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC}}$ või $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$,

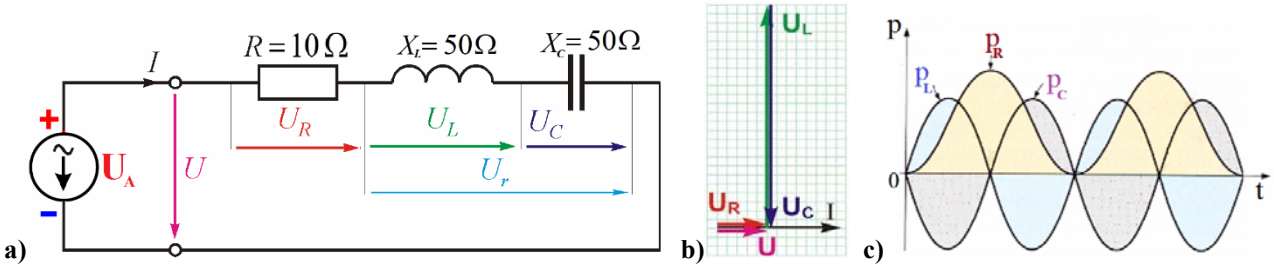
kus f – sagedus, Hz; L – induktiivsus, H; C – mahtuvus, F.

Resonantsnähtust kasutatakse raadiotehnikas mitmesugustel eesmärkidel.

Vahelduvvoolutehnikas võib see nähtus viia kahjulike (avariiliste) tagajärgedeni elektriahela eri osade pingete ja sellele vastava voolu suure tõusu tõttu. Selline olukord võib näiteks tekkida, kui vahelduvvoolugeneraatorist tulevale kaabelliinile lülitatakse mingi seade, mille induktiivtakistus võrdub liini mahtuvustakistusega.

NÄIDE 4.24

Antud: vahelduvvooluahelasse (joonis 4.60) pingega 100 V on järjestikku lülitatud aktiivtakistus $r = 10\ \Omega$, induktiivtakistus $x_L = 50\ \Omega$ ja mahtuvustakistus $x_C = 50\ \Omega$.



Joonis 4.60. Resonantsahela skeem (a), vektordiagramm (b) ja võimsuste muutumine *RLC*-elementidel (c)

Leida: vool ahelas, pinged ja võimsused kõikidel elementidel ja konstrueerida vektordiagramm.

Lahendus

Ahela reaktiivtakistus $x = x_L - x_c = 50 - 50 = 0$.

Ahela näivtakistus $z = \sqrt{r^2+x^2} = \sqrt{10^2+0} = 10\,\Omega$.

Vool $I = U/z = 100/10 = 10$ A.

Potentsiaalilangud ahela elementidel $U_R = Ir = 10 \cdot 10 = 100$ V;

$U_L = Ix_L = 10 \cdot 50 = 500$ V;

$U_C = Ix_C = 10 \cdot 50 = 500$ V.

Võimsused ahela elementidel: takistil $P_r = U_r I = 100 \cdot 10 = 1000$ W,

poolil $Q_L = U_L I = 500 \cdot 10 = 5000$ var ja

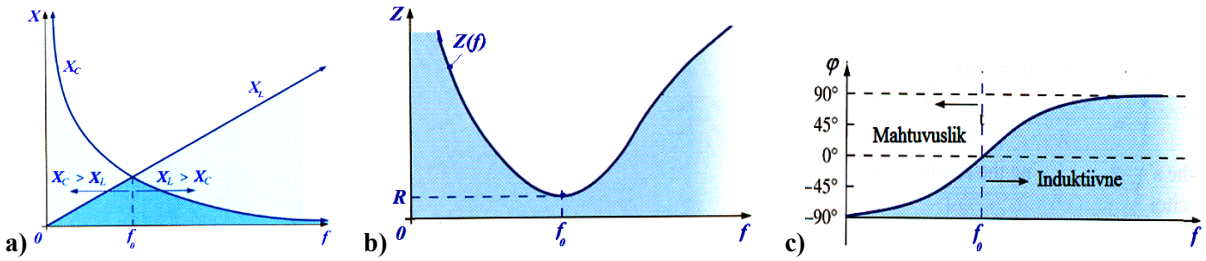
kondensaatoril $Q_C = U_C I = 500 \cdot 10 = 5000$ var ning

resonantsahela näivvõimsus $S = UI = P = 100 \cdot 10 = 1000$ VA.

Valinud voolu- ja pingevektorite mõõtkava, koostame vektordiagrammi (joonis 4.60b).

Joonis 4.60c iseloomustab võimsuste muutumist ajas igal *RLC*-elemendil. Need võimsuse hetkväärtuste kõverad on illustreeriva iseloomuga ja nende suurused ei vasta antud lähtesuurustele. Korrektse joonise korral on pooli ja kondensaatori hetkvõimsuste amplituudväärtus viis korda suurem takisti omast. Sellel joonisel on erinevus vaid *ca* 1,5 korda. Raadiotehnikas kasutatakse **hüveteguri** Q mõistet, mis näitab, mitu korda suuremat potentsiaalilangu on võimalik saada *LC*-elementidel resonantsi korral. Hüvetegur leitakse seosest $Q = \omega_0 L / R$, kus ω_0 on resonantsitingimustele vastav nurksagedus.

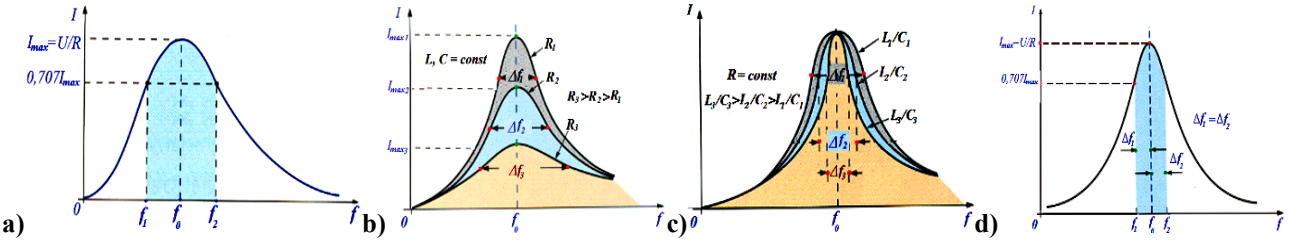
Joonise 4.60a *RLC*-ahelas reaktiivtakistuse ja ahela näivtakistuse muutus olenevalt allikapinge sagedusest vabalt valitud muutumatute L ja C väärtuste korral on esitatud joonisel 4.61. Näeme (a), et nullsageduse (alalisvoolu korral) puhul võrdub pooli induktiivtakistus x_L nulliga ja kondensaatori mahtuvustakistus x_C on lõpmata suur. Sageduse kasvades x_L suureneb ja x_C väheneb. Resonantsitingimuste korral ($f = f_0$) on ahelas pooli ja kondensaatori takistused võrdsed. Seega, $x_L = x_C$, ahela reaktiivtakistus $x = x_L - x_C = 0$ ja näivtakistus $z = \sqrt{r^2+x^2} = r$ on minimaalne (b) ning võrdne oomtakistusega r. Sagedustel nullist resonantssageduseni on ahela näivtakistus aktiivmahtuvusliku iseloomuga, suurematel sagedustel aktiiv-induktiivse iseloomuga ning resonantssagedusel on ahel puht aktiivtarbija.



Joonis 4.61. Resonantssageduse leidmine (a), näivtakistuse olenevus sagedusest (b) ja *RLC*-tarbija olemuse muutus sageduse muutumisel (c)

Joonisel 4.62 vaadeldakse sama *RLC*-ahela voolu I muutust olenevalt sagedusest vabalt valitud muutumatute L ja C väärtuste korral (a). Siin on voolu suurim väärtus I_{max} resonantsi korral võrdne $I_{\max} = U_A / r$. Sagedused f_1 ja f_2 vastavad voolu maksimaalväärtuse vähenemisele $I_{\max}/\sqrt{2} = 0{,}701 I_{\max}$ korda. Joonisel 4.62b vaadatakse, kuidas muutub voolu maksimaalväärtus ahela oomtakisti suurenedes. Resonantskontuuri hüvetegur väheneb, sageduste f_1 ja f_2 vahelised vahemikud Δf_2 ja Δf_3 laienevad. Muutumatu takisti r korral, kui pooli induktiivsuse ja kondensaatori mahtuvuse suhe on $L_3/C_3 > L_2/C_2 > L_1/C_1$, sageduste f_1

ja f_2 vahelised vahemikud $\Delta f_2 > \Delta f_2 > \Delta f_2$ ja Δf_3 laienevad, aga voolu suurim väärtus I_{max} jääb muutumatuks. Võimalik on ka sümmeetriliste sagedusvahemikega ($\Delta f_1 = \Delta f_2$) ahela resonantskarakteristik (d).



Joonis 4.62. Voolu vähenemine resonantssagedusest eemaldumisel (a), oomtakistuse mõju resonantsile (b), *LC*-suhte mõju resonantsile (c) ja sümmeetriline resonantskõver (d)

NÄIDE 4.25

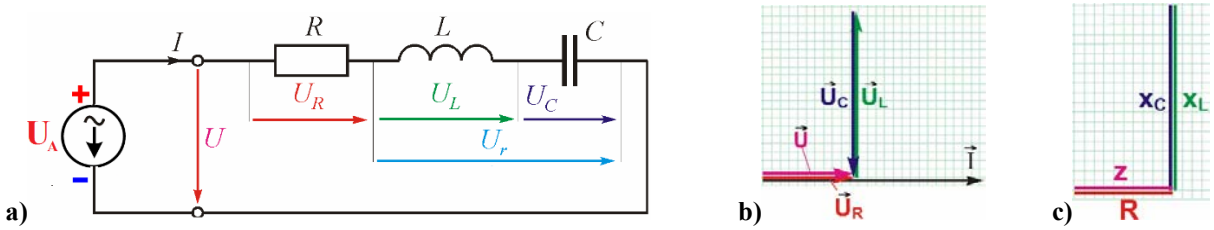
Olgu *RLC*-jadaahel (joonis 4.63), kus takisti $r = 40\ \Omega$, pooli $L = 0{,}203$ H, kondensaatori mahtuvus $C = 50\ \mu$F. Ahela toitepinge on $U = 230$ V, $f = 50$ Hz.

Leida: x_L, x_C, z, I,U_r, U_L, U_C, φ, P, Q, S. Koostada pingete-voolude vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

Lahendus

Pooli induktiivtakistus $x_L = \omega L = 314\ \text{s}^{-1} 0{,}203\ \text{H} = 63{,}8\ \Omega$.

Kondensaatori takistus $$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314\text{s}^{-1} \cdot 50 \cdot 10^{-6}\text{F}} = 63{,}8\Omega.$$



Joonis 4.63. Jadaahela lülitus (a), vektordiagramm (b) ja takistuskolmnurk (c)

Siin $x_L = x_C$, mis tähendab, et ahelas on pingeresonants.

Leiame ahela näivtakistuse $$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2} = r = 40\ \Omega.$$

Ahela vool $I = U/r = 230\ \text{V}/40\ \Omega = 5{,}75$ A.

Potentsiaalilang takistil $U_r = Ir = 5{,}75\ \text{A} \cdot 40\ \Omega = 230$ V.

Potentsiaalilang poolil $U_L = Ix_L = 5{,}75\ \text{A} \cdot 63{,}8\ \Omega = 366{,}85$ V.

Potentsiaalilang kondensaatoril $U_C = Ix_C = 5{,}75\ \text{A} \cdot 63{,}8\ \Omega = 366{,}85$ V.

Pinge-voolu nihkenurga tangens $$\tan\varphi = \frac{x_L - x_C}{r} = \frac{0\Omega}{40\Omega} = 0.$$ Siit $\varphi = 0$.

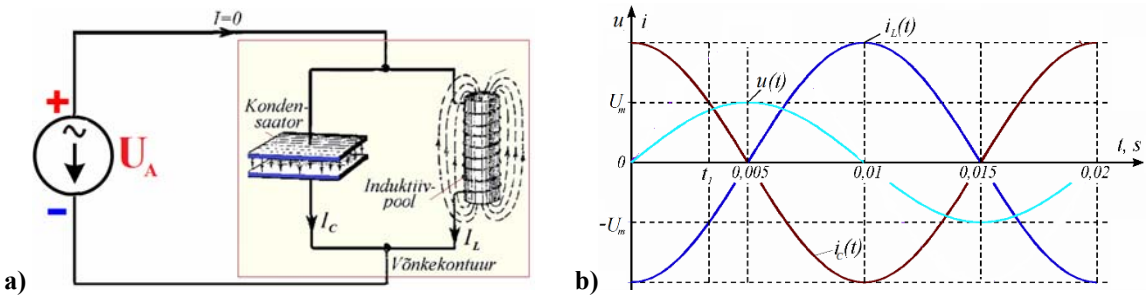
Ahela näivvõimsus $S = UI = 230\ \text{V} \cdot 5{,}75\ \text{A} = 1322{,}5$ VA.

Ahela aktiivvõimsus $P = UI \cos\varphi = 230\ \text{V} \cdot 5{,}75\ \text{A} \cdot 1{,}0 = 1322{,}5$ W.

Ahela reaktiivvõimsus $Q = UI \sin\varphi = 230\ \text{V} \cdot 5{,}75\ \text{A} \cdot 0 = 0$ var.

Koostame potentsiaalilangude-voolude vektordiagrammi (joonis 4.63b) ja takistuskolmnurga (joonis 4.63c).

Vooluresonants. Võnkesüsteemi võib saada ka induktiivpooli ja kondensaatori rööplülitusel (joonis 4.64a), kui nende takistused on võrdsed ($x_L = x_C$). Siis me saame **rööpvõnkekontuuri.**



Joonis 4.64. Induktiivpooli ja kondensaatori rööplülituse puhul (a) esineb nende võrdsete takistuste ($x_L = x_C$) korral vooluresonants. Pooli ja kondensaatori voolud on võrdsed ja vastassuunalised; vooluallikast ei tule võnkekontuuri elektrivoolu, st elektrienergiat (b)

Võnkekontuuris on pooli ja kondensaatori voolud võrdsed, kuid suunalt vastupidised, sest induktiivpooli vool I_L jääb allikapingest U maha 90º, aga kondensaatori vool on allikapingest U ees 90º (joonis 4.64b).

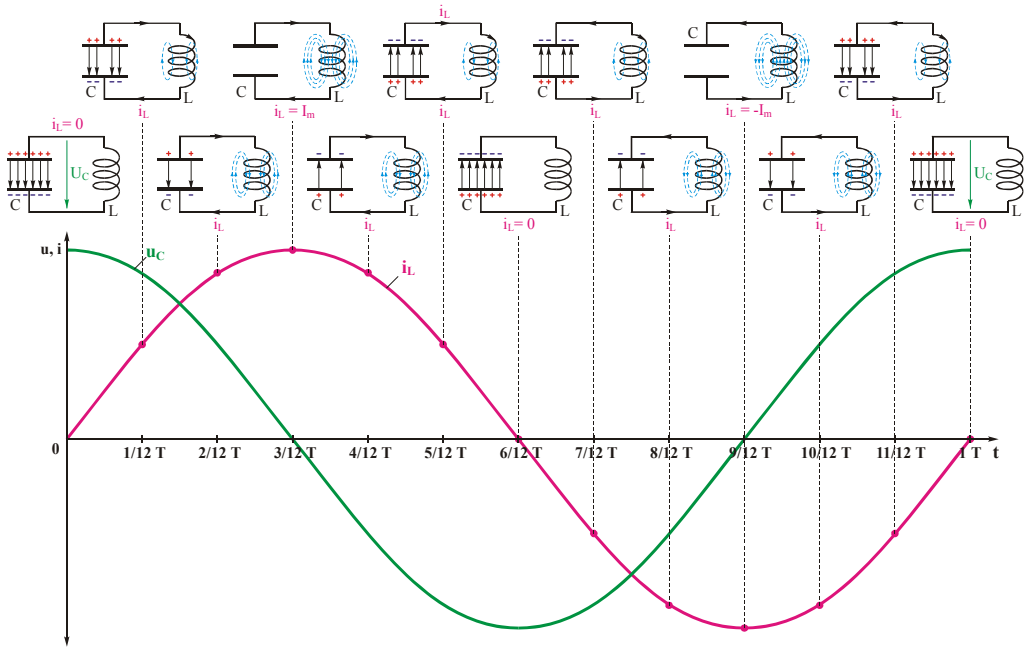
Aktiivtakistuse puudumisel on summaarne vool ahela hargnemata osal null ja järelikult **vaadeldav paralleelne kontuur on elektrivoolule lõpmatult suure väärtusega takistus.** See nähtus kannab vooluresonantsi nime. Sagedust, mille puhul esineb vooluresonants, nimetatakse **resonantssageduseks**. Olenevalt ahela induktiivsusest L ja mahtuvusest C saab seda leida valemiga $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$.

Voolude I_L, ja I_C olemasolu takistustes X_L ja X_C olukorras, kus vahelduvvooluallikas vool puudub, on seletatav järgmiselt. Nii pingeresonantsi kui ka vooluresonantsi korral toimub energia võnkumine pooli magnetvälja ja kondensaatori elektrivälja vahel (joonis 4.64a). Generaator, mis ükskord annab ahelasse energiat, osutub isoleerituks ja teda võiks nagu hoopiski välja lülitada, vool ahela hargnevas osas säiliks ilma generaatorita selle energia arvel, mis salvestati ahelasse kõige alguses. Pinge ahela klemmidel jääks täpselt samaks, mis oli generaatoril. Seega tekkib induktiivpooli ja kondensaatori rööbiti lülitamisel suletud võnkekontuur, kus on teatud sagedusega muutuv vahelduvvool.

Kontuuris tekkiv vahelduvvoolu sagedus ei olene esialgsest elektrilisest tõukest. Nagu näitab resonantssageduse f_0 valem, oleneb sageduse väärtus pooli induktiivsusest L ja kondensaatori mahtuvusest C. Muutes mahtuvuse või induktiivsuse suurust, võib muuta võnkumiste sagedust kontuuris, s.o „häälestada“ kontuuri nõutud sagedusele. Kui poolis ja kontuuris ei oleks aktiivtakistust, siis see energia võnkumise protsess pooli ja kondensaatori vahel toimuks lõpmata kaua ilma energia tarbimiseta vooluallikast.

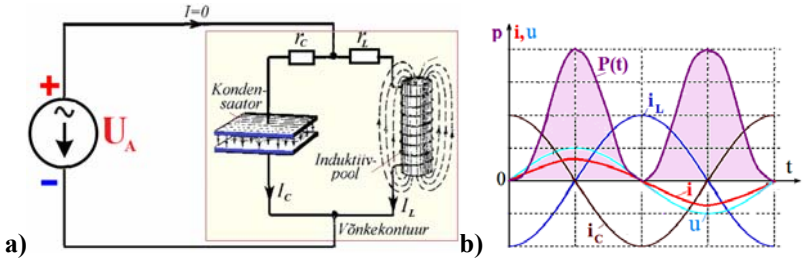
Siiski muundavad reaalsed poolid ja kondensaatorid alati veidi energiat (pooli mähise ja juhtmete aktiivtakistuse ning dielektrikut kuumutavate nihkevoolude tõttu kondensaatoris), seepärast tarbib reaalne kontuur vooluresonantsi korral ikkagi teatavat võimsust ja ahela hargnemata osas esineb vool I (joonis 4.64a). See vool langeb faasilt pingega kokku, s.o reaalse induktiivpooli ja kondensaatoriga võnkeahel käitub vooluresonantsi korral nii nagu suure takistusega takisti.

Joonis 4.65 kirjeldab elektrienergia vahetust kondensaatori ja induktiivpooli vahel võnkekontuuris ühe perioodi vältel. Ajahetkel $t = 0$ on energia salvestatud kondensaatori elektrivälja, vool kontuuris puudub, poolil puudub magnetväli. Seejärel hakkab kondensaator tühjenema, tekkib vool, mis suureneb veerandperioodi möödudes amplituudväärtuseni. Kogu energia on sel hetkel pooli magnetväljas, kondensaator on tühjaks laadinud. Järgnevalt hakkab pooli vool vähenema ja kondensaatori elektrivälja energia salvestuma jne.



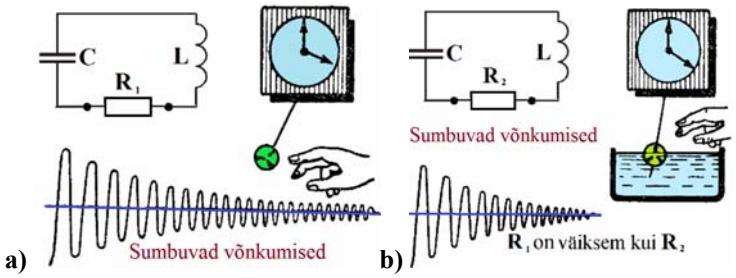
Joonis 4.65. Võnkekontuuris läheb elektrienergia pidevalt kondensaatorist induktiivpooli ja vastupidi

Võnkekontuuride kasutamine tehnikas. Vooluresonantsi nähtused ja võnkekontuurid on leidnud äärmiselt laia rakenduse raadiotehnikas ja kõrgsageduslikes seadmetes. Võnkekontuuride abil saame kõrgsageduslikke voole mitmesugustes raadioseadmetes ja kõrgsagedusgeneraatorites.



Joonis 4.66. Reaalses võnkekontuuris on energiakaod pooli ja kondensaatori aktiivtakistustes (a); kontuur tarbib allikast teatavat võimsust ja käitub nagu takisti (b)

Et iga voolu võnkumisega kontuuris kaasnevad energiakaod kontuuri aktiivtakistuses, siis ükskord kontuuri antud energia muundub teiseks energialiigiks (soojuseks). Protsess on sujuv. Aja jooksul väheneb võnkumiste amplituud kuni täieliku kustumiseni. Niisuguseid võnkumisi nimetatakse **sumbuvateks võnkumisteks** (joonis 4.67).



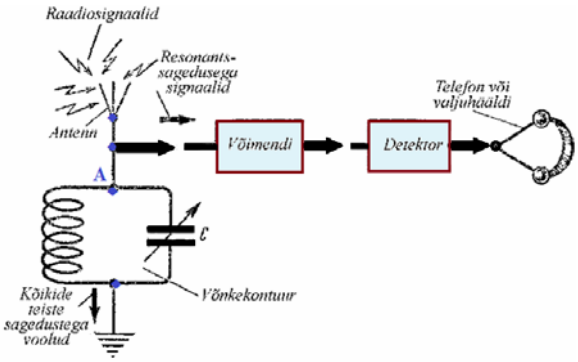
Joonis 4.67. Voolu võnkumised võnkekontuuris on sarnased pendli võnkumistega üleskeeramata kella puhul (a). Kontuuri aktiivtakistuse suurenemisega sumbuvad nad kiiremini (b)

Mittesumbuvate võnkumiste saamiseks on vaja iga perioodi vältel aktiivtakistis katta energiakaod kõrvalisest allikast. Siis on iga võnge sama jõuga, s.o sama amplituudiga kui eelmine ja kontuur muutub mittesumbuvate võnkumiste allikaks.

On ilmne, et kontuuri on vaja anda kindel energiakogus rangelt rütmiliselt, kontuuri voolu võnkumise taktis. Kuid kuna nende võnkumiste sagedus on harilikult väga suur, siis ei jõua ükski mehaaniline seade täiendada kontuuri energiat. Seda ülesannet täidavad elektroonsed koostisosad, mis kindlustavad energiaimpulsside andmise võnkekontuuri äärmiselt kiiresti ja suure sagedusega.

Võnkekontuur on ka iga raadiovastuvõtja tähtsaim koosteosa.

Raadiojaamast kiirguvad raadiosignaalid levivad elektromagnetlainetena eetris. Aheldudes vastuvõtja antenniga (elektrit juhtiva traadiga), indutseeritakse (muundatakse) selles tasakaalustavaks vahelduvallikasisepingeks, mis antakse raadio sisendile. Kuid antenn võtab üheaegselt vastu paljude raadiojaamade raadiosignaale. Seepärast on vaja erinevate raadiojaamade paljude erineva lainepikkusega (s.o erineva sagedusega) võnkumiste suurest hulgast eraldada huvipakkuva raadiojaama signaalid. Seda teeb võnkekontuur. Antennist antakse võnkekontuuri sisendisse (punkti A) erinevate võnkesagedustega vahelduvallikasisepinged (joonis 4.68).



Joonis 4.68. Võnkekontuur eraldab (filtreerib) kõikide antenni poolt vastu võetud jaamade raadiosignaalidest resonantssagedusega signaali ja suunab võimendisse, detektorisse ja telefoni. Kõikide teiste sagedustega signaalidele on resonantskontuuri takistus väike

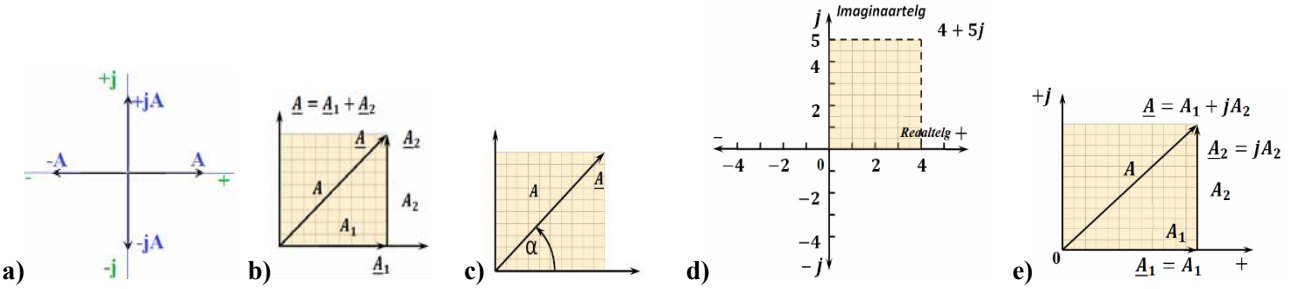
Enamiku sageduste puhul on kontuuri takistus väga väike, sisuliselt lühis, ja punkt A omandab maa nullpotentsiaali ning see on ka nullsignaaliks vastuvõtja võimendi sisendis. Kuid kontuuri resonantssagedusega allikapinge jaoks on kontuuri takistus lõpmata suur. Seepärast on võnkekontuuri sisendi ja maa vahel väga suur takisti, mille potentsiaali erinevus maa potentsiaalist rakendub raadiovastuvõtja sisendisse (võimendisse ja sealt detektorisse ning valjuhääldisse). Kui on vaja vastu võtta teist raadiojaama, siis tuleb muuta võnkekontuuri mahtuvust C või induktiivsust L (harilikult muudetakse mahtuvust C häälestusnupu abil). Seejuures muutub kontuuri resonantssagedus, nagu ilmneb resonantssageduse valemist, ja järelikult muutub ka kontuuri poolt eraldatavate raadiosignaalide sagedus.

4.12. Vektorite kujutamine kompleksarvude abil

Vektorite kujutamine kompleksarvudega annab suure eelise vahelduvvooluahelate arvutamisel siinustalitluse korral, kui ahelas on peale takistite induktiivpoole ka kondensaatoreid. Vahelduvvoolu võib määratleda ka ühe kompleksarvuga. Järgnevalt kordame kõrgema matemaatika põhiseisukohti kompleksarvude kohta.

Kompleksarvuks nimetatakse **reaalarvu** ja **imaginaararvu** summat. Imaginaararv on ruutjuur negatiivsest arvust. Imaginaararv väljendatakse reaalarvu ja imaginaarühiku $\sqrt{-1}$ korrutisena. Imaginaarühik – ruutjuur miinus ühest tähistatakse tähega j. Reaalarvu võib graafiliselt kujutada punkti või lõiguna abstsisseljel, mida nimetatakse ka reaalarvude teljeks ehk **reaalteljeks**. Imaginaararvu võib graafiliselt samuti kujutada punkti või lõiguna ordinaatteljel, mida nimetatakse ka imaginaararvude teljeks ehk **imaginaarteljeks**.

Imaginaarühikut j vaatleme kui pööramiskordajat, millega korrutamine on samaväärne vektori pööramisega 90° ehk π/2 võrra positiivses suunas, seega vastupäeva. Kui meil on positiivne reaalarv A, siis saame seda kujutada lõiguna või vektorina $\underline{A}$ reaalteljel (joonis 4.69a). Kui korrutame $\underline{A}$ imaginaarühikuga j, saame vektori $j\underline{A}$ positiivsel imaginaarteljel. Teistkordsel imaginaarühikuga korrutamisel $j(j\underline{A})$ pöörame vektorit $+j\underline{A}$ veel 90° võrra positiivses suunas. See on negatiivne arv A. Seega, $j(A) = j^2 A = \sqrt{-1}\cdot\sqrt{-1}A = -A$ ehk $j^2 = -1$. Positiivse reaalarvu A kolmas korrutamine imaginaarühikuga j annab negatiivse imaginaararvu $j(j^2 A) = j^3 A = j^2 jA = -jA$. Seega pöördus vektor A veel 90° võrra positiivses suunas, olles nüüd imaginaartelje negatiivsel suunal. Siit järeldub, et $j^3 = -j$. Neljas pööre viib vektori algasendisse $\vec{A}$.



Joonis 4.69. Vektori kujutamine kompleksarvuna

Vaatleme lähemalt paigalolevat raadiusvektorit (ehk lihtsalt vektorit). Oletame, et vektori üks ots asub rist-koordinaatide süsteemi alguspunktis. Sel juhul vektori teise otsa asendi võib üheselt määrata kahe parameetri näitamisega. Olenevalt nende parameetrite iseloomust on kolm erinevat varianti vektori asendi kujutamiseks.

Kui vektor $\underline{A}$ on jagatud komponentideks, nagu näidatud joonisel 4.69b, siis võib seda kujutada järgmise võrdusega:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2,$$

kusjuures plussmärk tähendab selles avaldises suuruste vektoriaalset liitmist.

Vektori $\underline{A}$ võib samuti määrata selle pikkuse (mooduli) A ja nurga (argumendi) α kaudu (joonis 4.69c).

Vektori algus on komplekstasandi algus- ehk nullpunktis, mille igale punktile vastab kompleksarv $\underline{C} = a + jb$.

Reaalarvud kantakse abstsissteljele (reaaltelg, tähistatakse plussmärgiga), aga imaginaararvud jb kujutatakse imaginaarteljel j (joonis 4.69d). Seega saab vektori $\underline{A}$ komponente esitada tema projektsioonide A_1 ja A_2 kaudu järgmisel viisil (joonis 4.69e): reaalteljeline komponent $\underline{A}_1 \equiv A_1$; imaginaarteljeline komponent $\underline{A}_2 \equiv jA_2$.

Kompleksarvuna esitatav vektor **algebraliselt** $\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 = A_1 + jA_2$. (4.15)

Kui vektori imaginaarkomponent ei võrdu nulliga [näiteks jA_2 valemis (4.15)], siis see tähendab, et komponente $\underline{A}_1$ ja $\underline{A}_2$ ei tohi liita kui skalaare (algebralised arvud), vaid kui kahte vastastikku risti olevat vektorit: üks on suunatud piki reaaltelge, teine piki imaginaartelge.

Joonise 4.69e vektori $\underline{A}$ moodul A, mis määrab tema pikkuse, avaldub järgmiselt:

$$A \equiv |\underline{A}| = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}\,. \tag{4.16}$$

Nurk, mille see vektor moodustab reaalteljega ehk vektori $\underline{A}$ argument määratakse võrdusega

$$\alpha = arctg(A_2 / A_1)\,. \tag{4.17}$$

Seejuures imaginaar- ja reaalkomponendid tuleb valemisse (4.11) panna koos oma märkidega.

Üldlevinud tava järgi loetakse nurka reaalteljest kellaosuti liikumise vastassuunas. Projektsioonid A_1 ja A_2 võib määrata, kui on teada vektori $A \equiv |\underline{A}|$ argument (nurk) α ja moodul (pikkus):

$$A_1 = A\cos\alpha;\quad A_2 = A\sin\alpha.$$

Vektor avaldub nn **polaarkujul** valemiga $\underline{A} = A(\cos\alpha + j\sin\alpha)$. (4.18)

Kui selles valemis kasutada Euleri võrrandit $\cos\alpha + j\sin\alpha = e^{j\alpha}$, saame vektori kolmanda, nn **eksponentkuju**

$$\underline{A} = Ae^{j\alpha}. \tag{4.19}$$

Seega võib vektorit nagu kompleksarvu esitada kolmel kujul:

$$\underline{A} = A_1 + jA_2 = \mathrm{A}\,(\cos\alpha + j\sin\alpha) = Ae^{j\alpha}.$$

Paljudes arvutustes on eksponentkuju eelistatud, kuna sel juhul kaks määravat parameetrit (moodul ja argument) esinevad eraldi.

Komplekssuurust $\underline{A} = A_1 + jA_2$, arvestades valemeid (4.10), (4.11) ja (4.13), võib avaldada järgmisel viisil:

$$\underline{A} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}\, e^{jarctgA_2/A_1}\,. \tag{4.20}$$

Komplekssuurust **$e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$ nimetatakse ühikvektoriks,** kuna selle moodul võrdub ühega. Argumentide α erinevate väärtuste puhul kehtivad järgmised võrdused:

$$\left.\begin{aligned}
&\alpha = 0 : e^{j0} = \cos 0 + j\sin 0 = 1;\\
&\alpha = \frac{\pi}{2} : e^{j\pi/2} = \cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2} = j;\\
&\alpha = -\frac{\pi}{2} : e^{-j\pi/2} = -j;\\
&\alpha = \pi : e^{j\pi} = -1;\\
&\alpha = \frac{\pi}{4} : e^{j\pi/4} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j).
\end{aligned}\right\} \qquad (4.21)$$

Reegel. Korrutamine vektoriga $e^{j\pi/2} = j$ tähendab pööramist +90º võrra.

Ühikvektori abil võib välja tuua tuntud seose, mis on kasulik arvutustes kompleksarvudega:

$$e^{j\pi} = e^{j\pi/2}e^{j\pi/2} = jj = j^2,$$

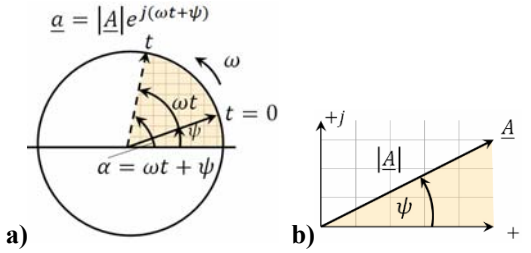
kuna $e^{j\pi} = -1$, siis $\qquad j^2 = -1$ või $j = \sqrt{-1}$ ja $1/j = -j$. $\qquad (4.22)$

Pöörlev raadiusvektor. Pöörleva raadiusvektori $\underline{a}$ nurk α joonise 4.63a järgi

$$\alpha = \omega t + \psi.$$

Joonisel 4.70b on kujutatud vektor $\underline{A}$. Mõlemad vektorid on seoses $\underline{a} = |\underline{A}|e^{j(\omega t+\psi)}$.

Vastavalt (4.13) $\underline{A} = Ae^{j\alpha}$ ja seepärast $\underline{a} = Ae^{j\alpha}e^{j\omega t}$. $\qquad (4.23)$



Joonis 4.70. Vektorite kujutamine: a – pöörlev raadiusvektor; b – vektor komplekstasandil

Vektori $\underline{A}$ mooduliga A võib teisendada pöörlevaks raadiusvektoriks $\underline{a}$, kui teda korrutada funktsiooniga $e^{j\omega t}$.

Arvutused kompleksarvudega (vektoritega). Eeltoodud seoste alusel võib välja tuua järgmised reeglid arvutusteks kompleksarvudega.

Kahe kompleksarvu võrdsus. Kaks kompleksarvu $\underline{A} = A_1 + jA_2$ ja $\underline{B} = B_1 + jB_2$ on võrdsed, kui on võrdsed nii nende reaal- kui ka imaginaarosad. Seega, kui $A_1 = B_1$ ja $A_2 = B_2$, siis vastavalt (4.10) ja (4.11) on nende kompleksarvudega kirjeldatavad vektorid ühesuguste moodulite ja argumentidega.

Liitmine ja lahutamine. Kompleksarvude liitmisel (lahutamisel) tuleb liita (lahutada) nende reaal- ja imaginaarosad:

$$\underline{A} + \underline{B} = (A_1 + B_1) + j(A_2 + B_2). \qquad (4.24)$$

Vektordiagrammil tuleb vektorid geomeetriliselt liita (lahutada).

Korrutamine ja jagamine. Kahe kompleksarvu korrutamisel (jagamisel) tuleb korrutada (jagada) nende moodulid ja liita (lahutada) nende argumendid

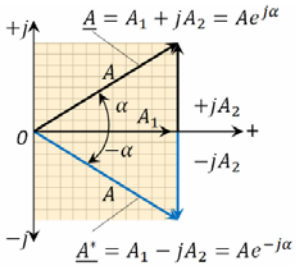
Kui $\underline{A} = A_1 + jA_2 = Ae^{j\alpha}$ ja $\underline{B} = B_1 + jB_2 = Be^{j\beta}$ siis $\qquad \underline{AB} = ABe^{j(\alpha+\beta)}$ $\qquad (4.25)$

või valemi (4.20) alusel $\underline{AB} = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2)(B_1^2 + B_2^2)}\cdot e^{j[arctg(A_2/A_1)+arctg(B_2/B_1)]}$. Eeltoodust järeldub, et vektori korrutamine (jagamine) reaalarvuga muudab vektori moodulit, aga korrutamine (jagamine) kompleksarvuga muudab tema moodulit ja nurka. Ning lõpuks, korrutamine (jagamine) kompleksarvuga, mille moodul on 1, tähendab ainult vektori pööramist. Vektori korrutamine $\pm j = e^{\pm j\pi/2}$ tähendab selle pööramist nurga $\pm\pi/2$ võrra, s.o ±90º võrra.

Vektori $\underline{A}$ peegelkujutis reaaltelje suhtes on nn kaaskompleksvektor $\underline{A}^*$ (joonis 4.71). Vektori $\underline{A} = A_1 + jA_2 = Ae^{j\alpha}$ kaaskompleksvektor $\underline{A}^* = A_1 - jA_2 = Ae^{-j\alpha}$, millest järeldub

$$\underline{A}\underline{A}^* = A^2. \qquad (4.26)$$

Järelikult on kahe kaaskomplekssuuruse korrutis reaalarv.



Joonis 4.71. Kaaskompleksvektor

Astendamine ja juurimine. Et mingit kompleksarvu võtta astmele n (leida selle n-juur), tuleb selle arvu moodul võtta astmele n (leida mooduli n-juur), aga argument korrutada (jagada) n-ga

$$A^n = A^n e^{jn\alpha}, \tag{4.27}$$

või

$$A^n = (A_1^2 + A_2^2)^{n/2} e^{jn\,arctg A_2/A_1} \tag{4.28}$$

Diferentseerimine ja integreerimine. Pöörleva raadiusvektori argument on ajafunktsioon

$$\underline{a} = Ae^{j\alpha(t)}.$$

Diferentseerimise tulemusena saame $$\frac{d\underline{a}}{dt} = \underline{a}_1 = j\frac{d\alpha}{dt} Ae^{j\alpha(t)}.$$

Arvestades, et $\alpha = \omega t + \psi$, saame $\frac{d\underline{a}}{dt} = j\omega\underline{a} = \omega\underline{a}e^{j\pi/2}$. (4.29)

Integreerimisel $$\int \underline{a}dt = \frac{1}{j\omega}\underline{a} = -j\frac{\underline{a}}{\omega} = \frac{\underline{a}}{\omega}e^{-j\pi/2}. \tag{4.30}$$

Aja järgi diferentseerimisel ja integreerimisel muutub raadiusvektori pikkus ja vektor pöördub 90° võrra positiivses või negatiivses suunas.

NÄIDE 4.26

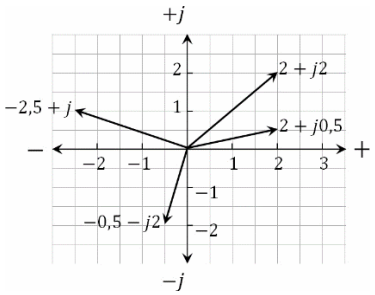
Leida: vektori moodul ja argument, mille lõpu koordinaadid on järgmised kompleksarvud:

$$2 + j\frac{1}{2}; \quad 2 + j2; \quad -2\frac{1}{2} + j; \quad -\frac{1}{2} - j2.$$

Lahendus

Kanname need kompleksarvud punktidena komplekstasandile (joonis 4.72) ja joonistame neile punktidele vastavad vektorid koordinaatide alguspunktist. Vektori mooduli ja argumendi leiame valemi (4.14) järgi $A_1 + jA_2 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \cdot e^{j\,arctg(A_2/A_1)}$.

Selles avaldises $\sqrt{A_1^2 + A_2^2}$ annab vektori mooduli väärtuse, aga arctg (A_2/A_1) – tema argumendi väärtuse (s.o nurga vektori ja abstsisstelje vahel).



Joonis. 4.72. Komplekssuurustega arvutus

Esimesele vektorile saame $2 + j\frac{1}{2} = \sqrt{4+\frac{1}{4}} \cdot e^{j\,arctg\,1/4} = 2{,}1e^{j14°2'}$.

Seega moodul on 2,1 ja argument +14º2'.

Teisele vektorile $2 + j2 = \sqrt{8}e^{j\,arctg\,1} = 2{,}83e^{j45°}$.

Moodul 2,83, argument +45º (joonis 4.43).

Kolmandale vektorile $-2\frac{1}{2} + j = \sqrt{\frac{29}{4}} \cdot e^{j\,arctg\,-2/5} = 2{,}69e^{j159°12'}$.

Moodul 2,69, argument +159º12' (joonis 4.72).

Neljandale vektorile $-\frac{1}{2} - j2 = \sqrt{\frac{17}{4}}e^{j\,arctg\,4} = 2{,}1e^{j255°58'}$.

Moodul 2,1, argument +255º58' (joonis 4.72).

NÄIDE 4.27

Leida: järgmiste kompleksarvude reaal- ja imaginaarosad ning kujutada neid vektoritena $\sqrt{j}$; $\frac{\sqrt{3}}{-\sqrt{2}-\sqrt{-3}}$, võttes arvesse vaid positiivseid juuri.

Lahendus

Esitame komplekssuuruse $\sqrt{j}$ järgmiselt: $\sqrt{j} = A_1 + jA_2$.

Võttes selle võrduse mõlemad pooled ruutu, saame

$$j = A_1^2 - A_2^2 + j2A_1A_2 .$$

Kuna mõlema kompleksarvu reaal- ja imaginaarosad peavad olema võrdsed, siis

$$0 = A_1^2 - A_2^2; \qquad 1 = 2A_1A_2 .$$

Nende võrduste alusel leiame kompleksarvu $\sqrt{j}$ otsitava reaal- ja imaginaarosa. Kirjutades need võrdused

$$\pm A_1 = \pm A_2, \qquad A_1 = \frac{1}{2A_2},$$

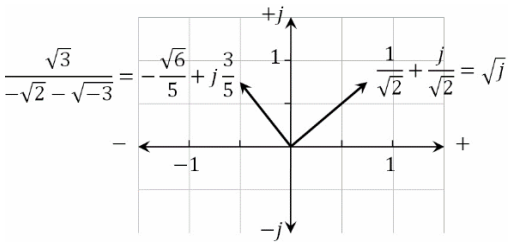
saame $A_1^2 = \frac{1}{2}$ ja $A_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} = A_2$ või $A'_1 = -\frac{1}{\sqrt{2}} = A'_2$.

Järelikult (joonis 4.73)

$$\sqrt{j} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) = 1e^{j45°} \text{ või } \sqrt{j} = -\frac{1}{\sqrt{2}}(1+j) = 1e^{j(45°+\pi)} .$$

Reaalosa on $\pm 1/\sqrt{2}$, imaginaarosa $\pm 1/\sqrt{2}$. Moodul 1, argument +45°, +225°.

Samad tulemused võib saada tunduvalt kiiremini.



Joonis 4.73. Kompleksarvude kujutamine vektoritena

Kuna $j = e^{j\pi/2}$, siis (4.25) järgi

$$\sqrt{j} = j^{1/2} = e^{j(\pi/2+2\pi)1/2} = e^{j(\pi/4+\pi)}.$$

Teise kompleksarvu jaoks saame

$$\frac{\sqrt{3}}{-\sqrt{2}-\sqrt{-3}} = \frac{\sqrt{3}}{-\sqrt{2}-j\sqrt{3}} = \frac{\sqrt{3}(-\sqrt{2}+j\sqrt{3})}{2+3} = -\frac{\sqrt{6}}{5} + j\frac{3}{5}.$$

Võrrandi (4.20) järgi asendasime komplekssе nimetaja reaalse suurusega, korrutades murru lugejat ja nimetajat nimetaja kaaskompleksarvuga.

Vaadeldavale kompleksarvule vastav vektor

$$\frac{\sqrt{3}}{-\sqrt{2}-\sqrt{-3}} = \sqrt{\frac{15}{25}}e^{jarctg(-3/\sqrt{6})} = 0{,}775e^{j129°15'}.$$

Niisiis, reaalosa $-\sqrt{6/5} = -0{,}49$; imaginaarosa 3/5=0,6; moodul 0,755; argument +129º15'.

Joonisel 4.66 on näidatud selle ülesande mõlemad vektorid.

NÄIDE 4.28

Kujutada ühikvektorid, mis moodustavad abstsissteljega nurgad 45º, 60º, 150º ja 330º kompleksarvudena.

Lahendus

Kasutame Euleri võrrandit: $e^{j\alpha} = \cos\alpha + j\sin\alpha$.

Sellest järeldub, et $e^{j45°} = \cos 45° + j\sin 45° = \frac{1}{\sqrt{2}} + j\frac{1}{\sqrt{2}}$,

$$e^{j60°} = \cos 60° + j\sin 60° = \frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}.$$

Vektori argumendiga 150° võib saada vektorist argumendiga 60°, pöörates viimast +90°.

Seega, $e^{j150°} = e^{j(60°+90°)} = e^{j60°}e^{j90°} = e^{j60°}j,$

ehk $e^{j150°} = \left(\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3}\right)j = -\frac{1}{2}\sqrt{3} + j\frac{1}{2}.$

Sarnaselt $e^{j330°} = e^{-j30°} = \cos(-30°) + \sin(-30°) = \frac{1}{2}\sqrt{3} - j\frac{1}{2}.$

NÄIDE 4.29

Leida:

kompleksarvude $\underline{A} = \frac{1}{2} - j2\sqrt{2}$ ja $\underline{B} = -3 + j4$ korrutis ning joonistada vastavad vektorid.

Lahendus

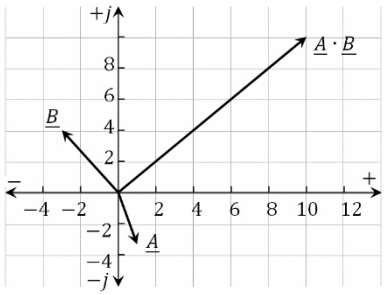
Kompleksarvude korrutamiseks on otstarbekas esitada nad eksponentkujul:

$$\underline{A} = \frac{1}{2} - j2\sqrt{2} = \sqrt{\frac{33}{4}} e^{j\,arctg(-4\sqrt{2})} = 2{,}87e^{-j79°58'},$$

$$\underline{B} = -3 + j4 = 5e^{j\,arctg\,4/-3} = 5e^{j126°52'}.$$

Joonisel 4.74 on näidatud kõik kolm vektorit. Sama tulemuse saaksime, kui mõlemad kompleksarvud $\underline{A}$ ja $\underline{B}$ korrutada antud kujul, aga pärast seda määrata vastava vektori moodul ning tema argument: $\underline{AB} = \left(\frac{1}{2} - j2\sqrt{2}\right)(-3 + j4) = -\frac{3}{2} + 8\sqrt{2} + j6\sqrt{2} + j2$; $\underline{AB} = 9{,}81 + j10{,}48 = \sqrt{9{,}81^2 + 10{,}48^2}\, e^{j\,arctg(10{,}48/9{,}81)}$; $\underline{AB} = 14{,}35e^{j46°54'}$

Nende kahe arvu korrutis $\underline{AB} = 2.87e^{-j79°58'} 5e^{j126°52'} = 14{,}35e^{j46°54'}$



Joonis 4.74. Kahe vektori korrutamine

NÄIDE 4.30

Leida:

kompleksarvude $\underline{A} = -2 + j2\sqrt{3}$ ja $\underline{B} = 1 - j$ jagatis ning joonistada vastavad kolm vektorit.

Lahendus

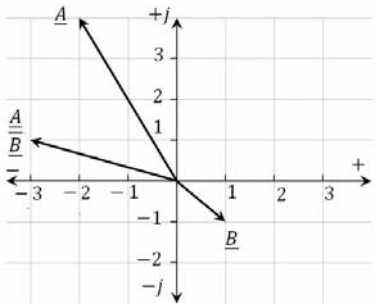
Esitame lähtevektorid eksponentkujul

$\underline{A} = 4e^{j\,arctg(-\sqrt{3})} = 4e^{j120°}$,

$\underline{B} = \sqrt{2}e^{j\,arctg(-1)} = 1{,}414e^{-j45°}$.

Leiame nende suhte $\frac{\underline{A}}{\underline{B}} = \frac{4e^{j120°}}{1{,}414e^{-j45°}} = 2{,}83e^{j165°}$.

Joonisel 4.75 on esitatud kõik vektorid.



Joonis 4.75. Kahe vektori jagamine

NÄIDE 4.31

Leida: joonisel 4.76 kolme vektori $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$, $\underline{A}_3$ summa, kui nende moodulid on võrdsed ja nad on üksteise suhtes nihutatud 120°.

Lahendus

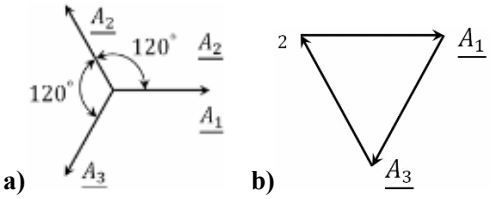
Vektorite summeerimisel on otstarbekas esitada nad algebraliselt, s.o Cartesiuse ristkoordinaadistikus. Ühe vektori $\underline{A}_1$ loeme baasvektoriks, võttes tema argumendi võrdseks nulliga (joonis 4.76a):

$$\underline{A}_1 = Ae^{j0^\circ} = A.$$

Seejuures kahe ülejäänud vektori argumendid on +120° ja –120°.

$$\underline{A}_2 = Ae^{j120^\circ} = A(\cos 120^\circ + j\sin 120^\circ) = A\left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right);$$

$$\underline{A}_3 = Ae^{-j120^\circ} = A\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right).$$



Joonis 4.76. Kolme ühesuguse mooduliga vektori summa, mis on üksteisest faasis nihutatud 120°

Edasi leiame kolme vektori summa $\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_3 = 0$.

Jooniselt 4.76b on näha, et vektorid moodustavad võrdkülgse kolmnurga ja seepärast nende summa võrdub nulliga.

4.13. Sümboli- ehk kompleksmeetod

Erinevalt alalisvoolust, mida saab määratleda ühe suurusega, on kindla sagedusega vahelduvvoolu määramiseks mingil ajahetkel vaja teada kahte suurust, näiteks voolu amplituudi ja tema algfaasinurka. Nagu varem näidatud, võib iga siinusfunktsiooni esitada pöörleva raadiusvektorina – kompleksfunktsiooni kujul ja kirjutada kompleksarvuna. Niisiis võib iga vektorit, näiteks I_m, mis on kujutatud tasapinnal horisontaaltelje suhtes kaldenurgaga φ, esitada kompleksarvu abil (joonis 4.77). See kompleksarv koosneb reaalosast $a = I_m \cos \varphi$ ja imaginaarosast $b = I_m \sin \varphi$. Sel juhul nimetatakse vertikaaltelge **reaalteljeks** ja horisontaaltelge **imaginaarteljeks**. Imaginaararvuks nimetatakse arvu, mida korrutatakse $j = \sqrt{-1}$. Selline vektori kujutlus vastab vektori kujutlusele komplekstasapinnal. Komplekssuurusi, mis iseloomustavad siinusvoolu, allikasise- ja allikaväljundpinget, tähistatakse vastavate suurte tähtedega*, mille kohal on punkt, seega $\dot{I}, \dot{U}_A, \dot{U}$.

Neid nimetatakse kompleksvooluks ja komplekspingeks. Niisiis siinusvoolu $i = I_m \sin(\omega t + \psi)$ võib esitada komplekssuurusena (algfaas joonisel $\varphi = \psi$)

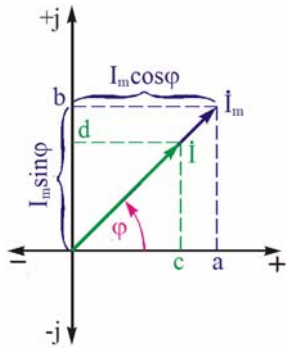
$$\dot{I}_m = I_m \cos\psi + jI_m \sin\psi = a + jb,$$

kus $\dot{I}_m$ – kompleksamplituud.

Kompleksarvuna võib kujutada ka efektiivvoolu I, selleks tuleb viimast võrrandit läbi jagada $\sqrt{2}$-ga (joonis 4.77):

$$\dot{I} = I\cos\psi + jI\sin\psi = c + jd.$$

* Vahelduvvooluahelate arvutusel kompleksarvude abil on kasutusel neli vektorite, näiteks vektori A, tähistusviisi: $\vec{A}$ – ülanoolega, $\dot{A}$ – ülapunktiga, $\underline{A}$ – alakriipsuga, $\boldsymbol{A}$ – paksu kirjaga.



Joonis 4.77. Vooluvektorite kujutamine reaal- ja imaginaararvude teljestikus

Sellist kompleksarvu esitamiskuju nimetatakse algebraliseks. Algebralise kuju asemel võib kasutada ka trigonomeetrilist $\dot{I} = I(\cos\psi + j\sin\psi)$

või eksponentkuju $\dot{I} = \sqrt{(I\cos\psi)^2 + (I\sin\psi)^2}\cdot e^{j\psi} = \sqrt{c^2 + d^2}\cdot e^{j\psi} = Ie^{j\psi}$.

Siin on I vektori pikkus ehk moodul ja ψ on nurk reaaltelje suhtes ehk argument.

Samuti võib kasutada polaarkoordinaatsüsteemi $\dot{I} = I < \psi$.

Kahe kompleksarvu summale vastab kahe neid arve iseloomustava vektori liitmine. Näiteks kahte siinusvoolu $i_1 = I_{1m}\sin\omega t$ ja $i_2 = I_{2m}\sin(\omega t + \psi_2)$ võib kujutada kahe kompleksarvu summana

$\dot{I}_m = \dot{I}_{m1} + \dot{I}_{m2}$ või siis $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

Summaarse kompleksarvu moodul ehk vektori pikkus meie voolude korral on

$$I_m = \sqrt{(I_{1m} + I_{2m}\cos\psi_2)^2 + (I_{2m}\sin\psi_2)^2}\ .$$

Argument ψ ehk nurk reaaltelje vahel $\psi_2 = arctg\dfrac{b}{a}$.

Formaalse sarnasuse põhjal võime siinuseliselt ajas muutuvad voolu-, pinge- või allikasisepinge vektorid kirjutada tinglikult komplekskujul ning teha vahelduvvooluahela arvutuse kompleksarvudega. Ilmselt tuleb siis ka takistus esitada komplekskujul.

Kompleksnäivtakistus ehk komplekstakistus $\dot{Z} = r \pm jx = z(\cos\varphi \pm j\sin\varphi) = ze^{\pm j\varphi}$,

kusjuures takistuse komponendid r ja x on takistuskolmnurga põhjal vastastikku risti, mida näitabki imaginaarühik $j = \sqrt{-1}$. Kui reaktiivtakistus x on induktiivne, siis kirjutame $+jx$, mahtuvusliku puhul aga $-jx$, sarnaselt ka juhtivus komplekskujul ehk kompleksjuhtivus $\dot{Y}$

$$\dot{Y} = g \pm jb = y(\cos\varphi \pm j\sin\varphi) = ye^{\pm j\varphi}.$$

Nii võime komplekskujul kirjutada ka Ohmi seaduse: $\dot{I} = \dfrac{\dot{U}}{\dot{Z}} = \dot{U}\dot{Y}$,

kusjuures pinge ja voolu vaheline nihkenurk φ = arctg x/r = arctg b/g või Kirchhoffi I ja II seaduse järgi:

$$\sum\dot{I} = 0 \quad \text{ja} \quad \sum\dot{U}_A = \sum\dot{U}\ .$$

Näivvõimsus komplekskujul ehk kompleksvõimsus annab arvutamisel aktiiv- ja reaktiivvõimsuse, kusjuures $+jQ$ tähistab analoogiliselt takistusega induktiivvõimsust ja $-jQ$ mahtuvusvõimsust. Niisuguste märkidega reaktiivvõimsused saame siis, kui leiame näivvõimsuse järgmiselt:

$$\dot{S} = \dot{U}\overset{*}{\dot{I}} = P \pm jQ = Se^{\pm j\varphi}\ ,$$

kus tärniga tähistame kompleksarvu kaaskompleksarvu ja $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ ning φ = arctg Q/P. Näiteks voolu $I_a - jI_r$ kaaskompleksvool on $I_a + jI_r$. Seega tuleb komplekspinge korrutada kaaskompleksvooluga.

Selles avaldises kujutab i^* funktsiooni komplekshetkväärtust, aga I_m^* – kompleksamplituudi. Seega aja-funktsiooni hetkväärtuse üleminekule pöörleva raadiusvektori hetkväärtuseks vastab siinusfunktsiooni asendamine kompleksfunktsiooniga, s.o üleminek $i(t) \rightarrow i^*(t)$.

Sellistel teisendustel ja arvutustel tuleb kinni pidada järgmistest etappidest:

1. Otsene teisendus	Üleminek siinusfunktsioonilt komplekssuurusele
2. Arvutused komplekstasandil	Tulemus kompleksarvu kujul
3. Pöördteisendus	Üleminek komplekssuuruselt siinusfunktsioonile

Siiski tuleb arvestada, et igal eri juhtumil võib arvutustes toimetada ka ainult siinusfunktsioonidega, kuid seejuures muutuvad arvutused tunduvalt keerukamateks.

Reeglid, mida kasutatakse eespool esitatud teisenduste käigus.

1. Siinusfunktsiooni puhul

Otseteisendusel korrutame siinusfunktsiooni *j*-ga ja lisame vastava koosinusfunktsiooni

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi) \rightarrow \dot{i} = I_m \cos(\omega t + \psi) + jI_m \sin(\omega t + \psi) = I_m e^{j(\omega t + \psi)} = \dot{I}_m e^{j\omega t} = Re\{\dot{i}\} + jIm\{\dot{i}\},$$

kus $$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi} \quad \text{või} \quad \dot{I} = Ie^{j\psi}. \tag{4.31}$$

Siin tähistab $Re\{\dot{i}\}$ funktsiooni reaalosa, aga imaginaarosa – $jIm\{\dot{i}\}$.

Saadud tulemuse pöördteisendusel, mis näiteks võib olla $\dot{i}_1 = \dot{I}_{m1} e^{j\omega t} = \dot{I}_{m1} e^{j(\omega t + \psi_1)}$,

tuleb kõrvaldada varem sissetoodud koosinusfunktsioon ja kasutada ainult imaginaarosa koos selle märgiga

$$\dot{i}_1 = I_{m1} e^{j(\omega t + \psi_1)} \rightarrow Im\{\dot{i}_1\}. \tag{4.32}$$

2. Koosinusfunktsiooni puhul

Otseteisendusel tuleb lisada vastav imaginaarosa

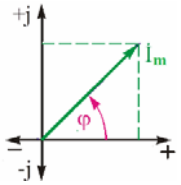
$$i = I_m \cos(\omega t + \psi) \rightarrow \dot{i} = I_m \cos(\omega t + \psi) + jI_m \sin(\omega t + \psi) = \dot{I}_m e^{j(\omega t + \psi)} = \dot{I}_m e^{j\omega t}.$$

Saadud tulemuse pöördteisendusel (näiteks $\dot{i}_2 = \dot{I}_{m2} e^{j\omega t} = \dot{I}_{m2} e^{j(\omega t + \psi_2)}$) tuleb võtta ainult reaalosa koos märgiga $$\dot{i}_2 = \dot{I}_{m2} e^{j(\omega t + \psi_2)} \rightarrow Re\{\dot{i}_2\}. \tag{4.33}$$

4.14. Voolud, pinged ja takistused sümbolkujul

Eespool selgitasime, et siinusvoolu või -pinge hetkväärtusi võib kujutada pöörleva diagrammivektori projektsioonina paigalseisvale teljele (ordinaatteljele). Samuti selgus, et vahelduvvooluahelate käsitlemisel ei ole vajadust pöörata vektordiagrammi, sest sama sagedusega pöörlevate vektorite vastastikune asend ei muutu.

Nüüd võtsime abtsisstelje reaalarvude ja ordinaattelje imaginaararvude teljeks. Järelikult võib siinussuurusi esitada ja üles kirjutada kompleksarvudena. Siinussuuruste vektorite esitamine kompleksarvudena võimaldab tunduvalt lihtsustada vahelduvvooluahelate arvutust.



Joonis 4.78. Vooluvektor koordinaatsüsteemis

Kuna reaal- ja imaginaartelg ühtivad abtsiss- ja ordinaatteljega, siis diagrammvektor, mis kujutab $i_1 = I_{m1}\sin\omega t$, langeb ühte reaalteljega. Seda vektorit ja vastavat komplekssuurust tähistame $\dot{I}_{m1}$ (punkt tähe peal) ja nimetame **kompleksvooluks.** Kompleksvoolu moodul on I_{m1}, algfaasinurk – 0º. Järelikult eksponentkujul

$$\dot{I}_{m1} = I_{m1}e^{j0^\circ} = I_{m1}. \tag{4.34}$$

Kui vool muutub järgmiselt:

$$i_2 = I_{m2}\cos\omega t = I_{m2}\sin(\omega t + 90^\circ),$$

siis sellele vastav vektor pöörleb voolu i_1 vektorist 90º nurga ehk π/2 võrra ees, st asetseb piki imaginaartelge. Järelikult kompleksvool

$$\dot{I}_{m2} = I_{m2}e^{j90^\circ} = jI_{m2}. \tag{4.35}$$

Üldjuhul muutub siinuseline vool järgmiselt:

$$i = I_m\sin(\omega t + \psi) = I_m\cos\psi\sin\omega t + I_m\sin\psi\cos\omega t \tag{4.36}$$

ja vastav kompleksvool (joonis 4.78):

$$\dot{I}_m = I_m\cos\psi + jI_m\sin\psi = I_m(\cos\psi + j\sin\psi) = I_m e^{j\psi}. \tag{4.37}$$

Samade juhiste järgi kirjutatakse ka pingete hetkväärtusi väljendavad komplekspinged. Kui pinge

$$u = U_m\sin(\omega t + \alpha), \tag{4.38}$$

siis komplekspinge

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\alpha}. \tag{4.39}$$

Vooluahelate arvutamisel tuleb meeles pidada, et $\dot{I}_m$ ja $\dot{U}_m$ on kompleksarvud moodulitega I_m ja U_m ning argumentidega ψ ja α.

Kompleksvoolu $\dot{I}_m$ või komplekspinge $\dot{U}_m$ tähise peal olev punkt rõhutab, et vool või pinge muutub siinuseliselt (nurksagedusega ω).

Mõnikord kasutatakse ka järgmist siinusvoolu tähistust:

$$\dot{I} = Ie^{j\psi}, \tag{4.40}$$

kusjuures $I = \dfrac{I_m}{\sqrt{2}}$,

seega antakse voolu efektiivväärtus ja ta algfaasinurk. Ilmselt määravad ka need suurused mainitud sagedusega voolu täielikult.

Kui voolud ja pinged on väljendatud sümbolina, tehakse arvutused nii, nagu oleksid kõik teised vahelduvvooluringi elemendid – aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvustakistused samuti väljendatud kompleksarvudena.

Haru komplekspinge ja kompleksvoolu jagatist nimetatakse haru **komplekstakistuseks** ja märgitakse suure tähega $\dot{Z}$:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_m}{\dot{I}_m} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}.$$

Vaatleme näiteks takisti ja induktiivpooli järjestiklülitust. Sellise ahela vool ja pinge (4.18)

$$i = I_m\sin\omega t; \quad u = U_m(\sin\omega t + \varphi)$$

või sümbolina $\dot{I} = I;\ \dot{U} = Ue^{j\varphi}$.

Ahela komplekstakistus (4.20)

$$Z = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I}e^{j\varphi} = ze^{j\varphi} = z(\cos\varphi + j\sin\varphi)\,. \tag{4.41}$$

Võttes arvesse seosed $z\cos\varphi = r$ ja $z\sin\varphi = x_L$, saame komplekstakistuse

$$\dot{Z} = r + jx_L\,. \tag{4.42}$$

Sama tulemuseni jõuaksime, kui käsitleme ahela induktiivtakistust suurusena $jx_L = j\omega L$. Kordajal j on ühene füüsikaline sisu: induktiivpooli korral on potentsiaalilangu ja voolu vaheline faasinihe 90 kraadi, kusjuures vool jääb potentsiaalilangust maha.

Tõepoolest valemist (4.16) saame: $\dot{U} = \dot{I}\dot{Z} = \dot{I}r + \dot{I}jx_L$.

Esimene liidetav on pinge aktiivkomponendi kompleksavaldis. Takisti potentsiaalilang ühtib ajaliselt vooluga ja kompleksavaldistel $\dot{I}r = Ir$ ja $\dot{I} = I$ on mõlemal nulliga võrdne argument. Teine liidetav on induktiivpooli potentsiaalilangu kompleksavaldis $\dot{I}jx_L = Ijx_L = Ix_Le^{j90^\circ}$, mille argument võrdub 90º, samal ajal kui kompleksvoolu $\dot{I} = I$ argument võrdub nulliga. See tähendabki, et potentsiaalilangu induktiivkomponent pöörleb voolust ajaliselt 90º võrra ees.

Järjestiklülituses takisti ja kondensaatori korral

$$\dot{Z} = r - jx_C \tag{4.43}$$

ja järelikult potentsiaalilangu mahtuvuskomponent $\dot{U}_C = -jx_C\dot{I} = x_CIe^{-j90^\circ}$

jääb voolust ajaliselt 90º võrra maha.

Väga tähtis on meeles pidada, et kompleksarv $\dot{Z}$ ei olene (erinevalt voolust ja pingest) voolu ja pinge algfaasinurgast. Tõepoolest, kui valida ajaarvestuse algus nii, et vool $i = I_m\sin(\omega t + \psi)$, siis teatavasti potentsiaalilang $u = U_m\sin(\omega t + \alpha)$ pöörleb voolust nurga φ võrra ees (kui ahelas on r ja L). Seega, $\alpha = \psi + \varphi$. Kui $\dot{U} = Ue^{j\alpha}$ ja $\dot{I} = Ie^{j\psi}$,

siis komplekstakistus $\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\alpha}}{Ie^{j\psi}} = \frac{U}{I}e^{j(\alpha-\psi)} = ze^{j\varphi}$. (4.44)

Hargneva ahela arvutust on sobivam läbi viia, kui kasutada **kompleksjuhtivust** $\dot{Y}$. Komplekstakistus $\dot{Z}$ ja kompleksjuhtivus $\dot{Y}$ on seostatud järgmiselt:

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{Ze^{j\varphi}} = \frac{1}{z}e^{-j\varphi} = ye^{-j\varphi}\,. \tag{4.45}$$

Aktiivtakistusega r ja induktiivsusega L ahela juhtivus

$$\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{r + jx_L} = \frac{r - jx_L}{z^2} = g - jb_L\,,$$

kus $z^2 = r^2 + x_L^2;\ g = \frac{r}{z^2};\ b_L = \frac{x_L}{z^2};\qquad tg\varphi = \frac{x_L}{r} = \frac{b_L}{g};\ \varphi < 0\,;$

siin g on ahela aktiivjuhtivus ja b_L – induktiivjuhtivus.

Aktiivtakistusega r ja mahtuvusega b_L ahela juhtivus $\dot{Y} = \frac{1}{\dot{Z}} = \frac{1}{r + jx_C} = \frac{r - jx_C}{z^2} = g + jb_C\,,$

kus $z^2 = \sqrt{r^2 + x_C^2};\ b_C = \frac{x_C}{z^2};\ tg\varphi = \frac{-x_C}{r} = \frac{-b_C}{g},\ \varphi < 0;$

siin on g ahela aktiivtakistus ja b_C – mahtuvusjuhtivus.

Ahelas, kus on r, L ja C,

$$\dot{Z} = r + jx_L - jx_C = r + j(x_L - x_C) = r + jx = ze^{j\varphi},$$

$$\dot{Y} = \frac{1}{r + jx} = \frac{r - jx}{r^2 + x^2} = g - jb,$$

kus $g = \frac{r}{r^2 + x^2} = \frac{r}{z^2};\ b = \frac{r}{r^2 + x^2} = \frac{x_L - x_C}{z^2};$

$$tg\varphi = \frac{x}{r} = \frac{b}{g};\ \varphi > 0\ kui\ \ x > 0\ \text{ehk}\ \ b > 0;$$

$$\varphi < 0\ kui\ \ x < 0\ \text{ehk}\ \ b < 0.$$

Sarnaselt komplekstakistusega ei olene ka kompleksjuhtivus voolu ega pinge algfaasinurgast.

Avaldise (4.19) võib ümber kirjutada järgmiselt: $\dot{U} = \dot{I}Z$ (4.46)

ehk $\dot{I} = \dot{U}Y$. (4.47)

Viimaseid võrrandeid nimetatakse **Ohmi seaduseks sümbolkujul**.

NÄIDE 4.32

Antud: pinge $u = 340\sin(\omega t + 62°)$ V ja järjestikku ühendatud takisti r = 1,6 Ω ning pool x_L = 1,2 Ω. **Määrata** ahela vool.

Lahendus

Komplekstakistus $\dot{Z} = r + jx_L = (1{,}6 + j1{,}2)\ \Omega;$

tema moodul ja argument $z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{1{,}6^2 + 1{,}2^2} = 2\ \Omega;$

$$tg\varphi = \frac{x_L}{r} = \frac{1{,}2}{1{,}6} = 0{,}75;\ \varphi \approx 37°.$$

Komplekstakistus eksponentkujul $Z = ze^{j\varphi} = 2e^{j37°}\ \Omega.$

Komplekspinge $\dot{U} = \frac{340}{\sqrt{2}}e^{j62°} = 240e^{j62°}.$

Kompleksvool $\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z} = \frac{240e^{j62°}}{2e^{j37°}} = 120e^{j25°}$

ja ahela vool $i = 120\sqrt{2}\sin(\omega t + 25°)$ A.

NÄIDE 4.33

Antud: pinge $u = 340\sin(\omega t + 25°)$ V ja järjestikku ühendatud takistused r = 160 Ω ning xC = 120 Ω. Määrata ahela vool.

Lahendus

Komplekstakistus $\dot{Z} = r - jx_C = (160 - j120)\ \Omega;$

tema moodul ja argument $z = \sqrt{r^2 + x_C^2} = \sqrt{160^2 + 120^2} = 200\ \Omega;$

$$tg\varphi = -\frac{x_C}{r} = \frac{120}{160} = -0{,}75;\ \ \varphi \approx -37°.$$

Komplekstakistus eksponentkujul $Z = ze^{j\varphi} = 200e^{-j37°}\ \Omega$.

Kompleksvool $\dot{I} = \dfrac{\dot{U}}{Z} = \dfrac{240e^{j25°}}{200e^{-j37°}} = 1{,}2e^{j62°}$

ja ahela vool $i = 1{,}2\sqrt{2}\sin(\omega t + 62°)$ A.

4.15. Kompleksvõimsus

Näivvõimsuse kompleksavaldist võiks võrdsustada komplekspinge ja kompleksvoolu korrutisega, st

$$\dot{U}\dot{I} = UIe^{j\alpha}e^{j\psi};$$

et aga $UI = S$ ja $\alpha = \varphi + \psi$,

siis $\dot{U}\dot{I} = Se^{j(\varphi+2\psi)} = S\cos(\varphi + 2\psi) + Sj\sin(\varphi + 2\psi)$.

Kompleksvõimsus $\dot{S}$ osutub sõltuvaks voolu algfaasinurgast ψ. Tema reaalosa ei võrdu aktiivvõimsusega $P = UI\cos\varphi$ ega reaktiivvõimsusega $Q = UI\sin\psi$.

Seepärast korrutatakse kompleksvõimsuse saamiseks komplekspinge voolu kaaskompleksavaldisega.

Olgu ahela kompleksvool $\dot{I} = Ie^{j\psi}$ ja komplekspinge $\dot{U} = Ue^{j\alpha} = Ue^{j(\varphi+\psi)}$. Komplekspinge ja voolu kaaskompleksavaldise korrutis

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = Ue^{j(\varphi+\psi)} \cdot Ie^{-j\psi} = UIe^{j\varphi} = Se^{j\varphi} = UI\cos\varphi + jUI\sin\varphi = P + jQ, \qquad (4.48)$$

st selle kompleksavaldise reaalosa annab aktiivvõimsuse, imaginaarosa aga reaktiivvõimsuse. Mahtuvusliku koormuse korral, st nurga φ negatiivse väärtuse korral, on kompleksvõimsuse imaginaarosal negatiivne märk.

Tuleb rõhutada, et erinevalt voolust ja pingest ei kuulu näivvõimsus siinuseliselt muutuvate suuruste hulka, st näivvõimsuse kompleksavaldis ja vastav diagrammvektor ei kujuta siinuseliselt muutuvat suurust.

NÄIDE 4.34

Määrata aktiiv- ja reaktiivvõimsus, kui $\dot{U} = 120e^{j62°}$ V ja $\dot{I} = 100e^{j25°}$ A.

Lahendus

Kompleksvõimsus

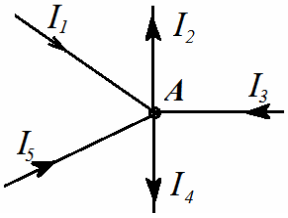
$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = 120e^{j62°} \cdot 100e^{-j25°} = 12\,000e^{j37°} = 12\,000\cos 37° + j12\,000\sin 37° =$$
$$= 12\,000 \cdot 0{,}8 + j12\,000 \cdot 0{,}6 = (9600 + j7200)VA;$$

$P = 9{,}6$ kW; $\ Q = 7{,}2$ kvar.

Kirchhoffi seadused

Võttes kasutusele allikasisepinge, voolu, potentsiaalilangu, takistuse ja juhtivuse tähistused sümbolitena, saame võimaluse kirjutada Kirchhoffi võrrandeid vahelduvvooluahelate kohta samal kujul nagu alalisvooluahelategi kohta. Seega võib formaalselt kõik vahelduvvooluahelate seosed ja seadused taandada alalisvooluahelate seostele ja seadustele.

Kirchhoffi esimese seaduse kohaselt võrdub vahelduvvooluahela hargnemis- ehk sõlmpunkti suunduvate voolude hetkväärtuste summa sõlmpunktist väljuvate voolude hetkväärtuste summaga. Sama kehtib ka kompleksvoolude kohta.



Joonis 4.79. Elektriahela sõlmpunkt

Väljendades voolud sümbolitena ja arvestades nende suundi (sõlmpunkti või sõlmpunktist), saame sõlmpunktile *A* **Kirchhoffi esimese seaduse** (joonis 4.79) põhjal vooludevahelise seose **sümbolitena**

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_3 + \dot{I}_5 = \dot{I}_2 + \dot{I}_4, \tag{4.49}$$

seega sõlmpunkti suunduvate kompleksvoolude summa võrdub sõlmpunktist väljuvate voolude summaga.

Kui sõlmpunkti suunduvaid voole lugeda positiivseteks ja sealt väljuvaid voole negatiivseteks, siis

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 + \dot{I}_3 - \dot{I}_4 + \dot{I}_5 = 0 \tag{4.50}$$

või üldkujul

$$\sum \dot{I} = 0, \tag{4.51}$$

st sõlmpunktis on kõikide kompleksvoolude algebraline summa võrdne nulliga. Võrrand (4.50) ühtib väliselt täielikult Kirchhoffi esimest seadust väljendava võrrandiga (2.5) alalisvoolu kohta.

Kirchhoffi teise seaduse kohaselt võrdub vahelduvvooluahela mingis kinnises kontuuris allikate sisepingete hetkväärtuste algebraline summa sama kontuuri tarbijate potentsiaalilangude algebralise summaga.

Väljendanud allikasisepinged, voolud ja takistused sümbolitena ning lugedes positiivseteks need allikasisepinged ja voolud, mille suunad ühtivad kinnises kontuuris valitud ringkäigu suunaga, vastassuunalised aga negatiivseteks, võime mistahes kinnise kontuuri kohta kirjutada

$$\sum \dot{U}_A = \sum (\dot{I}\dot{Z}). \tag{4.52}$$

Seejuures tuleb sisepingeteks lugeda ainult toiteallikate sisepingeid, kuna tarbijate allikasisepinged võetakse arvesse vastavate potentsiaalilangudena $j\dot{I}x_L$. **Seega võrdub igas kinnises kontuuris allika kompleks-sisepingete summa komplekspotentsiaalilangude summaga.**

Viimast võrrandit nimetatakse **Kirchhoffi teiseks seaduseks sümbolkujul**, mis ühtib üheselt alalisvooluahela vastava võrrandiga 2.12.

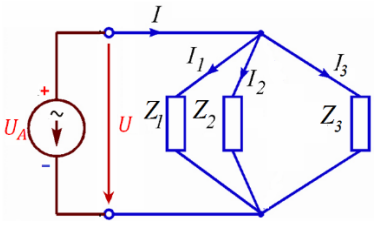
Jada- ja rööplülituses takistitega elektriahelad. Vaatame Kirchhoffi seaduste kasutamist näidisülesannetes.

NÄIDE 4.35

Määrata ahela mittehargneva osa vool (joonis 4.80), kui harude voolud (amprites) on

$i_1 = 70\sin(\omega t + 66°)$, $i_2 = 31{,}8\sin(\omega t + 116{,}5°)$, ja

$i_3 = 82{,}8\sin(\omega t - 59°)$.



Joonis 4.80. Hargahel

Lahendus

Kompleksvoolud (amprites):

$$I_1 = \frac{70}{\sqrt{2}} e^{j66°} = 49{,}5(\cos 66° + j \sin 66°) \approx 20 + j45\,;$$

$$I_2 = \frac{31{,}8}{\sqrt{2}} e^{j116{,}5°} = 2{,}5(\cos 116{,}5° + j \sin 116{,}5°) \approx -10 + j20;$$

$$I_3 = \frac{82{,}8}{\sqrt{2}} e^{-j59°} = 58{,}6\left[\cos(-59°) + j \sin(-59°)\right] \approx 30 - j50\,.$$

Arvestades joonisel 4.68 märgitud voolude suundi, võime kirjutada

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 20 + j45 - 10 + j20 + 30 - j50 = 40 + j15 \ \text{A}.$$

Voolu efektiivväärtus $I = \sqrt{40^2 + 15^2} = 42{,}7$ A.

Nihkenurga tangens ja nihkenurk $tg\varphi = \frac{15}{40} = 0{,}375; \quad \varphi = 20{,}5°$.

Voolu hetkväärtus $i = 42{,}7\sqrt{2}\sin(\omega t + 20{,}5°)$ A.

Mittehargnevas vooluahelas (joonis 4.81), mis koosneb allikast sisepingega U_A ja mitmest järjestikku ühendatud takistist Z_1; Z_2, Z_3 jne, saame Kirchhoffi teise seaduse järgi

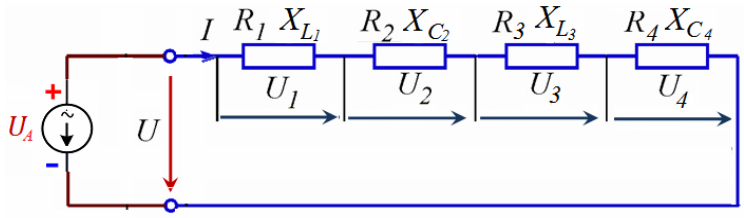
$$\dot{U}_A = \dot{I}\dot{Z}_1 + \dot{I}\dot{Z}_2 + \dot{I}\dot{Z}_3 + \ldots + \dot{I}\dot{Z}_n = \sum(\dot{I}\dot{Z})\,.$$

Mittehargneva ahela kõiki punkte läbib üks ja sama vool. Tuues voolu sulgude ette, saame:

$$\dot{U}_A = \dot{I}(\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \ldots + \dot{Z}_n).$$

Siit $$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \ldots + \dot{Z}_n. \qquad (4.53)$$

Seega võrdub mittehargneva vooluringi kompleksnäivtakistuse avaldis üksikute takistuste summaga.



Joonis 4.81. Mitme aktiiv- ja reaktiivtakistusega mittehargnev ahel

Näiteks joonisel 4.81 toodud välisahela kogutakistus

$$\dot{Z} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3 + \dot{Z}_4 = r_1 + jx_{L1} + r_2 - jx_{C2} + r_3 + jx_{L3} + r_4 - jx_{C4} =$$
$$= (r_1 + r_2 + r_3 + r_4) + j(x_{L1} + x_{L3} - x_{C2} - x_{C4}),$$

kus $r = r_1 + r_2 + r_3 + r_4; \quad x = x_{L1} + x_{L3} - x_{C2} - x_{C4}$.

4.16 Kordamisküsimused

1. Mida kujutab endast vahelduvallikapinge, vahelduvvool ja kuidas seda saadakse?
2. Kuidas toimub vahelduvvoolu tarbijatel energia muundumine?
3. Millised parameetrid iseloomustavad vahelduvvoolu ja kuidas määratakse hetk-, efektiiv-, kesk- ning amplituudväärtust?
4. Millisteks gruppideks jagatakse takistid? Pinnanähtuste tekkemehhanism. Sageduse mõju pinnanähtele.
5. Oomtakisti (takisti) vahelduvvooluahelas. Tööpõhimõte. Tasakaalustava allikapinge ja potentsiaalilangu teke, vektordiagramm, võimsuste hetkväärtuste muutumine ajas.
6. Pool vahelduvvooluahelas. Tööpõhimõte. Tasakaalustava allikasisepinge ja potentsiaalilangu teke, vektordiagramm, võimsuste hetkväärtuste muutumine ajas. Näidata, miks vool jääb pingest maha 90 °?
7. Kondensaator vahelduvvooluahelas. Tööpõhimõte. Tasakaalustava vastuallikapinge teke, vektordiagramm, võimsuste hetkväärtuste muutumine ajas. Näidata, miks pinge jääb voolust maha 90 °?
8. *RLC*-jadaahel. Pingeresonants. Missuguste parameetrite kombinatsiooni korral see on ohtlik? Milles on oht?
9. *RLC*-rööpahel. Vooluresonants. Missuguste parameetrite kombinatsiooni korral see on ohtlik? Milles on oht?
10. Võimsus ja võimsustegur. Võimsusteguri parendamise eesmärgid ja vahendid.
11. Reaktiivvõimsuse tarbimise mõju toitepinge kvaliteedile 6...35 kV keskpingevõrkudes.

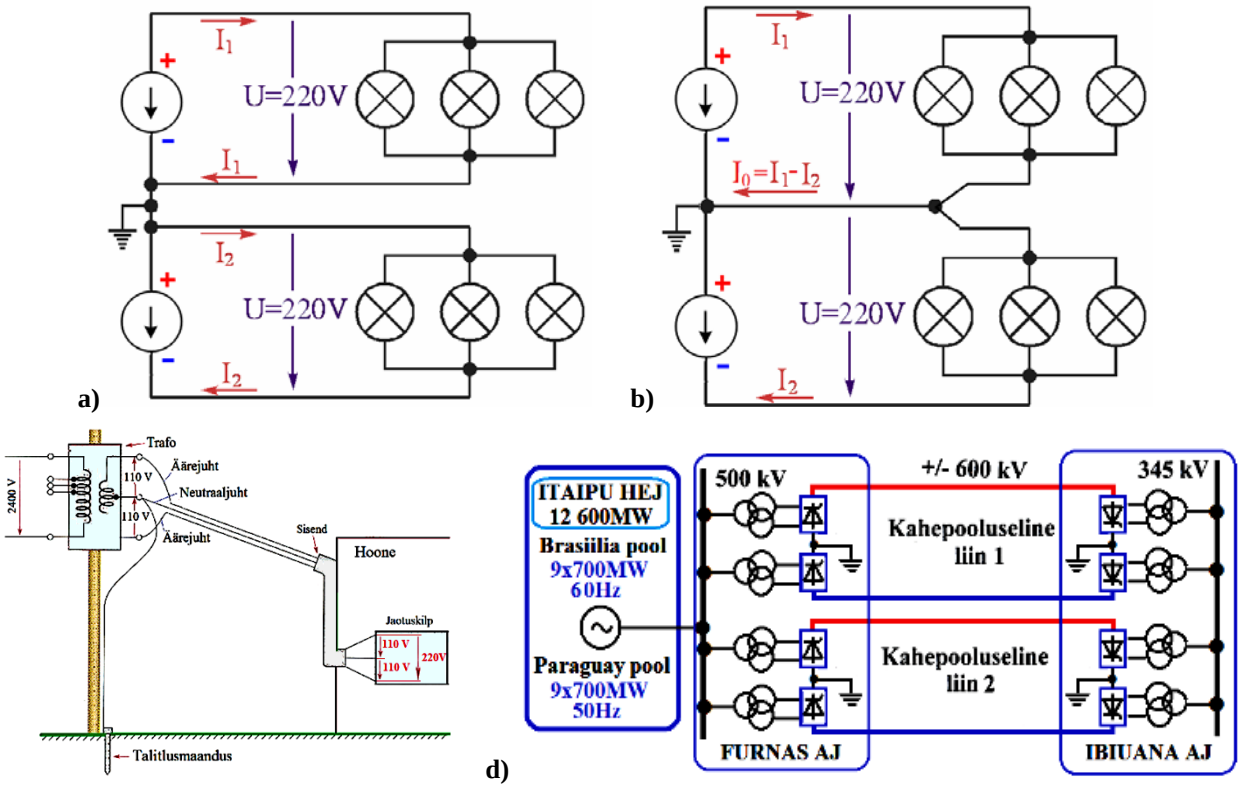
5. KOLMEFAASILISED AHELAD

5.1. Materjali- ja energiasäästlike elektriedastussüsteemide kujundusideed
5.2. Kolmefaasilise voolu saamine
5.3. Tähtlülitus
5.4. Kolmnurklülitus
5.5. Kolmefaasilise voolu võimsus
5.6. Kordamisküsimused

5.1. Materjali- ja energiasäästlike elektriedastussüsteemide kujundusideed

Alalisvoolu edastussüsteemid. Et muuta energia ülekanne liinijuhtmete kaudu tõhusamaks, kasutatakse mitme eraldi allikaga sõltumatu elektriahela omavahelist sidumist. Seda kasutati 19. sajandil väga laialdaselt kolmejuhtmeliste alalisvooluülekannete (joonis 5.1) loomisel.

Taoline süsteem koosneb kahest tarbijate rühmast, mida toidetakse kahe alalisvoolugeneraatoriga (joonis 5.1b), kusjuures **üks liinijuhe on ühine mõlema rühma jaoks** (joonis 5.1b).



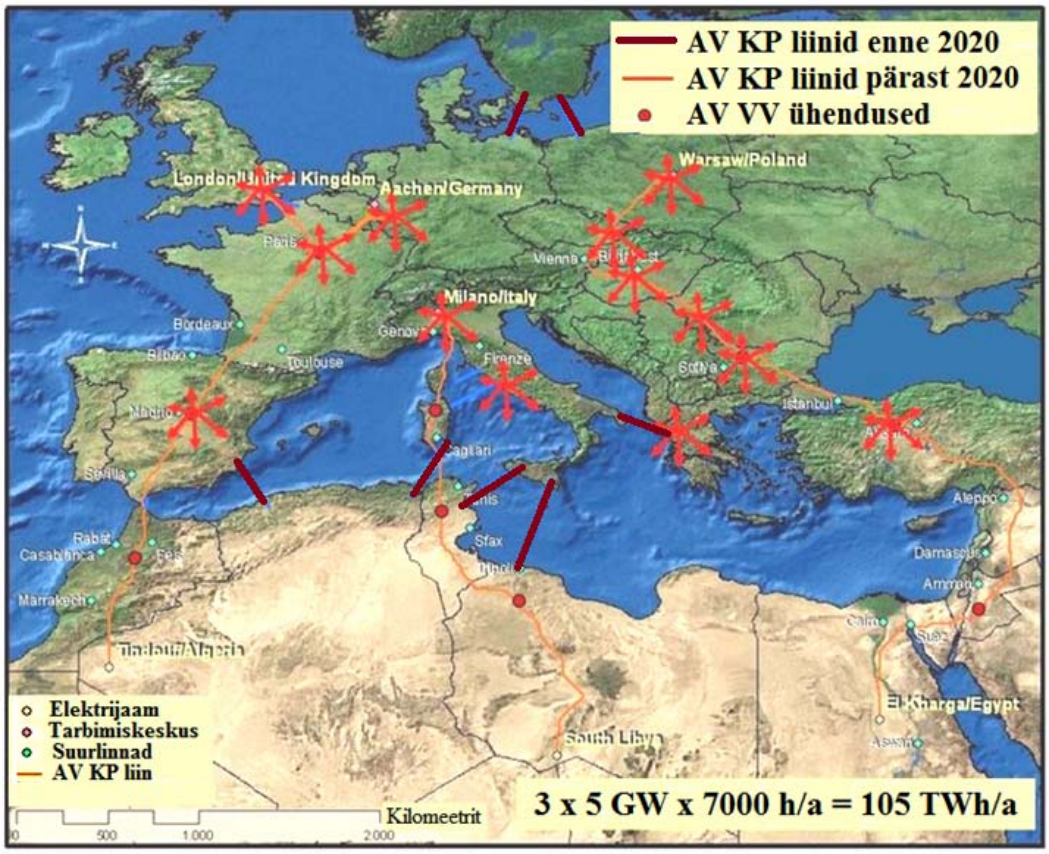
Joonis 5.1. Alalisvoolu edastussüsteem kolme- ja kahejuhtmelise liini abil: a – kaks ühise maandusega kahejuhtmelist liini, b – sama edastussüsteem pärast kolmejuhtmeliseks liiniks kujundamist, c – elamu elektrivarustus USAs, d – kahejuhtmeline süsteem, kus muundurite sümmeetria ja nende keskpunkti maandamise tõttu $I_0 = 0$. Siin tagab maandamine nullpotentsiaali iga muunduri ühel klemmil. See võimaldab avariioludes piirata muundurile rakenduvat pinget

Generaatorite voolud on ühises liinijuhtmes vastassuunalised. Seetõttu vool $I_0 = I_1 - I_2$. Kui generaatorite koormused on võrdsed ehk kui $I_1 = I_2$, siis võrdub vool ühises liinijuhtmes nulliga. Ühist liinijuhet nimetatakse seetõttu **null-** või **neutraaljuhtmeks**. Kahte ülejäänud juhet nimetatakse **liinijuhtmeteks**. Kuna neutraaljuhtmes olev vool on võrdne kahe generaatorivoolu vahega, siis neutraaljuhtme ristlõige võib olla palju väiksem kui liinijuhtmetel. Sageli on neutraaljuhi ristlõikepindala $S_N = 1/2 S_{liini}$. Seega säästetakse kolmejuhtmeliseks kujunenud süsteemis oluliselt juhtmematerjali (Al, Cu). Juhtmete summaarne ristlõikepindala on $S_\Sigma = 2{,}5 S_{liini}$, mitteseotud süsteemi korral aga oleks vaja $S_\Sigma = 4 S_{liini}$.

Ohutuse seisukohast tuleb neutraaljuhe maandada (töökindlalt ühendada maaga spetsiaalse maanduri, näiteks metallplaadi või varraste abil, mis ulatuvad allapoole pinnavee taset). Maandamise korral (joonis 5.1) ei saa liinijuhtmete pinge maa suhtes ületada generaatori pinget 220 V. Juhul kui neutraaljuhe ei ole maandatud, kuid maandatud on üks liinijuhtmetest, siis teise juhtme pinge maa suhtes kasvab 440 V-ni.

Tänapäeval ulatub pinge alalisvoolu kaugülekandeliinides 1500 kilovoldini. Näiteks Brasiilias, Itaipu hüdroelektrijaama lähedalt Furnase vahelduvvoolu-alalisvoolu (VV-AV) muunduralajaamast suunduvad kaks 805 km pikkust ±600 kV kahejuhtmelist AV-liini São Paulo lähedale Ibiuna vaheldialajaama (joonis 5.1c). Nii muundur- kui ka vaheldialajaama väljundpinged on sümmeetrilised ja jadalülituses oleva kahe muunduripaari keskpunktid on maandatud. Nii täidab maa kahe alajaama vahel kolmanda juhtme rolli. Muunduripaaride sümmeetrilise talitluse tõttu maa sees vool puudub, sest $I_0 = I_1 - I_2 = 0$. Nii on juhtmematerjali kokkuhoid kahekordne.

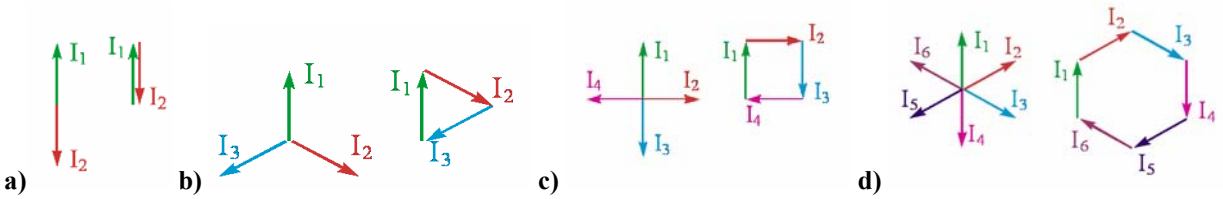
Lähiaastakümnetel hakkab selliste elektriedastusliinide osakaal jõudsalt kasvama. Joonisel 5.2 on Euroopa kaardil tumepunase joonega tähistatud kõrgepingelised AV-liinid, mis ehitatakse valmis enne 2020. aastat ja helepruuniga pärast 2020. aastat kavandatud. Pooljuhtmuundurite kiire areng ja reaktiivvõimsuse probleemide puudumine annavad real juhtudel AV kaugülekannetele konkurentsieelise VV ees.



Joonis 5.2. Võimsate alalisvoolu kõrgepingeliste edastussüsteemide ehituskavad enne ja pärast 2020. aastat
Allikas: http://de.wikipedia.org/wiki/TransMediterranean_Renewable_Energy_Cooperation

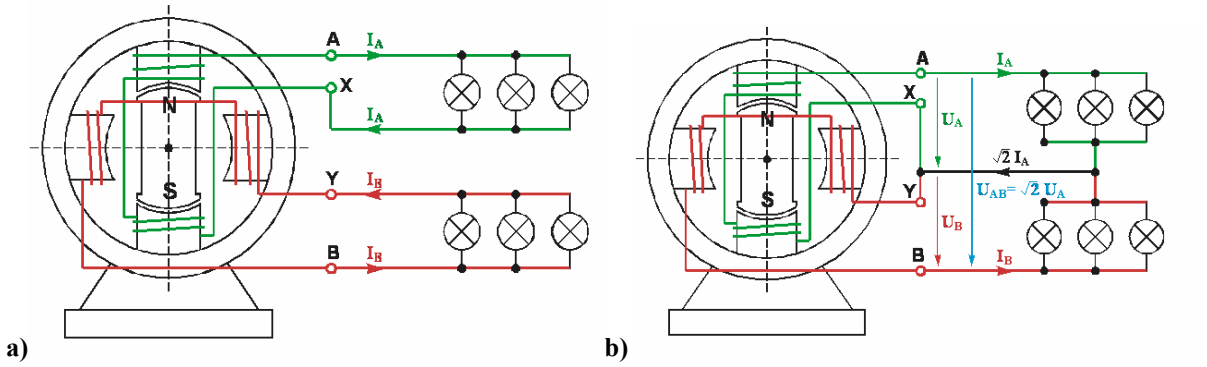
Vahelduvvoolu edastussüsteemid. Vahelduvvoolu korral on eraldi allikatega omavahel seotud süsteemide loomiseks vaja, **et ühises voolujuhtmes kõikide allikate voolude hetkväärtuste algebraline summa võrduks nulliga igal ajahetkel. Siis on mitme elektriallika ühisjuhe kõige vähem vooluga koormatud.** See tingimus on täidetud, kui ühendatud ahelate vooluvektorite summa võrdub nulliga ehk vektorid moodustavad suletud hulknurga (vt joonis 5.3).

Vahelduvvoolu seotud süsteemis nimetatakse üksikuid ahelaid **faasideks** ja kogu süsteemi **mitmefaasiliseks (kahe-, kolme-, kuue- jne faasiliseks) süsteemiks.** Seega terminit „faas“ kasutatakse elektrotehnikas kahes erinevas tähenduses: perioodilise protsessi suhtelise momendina (siinusfunktsiooni argumendina) ja mitmefaasiliste vahelduvvoolusüsteemi koosteosade nimetusena.



Joonis 5.3. Kahe- (a), kolme- (b), nelja- (c) ja kuuefaasilise (d) süsteemi vooluvektorid ja nende vektorite suletud hulknurk

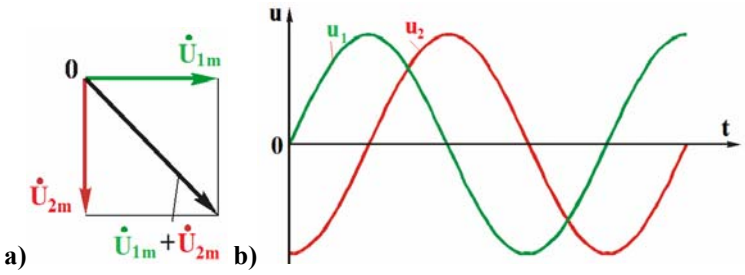
Kahefaasiline süsteem. Ajalooliselt võeti esimesena kasutusele kahefaasiliste generaatoritega kahefaasiline süsteem (N. Tesla ja G. Westinghouse), vt joonis 5.4.



Joonis 5.4. Kahefaasilise generaatori põhisõlmed ja neljajuhtmeline mitteseotud (a) ning kolmejuhtmeline seotud (b) süsteem

Kui ühefaasilise generaatori staatorile lisada teine iseseisev ja eelmisest 90° nihutatud mähis, siis rootori pöörlemisel indutseeritakse mõlemas oma sisepinge. Niisiis indutseeritakse ühes generaatoris kaks ühefaasilist teineteisest 90° võrra nihutatud sisepinget (joonis 5.5).

Vektordiagrammist näeme, et kahe allikasisepinge summa on $U_{1m} + U_{2m} = \sqrt{2}U_{1m}$



Joonis 5.5. Kahefaasilise generaatori sisepingete vektordiagramm (a) ja kuju (b)

Juhtmematerjali kokkuhoiuks võib samuti kasutada seotud mähistega kahefaasilist süsteemi (joonis 5.4b). Selleks ühendatakse *A* ja *B* faasi mähiste lõpud *X* ja *Y* omavahel. Niiviisi jääb neljas juhe ära ja keskmist juhet nimetatakse nulljuhtmeks või neutraaliks. Nulljuhtme ja faasijuhtmete (Ameerikas nimetatakse „äärejuhid“) vahel on pinged võrdsed ja neid võib paarikaupa vaadelda kui omaette faase. Äärejuhtide ehk liinijuhtmete vahele rakendub üksikute faasipingete geomeetriline summa $U_{12} = \sqrt{2}U_A$.

Kui aga kasutame ühefaasilist generaatorit, kus väljundpinge on kahe samasuunalise osapinge summa, siis saame igal hetkel samasuguse lülituse nagu alalisvoolu korral joonisel 5.1b. Võrdsete faasivoolude korral võrdub seotud kolmejuhtmelise süsteemi neutraaljuhtme vool nulliga. Ameerika Ühendriikides on niisugune süsteem tänaseni kasutusel .

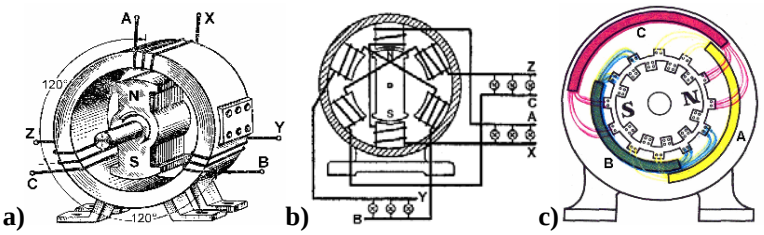
5.2. Kolmefaasilise toiteallika saamine

Vahelduvvoolu kolmefaasiline süsteem on maailmas laialt levinud, sest aastate vältel tagas see kõige ökonoomsema energia ülekandmisviisi ja võimaldas luua töökindlaid, ehituselt lihtsaid elektrimootoreid, generaatoreid ning transformaatoreid. Tänaseks on konkurentsieelis nõrgenenud. Mihhail Dolivo-Dobrovolsky, keda nii Saksamaa, Venemaa kui ka Poola loevad oma elektriinseneriks (õppis Riia ja Darmstadti tehnikaülikoolis, töötas firmas AEG, oli hiljem tehnikadirektor), töötas välja ja võttis kasutusele kolmefaasilise süsteemi ja selle koosteosad (generaatori, asünkroonmootori ja trafo) ning 1891. a arendas välja ka esimese kolmefaasilise kõrgepingeliini pikkusega 175 km.

Kolmefaasiline süsteem koosneb kolmest elektriallika ja tarbijate paarist, mis on seotud ühiste ülekandeliini-juhtmete abil. Süsteemi energiaallikaks on kolmefaasiline generaator, mille tööpõhimõtet ja ehituse ideed illustreerib joonis 5.6a. Joonisel 5.6c on elektrijaamades kasutatava kahepooluselise generaatori ehitus. Joonisel 5.6b koosneb iga faasimähis kahest magnetsüdamikule keritud jadalülituses olevast poolist.

Praegu toodavad peaaegu kõik elektrijaamad elektrienergiat kolmefaasilise vahelduvvooluna, mis edastatakse sealt tarbimiskeskustesse.

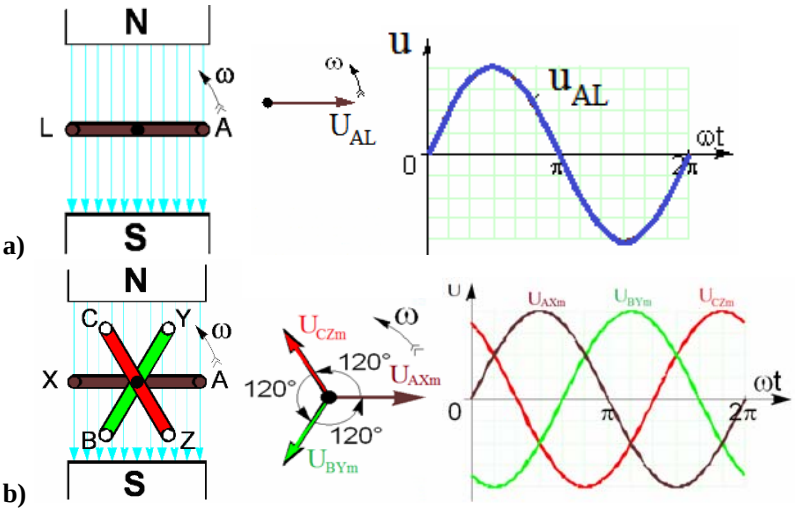
Mitmefaasilise süsteemi erinevad juhtmed (kaablisooned, faasid) märgistatakse tihti eri värvidega. IEC standardi järgi on kaitsejuhe kollarohelise pikitriibuga, neutraaljuhe – helesinine. Faasijuhtmed peavad olema eristatavad värvi järgi, kuid IEC reeglite järgi ei tohi kasutada kollast, rohelist ega sinist. **Õpiku joonistel ei ole ilmekuse huvides sellest soovitusest kinni peetud.**



Joonis 5.6. Püsimagnetiga kolmefaasiline generaator (a) ja (b). Kolmefaasilises generaatoris on staatorile paigutatud kolm ühesugust mähist, mis on üksteise suhtes nihutatud 120° võrra. Magnetvoo võib tekitada ka rootoril paikneva ergutusmähise abil (c)

Kolmefaasiline generaator (joonis 5.6) erineb ühefaasilisest selle poolest, et tema paigalseisvale staatorile on paigutatud kolm eri mähist (faasi) joonisel – kollane, roheline, punane, vastavalt *A*, *B* ja *C*), mille teljed kahepooluselisel generaatoril on üksteise suhtes nihutatud 120° nurga võrra. Generaatori rootor kujutab endast püsi- või elektromagnetit, mis pöörleb teatud kiirusega mingi primaarmootori (turbiin, diisel jt) mõjul.

Rootori pöörlemisel konstantse kiirusega indutseeritakse staatori igas mähises ühesuguse sagedusega siinuseline allikasisepinge, mis on ühesuguse amplituudiga, kuid faasilt üksteisest nihutatud 1/3 perioodi võrra (joonis 5.7).



Joonis 5.7. Ühefaasilise generaatori staatori mähises indutseeritakse siinuseliselt muutuv sisepinge. Kolmefaasilise generaatori kolmes mähises indutseeritakse kolm siinuseliselt muutuvat sisepinget, mis on ühesuguse amplituudiga, kuid üksteise suhtes faasilt nihutatud 1/3 perioodi võrra

Allikasisepinge indutseeritakse mähiste alguse (A) ja lõpu (L) või kolmefaasilise süsteemi korral *A,X*; *B,Y*; *C,Z* vahel.

Ühefaasilise generaatori allikasisepinge $u_{AL} = U_m \sin \omega t$.

Kolmefaasilise generaatori korral mähiste lõppude ja alguste vahelised sisepinged on

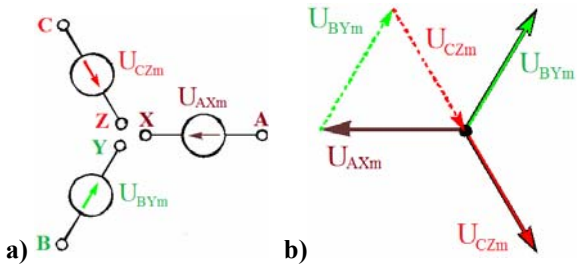
$$u_{AX} = U_m \sin \omega t,$$

$$u_{BY} = U_m \sin (\omega t - 2\pi/3) = U_m \sin (\omega t - T/3),$$

$$u_{CZ} = U_m \sin(\omega t - 4\pi/3) = U_m \sin (\omega t - 2T/3).$$

Allikasisepinge saavutab mähistes oma amplituud- (maksimaal) väärtuse U_m siis, kui mähise küljed lõikavad magnetpooluse keskjoont (joonis 5.7). Sümmeetrilise ehitusega generaatori korral on kõikide faaside sisepingete amplituudid (ning efektiivväärtused) võrdsed. Siinusallika sisepinge korral efektiivväärtus $U_{AX} = U_{BY} = U_{CZ} = U_m/\sqrt{2}$.

Liites kolme faasi sisepingevektorid $\vec{U}_{AX} + \vec{U}_{BY} + \vec{U}_{CZ}$ (joonis 5.8), saame suletud kolmnurga (joonis 5.8b). Seega võrdub vektorite summa igal ajahetkel nulliga.



Joonis 5.8. Kolmefaasilise generaatori faasipinge (a) ja nende vektordiagramm ning vektorite summa (b)

Kolmefaasiliste mootorite pöörlemissuund oleneb faaside järjestusest süsteemis. Seepärast kasutatakse faaside järjestuse määramiseks spetsiaalseid näidikuid ja jaotusseadmetes on latid värvitud. NSV Liidu aegsetes jaotlates on faas *A* kollane, *B* – roheline ja *C* – punane, maandamata neutraal – valge, maandatud neutraal – must. Generaatori mähiste algused on *A, B, C*, lõpud *X, Y, Z*.

Kolmefaasilise generaatori iga mähist koos temaga ühendatud välisahelaga nimetatakse **faasiks.** Iga mähis on iseseisev elektriallikas ja võib olla ühendatud oma elektritarbijaga. Sel juhul saadakse mitteseotud kolmefaasiline süsteem, mis nõuab energia edastamiseks kuut juhet (joonis 5.8a). Praktikas selliseid süsteeme ei kasutata. Harilikult ühendatakse kolmefaasilise generaatori mähised kas tähte või kolmnurka, mis on ökonoomsem.

Kolmest suurema faaside arvuga süsteemid. Lähtudes mitmefaasilise süsteemi eri faase siduvas ühises juhtmes nullvoolu tingimusest (voolu hetkväärtuste summa võrdub nulliga), võib koostada erinevaid mitmefaasilisi süsteeme (nelja, kuue, kaheksa, kaheteistkümne jne faasiga).

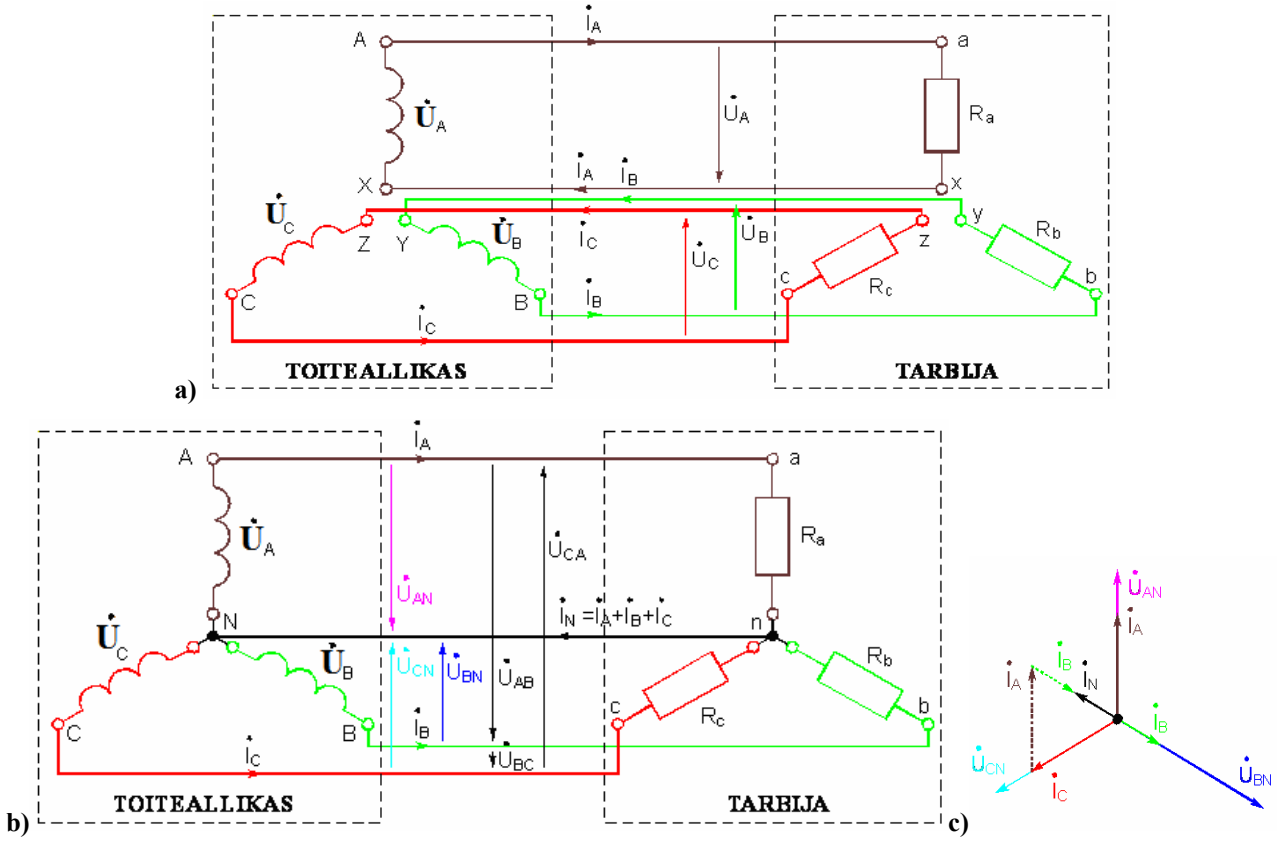
Joonisel 5.3 on koostatud vektordiagrammid sümmeetrilistele kahe-, kolme-, nelja- ja kuuefaasilistele süsteemidele. Näiteks joonisel 5.3d on kuus faasivoolu vektorit, mis liites moodustavad kuusnurga, kus vektorid on nihutatud eelneva suhtes 1/6 perioodi võrra, millele vastab vektoritevaheline nurk 60º.

Mitmefaasilistest süsteemidest on oma lihtsuse tõttu levinuim kolmefaasiline süsteem.

Vahelduvvoolu alaldamisel pooljuhtalalditega on alaldatud voolu pulsatsioon seda väiksem, mida suurem on toitesüsteemi faaside arv. Seetõttu kasutatakse võimsates alaldites 6- ja 12-faasilist toitesüsteemi, eriti võimsate korral ka veel suuremat faaside arvu. Tavaliselt luuakse kolmefaasilisest süsteemist eritrafode abil 6- või 12-faasiline alaldi toitesüsteem.

5.3. Tähtlülitus

Neutraaljuhtmega tähtlülituse skeem. Kolmefaasilise generaatori mähiste tähtlülituse korral ühendatakse kolme faasimähise lõpud ühte punkti, mida nimetatakse **nullpunktiks** *N* või generaatori **neutraaliks** (joonis 5.9). Allika faasid tähistame *AX, BY, CZ* ja neutraalpunkt *N* tarbijal *ax, by, cz* ja *n*.



Joonis 5.9. Faasid tähtlülituses. Mitteseotud kolmefaasiline süsteem (a). Neutraaljuhtmega tähtlülitusega skeemi puhul ühendatakse generaatori mähiste lõpud (*X*, *Y*, *Z*) ühisesse neutraalpunkti *N*. Tarbijad ühendatakse generaatori mähiste algusest minevate liinijuhtmete ja neutraaljuhtme vahele (a). Neutraaljuhtmes on vool I_N, mis võrdub faasivoolude vektorsummaga (b). Neutraaljuhtme voolu leidmine vektordiagrammil (c)

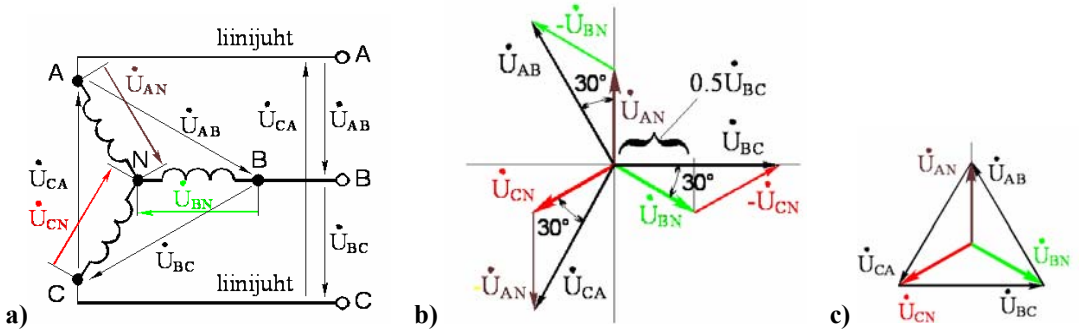
Elektritarbijad rühmitatakse kolmeks rühmaks, mille lõpud ühendatakse samuti ühisesse **neutraalpunkti *n***. Generaator ühendatakse elektrienergia tarbijatega nelja juhtme abil. Kolm neist on ühendatud mähiste algustega (*A*, *B*, *C*), neid nimetatakse **liinijuhtmeteks**. Neutraalpunktidega ühendatud juhet nimetatakse **neutraaljuhtmeks***. Sel viisil saadud skeemi nimetatakse **neutraaljuhtmega tähtlülituseks.** Lihtsustatult kujutatakse seda kolmekiirelise tähena, paigutades tarbija faasid paralleelselt generaatori faasidega. Pingeid faaside alguste ja lõppude vahel ehk pingeid iga liinijuhtme ja neutraaljuhtme vahel nimetatakse **faasipingeteks** ja tähistatakse U_f (vt joonis 5.9). Täpsem ja üheselt arusaadavam on tähistus, kui indeksitena kasutatakse vastava faasimähise algust ja lõppu tähistavat tähte. Näiteks U_{AX} või U_{AN} . Tähtlülituse tingmärk on ⅄ või Y.

Kui potentsiaalilangud generaatori mähistes puuduvad (tühijooksul), siis faasipinged võrduvad vastavate generaatori faaside mähiste sisepingetega.

Generaatori mähiste alguste vahelisi pingeid ehk liinijuhtmete vahelisi pingeid nimetatakse **liinipingeteks** (joonis 5.10) ja tähistatakse U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} või ilma indeksita *U*, sest nad on tavaliselt võrdsed ja sümmeetrilised.

---

* Varem nimetati nulljuhiks ja praegu olukorras, kus täidab ka kaitsejuhi ülesannet, **PEN-juhiks** (inglise keeles **Protection Earth Neutral**).

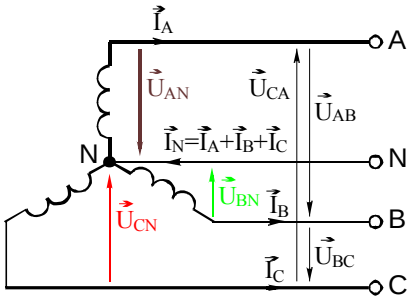


Joonis 5.10. Tähtlülituses generaatori faasi- ja liinipingete vektordiagramm

Neutraaljuhtmes (joonis 5.9b) on igal hetkel vool i_N, mis võrdub erinevate faasivoolude hetkväärtuste summaga. Harilikult on see summa väiksem kui voolud i_A, i_B, i_C liinijuhtmetes, kuna eri faasides kulgevad voolud on üksteise suhtes faasilt nihutatud erinevate nurkade võrra ja seepärast on neil igal hetkel erinev väärtus ja suund. Selle tulemusena tehakse neutraaljuhtme ristlõige sama suur või isegi väiksem kui liinijuhtmetel. Voolu I_N väärtuse võib leida voolude vektorsummast $\vec{I}_N = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ (vt joonis 5.9 ja 5.11).

Liinipinged (joonis 5.11) määratakse vastavate faasipingete vahena

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{BN},\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{CN},\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{AN}.$$



Joonis 5.11. Faasi- ja liinipinged ning voolud tähtlülituses neljajuhtmelise süsteemi korral

Sümmeetrilise süsteemi puhul $U_{AB} = 2U_{AN}\cos 30^\circ = 2U_{AN}\dfrac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}U_{AN}$, seega $U = \sqrt{3}U_f$.

NÄIDE 5.1

Antud: kolmefaasiline generaator tähtlülituses.

Leida: generaatori liinipinged, kui faasipinged on 220 V ja 230 V.

Lahendus

Liinipinge 220 V korral $U_l = \sqrt{3}U_f = \sqrt{3}\cdot 220 = 380$ V.

230 V korral $U_l = \sqrt{3}U_f = \sqrt{3}\cdot 230 = 398{,}4 \approx 400$ V.

Kolmefaasilise sümmeetrilise ahela koormusvool. Sümmeetrilise toitesüsteemi korral on kaovaba generaatori iga faasi sisepinge võrdne generaatori faasi klemmipingega. Sümmeetrilise koormuse korral on võrdsed ka kõikide faaside koormustakistused. Seega on faasivoolud samuti võrdsed ning nende suuruse määrab faasi klemmipinge ja koormustakistuse suhe. Faasi võimsustegur määratakse faasikontuuri aktiiv- ja näivtakistuse suhtega:

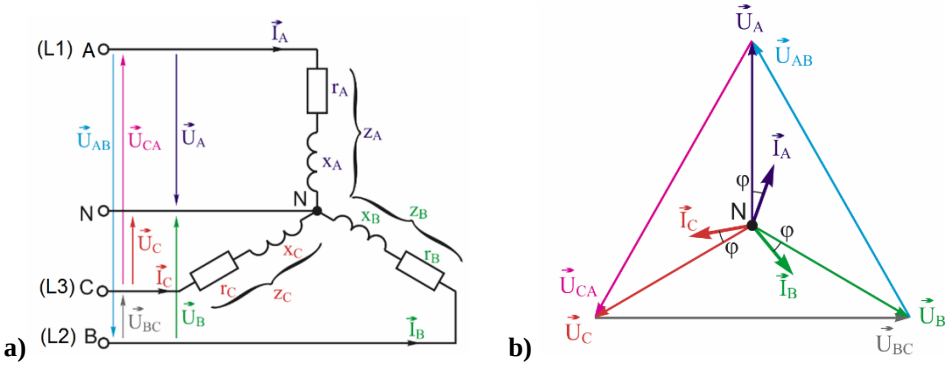
$$I_f = \frac{U_f}{z_f},\quad \cos\varphi = \frac{r_f}{z_f}.$$

Sümmeetrilise süsteemi korral on kolme faasi voolu ja võimsusteguri avaldised järgmised:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A},\ I_B = \frac{U_B}{z_B},\ I_C = \frac{U_C}{z_C};$$

$$\cos\varphi = \frac{r_A}{z_A} = \frac{r_B}{z_B} = \frac{r_C}{z_C}.$$

Joonisel 5.12 on tähistatud faasi- ja liinipinged, koormustakistused ja voolud ning on koostatud aktiiv-induktiivkoormusele vastav vektordiagramm.



Joonis 5.12. Sümmeetriline koormus neutraaljuhtmega tähtlülituses (a) ja vektordiagramm (b)

NÄIDE 5.2

Antud: kolmefaasilise generaatori mähised on tähtlülituses. Iga faasi sisepinge on 230 V. Iga faasi koormuseks on induktiivpool, mille aktiivtakistus on 6 Ω ja induktiivtakistus 8 Ω.

Leida: faasi- ja liinivoolud ning aktiiv-, reaktiiv- ja näivvõimsus, kui tarbijad on lülitatud tähte.

Lahendus

Määrame iga faasi näivtakistuse $z_f = \sqrt{r^2 + x^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\ \Omega$.

Eeldame, et generaator on lõpmata võimas, siis iga faasi sisepinge ja väljundpinge on võrdsed, $U_{fA} = U_f$.

Faasi- ja liinivoolud $I_f = I_l = U_f / z_f = 230/10 = 23$ A.

Iga faasi võimsustegur $\cos\varphi_f = r_f / z_f = 6/10 = 0{,}6$.

Iga faasi aktiivvõimsus $P_f = U_f \cdot I_f \cdot \cos\varphi_f = 230 \cdot 23 \cdot 0{,}6 = 3174$ W.

Kolme faasi võimsus $P = 3P_f = 3 \cdot 3174 = 9522$ W.

ehk $P = \sqrt{3} U_l \cdot I_l \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} \cdot 230 \cdot 23 \cdot 0{,}6 = 9522$ W.

Iga faasi reaktiivvõimsus $Q_f = U_f \cdot I_f \sin\varphi_f = 230 \cdot 23 \cdot 0{,}8 = 4232$ var.

Siin $\sin\varphi = \frac{x}{z} = \frac{8}{10} = 0{,}8$.

Kolme faasi reaktiivvõimsus $Q = 3Q_f = 3 \cdot 4232 = 12696$ var.

Iga faasi näivvõimsus $S_f = U_f I_f = 230 \cdot 23 = 5290$ VA.

Kolme faasi näivvõimsus $S = 3S_f = 3 \cdot 5290 = 15870$ VA ehk

$$S = \sqrt{3} U_l \cdot I_l = \sqrt{3}\sqrt{3} \cdot U_f \cdot I_l = 3 \cdot 230 \cdot 23 = 15870 \text{ VA}.$$

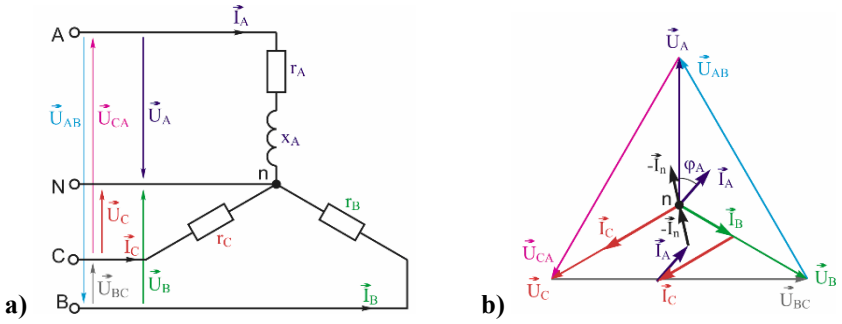
Kolmefaasilise mittesümmeetrilise ahela koormusvool. Kui lähtuda kolmefaasiliste generaatorite sümmeetrilisest kujundusest, on töökorras generaatori faaside sisepinged alati võrdsed ja nihutatud üksteise suhtes 120 kraadi võrra (sümmeetriline toide). See kehtib nii sümmeetrilise kui ka mittesümmeetrilise tarbija korral. Kaovaba generaatori siseliinipinge võrdub ta väljundliinipingega. Liinipingete moodulid on võrdsed.

Seega, $\dot{U}_{AB} = U_l$, $\dot{U}_{BC} = U_l e^{-j120^\circ}$, $\dot{U}_{CA} = U_l e^{-j240^\circ}$.

Kolme faasi aktiiv- ja reaktiivvõimsused määratakse kõikide faaside võimsuste summana ja seejärel määratakse näivvõimsus: $P = \sum P_f$, $Q = \sum \pm Q_f$ ja $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$.

NÄIDE 5.3

Antud: kolm tarbijat näivtakistustega $\dot{Z}_A = 40 + j30$, $\dot{Z}_B = 50$ ja $\dot{Z}_C = 50$ on ühendatud tähtlülitusse (joonis 5.13). Nad on lülitatud sümmeetrilisse kolmefaasilisse võrku liinipingetega $\dot{U}_{AB} = 400e^{j30^\circ}$, $\dot{U}_{BC} = 400e^{-j90^\circ}$ ja $\dot{U}_{CA} = 400e^{j150^\circ}$.



Joonis 5.13. Mittesümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülituses (a) ja vektordiagramm (b)

Leida: faasi- (liini-) voolud I_A, I_B, I_C, vool neutraaljuhtmes I_N ja tarbija võimsus.

Lahendus

Faasipingete avaldised $\dot{U}_A = \frac{\dot{U}_{AB} - \dot{U}_{CA}}{3}, \dot{U}_B = \frac{\dot{U}_{BC} - \dot{U}_{AB}}{3}, \dot{U}_C = \frac{\dot{U}_{CA} - \dot{U}_{BC}}{3}.$

Liinipinged $\dot{U}_{AB} = 346{,}4 + j200,\ \dot{U}_{BC} = -j400,\ \dot{U}_{CA} = -346{,}4 + j200.$

Leiame faasipinged $\dot{U}_A = \frac{1}{3}\left[346{,}4 + j200 - (-346{,}4 + j200)\right] = 230{,}9 + j0 = 230{,}9e^{j0^\circ};$

$$\dot{U}_B = \frac{1}{3}\left[-j400 - (346{,}4 + j200)\right] = -115{,}5 - j200 = 230{,}9e^{-j120^\circ};$$

$$\dot{U}_C = \frac{1}{3}\left[-346{,}4 + j200 - (-j400)\right] = -115{,}5 + j200 = 230{,}9e^{j120^\circ}.$$

Tähtlülituse korral võrdub faasivool liinivooluga. Faasivoolud avalduvad

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\dot{Z}_A} = \frac{230{,}9}{40 + j30} = \frac{230{,}9e^{j0^\circ}}{50e^{j36{,}9^\circ}} = 4{,}62e^{-j36{,}9^\circ} = 3{,}7 - j2{,}77;$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\dot{Z}_B} = \frac{-115{,}5 - j200}{50} = \frac{230{,}9e^{-j120^\circ}}{50e^{j0^\circ}} = 4{,}62e^{-j120^\circ} = -2{,}31 - j4{,}0$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\dot{Z}_C} = \frac{-115{,}5 + j200}{50} = \frac{230{,}9e^{j120^\circ}}{50e^{j0^\circ}} = 4{,}62e^{j120^\circ} = -2{,}31 + j4{,}0.$$

$$I_A = I_B = I_C = 4{,}62 \text{ A}.$$

Vool neutraaljuhtmes

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3{,}7 - j2{,}77 - 2{,}31 - j4{,}0 - 2{,}31 + j4{,}0 = -0{,}92 - j2{,}77 = 2{,}92e^{-j108^\circ} \quad I_n = 2{,}92\text{A}.$$

Faaside kompleksvõimsused

$$\dot{S}_A = \dot{U}_A \overset{*}{I}_A = 230{,}9 \cdot (3{,}7 + j2{,}77) = 854{,}3 + j639{,}6;$$

$$\dot{S}_B = \dot{U}_B \overset{*}{I}_B = (-115{,}5 - j200) \cdot (-2{,}31 - j4{,}0) = 1066{,}8;$$

$$\dot{S}_C = \dot{U}_C \overset{*}{I}_C = (-115{,}5 + j200) \cdot (-2{,}31 + j4.0) = 1066{,}8.$$

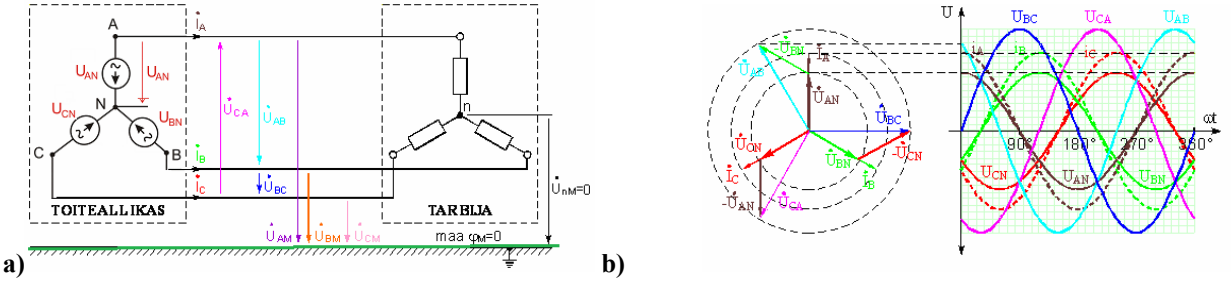
$$P = P_A + P_B + P_C = 854{,}3 + 1066{,}8 + 1066{,}8 = 2987{,}9\ \text{W}.$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = +j639{,}6\,\text{var}.$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2987{,}9^2 + 639{,}6^2} = 3055{,}5VA.$$

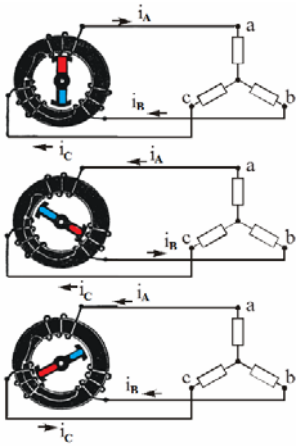
Neutraaljuhtmeta tähtlülitus ehk kolmejuhtmeline süsteem. Kolme faasi ühesuguse ehk nn **sümmeetrilise koormuse** korral, kui kõigis kolmes faasis on ühesugused aktiiv- ja reaktiivtakistused ($R_1 = R_2 = R_3$; $X_1 = X_2 = X_3$), on faasivoolud võrdsed ja vastavatest faasipingetest nihutatud võrdsete nurkade võrra. Seejuures võrdub vool neutraaljuhtmes nulliga.

On ilmne, et sel juhtumil võib neutraaljuhtme eemaldada ja kasutada kolmejuhtmelist skeemi elektrienergia edastamiseks. Saame nn neutraaljuhtmeta tähtlülituse skeemi (joonis 5.14).



Joonis 5.14. Sümmeetrilise koormuse korral võib tähtlülituse teha ilma neutraaljuhtmeta (a). Vektordiagramm ja voolude ning pingete hetkväärtuste kõverad

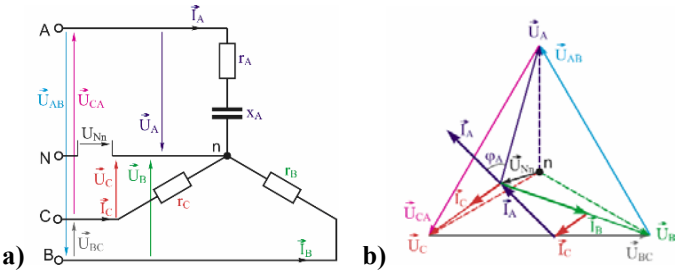
Neutraaljuhtmeta tähtlülituse korral kulgeb vool igal hetkel ühes (või kahes) juhtmes generaatorist tarbija poole, aga kahes ülejäänud (või ühes) juhtmes tarbijast generaatori poole (joonis 5.15). Seejuures kulgeb vool generaatorist kord üht, kord teist, kord kolmandat juhet mööda ja iga juhe on ka voolu teeks tagasi generaatorisse.



Joonis 5.15. Kolmefaasilise voolu korral kulgeb igal ajahetkel vool ühes või kahes juhtmes generaatorist tarbija poole, aga teistes juhtmetes (kahes või ühes) tuleb tagasi generaatorisse

Neutraaljuhtmeta tähtlülituse puhul on ühtlase koormuse korral voolud faasides ja liinijuhtmetes võrdsed, s.o $I = I_f$, kus I on liinivool (vool liinijuhtmes) ja I_f – faasivool (tarbija või generaatori faasis). Selle skeemi korral on liinipinge faasipingest $\sqrt{3}$ korda suurem (1,73 korda), s.o $U = \sqrt{3} \cdot U_f = 1{,}73 U_f$. Suurus 1,73, mis võrdub pingete suhtega U/U_f, on võetud nimipingete skaala aluseks vahelduvvoolu korral 230 V – 400 V (127V – 220V – 380V). Selles reas on iga järgmise pinge väärtus eelmisest 1,73 korda suurem.

Mittesümmeetrilise tarbija tähtlülitus, kui neutraaljuhtmes on takistus. Sel juhul (joonis 5.16) tekkib potentsiaalilang generaatori ja tarbija neutraalpunktide vahel ning koormuse faasipinged muutuvad. Vaatleme neutraaljuhtme katkestust (neutraaljuhtme takistus võrdub lõpmatusega).



Joonis 5.16. Ebasümmeetriline tarbija kolmejuhtmelises süsteemis (a) ja vektordiagramm (b)

Neutraalpunktide vaheline pinge ($Y_N = 0$) $\dot{U}_{Nn} = \dfrac{\dot{U}_{AN}\dot{Y}_A + \dot{U}_{BN}\dot{Y}_B + \dot{U}_{CN}\dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C + \dot{Y}_N}$

Liinivoolud

$$\dot{I}_A = \dot{U}'_{An}\dot{Y}_A = (\dot{U}_{AN} - \dot{U}_{Nn})\dot{Y}_A,$$
$$\dot{I}_B = \dot{U}'_{Bn}\dot{Y}_B = (\dot{U}_{BN} - \dot{U}_{Nn})\dot{Y}_B,$$
$$\dot{I}_C = \dot{U}'_{Cn}\dot{Y}_C = (\dot{U}_{CN} - \dot{U}_{Nn})\dot{Y}_C,$$
$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

Neutraaljuhtme olemasolu korral $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$

Neutraaljuhtmeta tähtlülitust võib kasutada vaid faaside võrdse koormuse korral.

Valguskoormuse ühtlane jaotus kõigi kolme faasi vahel pole garanteeritud, sest üksikud lambid lülituvad sisse ja välja individuaalkorras. Erinevate koormuste korral on potentsiaalilang tarbija eri faasidel erinev (neutraalpunkti nihkumise tõttu). Mõnes faasis (väiksema takistusega) potentsiaalilang väheneb, aga teises suureneb, mis pole lubatav. Tuleb märkida, et neutraaljuhtmeta tähtlülitust saab kasutada faaside ühtlase koormuse korral. Tegelikult on see võimalik vaid mootorite puhul, kuna igal kolmefaasilisel mootoril on kolm ühesugust mähist, mis koormavad ühtlaselt kõiki kolme faasi. Ebaühtlase koormuse korral on aga tarbijate eri faaside potentsiaalilangud erinevad.

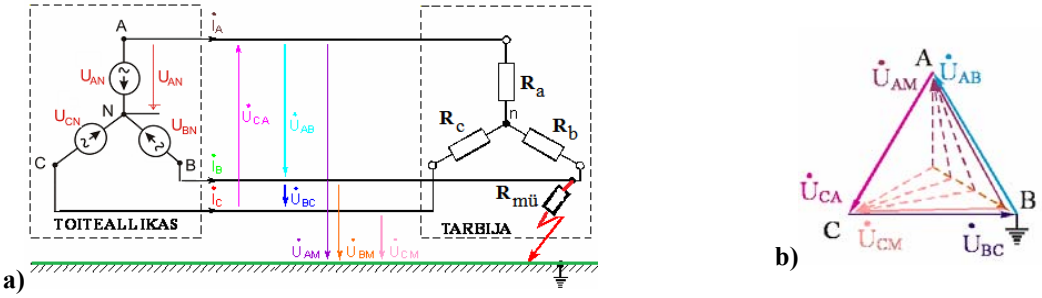
Vool igas liinijuhtmes avaldub teiste vastavate faasivoolude vektorite kaudu.

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_B - \dot{I}_C;\ \dot{I}_B = -\dot{I}_C - \dot{I}_A;\ \dot{I}_C = -\dot{I}_A - \dot{I}_B.$$

Mõne faasi (väiksema takistusega) potentsiaalilang väheneb, aga teistes suureneb, mis pole lubatav. Eriti ohtlik on olukord siis, kui ühes faasis on katkemine või lühis. Ühe faasi katkemisel väheneb potentsiaalide vahe kahes ülejäänud faasis poole liinipingeni, mille tõttu nendesse faasidesse lülitatud lambid põlevad alakoormusega. Ühe faasi maalühise korral suureneb rikketa faasides potentsiaalide vahe 1,73 korda ja kõik nendesse faasidesse lülitatud lambid põlevad läbi. Eespool näidatud põhjustel neutraaljuhtmega tähtlülituse puhul **ei paigutata neutraaljuhtmesse kaitsmeid ega lüliteid, et vältida selle katkemist**. Seega **kindlustab neutraaljuhe** tähtlülituses igasuguse koormuse korral **tarbija faasides potentsiaalilangude** võrdsuse.

Neutraaljuhtmeta tähtlülituse isolatsiooni rike. Pinge kasvu rikketa faasidel ühefaasilise maalühise korral selgitab joonis 5.17. Tegelik pingeerinevus nimipinge väärtusest oleneb rikkekoha takistuse $R_{mü}$ suurusest. Joonisel 5.17b on pingete kolmnurgas kõik faasipinged võrdsed faasi nimipingega, kui $R_{mü} = \infty$, seega kui

rike puudub ja maa ning juhtmevaheline isolatsioon on kahjustamata. Teine äärmusolukord on metallilise maalühise korral, kui $R_{mü} = 0$. Rikketa faasidel kasvab faasipinge liinipinge väärtuseni $U = \sqrt{3} \cdot U_f$, Siis $\dot{U}_{AM} = \dot{U}_{AB}$ ning $\dot{U}_{CM} = -\dot{U}_{BC}$, aga $\dot{U}_{BM} = 0$. Kui rikkekoha takistus $R_{mü} \neq 0$ ja lõpmatusega ning on vahepealne suurus, siis rikketa faasidel faasipinge kasvab, joonisel 5.17b on punktiiriga näidatud vahepealsed väärtused..



Joonis 5.17. Ühefaasilise maalühise korral, näiteks faasi *B* isolatsiooni rikke tõttu (a), tekkib liinijuhil *B* maapotentsiaal, mistõttu faasipinged U_{AM} ja U_{CM} suurenevad liinipinge väärtuseni (b)

NÄIDE 5.4

Antud: kolm hõõglampi on lülitatud tähtlülituses kolmefaasilisse toitevõrku (joonis 5.18). Tavatalitluse korral on iga lambile rakendatud pinge 230 V.

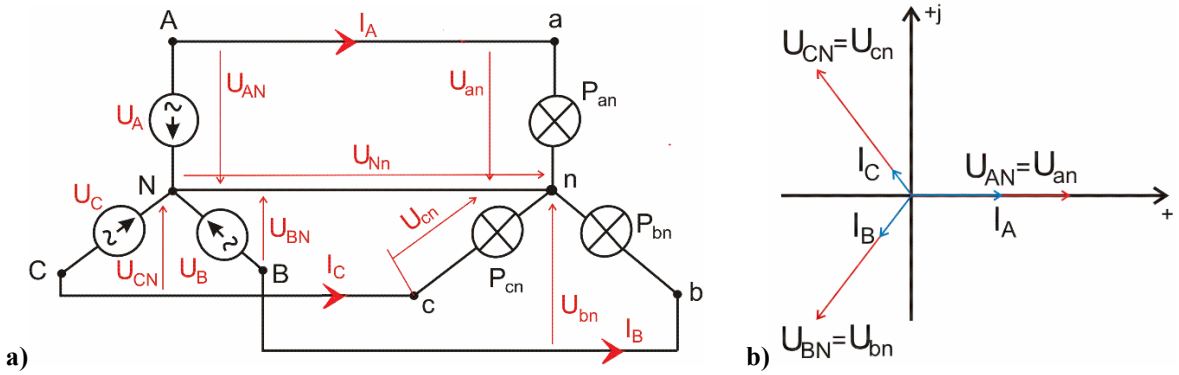
Leida: iga lambi klemmipinge ja voolud viie erineva arvutusvariandi korral. Olgu skeemil esitatud lampide võimsused $P_{an} = 100$ W, $P_{bn} = 60$ W ja $P_{cn} = 20$ W.

Lahendus

Leiame lampide takistused:

$$r_{an} = z_{an} = \frac{U^2}{P_{an}} = \frac{230^2}{100} = 529\,\Omega,\ r_{bn} = z_{bn} = \frac{U^2}{P_{bn}} = \frac{230^2}{60} = 882\,\Omega \text{ ja } r_{cn} = z_{cn} = \frac{U^2}{P_{cn}} = \frac{230^2}{20} = 2645\,\Omega.$$

I variant. Neutraaljuhe Nn on ideaalne juht $Z_{Nn} = 0$



Joonis 5.18. Ebasümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülituses (a) ja vektordiagramm (b)

$\dot{Z}_{Nn} = 0 \Rightarrow \dot{U}_{Nn} = 0$ V. Leiame allika komplekspinged: $\dot{U}_A = 230\angle 0° = 230$ V,

$\dot{U}_B = 230\angle -120° = -115 - j199{,}2$ V ja $\dot{U}_C = 230\angle 120° = -115 + j199{,}19$ V.

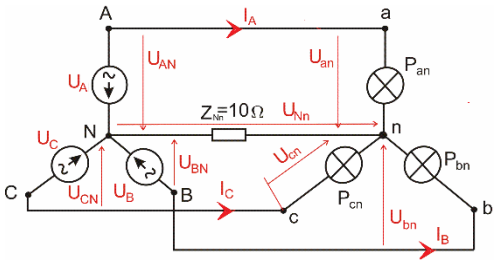
Kui ideaalsel allikal puudub sisetarbimine (-takistus), siis faasi sisepinge võrdub faasipingega (väljundpingega). Määrame faasivoolud, mis mainitud lülituse korral on võrdsed liinivooludega (üks ja sama vool):

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\dot{Z}_{an}} = \frac{230}{529} = 0{,}435 = 0{,}435\angle 0° \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{bn}}{\dot{Z}_{bn}} = \frac{-115 - j199{,}2}{882} = -0{,}130 - j0{,}226 = 0{,}261\angle -120° \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{-115 + j199{,}2}{2645} = -0.043 + j0{,}075 = 0{,}087\angle 120° \text{ A}.$$

II variant. **Neutraaljuhe *Nn* pole ideaalne ja juhtme takistus Z_{Nn} = 10 Ω** (joonis 5.19). Muud lähteandmed on samad, mis I variandi korral.



Joonis 5.19. Ebasümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülituses, kui Z_{Nn} = 10Ω

Lahendus

Potentsiaalilang neutraaljuhil

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A\dot{Y}_{an} + \dot{U}_B\dot{Y}_{bn} + \dot{U}_C\dot{Y}_{cn}}{\dot{Y}_{an} + \dot{Y}_{bn} + \dot{Y}_{cn} + \dot{Y}_{Nn}} = \frac{230 \cdot 0{,}0019 + (-115 - j199{,}2) \cdot 0{,}0011 + (-115 + j199{,}2) \cdot 0{,}0004}{0{,}0019 + 0{,}0011 + 0{,}0004 + 0{,}1} =$$

$$= \frac{0{,}261 - j0{,}151}{0{,}103} = 2{,}52 - j1{,}46 \text{ V}$$

Määrame juhtivused: $\dot{Y}_{an} = \frac{1}{\dot{Z}_{an}} = \frac{1}{529} = 0{,}0019\,\text{S}$, $\dot{Y}_{bn} = \frac{1}{\dot{Z}_{bn}} = \frac{1}{882} = 0{,}0011\,\text{S}$,

$$\dot{Y}_{cn} = \frac{1}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{1}{2645} = 0{,}0004\,\text{S}, \quad \dot{Y}_{Nn} = \frac{1}{\dot{Z}_{Nn}} = \frac{1}{10} = 0{,}1\,\text{S}.$$

Tarbija potentsiaalilangud

$$\dot{U}_{an} = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 230 - 2{,}52 + j1{,}46 = 227{,}5 + j1{,}46 = 227\angle 0°V;$$

$$\dot{U}_{bn} = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = -115 - j199{,}2 - 2{,}52 + j1{,}46 = -117{,}5 - j197{,}8 = 230\angle -121°V;$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = -115 + j199{,}2 - 2{,}52 + j1{,}46 = -117{,}5 + j200{,}6 = 232\angle 120°V.$$

Faasivoolud $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\dot{Z}_{an}} = \frac{227}{529} = 0{,}43\angle 0° \text{ A},$

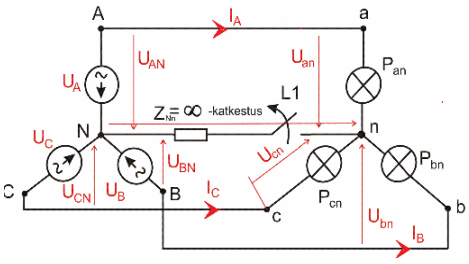
$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{bn}}{\dot{Z}_{bn}} = \frac{-117{,}6 - j197{,}8}{882} = -0{,}133 - j0{,}224 = 0{,}261\angle -121° \text{ A},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{-117{,}5 + j200{,}6}{2645} = -0{,}044 + j0{,}076 = 0{,}088\angle 120° \text{ A}.$$

III variant. **Neutraaljuhe *Nn* on katkenud.**

Joonisel 5.20 oleval skeemil on neutraaljuhi katkemist kujutatud lüliti L1 väljalülitamisega. Enne väljalülitamist oli Z_{Nn} = 0, seejärel $Z_{Nn} \approx \infty$. (Tavaliselt on keelatud paigaldada neutraaljuhtmesse lüliteid ja sulavkaitsmeid). Allikaväljundpinged ei muutu ja on võrdsed vastavate allikasisepingete väärtustega

$\dot{U}_{AN} = 230V$ ja $\dot{U}_{CN} = -115 + j199{,}2 = 230\angle 120°$. Y_n on võrdne 0-ga, kuna *Nn* ahel katkestatakse, järelikult takistus on lõpmata suur ning ahela juhtivus on võrdne nulliga.



Joonis 5.20. Ebasümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülituses, kui neutraaljuhe *Nn* on katkenud

Lahendus

Leiame neutraali nihkepinge

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{U}_A\dot{Y}_{an} + \dot{U}_B\dot{Y}_{bn} + \dot{U}_C\dot{Y}_{cn}}{\dot{Y}_{an} + \dot{Y}_{bn} + \dot{Y}_{cn} + \dot{Y}_{Nn}} = \frac{230 \cdot 0{,}0019 + (-115 - j199{,}2) \cdot 0{,}0011 + (-155 + j199{,}2) \cdot 0{,}0004}{0{,}0019 + 0{,}0011 + 0{,}0004 + 0} =$$

$$= \frac{0{,}261 - j0{,}151}{0{,}0034} = 76{,}7 - j44{,}3 = 88{,}5\angle -30°.$$

Faasipinged $\dot{U}_{an} = \dot{U}_A - \dot{U}_{Nn} = 230 - 77{,}79 + j41 = 152{,}21 + j41 = 158\angle 15°$ V,

$$\dot{U}_{bn} = \dot{U}_B - \dot{U}_{Nn} = -115 - j199{,}2 - 77{,}79 + j41 = -192{,}79 - j158{,}2 = 249\angle -141°\text{ V},$$

$$\dot{U}_{cn} = \dot{U}_C - \dot{U}_{Nn} = -115 + j199{,}2 - 76{,}7 - j44{,}3 = -191{,}7 + j243{,}5 = 309{,}8\angle 128{,}2°\text{ V}.$$

Faasi- ehk liinivoolud $\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\dot{Z}_{an}} = \frac{153{,}3 + j44{,}3}{529} = 0{,}29 + j0{,}084 = 0{,}30\angle 16°$ A,

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{bn}}{\dot{Z}_{bn}} = \frac{-191{,}7 - j154{,}9}{882} = -0{,}217 - j0{,}176 = 0{,}28\angle -141°\text{ A},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{-191{,}7 + j243{,}5}{2645} = -0{,}072 + j0{,}092 = 0{,}12\angle 128°\text{ A}.$$

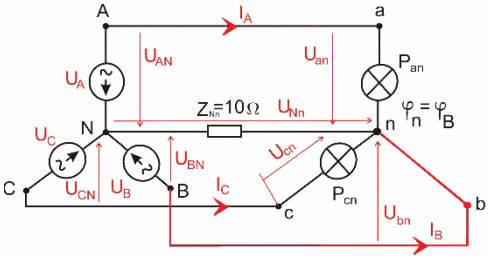
IV variant. Neutraaljuhtme *Nn* takistus on $Z_{Nn} = 10\ \Omega$ ja faasis *bn* on lühis.

Lahendus

Kuna tarbija faasis *bn* on lühis, siis saame (joonis 5.21) neutraali nihkepingeks *BN* faasi allikapinge

$\dot{U}_{Nn} = \dot{U}_{BN} = 230\angle -120°$V ja $\dot{U}_{AN} = 400\angle 30°$V ja $\dot{U}_{CN} = 400\angle 90°$V.

Määrame faasi- ehk liinivoolud.



Joonis 5.21. Ebasümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülituses, kui faasis *bn* on lühis

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\dot{Z}_{an}} = \frac{400\angle 30°}{529} = 0{,}756\angle 30°\text{ A},$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{400\angle 90°}{2645} = 0{,}151\angle 90° \text{ A},$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{bn}}{\dot{Z}_{Nn}} = \frac{230\angle -120°}{10} = 23\angle -120° \text{A}.$$

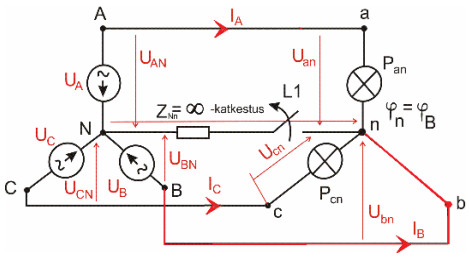
V variant. Neutraaljuhe *Nn* on katkenud ja faasis *bn* on lühis.

Lahendus

Kuna tarbija faasis *bn* on lühis, siis saame (joonis 5.22) neutraali nihkepingeks *BN* faasi allikapinge $\dot{U}_{Nn} = \dot{U}_{BN} = \dot{U}_{bn} = 0$ V ja $\dot{U}_{an} = 400\angle 30°$ V ja $\dot{U}_{cn} = 400\angle 90°$ V.

Määrame tarbija faasivoolud

$$\dot{I}_{an} = \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{an}}{\dot{Z}_{an}} = \frac{400\angle 30°}{529} = 0{,}756\angle 30° \text{ A}, \quad \dot{I}_{cn} = \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{cn}}{\dot{Z}_{cn}} = \frac{400\angle 90°}{2645} = 0{,}151\angle 90° \text{ A}.$$



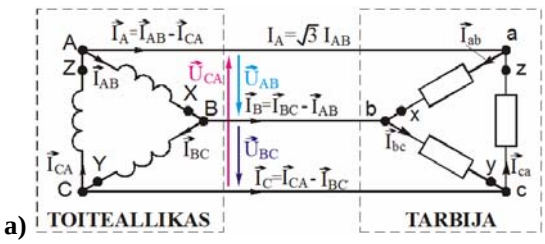
Joonis 5.22. Ebasümmeetriline tarbija neljajuhtmelises tähtlülitu-ses, kui faasis *bn* on lühis

Kirchhoffi vooluseadusest saame $\dot{I}_{an} + \dot{I}_{bn} + \dot{I}_{cn} = 0 \Rightarrow \dot{I}_{bn} = -\dot{I}_{cn} - \dot{I}_{an}$.

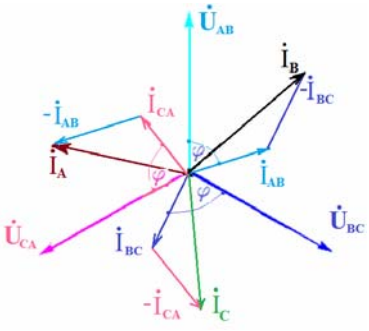
$$\dot{I}_{bn} = -0{,}655 - j0{,}378 - 0 - j0{,}151 = -0{,}655 - j0{,}529 = 0{,}842\angle -141° \text{ A}.$$

5.4. Kolmnurklülitus

Kolmnurklülituse skeem. Kolmefaasilise generaatori mähiste ühendamisel kolmnurka (joonis 5.23) ühendatakse esimese mähise lõpp *X* teise mähise algusega *B*, teise mähise lõpp *Y* ühendatakse kolmanda mähise algusega *C* ja kolmanda mähise lõpp *Z* – esimese algusega *A*. Tarbijatele (tarvititele) minevad kolm liinijuhet ühendatakse faaside algustega *A*, *B*, *C*. Kolmnurklülituse tingmärk on Δ.



a)



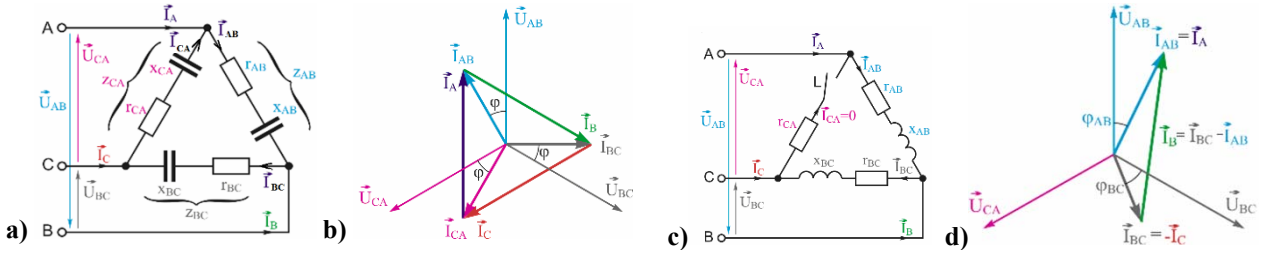
b)

Joonis 5.23. Kolmnurklülituse korral ühendatakse generaatoris ja tarbijas esimese faasi lõpp teise faasi algusega, teise lõpp kolmanda algusega ja kolmanda lõpp esimese algusega. Liinijuhtmed ühendavad omavahel generaatori ja tarbija faaside algusi (a). Vektordiagramm sümmeetrilise koormuse korral (b)

Kolmnurgas on kõikide faaside sisepinged võrdsed ja on kolmnurga sees samasuunalised. Seetõttu toimib kolmnurgas faasi sisepingete algebraline summa. Kuid $u_A + u_B + u_C = 0$ ja ühtlustusvoolu kolmnurgas ei teki.

Siiski kasutatakse generaatoritel kolmnurklülitust haruharva, sest juhul kui allikasisepinge ei ole ideaalne siinus, vaid sisaldab ka harmoonilisi, siis sisepingete summa pole null ja tekib tasandusvool.

Joonistel 5.24 on koormuse kolmnurklülitus sümmeetrilise (a ja b) ning mittesümmeetrilise (c ja d) koormuse korral. Täpselt samuti võib ühendada ka eri tarbijaid. Seejuures ühendatakse iga tarbija faas kahe generaatorist tuleva liinijuhtme vahele, s.o lülitatakse liinipingele, mis samaaegselt osutub ka tarbija faasipingeks ($U_{AB} = U_{AX}$).



Joonis 5.24. Sümmeetriline koormus kolmnurklülituses (a) ja vektordiagramm (b). Faasi katkemine (c) ja sellele vastav vektordiagramm (d)

Seega on kolmnurklülituse korral faasipinge U_f võrdne liinipingega U ega sõltu tarbija faasitakistustest, s.o

$$U_f = U.$$

Liinivool on kolmnurklülituse korral alati suurem liinijuhtmete vahele ühendatud tarbijate faasivooludest (joonis 5.24b). Ühtlasel (sümmeetrilisel) koormusel on liinivool $\sqrt{3}$ korda (1,73 korda) faasivoolust suurem

$$I = \sqrt{3} I_f = 1{,}73 I_f .$$

Vektordiagrammi koostamisel võib baasvektoriteks lugeda kolme liinipinget $\dot{U}_{AB}$; $\dot{U}_{BC}$ ja $\dot{U}_{CA}$ (joonis 5.24b). Vektoritevahelised nurgad on 120º. Tarbija faasivoolude vektorid $\dot{I}_{ab}$, $\dot{I}_{bc}$ ja $\dot{I}_{ca}$ on sümmeetrilisel koormusel vastavate pingevektorite suhtes nihutatud nurga φ võrra. Nurga φ väärtus oleneb tarbija reaktiiv- ja aktiivtakistuse suhtest. Selleks et leida vastavalt liini- ja faasivoolude seosele *A* liinivoolu vektor $\dot{I}_A$, võib vektorile $\dot{I}_{ab}$ liita vektori $(-\dot{I}_{ca})$, s.o vektori, mis suuruselt on võrdne vektoriga $\dot{I}_{ca}$, kuid suunalt vastupidine. Sarnaselt leitakse kaks ülejäänud vektorit.

Kui koormus on sümmeetriline, siis on faasivoolud võrdsed $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca}$ nii koormusel kui ka generaatoril $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA} = I_f$, omavahel on võrdsed ka liinivoolud $I_A = I_B = I_C = I_l$.

Vektordiagrammil moodustavad joonisel 5.24b faasi- ja liinivoolude vektorid kolm võrdhaarset kolmnurka teravnurkadega 30º. Kui tõmmata ühe kolmnurga nürinurga tipust vastasküljele ristsirge, saame

$$I_f \cos 30° = \frac{1}{2} I_l \text{ ehk } I_l = \sqrt{3} I_f .$$

Sümmeetrilisel koormusel on kolmnurklülituses liinivoolud $\sqrt{3}$ korda suuremad faasivooludest, liinipinged aga on samaaegselt ka faasipingeteks.

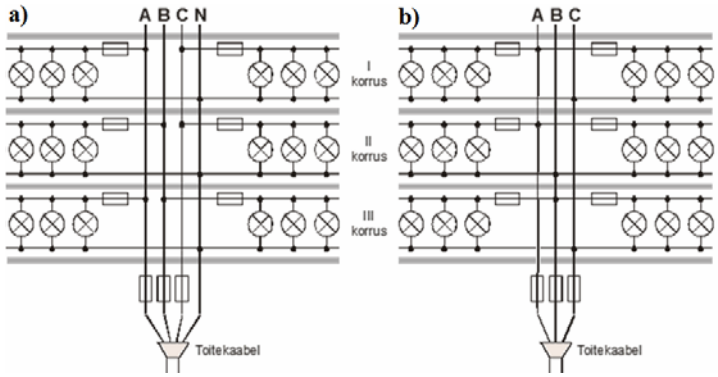
Kolmnurklülituse eeliseks on faasivoolude vastastikune sõltumatus neutraaljuhtme puudumisel.

Tuleb märkida, et vahelduvvooluallikate (kolmefaasiliste generaatorite ja transformaatorite) ühendamisel kolmnurka on väga tähtis õigesti ühendada nende faasimähiste algused ja lõpud, sest allika kolm faasi moodustavad suletud kontuuri, millel on väga väike takistus. Niisugune ühendamine on võimalik juhul, kui selles kontuuris mõjuvate sisepingete hetkväärtuste summa võrdub nulliga.

Kui näiteks generaatori esimese faasi lõpp ühendada mitte teise faasi algusega *B*, vaid selle lõpuga, siis esimeses ja teises faasis indutseeritud sisepinged lahutuvad (aga ei liitu) ning kolmnurga suletud kontuuris tekib vool, mis on lühisvool.

Kolmnurklülituse korral jäävad eri faaside koormuse muutumisel pinged erinevalt neutraaljuhtmeta tähtlülitusest kõikides faasides muutumatuks (pinged võivad vaid mõningal määral väheneda potentsiaalilangude tõttu ülekandeliini juhtmetes ja generaatoris).

Elektrilampide ja kolmefaasiliste elektrimootorite lülitusskeemid. Elumajades ja tootmisettevõtetes kasutatakse elektrilampide toiteks kolmefaasilist voolu, kuigi esmapilgul paistab, et sel eesmärgil kasutatakse ühefaasilist voolu, sest lampide toiteks tuleb vaid kaks juhet. Joonisel 5.25a on elumaja valgustusvõrgu skeemid lampide ühendamisel neutraaljuhtmega tähtlülituse järgi.



Joonis 5.25. Kodune valgustuskoormus ühendatakse kolmefaasilise elektrivõrgu juhtmetega neutraaljuhtmega tähtlülituse järgi ja jaotatakse faaside vahel võrdselt (a). Kolmnurklülituse (b) korral püütakse koormuste rühmitamisega tagada liinijuhtmetele võrdset koormust

Valgustuse toite eripära täht- ja kolmnurklülitusel. Kui võrrelda täht- (Y) ja kolmnurklülitust Δ, siis valgustuskoormusega tähtlülituse korral on neutraaljuhtme kasutamine hädavajalik, sest reeglina pole võimalik tagada ilma neutraaljuhita süsteemile vajalikku faasikoormuste võrdsust (joonis 5.25a). Vastasel juhul tekib nn neutraalpunkti nihe, mistõttu ühel valgustirühmal muutub toitepinge vajaliku nimipingega võrreldes väiksemaks, teistel suuremaks.

Nii juhtub siis, kui neutraaljuhe katkeb või selle katkestab sulavkaitse või kaitselüliti. Seetõttu ei tohi neutraaljuhe sisaldada kaitseelemente.

Kolmnurklülitus. Selle lülitusviisi eeliseks on, et faasivoolud ei olene neutraaljuhtme olemasolust (joonis 5.25b). Eripära on selles, et kui maja sisendis põleb läbi üks kaitse magistraalliinil (näiteks liinis *A*), siis kahe faasi *AB* ja *CA* valgustid lülituvad jadamisi, mistõttu võrdse koormuse korral nende toitepinge väheneb poole liinipinge väärtuseni. Faasis *BC* säilib toitepinge liinipinge väärtuse tasemel.

Elektrikaabli majja sisseviigu vahetusse lähedusse paigutatakse magistraali kõikidesse faasidesse üldkaitsmed (kaitselülitid), mis kaitsevad linnavõrku majajuhtmete lühise eest.

Lampide ühendamisel neutraaljuhtmega tähtlülituse skeemi järgi (joonis 5.25) ühendatakse igasse korterisse minevad haruliinid ühe otsaga liinijuhtme ja teisega neutraaljuhtme külge. Neutraaljuhtmesse kaitset ei panda. Ühtede ja samade tarbijate kahesugune lülitamisvõimalus – tähte või kolmnurka – laiendab nende kasutusvõimalusi. Kui näiteks kolmefaasilise elektrimootori mähis on arvestatud faasipingele 230 V, siis mähiste kolmnurklülituse puhul võib selle elektrimootori lülitada võrku liinipingega 230 V, mähiste tähtlülituse korral aga võrku liinipingega 230·1,73 = 398 V.

5.5. Kolmefaasilise voolu võimsus

Kolmefaasilise süsteemi ühtlasel koormusel on kõikide faaside aktiivvõimsused võrdsed ja seepärast kogu süsteemi aktiivvõimsus on

$$P = 3\,U_f I_f \cos\varphi,$$

kus U_f on faasipinge, V; I_f – faasivool, A; cos φ – võimsustegur (φ on faasinihke nurk faasipinge ja -voolu vahel).

Reaktiivvõimsus avaldub sarnaselt, s.o $Q = 3\,U_f I_f \sin\varphi$.

Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse võib avaldada ka liinivoolu ja liinipinge kaudu, siis

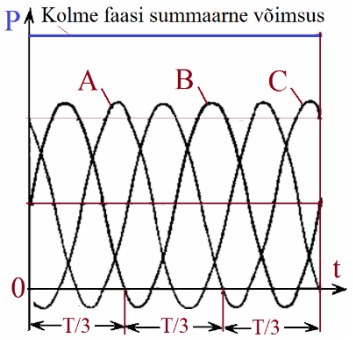
$$P = \sqrt{3}UI\cos\varphi = 1{,}73UI\cos\varphi\,,$$

$$Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi = 1{,}73UI\sin\varphi\,,$$

kus φ on faasipinge ja -voolu vaheline nihkenurk.

Näivvõimsus ühtlasel koormusel $S = \sqrt{3}UI = 1{,}73UI$.

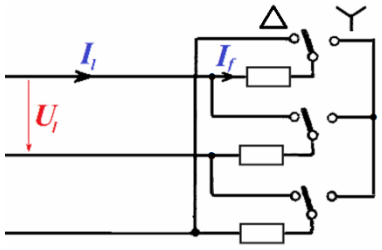
Kolmefaasilise voolu eelis on, et ühtlasel koormusel **ei pulseeri kolmefaasilise süsteemi võimsus kahekordse sagedusega, nagu ühefaasilise voolu korral, vaid on ajas muutumatu** (joonis 5.26). Sellega on kindlustatud kolmefaasiliste generaatorite võimsuse parem ärakasutamine ja kolmefaasiliste mootorite pöördemomendi konstantsus (mitte pulseeriv, nagu on ühefaasilistel mootoritel).



Joonis 5.26. Kolmefaasilise süsteemi kõigi kolme faasi summaarne võimsus ühtlasel koormusel ei olene ajast

Ümberlülitamine tähest kolmnurka. Kolmefaasilise tarbija ühendamise viis ei olene kolmefaasilise generaatori faasimähiste lülitusviisist. Sageli kasutatakse tarbija faaside ümberlülitamise võimalust täht-lülitusest kolmnurklülitusse voolutugevuse või võimsuse muutmiseks, näiteks kolmefaasiliste mootorite käivitamisel käivitusvoolu vähendamise eesmärgil või kolmefaasiliste elektriahjude võimsuse (temperatuuri) muutmiseks jne.

Vaatame, kuidas muutuvad sümmeetrilise tarbija voolud üleminekul tähtlülitusest kolmnurklülitusse. Olgu tarbija faasi takistus Z_f konstantne. Vaadeldav ümberlülitus on teostatav lihtsa kolmepooluselise ümberlülitiga (joonis 5.27).



Joonis 5.27. Tähtlülituse ümberühendamine kolmnurklülitusse

Tähtlülituses on faasivool I_{fY} võrdne liinivooluga I_{lY}. Ohmi seaduse põhjal $I_{lY} = I_{fY} = \dfrac{U_{fY}}{Z_f}$,

kuid tähtlülituses $U_{fY} = \dfrac{U_l}{\sqrt{3}}$ ning siis $I_{lY} = \dfrac{U_l}{\sqrt{3}Z_f}$.

Ohmi seaduse põhjal kolmnurklülituses $I_{f\Delta} = \dfrac{U_l}{Z_f}$, kuid liinivool $I_{l\Delta} = \sqrt{3}I_{f\Delta} = \dfrac{\sqrt{3}U_l}{Z_f}$.

Kõrvutades liinivoolude seosed täht- ja kolmnurklülituste puhul, saame: $I_{l\Delta} = 3\ I_{lY}$,

kuid faasivoolude jaoks $I_{f\Delta} = \sqrt{3} I_{fY}$.

Kolmefaasilise süsteemi võimsus $P = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi$

ja järelikult **ümberlülitamisel kolmnurklülitusest tähtlülitusse väheneb võimsus kolm korda**.

Laialt levinud kolmefaasilise mootori käivitusvool on normaalsest töövoolust umbes kuus korda suurem. Kui niisugune mootor peab tavatalitluses töötama kolmnurklülituses, siis võib selle mähised lülitada käivitamise ajaks tähtlülitusse. Selliselt väheneb käivitusvool kolm korda, st käivitusvool on normaalsest töövoolust vaid lühiajaliselt kaks korda suurem.

Liini- ja faasisuuruste vahekorrad kolmefaasilise süsteemi kahe lülitusviisi jaoks on koondatud tabelisse 5.1.

Tabel 5.1

Faasi- ja liinisuuruste vahekorrad täht- ja kolmnurklülitusel

Lülitusskeem	Y	$U_l = \sqrt{3} U_f$	$I_l = I_f$
	Δ	$U_l = U_f$	$I_l = \sqrt{3} I_f$

Vaatleme nüüd vajalikke tingimusi selleks, et saada samasugust faasivõimsust

$$P_f = U_f I_f \cos\varphi$$

täht- ja kolmnurklülitusel samasuguse liinipinge juures.

Tähtlülitusel on faasipinge $\sqrt{3}$ korda väiksem kui kolmnurklülitusel, järelikult selleks, et saada samasugust võimsust tähtlülitusel, peaks vool olema $\sqrt{3}$ korda suurem.

Väljendame faasivõimsuse faasi aktiivtakistuse kaudu: $P_f = I_f^2 R_f$.

Kuna mõlema lülitusviisi juures peab võimsus olema üks ja seesama, siis $I_f^2 R_{fY} = I_{f\Delta}^2 R_{f\Delta}$

ja et $I_{fY} = \sqrt{3} I_{f\Delta}$, saame järelikult $R_{fY} = \frac{R_{f\Delta}}{3}$.

Eeldame, et $R_f = \rho \frac{l}{S}$ on juhtme aktiivtakistus. Sellest juhtmest on mähitud elektrienergia tarbija mähis. Tähtlülituse korral peab juhtme ristlõige *S* olema umbes $\sqrt{3}$ korda suurem, et lasta läbi $\sqrt{3}$ korda suuremat voolu; juhtme pikkus *l* peab aga olema $\sqrt{3}$ korda väiksem. Seega on mähiseks vajaliku juhtme mass ühesuurune mõlema lülitusviisi puhul. Seejuures on tähtlülituseks vajalik juhe jämedam ja lühem. Selline juhe on odavam ja mehaaniliselt tugevam.

Lisaks sellele peab tähtlülitusel tarbija faasi isolatsioon olema arvutatud liinipingest $\sqrt{3}$ korda väiksemale pingele, kolmnurklülitusel aga liinipingele.

Seega on otstarbekohasem arvutada kolmefaasiline seade tavatööks tähtlülituses. Mõnikord aga võib eri nõuetest lähtudes osutuda vajalikuks kasutada kolmnurklülitust.

5.6. Kordamisküsimused

1. Mis on kolmefaasiline vahelduvvool ja miks teda nii nimetatakse?
2. Mille poolest erineb kolmefaasiline generaator ühefaasilisest?
3. Kuidas ühendatakse kolmefaasilise generaatori mähised ja tarbijad skeemi „neutraaljuhtmega tähtlülitus“ korral?
4. Missugustel tingimustel võib tarbijad ühendada skeemi „neutraaljuhtmeta tähtlülitus“ järgi?
5. Faasi mõiste. Mida nimetatakse liinipingeteks ja faasipingeteks?
6. Faasi mõiste. Mida nimetatakse liinivooludeks ja faasivooludeks?
7. Missugune seos on liini- ja faasipingete ning liini- ja faasivoolude vahel skeemis „neutraaljuhtmeta tähtlülitus“ faaside ühtlase koormuse korral?
8. Kuidas ühendatakse kolmefaasilise generaatori mähised ja tarbijad skeemi „kolmnurklülitus“ korral?
9. Missugune seos on liini- ja faasipingete ning liini- ja faasivoolude vahel skeemis „kolmnurklülitus“ faaside ühtlase koormuse korral?
10. Kuidas võib ühendada kolmefaasilisse võrku hõõglambid ja kolmefaasilised elektrimootorid?
11. Kuidas leitakse kolmefaasilise voolu võimsus?

6. MÕÕTMISMEETODID JA ANDURID

6.1. Põhimõisted
6.2. Mõõtevead
6.3. Voolu mõõtmine
6.4. Pinge mõõtmine
6.5. Uudsed mõõtetrafod
6.6. Takistuse mõõtmine
6.7. Võimsuse mõõtmine
6.8. Elektrienergia ja elektrikvaliteedi mõõtmine
6.9. Kompensatsioonimeetod
6.10. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine
6.11. Mitteelektriliste suuruste tajurite iseloomustus
6.12. Mitteelektriliste suuruste elektrimõõtmiste näited
6.13. Kordamisküsimused

6.1. Põhimõisted

Hinnangu erisuguste uuritavate objektide omadustele saab anda neid omadusi iseloomustavate füüsikaliste suuruste mõõtmise teel.

Mõõtmiseks nimetatakse mõõdetava suuruse võrdlemist ühikuks võetud sama liiki suurusega. Mõõtmistulemus väljendub mõõdetava suuruse arvväärtusena A_x, mis näitab mõõdetava suuruse X ja mõõtühiku X_e suhet. Teiste sõnadega, arvväärtus näitab, mitu korda mõõdetav suurus on mõõtühikust väiksem või suurem. Seega võib mõõtmist kirjeldada järgmiselt: $A_x = X / X_e$, millest

$$X = A_x X_e. \tag{6.1}$$

Avaldis (6.1) on mõõtmise põhivõrrand.

Mõõtühiku, tema murdosa või kordväärtuse esemelist kuju nimetatakse **mõõduks.**

Mõõdetava suuruse võrdlemiseks mõõtühiku või mõõduga määratud seadist nimetatakse **mõõteriistaks.**

Seega peame mõõtmisprotsessis eristama kolme elementi:

- mõõtmisobjekt – mõõdetav suurus;
- mõõtmismeetod – mõõdetava suuruse valitud ühikuga võrdlemise moodus;
- mõõteaparatuur – mõõtmise korraldamiseks mõeldud tehniliste vahendite kogum (mõõdud, mõõteriistad).

Mõõta võib mitmeti, olenevalt mõõdetava suuruse laadist ja mõõtmise võtetest. Mõõtmised jagunevad otsesteks ja kaudseteks.

Otsesel mõõtmisel võrreldakse mõõdetavat suurust vahetult sama liiki suurusega. Selleks kasutatakse põhiliselt vastavalt gradueeritud mõõteriistu ja mõõtmise tulemus saadakse tavaliselt ühe mõõtmisega. Siia kuuluvad vahetu hindamise ja võrdlusmeetod.

Vahetu hindamise meetodi puhul loetakse mõõdetava suuruse väärtus vahetult selle suuruse mõõtühikuis gradueeritud mõõteriista skaalalt (näiteks pinge mõõtmine voltmeetriga, takistuse mõõtmine oommeetriga jne). Meetod on väga laialt levinud mõõtmise lihtsuse ja kiiruse tõttu, ehkki saavutatav mõõtmistäpsus pole eriti suur. Mõõtmistäpsust piirab mõõteriistade endi täpsus, mistõttu mõõteviga võib olla kuni 15%.

Võrdlusmeetodi puhul määratakse mõõdetava suuruse väärtus selle suuruse mõõduga vahetu võrdlemise teel (näiteks pinge mõõtmine tema võrdlemise kaudu normelemendi allikasisepingega). Võrdlusmeetod annab täpse tulemuse, kuid kasutatav mõõteaparatuur on keerukam. Ka mõõtmine ise kujuneb tülikamaks.

Kaudsel mõõtmisel ei mõõdeta otsitavat suurust vahetult, vaid arvutatakse teiste suuruste mõõtmise ja mõõdetud ning otsitava suuruse vahelise tuntud seose põhjal. Näiteks saab sel teel leida materjali

eritakistuse. Nagu teada, on juhi takistus R seotud tema pikkuse l ja ristlõikega s järgmiselt: $R = \rho\frac{l}{s}$, kus ρ on juhi materjali eritakistus. Mõõtnud juhi takistuse R, pikkuse l ja ristlõike s, arvutame eritakistuse ρ.

6.2. Mõõtevead

Kui täpselt ja hoolikalt ka püütakse mingit suurust mõõta, pole kunagi võimalik saada selle täpset väärtust. Tulemus jääb alati ligikaudseks. Põhjusi on palju: mõõteriistade ebatäpsus, mõõtmismeetodite ebatäiuslikkus, kogemuste vajakajäämine, meeleelundite puudulikkus, vaatlustingimuste muutumine. Tuleb arvestada ka mitmesuguste juhuslike tegurite mõju mõõtmistulemustele. Seetõttu peame mõõtmisel alati määrama nii mõõdetud suuruse arvulise väärtuse kui ka selle täpsuse.

Absoluutseks mõõteveaks ΔX nimetatakse vahet mõõtmistulemuse X ja mõõdetava suuruse tegeliku väärtuse X_0 vahel:

$$\Delta X = X - X_0.$$

Absoluutne mõõteviga antakse alati mõõdetava suuruse ühikuis.

Suhteliseks mõõteveaks γ nimetatakse absoluutse mõõtevea ΔX ja mõõdetud suuruse tegeliku väärtuse X_0 suhet: $\gamma = \frac{\Delta X}{X_0}$. (6.2)

Suhteline mõõteviga antakse tavaliselt protsentides.

Püsivead jäävad teatud suuruse korduval mõõtmisel muutumatuks või siis avaldub vigade muutumises mingi kindel seaduspärasus. Nende hulka kuuluvad mõõteriista ja mõõtmismeetodi puudulikkusest, väärast paigaldamisest jpm tingitud vead. Süstemaatiliste vigade mõju saab kahandada vastavate paranduste tegemisega. Palju aitab siin kaasa katse hoolikas korraldamine.

Kui korduval mõõtmisel samade tingimuste juures osutuvad tulemused lahknevaiks, viitab see **juhuslike vigade** esinemisele mõõtmistulemustes. Väärtuselt ja märgilt võivad need olla vägagi erinevad. Katse teel juhuslikest vigadest lahti ei saa, küll aga võib nende mõju arvestada katseandmete töötlemisel.

Jämedalt moonutavad mõõtmistulemust **eksitused**. Siia hulka kuuluvad vale lugem, mõõtmisandmete väär üleskirjutamine jm. Säärased tulemused heidetakse kõrvale kui mitteusaldatavad.

Eeltoodust nähtub, et iga mõõtmisega kaasneb paratamatult teatav viga, mistõttu mõõdetava suuruse tegelik väärtus jääb teadmata. Et katse tulemusel leitud ligikaudne väärtus oleks võimalikult lähedane tegelikule, tuleb mõõtmine sooritada nii, et saaks katseandmete põhjal hinnata lahkuminekut mõõdetava suuruse tegelikust väärtusest – langetada otsus mõõtmistäpsuse kohta.

Mõõtmispraktika kinnitab, et kõige usaldatavama väärtuse, mille võib mõõdetavale suurusele omistada, pakub mõõtmistulemustest leitud aritmeetiline keskmine.

Mõõteriista täpsust iseloomustab **taandatud viga**, mille all mõistetakse absoluutse vea ΔX ja mõõteriista skaala nimiväärtuse (mõõteulatuse) X_n suhet protsentides:

$$\gamma_t = \frac{\Delta X}{X_n} \cdot 100\%.$$

Valmistajatehased tagavad, et nende mõõteriistade suurim taandatud viga skaala kasutusel oleva osa piires ei ületa teatavat veamäära, milleks on lubatav viga. Viimase järgi jagatakse mõõteriistad üheksasse täpsusklassi: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 ja 4,0. Mõõteriista täpsusklass märgitakse skaalal numbriga (näiteks 2,5). Kuid mõõteriista täpsusklass ei väljenda veel mõõtmise täpsust. Suhteline mõõteviga

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_0} \cdot 100\% = \frac{\Delta X}{X_n} \cdot \frac{X_n}{X_0} \cdot 100\% = \gamma_t \frac{X_n}{X_0} \cdot 100\%.$$

Suhteline mõõteviga saab väärtuselt ligikaudu võrdseks mõõteriista taandatud veaga üksnes riista skaala nimiväärtusele lähedaste suuruste mõõtmisel. Mida enam erineb nimiväärtus mõõdetavast väärtusest, seda suuremaks kujuneb suhteline mõõteviga. Suurema mõõtmistäpsuse saamiseks tuleb mõõtmiseks kasutada mõõteriistu, mille mõõteulatus ei ületa oluliselt mõõdetavat väärtust.

Näiteks täpsusklassiga 2,5 ja mõõteulatusega 150 V voltmeetri suurim absoluutne viga

$$\Delta U = \pm 0{,}025 \cdot 150 = \pm 3{,}75 \text{ V}.$$

Kui voltmeeter näitab 120 V, siis pinge tegelik väärtus jääb piiresse 120±3,75 V. Seega suhteline mõõteviga

$$\gamma = \pm 3{,}75 \cdot \frac{100}{120} = \pm 3{,}1\%.$$

Kuid suhteline mõõteviga sama voltmeetriga 25 V mõõtmisel

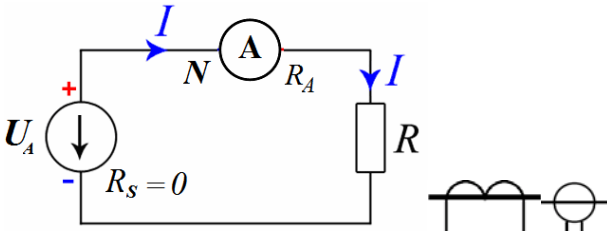
$$\gamma = \pm 3{,}75 \cdot \frac{100}{25} = \pm 15\%.$$

6.3. Voolu mõõtmine

Voolu mõõtmiseks mingis vooluahela osas lülitatakse sellesse jadamisi ampermeeter. Et mõõteriista juurdelisamine mõjutaks võimalikult vähe ahela loomulikku tööolukorda, peab ampermeetri sisetakistus olema väike. Voolutugevuse vahetul mõõtmisel saame

$$I = \alpha \cdot \mathrm{C} = \alpha \cdot I_p / N,$$

kus I, A – ampermeetri mõõteväärtus, α – ampermeetri osuti hälve (jaotiste arv), C – ampermeetri konstant, I_p – ampermeetri mõõtepiirkond, N – ampermeetri skaala jaotiste koguarv.

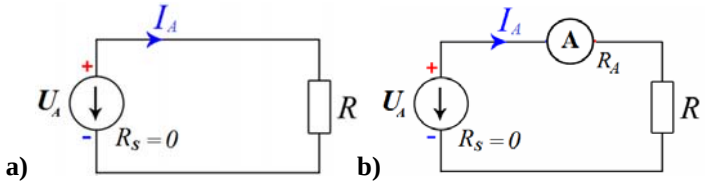


Joonis 6.1. Voolu mõõtmine ampermeetri abil ja voolutrafo tingmärgid elektriskeemidel

Õppelaborites kasutatakse alalisvooluahelates mõõtmiseks kõige rohkem magnetoelektrilisi ampermeetreid, harvemalt elektromagnetilisi. Vahelduvvooluahelate korral leiavad kasutamist peamiselt elektromagnetilised ampermeetrid, täpsemate mõõtmiste tarvis aga elektrodünaamilised ampermeetrid.

Mõõtemehhanismi omatarbest põhjustatud mõõtetulemuste moonutusi hinnatakse mõõtmismeetodi vea järgi.

Leiame mõõtmismeetodist tuleneva vea voolu mõõtmisel ampermeetriga, eeldades seejuures, et on teada tarbija takistus R ja ampermeetri sisetakistus R_A. Ampermeetri sissetoomiseni (joonis 6.2a) läbib ahelat vool $I = \frac{U}{R}$. Pärast ampermeetri juurdelülitamist (joonis 6.2b) vool ahelas $I_A = \frac{U}{R + R_A}$.



Joonis 6.2. Meetodi vea teke voolu mõõtmisel

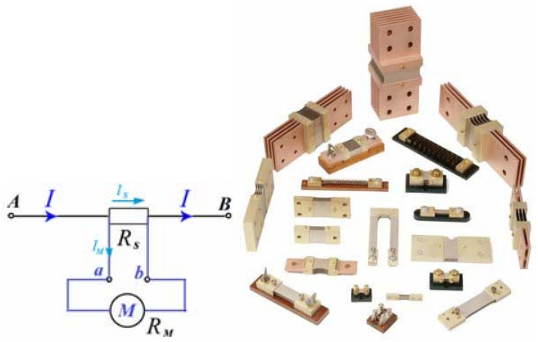
Vastavalt sellele kujuneb voolu mõõtmisel ampermeetriga meetodi veaks

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{I} = \frac{I_A - I}{I} = -\frac{r_A}{R + R_A} = -\frac{1}{1 + R/R_A}.$$

Mida suurem on ampermeetri sisetakistusega R_A võrreldes tarbija takistus R, seda väiksemaks jääb ampermeetrist tingitud viga.

Ampermeetri mõõtepiirkonna laiendamine sildava takisti abil. Ampermeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks mõõtmistel alalisvoolu- aga ka vahelduvvooluahelas kasutatakse **sildavat takistit** (nimetatakse ka šunt) – erikonstruktsiooniga takistit. Neid iseloomustatakse nimivoolu ja nimipotentsiaalilanguga, mida tuleb mõõtmistel arvesse võtta. Magnetelektrilisele mõõteriistale ehitatakse sildav takisti tavaliselt ampermeetri sisse, ent valmistatakse ka sildavaid takisteid, mida saab vajaduse korral vahetada.

Sildav takisti lülitatakse rööbiti mõõtemehhanismiga (joonis 6.3). Mõõtetulemus $I = \alpha C\, n = \alpha I_p\, n / N$. Siin n on mõõtepiirkonna laiendustegur. Takistid valmistatakse harilikult manganiidist, sest selle materjali takistuse temperatuurisõltuvus on väike (temperatuuritegur piires ±0,02% 10 °C koht**a)**.

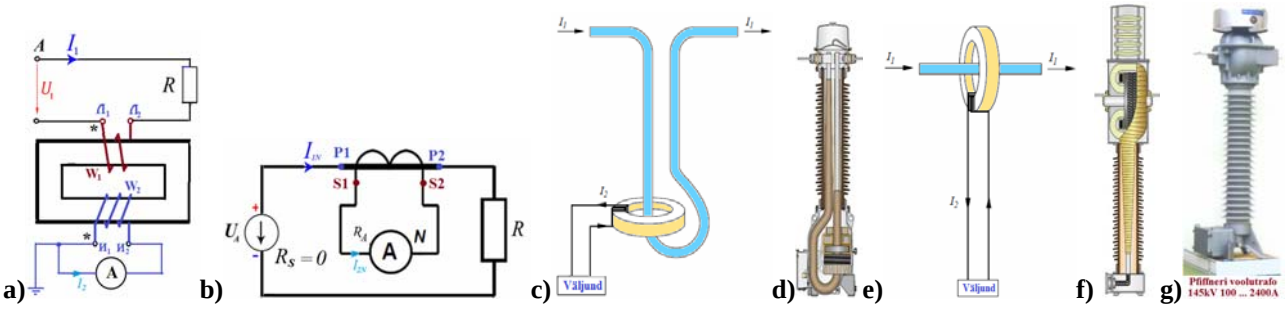


Joonis 6.3. Sildava takistiga mõõtemehhanism. Takistid

Voolu I mõõtmiseks, mis n korda ületab mõõtemehhanismi nimiväärtuse $I_m = I_n$, vajaliku sildava takisti leiame avaldisest $\frac{R_S}{R_M} = \frac{I_m}{I - I_m}$, millest $R_S = R_M \frac{I_m}{I - I_m} = \frac{R_M}{n - 1}$.

Suhet $n = I / I_n$ nimetatakse **laiendusteguriks** (sildamisteguriks).

Ampermeetri mõõtepiirkonna laiendamine voolutrafo abil. Vahelduvvooluahelais avardatakse ampermeetri mõõtepiirkonda voolutrafo abil. Selleks lülitatakse voolutrafo primaarmähis (P1, P2) jadamisi ahelasse, kus voolu tahetakse mõõta (joonis 6.4). Ampermeeter ühendatakse sekundaarmähise klemmidega (S1, S2). Mõõdetav vool leitakse ampermeetri näidu ja trafo ülekandearvu korrutisena. Trafo ülekandearv $n = I_{max}/I_p = I_{1N}/I_{2N}$. Siin I_{max} on eeldatav suurim ahela vool. Ahelavoolu väärtus $I = \alpha C\, n = \alpha I_p\, n/N$.



Joonis 6.4. Voolu mõõtmine voolutrafo abil (a, b). Kõrgepingelise voolutrafo kujundusnäited: magnetsüdamik paikneb trafo allosas (c ja d) ning ülaosas (e ja f)

Joonisel 6.4a, b on esitatud laborites kasutusel olevate voolutrafode slaavi tähtedega (a) ja rahvusvahelised klemmide tähistused (b) ning nende lülitusnäited tarbija vooluahelasse. Voolutrafodel on täita kaks põhiülesannet: tagada nõutava täpsusega voolu mõõtmine ja kõrgepinge isoleerimine mõõteahelatest.

Voolutugevuse mõõtmine ampertangidega. Ampertangid on erikujuline mõõteriist, mille abil saab mõõta voolutugevust juhtmes tema ahelat katkestamata (joonis 6.5).

Joonis 6.5. Voolu mõõtmine ampertangidega

6.4. Pinge mõõtmine

Pinge mõõtmiseks ahela mingis osas lülitatakse mõõteriist – voltmeeter selle osaga rööbiti. Et voltmeeter võimalikult vähe mõjutaks ahela tööolukorda, peab tema sisetakistus olema küllalt suur võrreldes ahela tarbijatakistusega.

Pinge vahetul mõõtmisel voltmeetri näidu põhjal leiame pinge arvväärtuse järgmiselt:

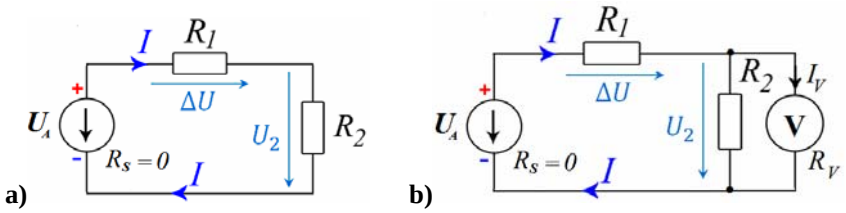
$$U = \alpha\, C = \alpha\, U_p/N,$$

kus $\boldsymbol{U}$, V – voltmeetri mõõteväärtus; $\boldsymbol{\alpha}$ – voltmeetri osuti hälve (jaotiste arv); $\mathbf{C}$ – voltmeetri konstant; $\boldsymbol{U_p}$ – voltmeetri mõõtepiirkond; $\boldsymbol{N}$ – voltmeetri skaala jaotiste arv.

Õppelaboris kasutatakse alalisvooluahelas pinge mõõtmiseks tavaliselt magnetoelektrilisi voltmeetreid, vahelduvvooluahelais peaasjalikult elektromagnetilisi voltmeetreid. Väikeste vahelduvpingete mõõtmisel annavad häid tulemusi suure sisetakistusega **elektronvoltmeetrid**. Nad sobivad ka kõrgsageduslike pingete mõõtmiseks. Igapäevapraktikas kasutatakse põhiliselt kompaktseid numbrilisi volt- ja multimeetreid.

Takistusel R_V tekkiva potentsiaalilangu U_2 mõõtmisel voltmeetriga (joonis 6.6) tuleb ilmsiks ka meetodi viga

$\gamma_U = \dfrac{\Delta U}{U_2} = \dfrac{U - U_2}{U_2} = -\dfrac{1}{1 + R_2 / R_{lül}}$, kus $R_{lül} = \dfrac{R_2 R_1}{R_2 + R_1}$ on lülituse takistus voltmeetri klemmide suhtes.

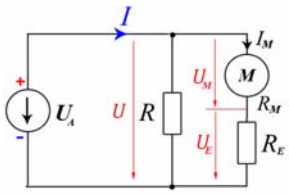


Joonis 6.6. Meetodi vea teke pinge mõõtmisel

Nagu mõõtmispraktika näitab, võib meetodi vea tähele panemata jätta, kui γ_I ja γ_U protsentides väljendatuna on vähemalt 5 korda väiksem kasutatava mõõteriista täpsusklassist. Mõõtmistel vahelduvvooluahelais tuleb arvestada mõõteriista ja tarbijate ahela näivtakistusi.

Voltmeetri mõõtepiirkonda laiendatakse eeltakistite ja pingejaguritega.

Voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamine eeltakisti abil. Eeltakisti – mõõtemehhanismiga jadamisi (joonis 6.7) lülitatav takisti, mille abil laiendatakse voltmeetri mõõtepiirkonda.



Joonis 6.7. Eeltakistiga mõõtemehhanism

Selle takistus määratakse seosest $\frac{R_E + R_M}{R_M} = \frac{U}{U_M}$. Siin R_M ja U_M – mõõtemehhanismi takistus ja potentsiaalilang; R_E ja U_E – eeltakisti takistus ning potentsiaalilang.

Siit eeltakisti takistus $R_E = R_M \frac{U - U_M}{U_M} = R_M (n-1)$, kus $n = \frac{U}{U_M}$.

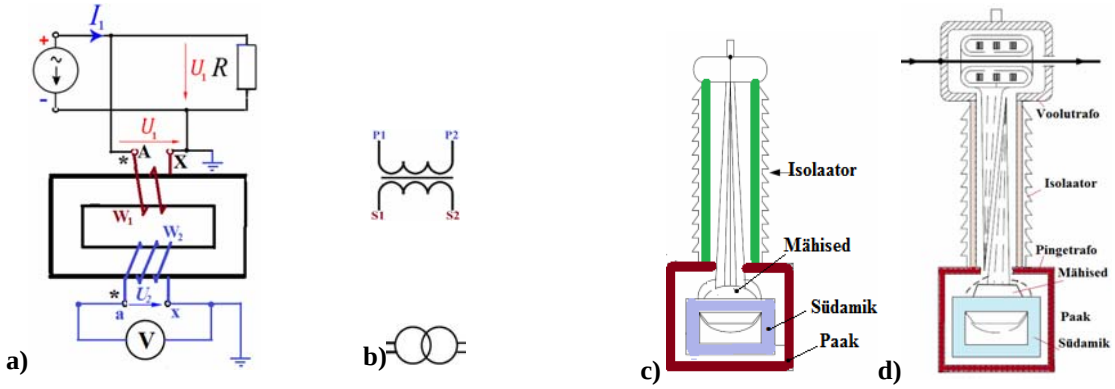
Mõõtmistulemus $U = \alpha\, C\, n = \alpha\, U_p\, n/N$,

kus ***U***, V – voltmeetri mõõteväärtus; **α** – voltmeetri osuti hälve (jaotiste arv); **C** – voltmeetri konstant; $\boldsymbol{U_p}$ – voltmeetri mõõtepiirkond; ***N*** – voltmeetri skaala jaotiste arv ja ***n*** – on laiendustegur. Eeltakistid valmistatakse tavaliselt manganiidist.

Voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamine pingetrafo abil. Kõrge vahelduvpinge mõõtmisel laiendatakse voltmeetri mõõtepiirkonda eri mõõtetrafoga, nn pingetrafoga. Trafo primaarmähis w_1 ühendatakse rööbiti võrku (joonis 6.8), mille pinget on vaja mõõta. Voltmeeter ühendatakse sekundaarmähise w_2 klemmidega. Pingetrafo tegur leitakse seosest: $n = U_{max}/U_p = U_{1N}/U_{2N}$. Mõõtetulemus leitakse järgneva avaldise põhjal:

$$U = \alpha\, C\, n = \alpha\, U_p\, n/N,$$

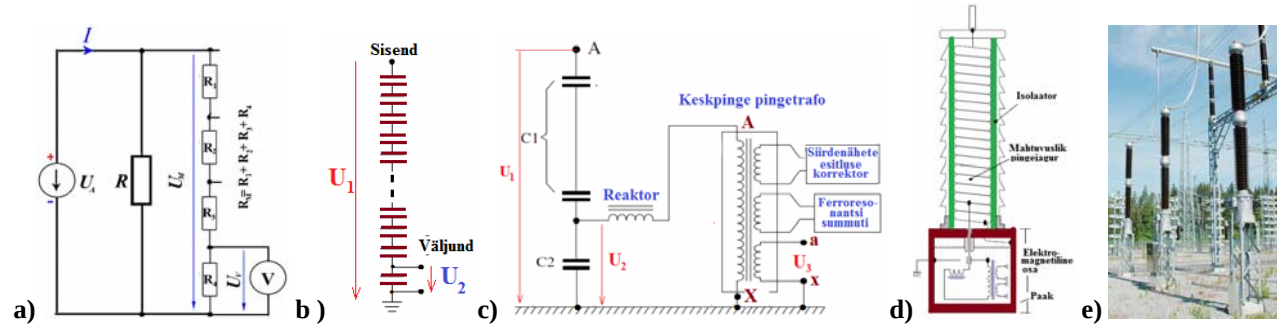
kus ***U***, V– voltmeetri mõõteväärtus; **α** – voltmeetri osuti hälve (jaotiste arv); **C** – voltmeetri konstant; $\boldsymbol{U_p}$ – voltmeetri mõõtepiirkond; ***N*** – voltmeetri skaala jaotiste arv ja ***n*** – on laiendustegur.



Joonis 6.8. Pinge mõõtmine pingetrafo abil (a). Pingetrafo tingtähised elektriskeemidel (b). Kõrgepinge õli-paberisolatsiooniga pingetrafo (c) ja kombineeritud voolu- ja pingetrafo kujundus (d)

Pingetrafosid valmistatakse ühe- ja kolmefaasilistena erinevate täpsusklassi nõuete järgi. Elektromagnetilised mõõtetrafod on pikka aega olnud elektroenergeetikas põhilised mõõtemuundurid. Vahepeal on digitaaltehnika läbi teinud kiire arengu. Saab analüüsida väga kiireid reaalaja protsesse ja olemasolevad mõõtemuundurid on osutunud nõrgaks lüliks nende protsesside registreerimiseks.

Pinge mõõtmine pingejaguri abil. **Pingejagur** (joonis 6.9) koosneb takistite (a) või mahtuvuste (b) kogumist, mis on valitud nii, et mõõtmisel ei langeks voltmeetri klemmidele pinget, mis ületab riista nimipinge. Mõõdetav potentsiaalide vahe $U_M = U_V \frac{R_M}{R_4}$, kus U_V on voltmeetri näit. Joonisel 6.9b ja c on esitatud ülikõrgpingelise mahtuvusliku pingejaguriga pingetrafo kujundusnäide. Tavaliselt muundab mahtuvuslik pingejagur ülikõrgpinge keskpingeks, mille muudab madalpingeks pinge mõõtetrafo. Isolaatori sees paikneb mahtuvuslik pingejagur, mille väljundsignaal U_2 on võetud järgmisena vaadeldava faasipingega 10...20 kV keskpingelise pingetrafo sisendiks. Joonisel 6.9c on näidatud põhilised koosteosad, mis tagavad pingetrafo rahuldava töö. Nendeks on mahtuvusvõimsust kompenseeriv reaktor, võimaliku ferroresonantsi summuti ja siirdeprotsesside soovitud kulgu korrigeeriv lüli, mis mõnikord võib ka puududa. Mahtuvusliku pingejaguri ülekandetegur $K_1 = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{U_1}{U_2}$, keskpinge pingetrafol $K_2 = \frac{U_2}{U_3}$ ning kogu lülituse ülekandetegur $K = K_1 \times K_2$.



Joonis 6.9. Takistitega (a), kondensaatoritega (b) pingejaguri mõõtelülitus ja kujundusnäide (c ja d). 420 kV mahtuvuslik pingetrafo firmalt ABB (e)

Joonisel 6.9e on 420 kV mahtuvusliku pingetrafo näide firmalt ABB.

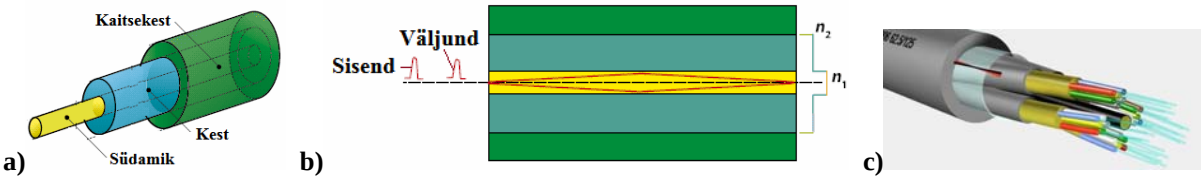
Elektromagnetiliste mõõtemuundurite põhipuudused. Mõõtetrafode olemusest tulenevad järgmised puudused: kaal ja gabariidid, resonantsinähtused, hüsterees, lühise korral küllastus, jääkmagnetism, õli või elegaasi kasutamisvajadus, voolutrafo sekundaarahela katkestamise ohtlikkus, sekundaarahela koormuse mõju täpsusele ja sageduse piirang kõrg- ja ülikõrgsagedussignaalide ülekandmisel. Seetõttu silutakse ülikiired protsessid, registreerivate riistade näitude alusel jääb mulje, et ülikiireid protsesse lihtsalt pole. Aga just nende protsesside analüüsi alusel on võimalik arendada seadmete ja süsteemide diagnostikat, rikkekoha kauguse määramist, tagada elektri kvaliteeti ning muud. Mõõtetrafode ehituse eripära võib energeetilistel objektidel põhjustada avariisid. Ka kaod ja juhtmematerjali kulu on sekundaarahelates märkimisväärsed.

Loetletud puuduste tõttu on tarvis välja töötada uute tööpõhimõtetega kõrgepingelisi mõõtemuundureid. Kõige tulemuslikumaks on osutunud magnetoptiliste nähtuste kasutamine. Esmapilgul näib, et valgus ja elekter on täiesti erinevad nähtused. Seda kinnitab kiudoptiliste sideliinide väga hea häiringukindlus. Füüsikutele on aga pikka aega teada nähtused, mis tõestavad laengute energiavälja (elektromagnetvälj**a)** mõju valguskiirele.

6.5. Uudsed mõõtetrafod

Lisaks elektromagnetilistele mõõtetrafodele on väljatöötamisel rida uusi mõõtemuunduriga mõõteseadmeid. Vaja on lineaarsete tunnusjoontega (ilma küllastuseta) mõõtetrafosid, mis sobivad koostööks väikese sisendvõimsustarbega digitaaltehnikaga. Siin on eelisolukorras optilised mõõtetrafod. Nendes kasutatakse lainete polarisatsiooni, st laineid, millel on eelistatud võnkumissuund. Seadmed, mis muudavad tavalise valguse polariseeritud valguseks, on polarisatsioonifiltrid ehk **polarisaatorid**.

Optilised kiud ja valguskaablid. Optilise mõõtemuunduri tähtsaim tundlik element on optiline kiud, mille tehnilised ja metroloogilised näitajad määravad muunduri põhinäitajad. Tajuri (anduri sisendosa, mis muundab mingi füüsikalise suuruse paremini töödeldavaks, reeglina elektriliseks suuruseks) moodustavad mitu optilise kiu keerdu, mis on paigutatud mittemagnetilisest jäigast materjalist kaitsekesta. Optilist kiudu kasutatakse valgusenergia ja optiliste signaalide ülekandmiseks. Optilised muundurid ja kiudoptilised kanalid moodustavad lüli tajuri ja voolutrafo madalpingelise väljundi vahel. Optilise mõõtemuunduri ja tavamõõtetrafo põhimõtteline erinevus on selles, et esimese toimimiseks on vaja täiendavat elektroonilist liidest. See liides täidab kahte kohustust – tajuri ja uue tehnika sobitamist voolu ja pinge väljunditega. Optiline valguskiud toimib lainejuhina (valgusjuhina), kandes üle optilise vahemiku elektromagnetkiirgust kiu sisendotsa tasapinnast väljundotsa tasapinda. Üks inimese juuksekarva läbimõõduga valguskiud kujutab endast silindrilist klaaskiudu, mida ümbritsevad kest ja kaitsekest (joonis 6.10a).



Joonis 6.10. Optiline valguskiud (a), üksiksignaali levi südamikus (b) ja valguskaabli kujundus (c)

Südamik on valmistatud ülipuhtast kvartsklaasist. Teda ümbritseb teisest klaasist või polümeerist kest, millel on halvemad murdumisnäitajad. Kaitsekest on tehtud plastmassist ja kaitseb kiudu vigastuste ja niiskuse eest. Nii alluvad südamiku ja kesta eralduspinnalt vastava nurga all langevad valguskiired täielikule sisetagasipeegeldusele. Tänu sellisele lahendusele võimaldavad optilised kiud valguskiirgust kanda väga väikeste energiakadudega pikkade vahemike taha ilma vahevõimenduseta. Olenevalt kaabli kasutusalast võib kiudude kogumeid ümbritseda ka mitu väliskesta (joonis 6.10c). Vahel kasutatakse kiudude vahel valgust neelavat tumedat klaasi, mis takistab ühest kiust lekkivat valgust kandumast teistesse kiududesse ja kiududevahelist signaalide segunemist.

Optilisi kiude on kahte tüüpi: üksiksignaali kiud ja mitme signaali kiud. Üksiksignaali kiududel on umbes 9 mikroni läbimõõduga südamikud ja nad edastavad 1300...1550 nanomeetri lainepikkusega infrapunast laserikiirt. Mitme signaali kiududel on suuremad südamikud (diameetriga umbes 62,5 mikronit) ja nad edastavad valgusdioodidest infrapunast valgust lainepikkusega 850...1300 nanomeetrit. Üksik- ja mitme signaali kiude omavahel ühendada ei saa.

PUUDUSED: Valguskaablite kasutamine ja hooldamine on vaskkaablitest oluliselt kallim. Valguskaablid on metallkaablitest hapramad ja neid on ka keerulisem jätkata. Valguskaablil on tema töövõimet piiravad puudused. Suurimad kasutusvaldkonna piirajad on signaali hajumine ja dispersioon (murdumisnäitaja sõltuvus valguse lainepikkusest). Hajuvus ei ole probleemiks väikevõrkudes, vaid kaugühenduste korral.

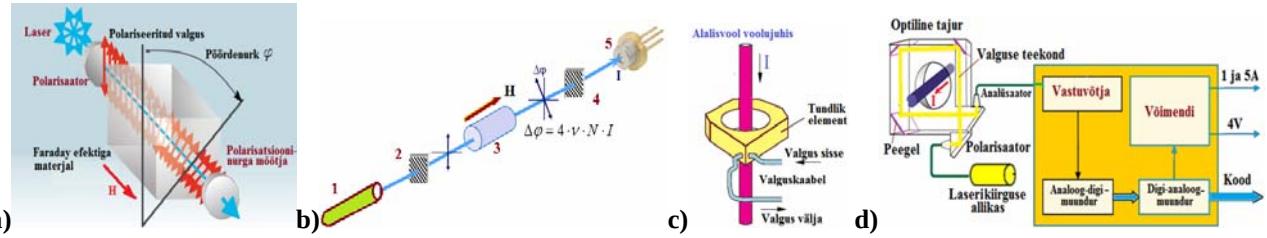
Infrapunane valgus on nähtamatu, mis võib ohustada kaablipaigaldajate silmi. Kaableid lõigates võivad naha alla sattuda klaasikillud, seetõttu tuleb olla väga ettevaatlik.

Optiline voolu mõõtetrafo. Optilise mõõtemuunduri idee tugineb 1845. a M. Faraday avastatud piki-magnetoptilisel nähtusel, mis seisneb selles, et lineaarselt polariseeritud valguse võnketasand pöördub, kui ta läbib magnetväljas olevat ainet (joonis 6.11a). Polarisatsioonitasapinna pöördenurk radiaanides

$$\beta = \nu B d \,,$$

kus ν – Verdet' tegur, B – magnetvoo tihedus levi suunas, T ja d – vahemik meetrites, kus valgus ja magnetvoog teineteist vastastikku mõjutavad.

Et mõõta voolujuhis alalisvoolu suurust (joonis 6.11a ja b), lähtume voolujuhi ümber olevast magnetväljast, valguse kaldenurga $\Delta\varphi$ järgi saab määrata magnetvälja tugevuse, viimase alusel voolu väärtuse voolujuhis.



Joonis 6.11. Valguse polariseerimistasapinna pöördumine magnetvälja mõjul (a). Optilise mõõtemuunduri skeem (b). Alalisvoolu optilise tajuri idee (c). Optilise alalisvoolu mõõtetrafo (d) lülitus

Lineaarselt polariseeritud valguse võnketasandi kaldenurk (joonis 6.11b) magnetväljas

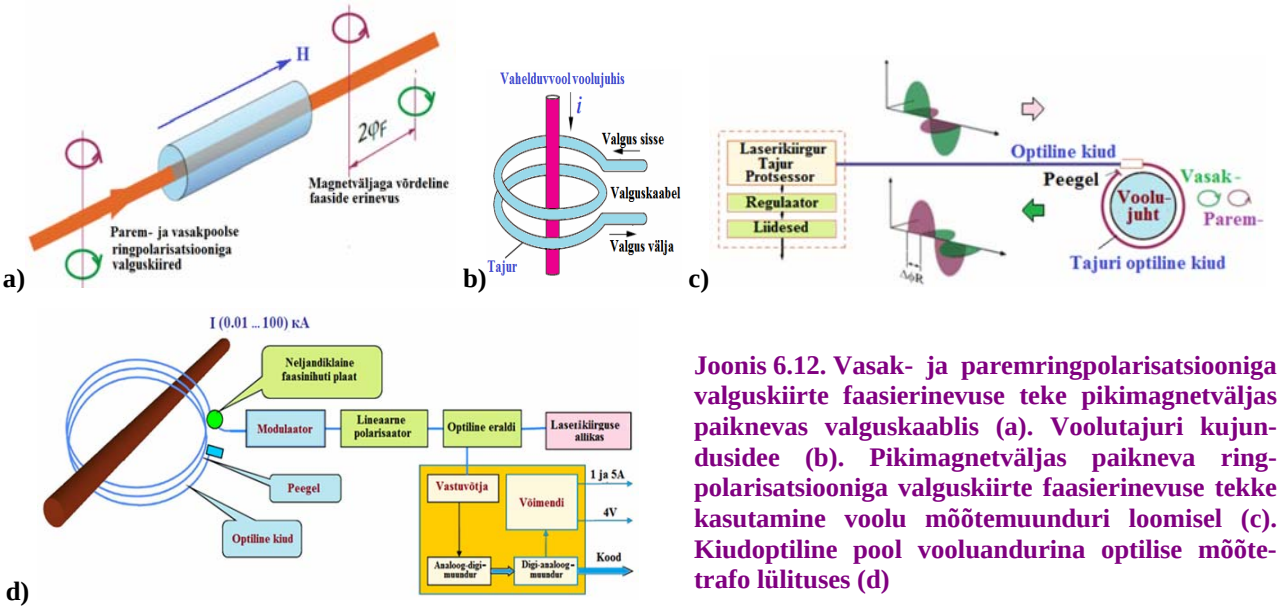
$$\Delta\varphi = 4 \cdot \nu \cdot N \cdot I \,,$$

kus N – valguskiire keerdude arv, I – voolu tugevus ja ν – empiiriline Verdet' tegur, radiaani tesla ja meetri kohta, mis sõltub lainepikkusest, temperatuurist. Käsiraamatutes on ν väärtused erinevate materjalide kohta. Optilise tajuri ideed iseloomustab joonis 6.11b, c ja d. Mõõtemuunduri skeemis: 1 – optilise kiirguse allikas, 2 ja 4 – lineaarne polarisaator, 3 – kiudoptiline niit magnetväljas, 5 – optilise kiirguse vastuvõtja.

Joonisel 6.11c ja d moodustab tajuri elektromagnetvälja paigaldatud peegelkamber, milles polariseeritud laserikiir (uuemates lahendustes valgusdioodikiir) läbib voolujuhi magnetväljas kindla pikkusega teekonna. Selle ulatuses toimub polariseeritud valguse ja magnetvälja vastastikmõju. Peegelkambri väljundist suunatakse valguskaabli abil kaldenurga $\Delta\varphi$ võrra pööratud polariseeritud valgus valgusdioodi kaudu elektroonikaploki vastuvõtjasse. Edasi toimub signaali töötlemine ja mõõtetulemuste esitlus digitaal- ja analoogkujul. Need tajurid on **passiivtajurid** ja ei vaja primaarpoolel abitoidet. Numbrilise koodväljundi sampimissagedus (diskreetimissagedus) on 30 kHz ehk 600 näitu perioodi kohta.

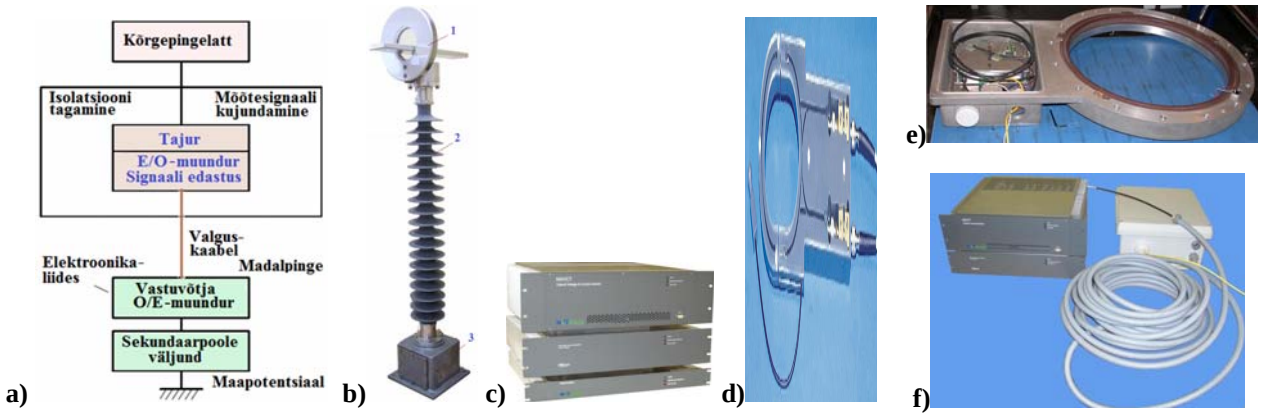
Keerulisem on vahelduvvoolu mõõtmine. Siin muutub magnetväli igal poolperioodil nii suuruselt kui ka suunalt, 50 Hz korral iga 10 millisekundi möödudes. Valguse polariseerimistasapinna pöörlemine tajuris muutub samuti igal poolperioodil vastassuunaliseks. Seetõttu võrdub siinusvoolu perioodi ja kordsete perioodide kaldenurk nulliga. Seega on kaldenurga mõõtmised vaja teha positiivsele ja negatiivsele poolperioodile eraldi. Siit sünkroniseerimisvajadus vastavate mõõtmiste alguste ja lõppude fikseerimisega.

Firma ABB kasutab vahelduvvoolu mõõtmiseks Faraday efekti valguskaablis. Kui magnetväli on näiteks klaasi keskkonnas rakendatud piki vasak- ja paremringpolarisatsiooniga valguskiiri (joonis 6.12a), siis lained kulgevad erinevate kiirustega. Kui need ringpolarisatsiooniga lained kulgevad eri kiirusel läbi tundliku optilise kiu voolu poolt tekitatud magnetväljas, siis peeglilt tagasitulevatel valguslainetel on tekkinud faasi erinevus (joonis 6.12c). See erinevus on võrdeline magnetvoo integraaliga piki väljas olevat kiudu. Seega on faasi erinevus võrdeline mõõdetava vooluga. Väljaga mõjutatud ringpolarisatsiooniga lained suunatakse voolutajuri elektroonikaplokile, kus signaalprotsessor muundab optilise faasinihke numbriliseks signaaliks. Lisaks paigalduse lihtsusele on kiudoptilise pooli eeliseks mehaaniliste mõjude (vibratsioon ja tõuked) kindlus. Ringpolarisatsiooniga lainete faasinihe kahekordistub edasi-tagasi liikudes. Mehaanilistest mõjuritest tingitud häiringud on pöördsuurused ja nullivad vastastikku teineteist.



Joonis 6.12. Vasak- ja paremringpolarisatsiooniga valguskiirte faasierinevuse teke pikimagnetväljas paiknevas valguskaablis (a). Voolutajuri kujundusidee (b). Pikimagnetväljas paikneva ringpolarisatsiooniga valguskiirte faasierinevuse tekke kasutamine voolu mõõtemuunduri loomisel (c). Kiudoptiline pool vooluandurina optilise mõõtetrafo lülituses (d)

Optilise mõõtetrafo kujundusnäited on joonisel 6.13c ja d. Suurimad edusammud praktiliste teostuste osas on Kanada firmal NxtPhase, mis 2009. aastast kuulub Alstom Gridi gruppi. Joonisel 6.13b on näitena toodud firma NxtPhase optiline voolutrafo nimivoolude vahemikule 100 A … 4000 A.



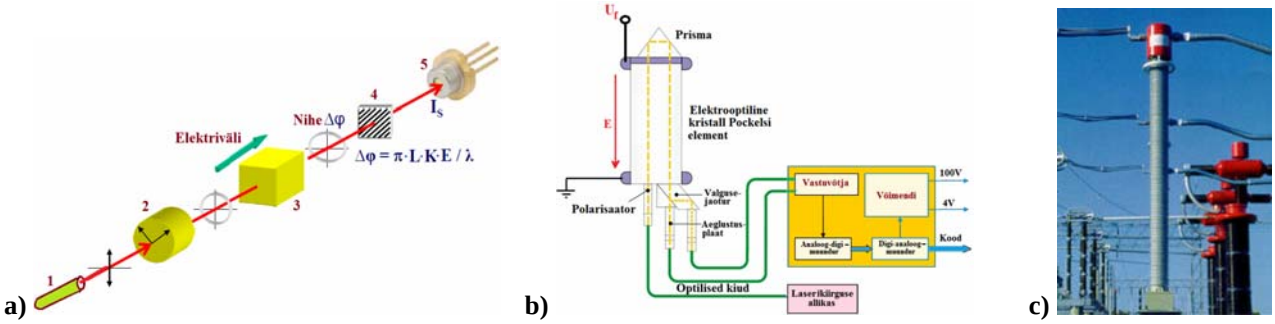
Joonis 6.13. Optilise trafo talitlusskeem (a). Optiline voolutrafo NXCT (b). Elektroonikakomplekt (c), optilise voolutajuri kujundus (d ja e) ning lahtiühendatava silmusega optiline voolutrafo NXCT-F3 (f): 1 – optiline tajur, 2 – spiraalne silikoonkummikattega täisvaluisolaator, 3 – samba alus

Vahelduvvoolu pingeklass 36 ...1150 kV ja AV 25 ... 800 kV. Sagedusriba laius 10 Hz...6 kHz, laienduse korral ... 20 kHz, kõrgus 1,5 ... 6,3 m, kaal 49 ... 95 kg. Voolutajur 1 koos peegeldiga on isolaatori ülaosas (joonisel 6.13a ja b), mõõtesignaal optilise kiu vahendusel piki täisvalu spiraalset silikoonkummi kattega isolaatorit 2 kantakse nullpotentsiaaliga samba alusel 3 olevasse väljundisse ning sealt elektroonilisse signaalitöötluse plokki.

Optilised voolutrafod on alates pingest 420 kV odavamad kui elektromagnetilised.

Optiline pingetrafo. Optilised pingeandurid ja mõõtetrafod tuginevad **Pockelsi elektrooptilisele (E/O) efektile.** Efekti nimetatakse Friedrich Carl Alwin Pockelsi 1893. a avastatud nähtuse järgi, et optilistes keskkondades tekkib valguskiirele alalis- või vahelduvelektrivälja pealistamisel kahekordne valguskiire murdumine (joonis 6.14). Polarisatsiooninurga muutus $\Delta\varphi = \pi \cdot L \cdot K \cdot E/\lambda$,

kus L – n plaadi paksus, K – on elektrooptiline tegur, E – elektrivälja tugevus ja λ – lainepikkus.



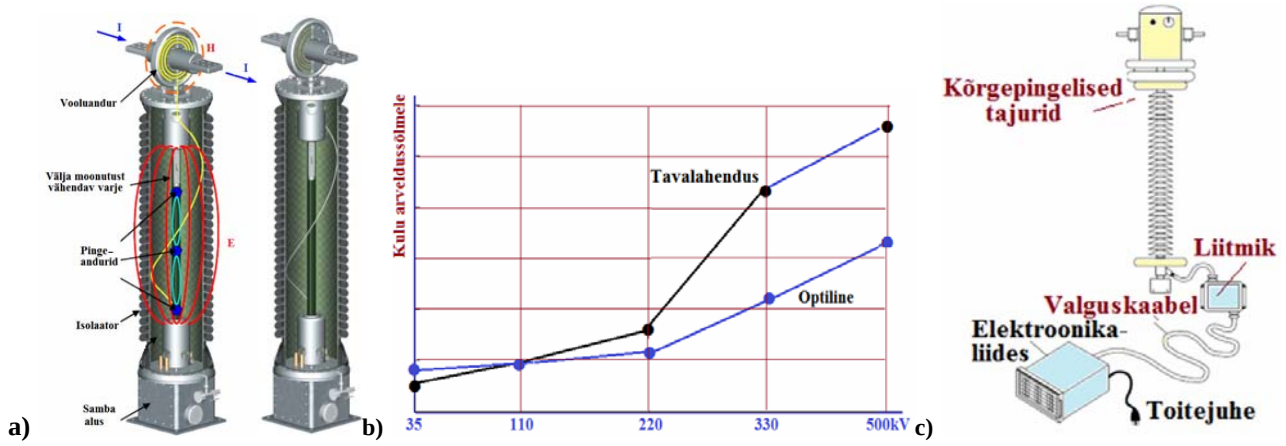
Joonis 6.14. Optiline pingeandur (a) ja optiline pingetrafo (b). Optiline 525 kV kombineeritud mõõteseade USAs Keeleri alajaamas (c): 1 – optilise kiirguse allikas, 2 – ringpolarisaator, 3 – Pockelsi element, 4 – lineaarne polarisaator, 5 – optilise kiirguse vastuvõtja

Pockelsi efekti on võimalik jälgida ainult neis kristallides, millel puudub sümmeetriakese. Lineaarsuse tõttu peab välja suuna muutumisel ka efekt märki muutma, mis aga pole võimalik sümmeetriakeskmega kehade korral. Efekt on hästi jälgitav ja toimib praktiliselt inertsivabalt, näiteks galliumarseniidi korral. Kiire-toimelisus on ligi 10^{-10}s. Nende omaduste tõttu on võimalik luua optilisi modulaatoreid. Pockelsi element on kristall, mis on paigaldatud kahe ristuva Nicoli prisma vahele, mida elektrivälja puudumisel valgus ei läbi. Välja pealistamisel läbib valgus prismat. Väli võib valguse levi suhtes olla piki- või põikiväli, ja nii saadakse piki- või põikimodulaator. Seega tugineb pingeanduri töö elektrivälja mõõtmisele Pockelsi elemendi abil, kasutades kahe kanali meetodit (joonis 6.14b), mis tagab temperatuurikõikumistest, vibratsioonist ja laservalgusallika valguse intensiivsuse muutustest sõltumatud mõõtetulemused.

Optiline kõrgepinge pinge- ja voolutrafo. Häid eeldusi tarkvõrgu ja -alajaamade kujundamiseks annab ühildatud kerega optiliste pinge ja voolutrafode kasutamine. Kogu täppismõõteinfo on ka digitaalkujul. See on komplekslahendus kahesuunaliseks energiaarvelduseks. Lineaarsed amplituudsageduse tunnusjooned võimaldavad teha elektri kvaliteedi kontrolli kuni 100 harmoonilise hindamiseks. Trafod võib paigaldada olemasolevatele alajaama konstruktsioonidele vertikaalselt, horisontaalselt või nurga all. Joonisel 6.15a on ühildatud optilise voolu ja pingetrafo NXVCT vaated. Isolaatori ülaosas paikneb vooluandur, mille signaal suundub samba alaossa. Pingeandurid paiknevad samba sees. Nimivoolud 100 A … 4000 A, nimipinged 110 ... 800 kV, täpsusklass 0,2, kaal 180 ... 780 kg. Isolaator on täidetud lämmastikuga. Surve 2 atm. Joonisel 6.15b on arveldussõlme valmisehitamise kulu võrdlus traditsioonilise ja optiliste lahenduste korral. Siit ilmneb, et tulevikus võib optiliste lahenduste kasutamine anda ülikõrge pinge korral suurt kokkuhoidu ja tagada suurema täpsuse ning väga hea signaalide häiringukindluse.

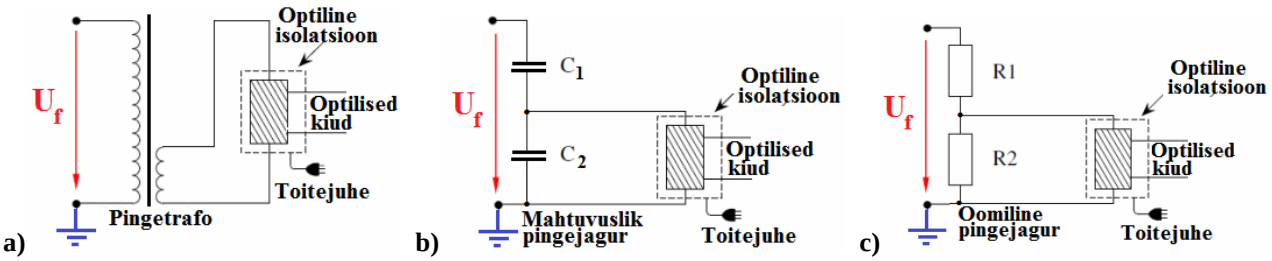
Kokkuvõte: energeetikas eelistatakse elektromagnetilistele mõõtetrafodele järjest rohkem optilisi kõrge-pinge voolu- ja pingetrafosid. On tähtis, et optilised mõõtetrafod on orienteeritud numberväljundile, kuigi säilitavad ka tavakohased analoogsignaalide esitlused. Seega saab andmetöötlus säästlikumalt toimuda ka

mõõtepunktide lähedal ilma lisamõõteriistu (ka arvesteid) kasutamata. Tulevikus, analoogsignaalide kasutamisest loobumise korral, on optiliste trafode vajalik väljundvõimsus väga väike võrreldes elektromagnetilistega, moodustades 1 VA murdosa. Trafodel puudub magnetsüdamik, seega küllastus ja primaarning sekundaarsuurused on kogu mõõteulatuses võrdelises sõltuvuses. Hetkel on elektrisüsteemides algamas üleminek numberväljundiga mõõtetrafodele. Seepärast on uusehitustel ja olemasolevate uuendamisel otstarbekas hinnata numberväljundiga mõõtetrafode kasutuselevõttu. Täielik üleminek neile võib kesta mõned aastakümned.



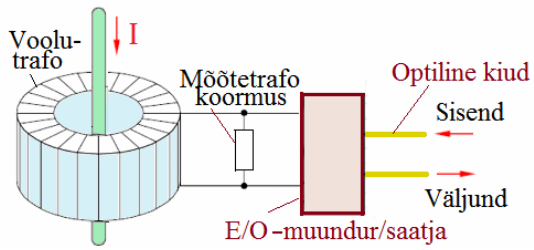
Joonis 6.15. Ühildatud optiline voolu- ja pingetrafo NXVCT (a). Arveldussõlme valmisehitamise kulu võrdlus tava- ja optiliste lahenduste korral (b). Arveldussõlme kujundusvõimalused (c)

Optilise pingemuunduriga hübriidpingetrafod. Rea optiliste mõõtetrafode heade omaduste, kuid praegu veel suhteliselt kõrge hinna tõttu on koos klassikaliste lahendustega välja töötatud rida hübriidlahendusi. Joonisel 6.16 on esitatud nende näiteid. Siin on pingetrafoga (a), mahtuvusliku (b) ja oomilise pingejaguriga (c) lülituste näited.



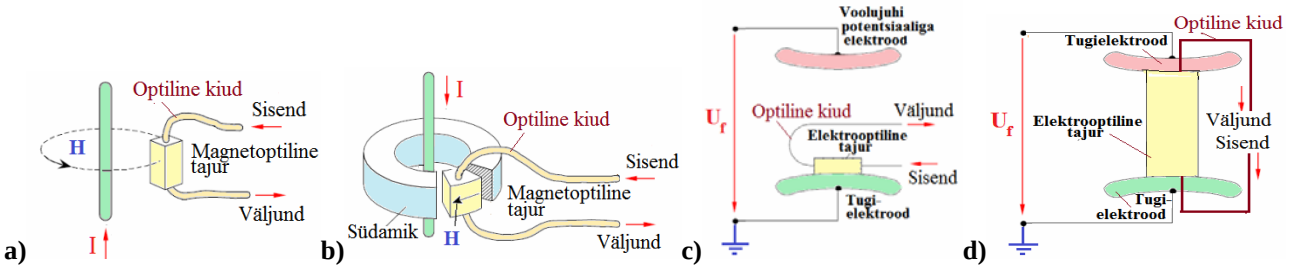
Joonis 6.16. Optilise pingemuunduriga hübriidpingetrafode aseskeemid: a – pingetrafoga, b – mahtuvusliku ja c – oomilise pingejaguriga lülitus

Magnetoptiline hübriidtajur. Sellist tajurit kasutatakse sageli pikkade ülekandeliinide korral, kus liini induktiivtakistust kompenseeritakse jadalülituses olevate kondensaatoritega. Seega seal, kus kasutatakse nn pikikompensatsiooni ja kus on vaja mõõta voolu ilma voolutrafot maandamata. Faaside tasakaalustamiseks ja kondensaatorite liigpingekaitseks on igas faasis vaja mitmeid voolutajureid. Eelistatuim on joonisel 6.17 kujutatud lahendus: mõõtetrafo, mille primaarmähiseks on südamikku läbiv voolujuht vooluga I_1 ja sekundaarmähiseks väikesele toroidsüdamikule mähitud pool vooluga I_2. Voolutrafo väljund on ühendatud kiudoptilise isolatsioonisüsteemiga. Tavaliselt on need aktiivtajurid ja vajavad toidet.



Joonis 6.17. Magnetoptilise hübriidtajuri põhimõtteline kujundus

Tajurite paigaldus. Optiliste tajurite head omadused võimaldavad luua uusi voolu ja pinge mõõtemuundureid. Optilistest materjalidest valmistatud tajurid paiknevad vahetult elektri- ja magnetväljas, mille parameetreid mõõdetakse. Juhtimisruumi ja mõõteseadmete vahelised ühendused on samuti valguskaabliga. Voolu mõõtmise korral võib optiline voolutajur paikneda voolujuhi magnetväljas (joonis 6.18a, b) või on paigutatud välja võimendava magnetsüdamiku õhupilusse. Potentsiaali või potentsiaalide erinevuse mõõtmisel on sarnased lahendused tajuri paigaldamisel elektrivälja (joonis 6.18c, d).



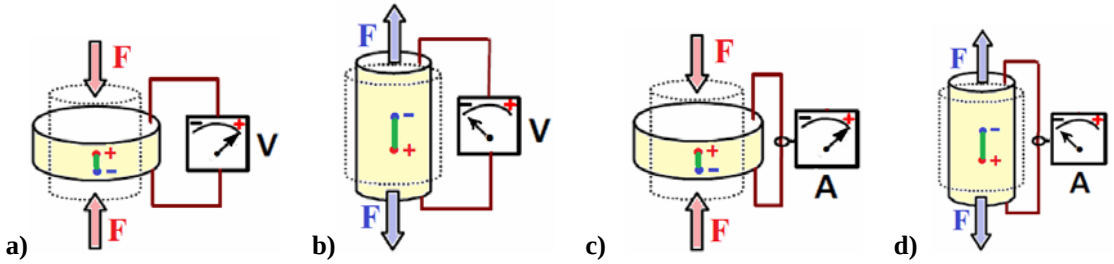
Joonis 6.18. Magnetoptilise tajuri paigaldus voolujuhi magnetvälja ja elektrooptilise tajuri paigaldus voolujuhi ja maa vahelisse elektrivälja: a – vabapaigutus, b – välja võimendava magnetsüdamiku õhupilusse, c – tajur paikneb tugielektroodil, d – tajur paikneb tugielektroodide paari vahel

Kõigil neljal juhtumil on optiline kiud, mis suunab tugivalguskiire allikast tajurisse, ka teine kiud, mis suunab vastastikmõjus osalenud kiire tagasi analüüsi ahelasse. Ilma analüüsita mõõtetulemus puudub. Seetõttu on optilise materjaliga mõõtmispõhimõte passiivne. Tema terviklik toimimine teostub lisaliidese abil, mis saab toite näiteks juhtimiskeskusest.

Piesoelektrilised mõõtetrafod

Piesoelekter – elektripotentsiaalide vahe tekkimine piesokristalli surumisel. Seega on piesoelekter, ka piesoelektriline efekt ehk **otsene** piesoefekt (kreeka keeles *Piëzo* – rõhun, surun) teatava materjali, näiteks kvartskristalli − piesokvartsi − omadus, mille puhul tema kokkusurumisel tekkib kokkusurutavate tahkude vahel potentsiaalide erinevus tingituna dielektrilisest polarisatsioonist, s.o erinimeliste elektrilaengute suunatud nihkumisest. On olemas ka piesoelektriline **pöördefekt** − mehaaniline deformatsioon elektrivälja mõjul. Seega, kui kvartskristalli vastastahkude vahele rakendada elektriväli (potentsiaalide vahe), muutub nende tahkude vahekaugus. Välja puudumisel kvartskristallil polarisatsiooni pole. Seevastu on real sünteetilistel kristallidel mehaanilise mõju kadumisel jääkpolarisatsioon. Rakendades vastassuunalise elektrivälja, saab polarisatsioonisuunda muuta vastupidiseks. Sellega kaasneb **ferroelektriline hüsteerees**.

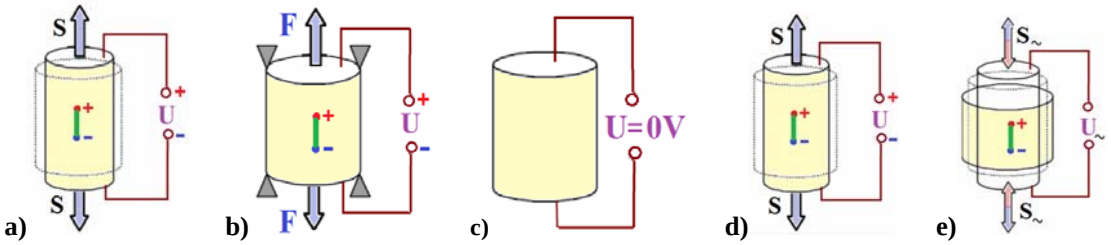
Kui piesoelektrilisele materjalile rakendada kas surve- või tõmbejõud *F*, siis moodustub laengute ümberpaigutuse tõttu dielektrikus nende elektriväli. Materjali otsaelektroodidele rakendub potentsiaalide vahe ehk erineva polaarsusega allikapinge (joonis 6.19a ja b). Juhul kui ülemine ja alumine elektrood juhtme abil lühistada, siis tekkib ahelas vool (joonis 6.19c ja d).



Joonis 6.19. Piesoelektrilisele materjalile surve (a) ja tõmbejõu (b) F rakendamisel on elektriväli ja voltmeeter registreerib potentsiaalide vahet elektroodide vahel ning, lühistades ülemise ja alumise elektroodi, tekkib ahelas vool

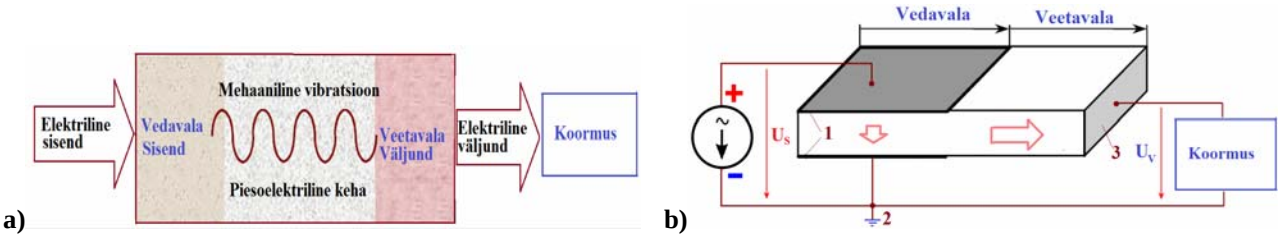
Juhul kui piesoelektrilisest materjalist keha vastastahkude vahele rakendada elektriväli, siis keha deformeerub, tekkib elastne mehaaniline pinge. Siin avaldub pöördefekt keha mehaanilise deformatsioonina elektrivälja mõjul ja kehale rakendub jõud *F* (joonis 6.20a ja b).

Mõlema, otsese ja pöördefekti alglätteks on rakukeste ebasümmeetria ja selle tulemusena elektriliste dipoolide tekitamine mehaanilise surve abil. Efekt on praktiliselt lineaarne, polariseerimine muutub otseselt vastavalt surve suurusele ja suunale (kas on surve või venitus).



Joonis 6.20. Piesoelektrilise materjali deformeerumine elektriallika elektrivälja toimel: a – vaba ning b – jõuga fikseeritud keha korral, c – elektriallika pinge on null, d – alalispinge ja e – vahelduvpinge korral

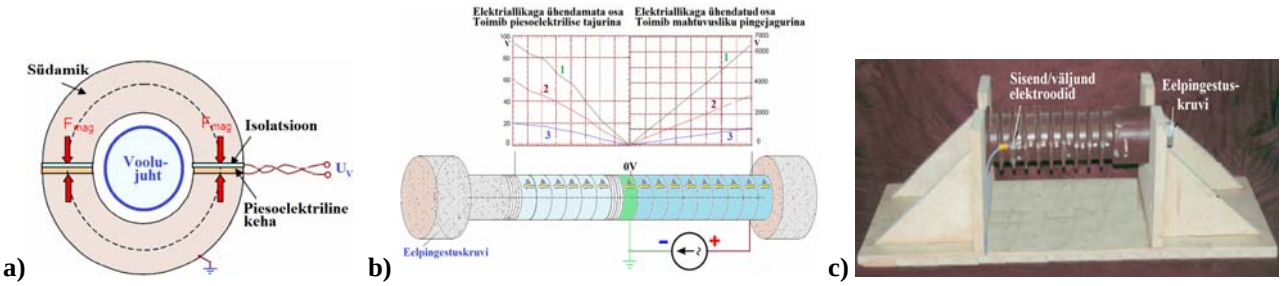
Piesoelektriline trafo. Koosneb piesoelektrilisest materjalist kehast (joonis 6.21), milles on kaks piirkonda: vedav- ja veetavala. Mõlemad alad on elektriliselt isoleeritud, kuid mehaaniliselt ergastatud. Vedavalal, nn sisendalal, kutsub mehaanilise vibratsiooni esile elektrivool. Mehaaniline vibratsioon kandub üle veetavalale, nn väljundalale, kus leiab aset mehaanilise vibratsiooni tagasimuundumine elektrisignaaliks. Seega toimub siin kaheastmeline muundusprotsess: elektriline mehaaniliseks vibratsioonienergiaks ja seejärel vastupidi. Piesoelektriline keha võib koosnda kahest kehast, mis on eritsemendiga kokku liidetud. Parim on siiski ühes tükis keha. Veetava ala elektroodidele 1 rakendatakse sisendpinge ja kehas on põiki polariseerimissuund. Veetaval alal on pikipolarisatsioon.



Joonis 6.21. Piesoelektrilises trafos elektrisignaali muundamine mehaaniliseks ja tagasi elektriliseks (a)

Elektroodidele 1 rakendatud vahelduvpinge kutsub esile mehaanilise võnkumise, mille sagedus sõltub keha geomeetriast ja trafo mehaanilisest ehitusest. See mehaaniline võnkumine kutsub sekundaarpoolel esile elektrivälja ja allikapinge tekke. Olenevalt kristallplaatide geomeetriast ja elektroodide paigutusest on väljundpinge kas madalam või kõrgem sisendpingest. Sellise ehitusega nn Rosen-trafo (1954 a C.A. Roseni leiutatud kombineeritud otsese ja kaudse piesoelektrilise efektiga mõõtetrafod) puhul sisend-väljundi galvaaniline eraldamine pole võimalik. Nende trafode väljundvõimsus on mõni kuni mõnikümmend vatti sageduste vahemikus (10 ... 100) kHz. Kõrgepinge korral on isolatsiooni probleemid palju lihtsamad kui tavatrafodel. Otsese piesoefektiga kvartskristallid suudavad genereerida mõne tuhande voldi suurust potentsiaalide vahet. Piesotrafod on ühed kõige kompaktsemad kõrgepingeallikad.

Välja on töötatud piesoelektrilised pinge ja voolu mõõtetrafod (joonis 6.22).



Joonis 6.22. Piesoelektrilise voolutrafo tajur (a) ja pingetrafo siseehitus (b) ning välisvaade (c)

Pingetrafo on mitteresonantstrafo, mis töötab jõuga fikseeritud keha korral (joonis 6.20b). Siin kasutatakse kaheastmelist energiamuundamist – elektriline mehaaniliseks vibratsioonienergiaks ja seejärel vastupidi. Voolutrafo korral genereerib magnetväli otse mehaanilised võnkumised, piesoelektriline tajur muundab need väljundpingeks. Seega toimub siin vaid mehaanilise energia muundamine elektriliseks. Väljundpinge oleneb

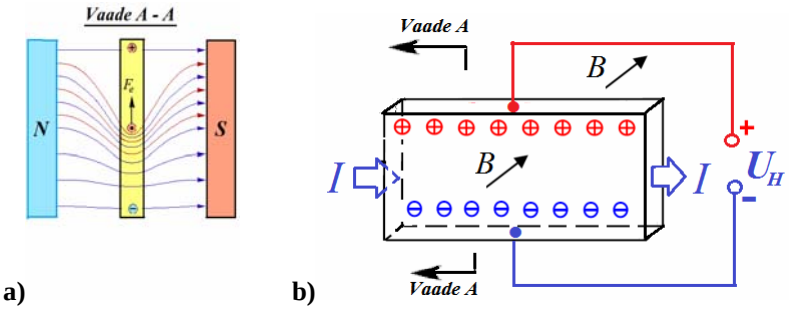
ka tajuri piesoelektrilistest tunnusjoontest ja mehaanilise kere teostusest. Mõlemal trafol on elektriline väljundsignaal võrdeline mehaanilise jõuga. Pingetrafol on see sõltuvus lineaarne, voolutrafol on ruutsõltuvus sisendvoolu ja väljundpinge vahel. Magnetjõud on võrdeline teda põhjustava voolu ruuduga.

Joonisel 6.22a on esitatud piesoelektrilise voolutrafo tajuri eskiis. Mõõdetav vool läbib kas südamikul paiknevat mähist või voolujuhti. Piesoelektriline tajur koos isolatsioonikihiga paiknevad südamiku õhupilus. Hea mehaanilise võnkumise saavutamiseks on kogu süsteem eelpingestatud. Piesoelektrilise pingetrafo (joonis 6.22b ja c) korral rakendatakse sisendkõrgepinge vaid osale tajuri sambast. Ülejäänud sambaosa on ühendusevaba. Samba ketastel, mis on ühendatud kõrgepingeallikaga, jagunevad potentsiaalilangud võrdeliselt ketaste paksusega. See on sarnane mahtuvusliku pingejaguri potentsiaalilangude jagunemisega.

Ketastel, mis pole ühendatud allikaga, on vastupidiselt ootustele samuti potentsiaalilangud, mis tekkivad põhjusel, et allikaga ühendatud ketaste vibratsioon kandub ka mitteühendatud ketastele ja kutsub esile polarisatsiooni ja elektriväljade tekke. Need kettad toimivad piesoelektriliste tajuritena. Järelikult genereerivad allikaga ühendatud sambaosa jõud ühendamata sambaosas sisendpingele võrdelise väljundpinge (joonis 6.22b). Väljundpinge suurus oleneb ketaste piesoelektrilisest tegurist ja ülekanduvate mehaaniliste võnkumiste jõust, mis omakorda sõltub eelpingestamisest. Joonisel 6.22b on esitatud piesoelektrilise pingemuunduri sisend- ja väljundpinge katselised väärtused kolme erineva muutuva pingevahemiku korral.

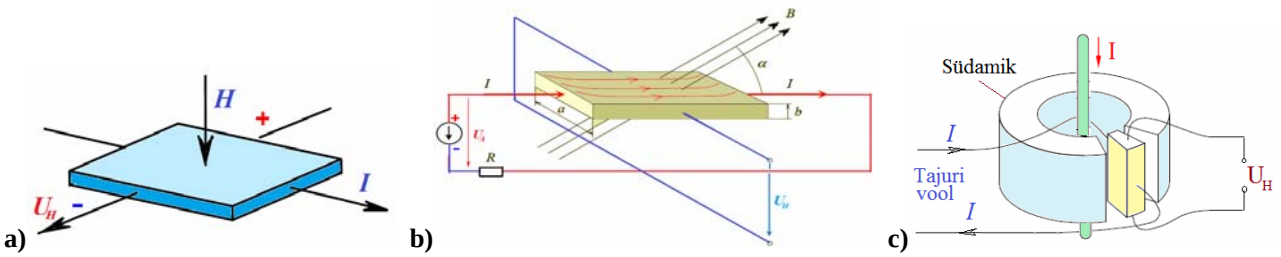
Halli efektiga mõõtetrafod

Halli efekt. Edwin Hall avastas 1879. aastal nähtuse, mis seisneb elektrivälja tekkimises magnetväljas asetsevas vooluga juhis. See kannab nüüd **Halli efekti** nime. Kui paigutada vooluga ristuvasse magnetvälja B suhteliselt õhuke ja lai juhtivast või pooljuhtmaterjalist voolujuht, mida läbib alalisvool I, siis kahe magnetvälja (elektronide ja näites püsimagneti välja) liitumisel tekkib elektronidele mõjuv jõud F_e. Selle jõu mõjul toimub elektronide liikumise osaline koondumine juhi ühte serva ning teise serva jäävad osaliselt tühjad pesad (joonis 6.23).



Joonis 6.23. Halli efekti teke õhukeses ja laias voolujuhis. Elektroni ja püsimagneti magnetväljade liitumise idee (a) ning selle tulemusel tekkiv Halli potentsiaalide vahe (b)

Seega tekkib voolujuhi voolu ja magnetväljaga paralleelsete tahkude vahel erinimeliste laengute energiaväli (elektriväli), mille potentsiaalide vahet U_H nimetatakse **Halli pingeks** (joonis 6.24).



Joonis 6.24. Halli efekt (a) ja Halli muunduri väljundpinge (b). Halli efektiga voolutrafo (c)

Seega põhjustab Halli efekti laengukandjate kõrvalekaldumine kahe magnetvälja koosmõjul voolujuhi sümmeetriateljelt risti voolu suunaga. Metallides, kus elektrone on kerge neutraalsest aatomist eemaldada, on

Halli efekt nõrk. Pooljuhtides on Halli efekt seda märgatavam, mida suurem on elektronide ja aukude liikuvuse erinevus ning mida väiksem on pooljuhi elektrijuhtivus.

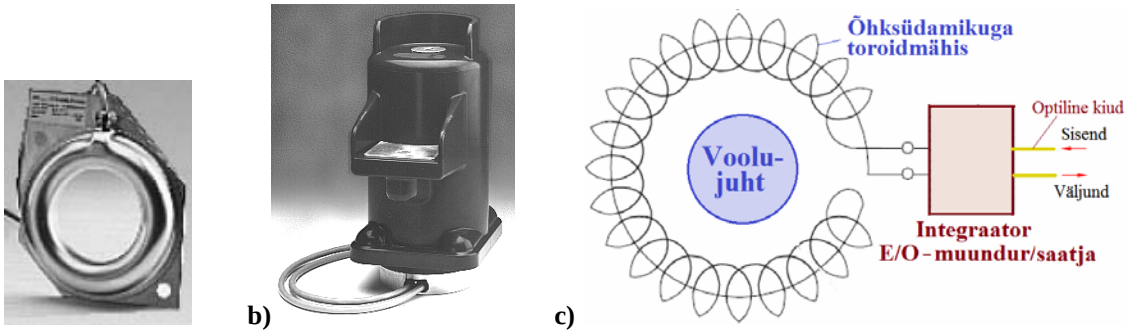
Praegu kasutatakse elektrivoolu mõõtmisel paljudes seadmetes (nt elektriarvestites) Halli efektil põhinevaid tajureid. Seda efekti saab kasutada kas voolu või magnetvoo muutuse mõõtmiseks, kuna elektrijuhi külgede vahel tekkiva potentsiaalide vahe amplituud ja märk olenevad magnetvoo ja voolu suunast ning tugevusest. Halli efekti üldjuhtumil selgitab joonis 6.24b, siin oleneb elektrijuhi külgede vahel tekkiv Halli pinge U_H elektrijuhi laiusest *a*, magnetvoo tihedusest *B*, voolu väärtusest *I*. Kui magnetväli läbib voolujuhti nurga α all, siis

$$U_H = k_H \frac{BI \sin\alpha}{b}.$$

Siin on k_H tundlikkust iseloomustav Halli tegur, mis oleneb juhi materjalist ja temperatuurist. Elektrijuhtide korral on Halli pinge väärtus mõni millivolt. Seepärast hakati Halli efekti praktiliselt kasutama koos pooljuhtmaterjalide arenguga. Tekkis võimalus sadu ja tuhandeid kordi suuremate Halli pingete genereerimiseks.

Halli efektiga voolutrafo. Vaatame voolutrafot, kus tundlikuks elemendiks on õhuke pooljuhtliistakuke, mis paikneb toroidikujulise ferromagnetsüdamiku õhupilus (joonis 6.24c). Ferromagnetsüdamik võimendab voolu I_1 magnetvälja, õhupilu muudab võimendust lineaarsemaks. See trafo vajab toidet eraldi toiteallikalt. Tajuri vool on sageli 1000 korda väiksem mõõdetava voolu suurusest. Soodsaimal juhtumil on Halli pinge võrdeline mõõdetava vooluga. Suurema tundlikkuse ja täpsuse saavutamiseks on Halli tajur samuti südamiku õhupilus, kuid tajuri vool läheb läbi paljukeerulise sekundaarmähise, mis paikneb magnetsüdamikul. Eesmärk on ära nullida südamiku õhupilus olev magnetväli. Selline teostus võimaldab saavutada väga täpset voolu mõõtmist nii alalis- kui ka kõrgsagedusvoolu korral.

Rogowski vööga voolutrafod. Rogowski vöö kujutab endast toroidalusele mähitud õhksüdamikuga pooli ehk trafot. Trafo primaarmähiseks on pooli läbiv voolujuht, sekundaarmähiseks õhksüdamikuga pool. Sekundaarpinge hetkväärtus on võrdeline primaarvoolu hetkväärtuse tuletisega. Sekundaarvoolu väärtuse saab leida sekundaarpinge integreerimisega.



Joonis 6.25. Rogowski vööga voolutajur (a) ja kombineeritud (b) pinge- ja voolutajur firmalt ABB Transmit OY (Vaasa) keskpingele. Alstom Grid grupi Rogowski vöö ja optilise muunduriga voolutajur ülikõrgepingele (c)

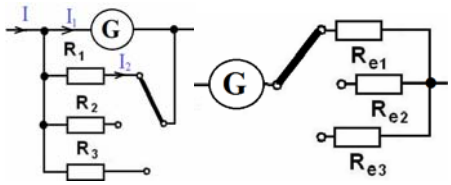
Rogowski vöö on vaba puudustest, mis kaasnevad ferromagnetsüdamiku kasutamisega mõõtetrafos. Puuduvad südamiku mittelineaarne võimendus ja hüsterees. Keskpingele toodetakse Soomes Vaasa linnas ABB Transmit Oy-s (joonis 6.25a) kombineeritud pinge- ja voolutrafosid vooludele 10 ...1600 A. Vooluanduri nimivoolud on 80, 300 ja 800 A, väljundpinge 150 mV, täpsusklass 1, mass 1 kg. Alstom Grid gruppi kuuluv Kanada firma NxtPhase on välja töötanud Rogowski vöö ülikõrgepinge anduri (joonis 6.25c), mille abitoide saadakse mõõdetavast ahelast ning mõõtetulemused maapotentsiaalile edastatakse valgusjuhi abil.

Mitme mõõtepiirkonnaga mõõteriistad. Võimalus kasutada ühe ja sama mõõtemehhanismi juures erineva suurusega sildavaid takisteid või eeltakisteid lubab ehitada riistu, millega saab mõõta pinget või voolu tugevust väga suurtes piirides.

Suure piirkonnaga mõõteriistaga saab mõõta ka väiksemaid pingeid või voolusid, kuid tulemus võib osutuda ebatäpseks. Kui meil on voltmeeter piirkonnaga 1000 V, siis vastab 10 voldile üks sajandik skaala ulatusest – kõrvalekalle, mida on silmaga raske hinnata. Kui aga asendada selle voltmeetri 10 000-oomine eeltakisti

100-oomisega, saame sama skaala ulatuseks (mõõtepiirkonnaks) 100 korda väiksema pinge 10 V. Selline voltmeeter ei sobi ka kõrgemate pingete mõõtmiseks. Seetõttu komplekteeritakse iga volt- või ampermeeter erinevate eeltakistite või sildavate takistitega (joonis 6.26).

Need paigaldatakse mõõteriista keresse ning neid saab valida kas lüliti või lisaklemmide abil.



Joonis 6.26. Mitme sildava takistiga (mõõtepiirkonnaga) ampermeeter ja mitme eeltakistiga (mõõtepiirkonnaga) voltmeeter

Mitme mõõtepiirkonna olemasolu raskendab mõõteriista gradueerimist. Enam ei saa märkida mõõtühikuid vahetult skaalale, kuna eri piirkondadele vastaksid seal erinevad numbrid. Seetõttu gradueeritakse skaala lihtsalt vastavate jaotistega ning nendele vastav pinge või voolutugevus arvutatakse nii, et jagatakse **mõõtepiirkond** jaotuste koguarvuga skaalal ning korrutatakse seejärel selle jaotise väärtusega, mille juures asub osuti. Arvutuste lihtsustamiseks püütakse mõõtepiirkonnad jagada kümnega kordsete skaalajaotistega, näiteks piirkonnad 10, 100 ja 1000 skaala 0 ... 100 jaotise korral.

Multimeetrid. Kombineerides eelkirjeldatud lülitusi, on võimalik ühte ja sama galvanomeetrit panna näitama väga erinevaid suurusi. Selliseid mõõteriistu nimetatakse multimeetriteks (kõnekeeles ka testriteks). Multimeetri esipaneelil on lülitid talitluste valikuks ning sageli ka pistikupesad juhtmete või andurite ühendamiseks. Juhtmete ja lülitite asend määrab, millisele suurusele vastav elektrivool galvanomeetrisse juhitakse. Multimeeter sisaldab tavaliselt ka vooluallikat (patareid), mis lubab näiteks takistuse mõõtmiseks vajalikku voolu tekitada väliseid pingeallikaid kasutamata. Lisaks elektrilistele suurustele mõõdavad multimeetrid sageli ka teisi suurusi, nagu temperatuur, valgustugevus jms.

Analoogmultimeeter. Multimeetreid, kus mõõtmisi tehakse tavalise (osutiga**)** galvanomeetri vahendusel, nimetatakse analoogmultimeetriteks. Seega on multimeeter universaalne elektrimõõteriist paljude elektriliste suuruste mõõtmiseks. Tavaliselt on nendel mitu mõõteskaalat erinevate suuruste tarbeks ning sageli ka tabelid või nomogrammid mõõtarvu teisendamiseks juhul, kui eraldi skaala kasutamine on võimatu. Multimeetrit (testrit) kasutatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolu tugevuse ja pinge ning elektritakistuse mõõtmiseks. Tänapäevased multimeetrid on varustatud lisavahenditega pooljuhtseadiste (dioodid ja transistorid) kontrollimiseks ja mõõtmiseks.

Joonis 6.27. Alalis- ja vahelduvvoolu analoogmultimeeter

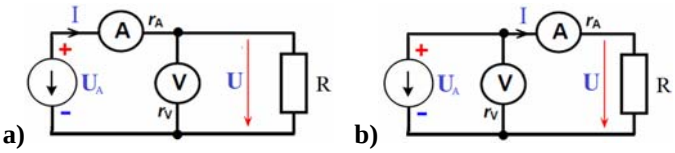
6.6. Takistuse mõõtmine

Elektritakistuse mõõtmiseks võib kasutada erinevaid meetodeid ja mõõteriistu.

Takistuse mõõtmine voltampermeetri meetodil. Alalisvooluahelais võib takistust r määrata ampermeetri ja voltmeetri abil. Kui mõõdetav takistus on suhteliselt väike, koostatakse mõõtmiseks joonisel 6.8a esitatud lülitus. Suuremate takistuste mõõtmiseks sobib paremini joonisel 6.28b näidatud lülitus.

Väikeste takistuse ligikaudne väärtus on $R \approx U/I$, tegelik $R = U/(I - U/r_V)$.

Suurte takistuse ligikaudne väärtus on $R \approx U/I$, tegelik takistus $R = U/I - r_A$.



Joonis 6.28. Takistuste mõõtmine voltmeetri ja ampermeetriga väikestel (a) ja suurtel (b) takistustel

Otsitava takistuse väärtus leitakse mõõteriistade näitude U_M ja I_M alusel: $R_x = \frac{U_M}{I_M}$. (6.3)

Täpselt oleks joonisel 6.28a esitatud lülituse puhul R_x arvutatav järgmiselt:

$$R_X = \frac{U_M}{I_r} = \frac{U_M}{I_M - U_M / R_M}. \quad (6.4)$$

Ent tingimusel, et voltmeetri takistus R_M on tunduvalt suurem mõõdetavast takistusest R_x, võib ampermeetri poolt näidatava voolu I_M lugeda võrdseks vooluga takistuses R_x. Seetõttu jääb R_x arvutamisel (6.3) järgi tekkiv viga tühiseks. Täpsete mõõtmiste korral on vaja teada voltmeetri sisetakistust R_M ja arvutamisel kasutada valemit (6.4).

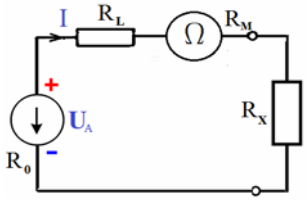
Joonisel 6.8b esitatud lülituse puhul avaldub R_x valemiga

$$R_x = \frac{U_r}{I_M} = \frac{U_M - R_M I_M}{I_M} = \frac{U_M}{I_M} - R_M. \quad (6.5)$$

Kui ampermeetri sisetakistus R_M on tunduvalt väiksem mõõdetavast takistusest R_x, võib voltmeetri poolt mõõdetava pinge U_M lugeda praktiliselt võrdseks pingega R_x klemmidel ja takistuse arvutamisel (6.3) järgi pole viga märkimisväärne. Täpsete mõõtmiste korral peab teada olema R_M ja arvutus tuleb teha (6.5) põhjal.

Elektritakistuse mõõtmine oommeetriga. Takistuse vahetuks ja kiireks mõõtmiseks kasutatakse oommeetrit. Oommeeter koosneb magnetoelektrilisest milliampermeetrist, eeltakistist ja toiteallikast (joonis 6.29). Mõõdetav takistus R_x jääb ahelasse jadamisi. Mõõteriista skaala gradueeritakse oomides.

Toiteallika konstantse allikapinge korral oleneb hälve α ainult mõõdetavast takistusest R_x, st: $\alpha = S_I I = S_I \frac{U_A}{(R_M + R_L + R_0) + R_x}$.



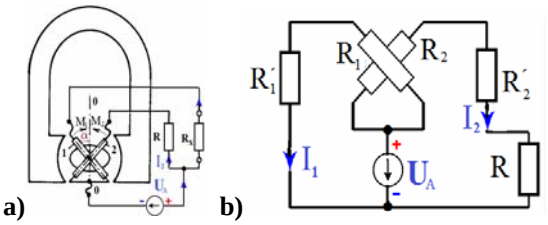
Joonis 6.29. Takistuse mõõtmine oommeetriga

Seega võib mõõteriista skaala gradueerida vahetult takistuse ühikuis. Kuna toiteallika sisepinge võib mõõtmiste käigus muutuda, pole α üheselt sõltuv mõõdetavast takistusest R_x. Tegevuse järjekord oommeetriga mõõtmisel:

- lühistada klemmid ja paigaldada 0,
- teha mõõtmine,
- korrutada mõõtmise tulemust klemmikordajaga (x1; x10; x100 või x1000).

Logomeetrid. Oommeetrite puudusest – mõõtetulemus pole üheselt sõltuv mõõdetavast takistusest R_X, on vaba **logomeeter**.

Logomeetrites kasutatakse kahe mähisega magnetoelektrilisi mõõtemehhanisme (joonis 6.30).



Joonis 6.30. Logomeeter (a) ja selle rakendamine megaoommeetris (b)

Vastumomenti tekitavad vedrud puuduvad ja kuna vool juhitakse raammähisesse elastsete momendivabade juhtmete kaudu, on mõõtemehhanismi liikuv osa ükskõikse tasakaalu asendis. Raammähiseid läbivad voolud I_1 ja I_2 loovad kaks pöördemomenti, kusjuures viimaste suurus oleneb raammähiste asendist ruumis: $M_1 = I_1 f_1(\alpha)$ ja $M_2 = I_2 f_2(\alpha)$, kus α on liikuva osa hälve lähteasendist.

Momendid M_1 ja M_2 mõjuvad vastassuunaliselt. Mõõteriista liikuv osa saavutab tasakaalu juhul, kui $M_1 = M_2$, st $I_1 f_1(\alpha) = I_2 f_2(\alpha)$. Siit $$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f(\alpha) \text{ ehk } \alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Seega on mõõteriista liikuva osa hälve määratud voolude I_1 ja I_2 suhtega. Viimane oleneb omakorda takistusest R_X. Toitepinge kõikumine mõõtetulemusele mõju ei avalda.

Isolatsioonitakistuse mõõtmine megaoommeetriga. Ajalooliselt on megaoommeeter käsiajamiga püsimagnetitega alalisvoolugeneraator pingega 500 V või 1000 V isolatsioonitakistuse mõõtmiseks. Megaoommeetrit nimetatakse ka **megeriks**. Neid kasutatakse väga suurte takistuste (näiteks juhtmete või seadmete isolatsioonitakistus) mõõtmiseks. Generaatori sisepinge küünib paari tuhande voldini. Riistas sisalduva magnetoelektrilise logomeetri (joonis 6.30b) mähiseid läbivad voolud

$$I_1 = \frac{U_A}{R_1 + R_1' + R_X} \quad \text{ja} \quad I_2 = \frac{U_A}{R_2 + R_2'}.$$

Seega oleneb mõõteriista liikuva osa hälve mõõdetavast takistusest r_x:

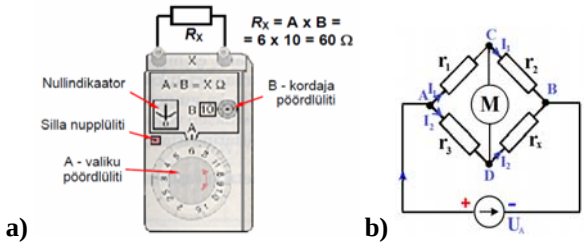
$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{R_2 + R_2'}{R_1 + R_1' + R_x}\right).$$

Megeri skaala on ebaühtlane. Moodsad megerid on digitaalsed (joonis 6.31). Väljundpinged on 500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V ja 10 000 V. Mõõteulatus kuni 1 teraoomi. Annab kasutajale ohusignaali võrgupinge olemasolust ja lugemi pingele kuni 600 V. Salvestab 99 katsetulemust koos kõigi mõõdetud suurustega. Sisaldab eritarkvara ja optilise liidese kaablit.

Joonis 6.31. Digitaalsed megaoommeetrid pingele 5000 V ja 10000 V

Elektritakistuse mõõtmine alalisvoolusillaga. Täpsemaid tulemusi takistuse mõõtmisel annab **sildlülitus**. Mõõtesild koosneb kolmest takistist R_1, R_2 ja R_3, mis koos mõõdetava takistusega R_x moodustavad suletud nelinurga *ABCD*; selle ühte diagonaali lülitatakse magnetoelektriline mõõtemehhanism ja teise toiteallikas (joonis 6.32).

Takistite R_1, R_2 ja R_3 väärtuste muutmisega mõõtesild tasakaalustatakse. Tasakaalu korral vool mõõtemehhanismis puudub. Sel juhul on punktide *C* ja *D* potentsiaalid võrdsed. Ühtlasi tähendab see, et takisteid R_1 ja R_2 läbib võrdne vool I_1 ning takisteid R_3 ja R_x vool I_2. Seega potentsiaalilangud $I_1 r_1 = I_2 r_3$ ja $I_1 r_2 = I_2 r_x$.



Joonis 6.32. Takistuse mõõtesilla lülitus (b). Mõõtesild on tavaliselt kiireks ja täpseks mõõtmiseks kujundatud kompaktse mõõteriistana (a)

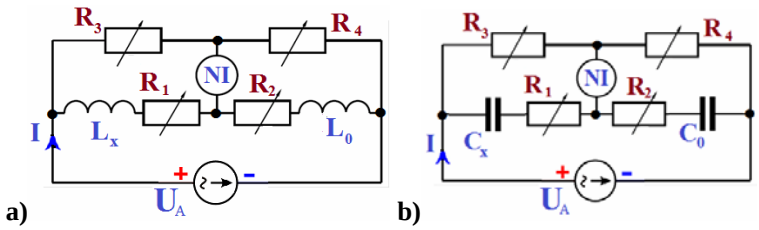
Jagades esimese võrrandi teisega, saame: $\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_x}$ ehk $r_1 r_x = r_2 r_3$, millest $r_x = \frac{r_2 r_3}{r_1}$.

Saadud avaldis on ühekordse silla tasakaalu tingimus.

Alalisvoolusillaga mõõtmisel on järgmine tegevusjärjekord:

- reostaatidega ja reguleerida mõõtesilla õlad tasakaalu (nullindikaator näitab nulli);
- arvutada takistuse suurus $r_x = \frac{r_2 r_3}{r_1}$.

Induktiivsuse ja mahtuvuse mõõtmine. **Vahelduvvoolusild** on mõõtelülitus, mida kasutatakse peamiselt elektriahelate induktiivsuse ja mahtuvuse mõõtmiseks (joonis 6.33).



Joonis 6.33. Vahelduvvoolu mõõtesilla lülitus induktiivsuse $L_X = L_0R_3/R_4$ (a) ja mahtuvuse $C_X = C_0R_3/R_4$ (b) mõõtmiseks

Mõõtmisel on soovitatav järgmine tegevusjärjekord:

- reostaatidega ja reguleerida mõõtesilla õlad tasakaalu (nullindikaator näitab nulli);
- arvutada sarnaselt takistuse määramisega otsitav induktiivsuse ja mahtuvuse suurus.

Digitaalne *LCR*-mõõtja. Nüüdisajal on põhilisteks takistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse mõõteseadmeteks erinevad digitaalsed mõõteriistad. Joonisel 6.34 olevad digitaalsed *LCR*-mõõtjad on ette nähtud mahtuvuse *C* (F – farad), induktiivsuse *L* (H – henri) ja takistuse *R* (Ω – oom) mõõtmiseks. Mõõdetav parameeter valitakse riista keskel paikneva keerdlüliti abil.

Mahtuvuse mõõtmine. Kondensaatorid tuleb enne mõõtmist tühjaks laadida. Kondensaatorite klemme ei tohi puutuda ka siis, kui nad ei ole voolu all. Suured kondensaatorid võivad sisaldada eluohtlikku laengut! Kondensaator laetakse tühjaks, lühistades läbi takisti selle klemmid. Suurte kondensaatorite tühjaklaadimiseks on olemas erivahendid. Enne mõõtmist tuleb mõõteseade kalibreerida.

Joonis 6.34. Digitaalsed *LCR*-mõõtjad induktiivsuse ja mahtuvuse mõõtmiseks

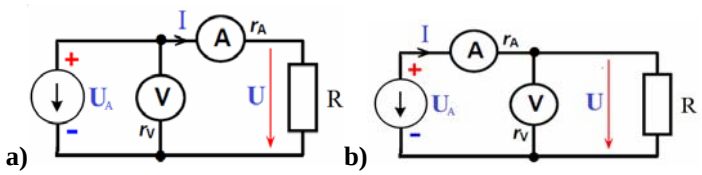
Kalibreerimiseks tuleb valida mõõtepiirkond. Selleks on vaja teada, millisesse piirkonda jääb mõõdetava elemendi mahtuvus. Kui seda aga ei teata, tuleb mõõteseadme mõõtepiirkonnaks valida esialgu 200 pF. Kalibreerimiseks tuleb kruvikeerajaga keerata 0-reguleerimisnuppu, kuni ekraanile ilmuvad nullid.

Kalibreerides mõõteseadme 200 pF mõõtepiirkonnas, on mõõteseade valmis mõõtma piirkondades 200 pF, 2 nF, 20 nF ja 200 nF. Et mõõta mahtuvust ülejäänud kõrgemates mõõtepiirkondades, tuleb mõõteseade kalibreerida mõõtepiirkonnas 2 µF. Pärast kalibreerimist on vaja ühendada mõõdetava kondensaatori klemmid mõõteriista sisendiga ja vaadata ekraanilt lugem. Kui lugemiks on 1 ilma järgnevate nullideta, ollakse liiga madalas mõõtepiirkonnas. Siis tuleb nuppu keerates valida kõrgem mõõtepiirkond ja vajadusel (näiteks juhul, kui minnakse üle mõõtepiirkonnast 200 nF piirkonda 2 µF) uuesti kalibreerida. Ümberkalibreerimisel tuleb kondensaator ajutiselt mõõteriistast lahti ühendada.

Induktiivsuse mõõtmine. Valida mõõtepiirkond. Kui seda ei teata, siis valida mõõtepiirkonnaks 200 µH. Mõõtepiirkonnad 200 µH, 2 mH, 20 mH ja 200 mH tuleb igaüks eraldi kalibreerida. Kalibreerimiseks tuleb mõõtepistikud või testjuhtmed väikese juhtmega kokku ühendada. Kruvikeerajaga keerata 0-nuppu, kuni lugemiks ekraanil on 0. Mõõtmisel ühendada mõõdetava pooli klemmid mõõteriistaga ja vaadata lugem. Kui see on 1 ilma järgnevate nullideta, lülitada mõõteriist teise mõõtepiirkonda ja vajadusel kalibreerida. Joonis 6.34 paremal: USB kaabli abil arvutiga ühendatav numbriline multimeeter.

6.7. Võimsuse mõõtmine

Võimsust alalisvooluahelates mõõdetakse voltampermeetri meetodil (joonis 6.35).
a. **Suurte võimsuste mõõtmine.** Toimub vastavalt lülitusele a. Siin saame ligikaudse võimsuse pinge ja voolu korrutisena $P \approx UI$. Lahutades koguvõimsusest ampermeetris eralduva võimsuse, saame võimsuseks koormusel $P = UI - I^2 r_A$.



Joonis 6.35. Võimsuse mõõtmine alalisvooluahelas suurte (a) ja väikeste (b) võimsuste korral

b**. Väikeste võimsuste mõõtmine.** Ligikaudse võimsuse saame samuti pinge ja voolu korrutisena $P \approx UI$. Arvestades voltmeetris eralduvat võimsust (joonis 6.35b), saame võimsuseks koormusel $P = UI - U^2 r_V$. Ligikaudu $P \approx UI$.

Võimsuse mõõtmine vattmeetriga. Alalisvoolu võimsust ja vahelduvvoolu aktiivvõimsust mõõdetakse elektrodünaamilise vattmeetriga. Mõõteriista liikumatu mähis on voolumähis ja see lülitatakse jadamisi tarbijaga. Liikuv pingemähis lülitatakse tarbijaga rööbiti. Kui vattmeetri ühe mähise klemmid ümber ühendada, siis muutub pöördemomendi suund. Õige ühenduse tagamiseks on vattmeetril nn generaatori-klemmid (toitepoolsed) tähistatud tärniga. Mõõtmisel ühendatakse generaatoriklemmid omavahel.

Aktiivvõimsust mõõdetakse elektrodünaamiliste vattmeetritega. Need mõõteriistad leiavad samuti rakendamist võimsuse mõõtmisel vahelduvvooluahelais. Joonisel 6.36 on näidatud vattmeetri lülitus ühefaasilises ahelas. Sarnane lülitus on ka alalisvooluahelas. Osuti hälve kujuneb võrdeliseks mõõdetava aktiivvõimsusega *P*. Mõõtmistel tuleb jälgida, et generaatori klemmid jääksid toiteallika poole. Õigesti ühendatud vattmeetri mähistes on voolud seega suunatud generaatoriklemmidelt mittegeneraatori-klemmidele. Generaatoriklemmid tähistatakse alati ka skeemidel. Vattmeetri mõõteväärtus vattides

$$P = \alpha C = \alpha I_p U_p / N,$$

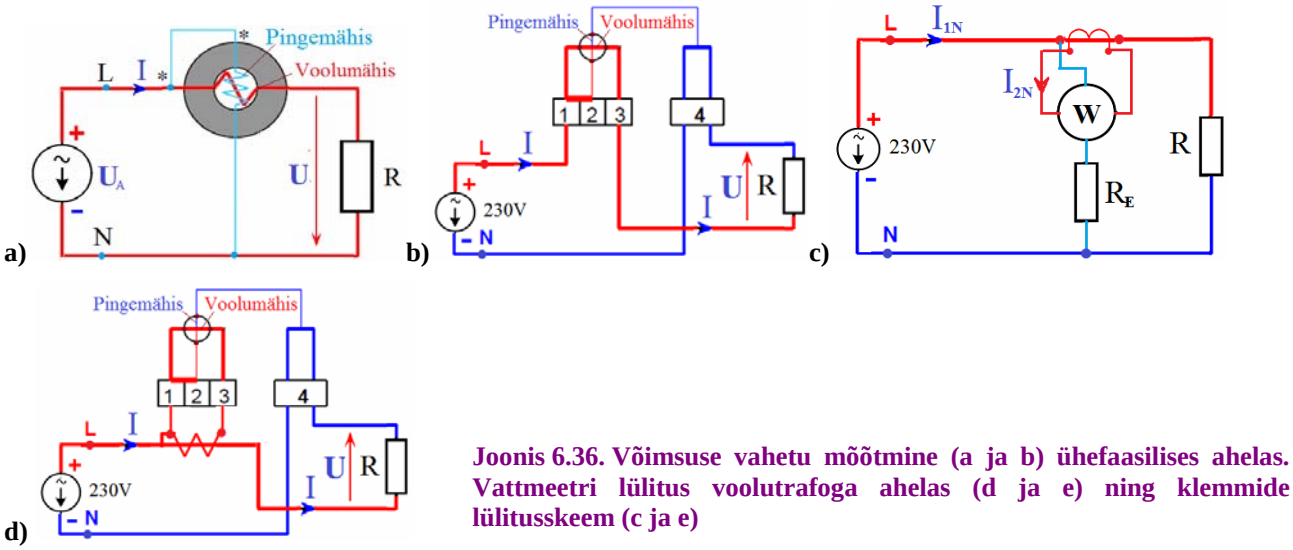
kus α – vattmeetri osuti hälve (jaotiste arv),

C – vattmeetri konstant,

U_p – vattmeetri pingepiirkond,

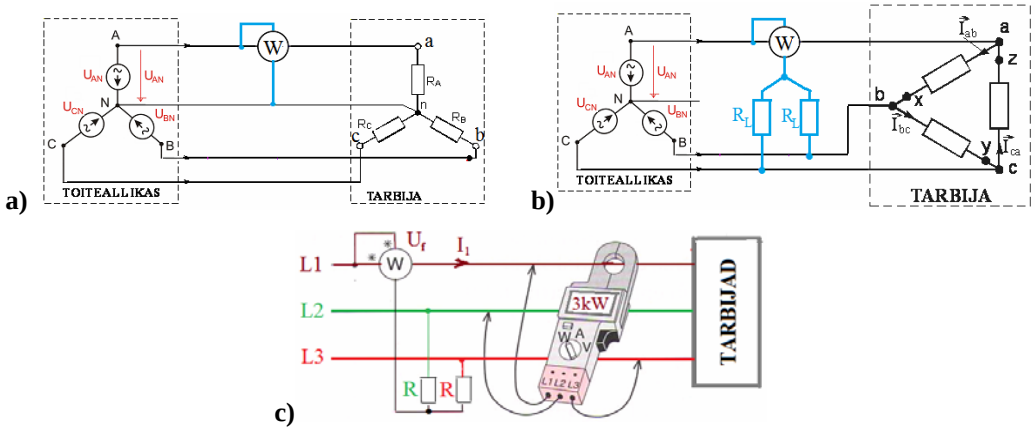
I_p – vattmeetri voolupiirkond,

N – vattmeetri skaala jaotiste üldarv.



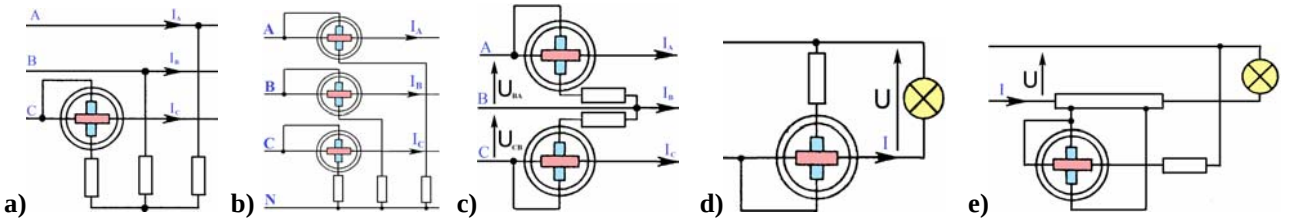
Joonis 6.36. Võimsuse vahetu mõõtmine (a ja b) ühefaasilises ahelas. Vattmeetri lülitus voolutrafoga ahelas (d ja e) ning klemmide lülitusskeem (c ja e)

Võimsuse mõõtmine kolmefaasilises ahelas. Siin kasutatakse mitmeid võtteid. Kui tegemist on sümmeetrilise koormusega, piisab aktiivvõimsuse P mõõtmiseks ühest vattmeetrist (joonis 6.37 ja 6.38a). Selleks mõõdetakse neutraaljuhi olemasolul (joonis 6.37a) ühe faasi võimsus ja korrutatakse faaside arvuga – kolmega. Kolmnurklülituse, seega kolmejuhtmelise süsteemi korral tuleb luua tehisnullpunkt (joonis 6.37b ja c). Selleks **valitakse kahe lisatakisti *R* takistuse väärtus võrdseks vattmeetri pingemähise takistusega.** Üldine ahelas tarbitav aktiivvõimsus $P = 3\ P_W$, kus P_W on vattmeetrilt loetud ühe faasi aktiivvõimsus. Joonisel 6.37c on näidatud võimsuse mõõtmine ampertangidega varustatud kaasaskantava numbrilise vattmeetriga.



Joonis 6.37. Aktiivvõimsuse mõõtmine ühe vattmeetriga sümmeetrilisel koormusel. Tarbija täht- (a) ja kolmnurklülitus (b). Mõõtmine kolmejuhtmelises süsteemis ampertangidega varustatud vattmeetriga (c)

Mittesümmeetrilise koormuse korral võib võimsust mõõta kolme vattmeetri abil (joonis 6.38b).



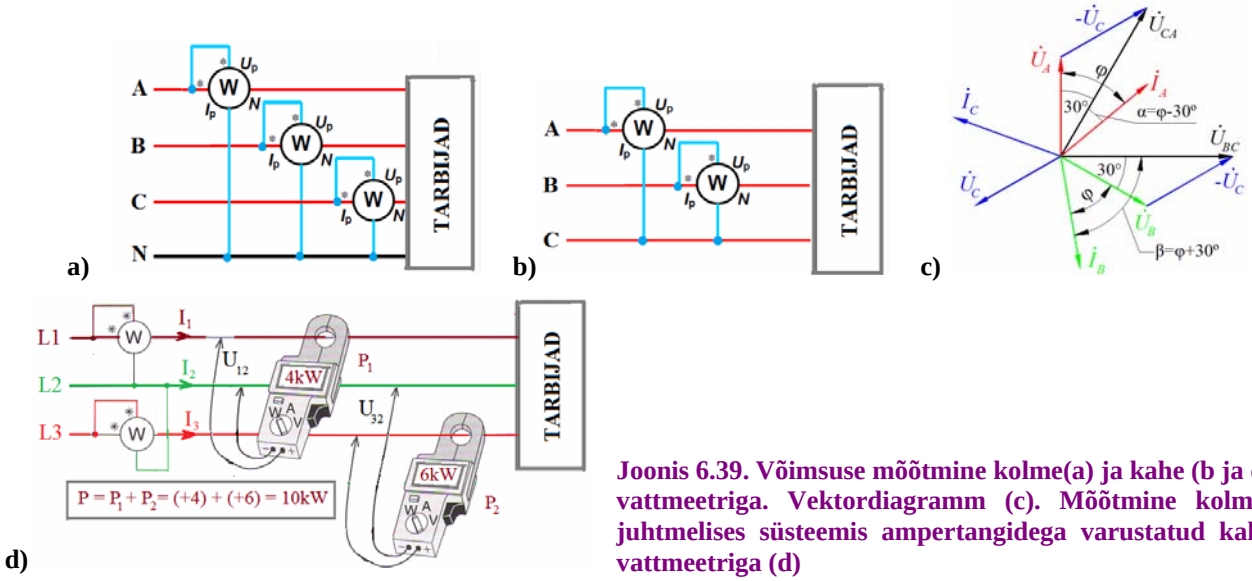
Joonis 6.38. Aktiivvõimsuse mõõtmislülitused: a – kolmefaasiline sümmeetrilise koormusega nulljuhita lülitus, b – ebasümmeetrilise koormusega neljajuhiline lülitus, c – kolmefaasiline ebasümmeetrilise koormusega nulljuhita lülitus, d – ühefaasiline lülitus, e – mõõtešundiga alalisvoolu lülitus

Iga vattmeeter mõõdab vastava faasi võimsust:

$$P_A = U_{AN} I_A \cos\varphi_A, \quad P_B = U_{BN} I_B \cos\varphi_B, \quad P_C = U_{CN} I_C \cos\varphi_C.$$

Kogu ahela võimsus $P = P_A + P_B + P_C$.

Kolmejuhtmelises süsteemis on nii sümmeetrilise kui ka mittesümmeetrilise koormuse puhul võimsuse mõõtmisel kasutusel kolme vattmeetri meetod (joonis 6.39a)**,** mis on kallim. Sama mõõtetäpsuse tagab laialt levinud **kahe vattmeetri meetod**, nn **Aroni** lülitus (joonis 6.38c ja 6.39b ning d).



Joonis 6.39. Võimsuse mõõtmine kolme(a) ja kahe (b ja d) vattmeetriga. Vektordiagramm (c). Mõõtmine kolmejuhtmelises süsteemis ampertangidega varustatud kahe vattmeetriga (d)

Kolmefaasilise süsteemi korral on kasutusel kaks faaside tähistusviisi. Algselt varasem: *A, B, C* ja nüüd hilisem: *L*1, *L*2 ja *L*3.

Vaatleme joonise 6.39b lülitust, kus mõõteriistade voolumähised on ühendatud faasidesse *A* ja *B* ning pingemähised liinipingetele U_{CA} ja U_{BC}. Loomulikult võib mähiste lülitus olla ka teistsugune, nagu näiteks joonisel 6.39d.

Ahela keskmine ehk aktiivvõimsus, väljendatuna voolu ja pinge efektiivväärtuste ning nurga α (joonis 6.39c**)** kaudu $P = U_{AC} I_A \cos(\dot{I}_A \dot{U}_{AC}) + U_{BC} I_B \cos(\dot{I}_B \dot{U}_{BC}) = P_{PW1} + P_{PW2}$.

Joonisel 6.39c esitatud vektordiagramm kujutab sümmeetrilise tähtlülituse juhtu. Liinivoolud ja liinipinged on siis võrdsed:

$$I_A = I_B = I_C = I_l, \quad U_{CA} = U_{BC} = U_l.$$

Nurk α vektorite $\dot{I}_A$ ja $\dot{U}_{AC}$ vahel võrdub $\varphi - 30°$, nurk β vektorite $\dot{I}_B$ ja $\dot{U}_{BC}$ vahel $\varphi + 30°$.

Seega, $$P = U_l I_l \cos\alpha + U_l I_l \cos\beta = U_l I_l \left[\cos(\varphi - 30^\circ) + \cos(\varphi + 30^\circ)\right] = \sqrt{3} U_l I_l \cos\varphi. \qquad (6.6)$$

Avaldisest (6.6) nähtub, et φ = 0 puhul (st puhtalt aktiivkoormuse korral) on mõlema vattmeetri näidud võrdsed. Kui φ > 60°, siis muutub ühe vattmeetri näit negatiivseks. Näidu saamiseks tuleb siis vool pingemähises muuta vastassuunaliseks, milleks on vattmeetril tavaliselt vastav ümberlüliti. Summaarse võimsuse saamiseks tuleb ümberlülitatava pingemähisega vattmeetri näit lahutada teise vattmeetri näidust.

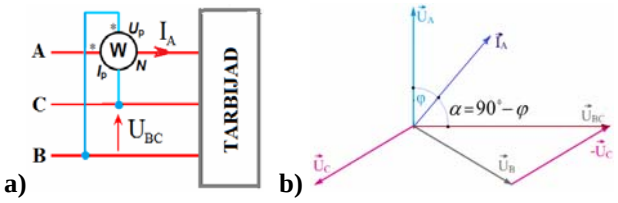
Esitatu kehtib ka ebasümmeetrilise koormuse korral, ainsa vahega, et nurkade α ja β väärtused kujunevad erinevaks siin esitatuist. Kahe vattmeetri meetod sobib võimsuse mõõtmiseks ka siis, kui tarbija on kolmnurklülituses.

Aktiivvõimsuse mõõtmisel kolmejuhtmelistes ahelates kasutati varem kaheelemendilisi elektrodünaamilisi või ferrodünaamilisi vattmeetreid, milles mõlemad mõõtemehhanismid toimivad ühisele liikuvale osale ja mähised ühendatakse eelvaadeldud kahe vattmeetri lülituse alusel. See lihtsustab oluliselt mõõtmisi, kuna langeb ära vajadus jälgida kaht mõõteriista, samuti pole tarvis teha mingeid lisaarvutusi, sest süsteemis

tarbitava võimsuse saab skaalalt otse lugeda. Tänapäeval leiavad laiemat kasutust ampertangidega varustatud numbrilised vattmeetrid. Nende kasutusnäide on joonisel 6.39d.

Reaktiivvõimsuse mõõtmiseks kolmefaasilistes süsteemides kasutatakse mitmesuguseid võtteid. Valiku määrab asjaolu, kas tegemist on sümmeetrilise või ebasümmeetrilise olukorraga. Üldiselt püütakse reaktiivvõimsuse mõõtmisel toime tulla tavaliste vattmeetritega. Sümmeetrilise koormuse korral saab reaktiivvõimsust *Q* kolmefaasilises süsteemis mõõta ühe vattmeetriga (joonis 6.40a). Selleks et vattmeetri hälve kujuneks võrdeliseks tarbitava reaktiivvõimsusega Q, tuleb vattmeeter lülitada ahelasse nii, et pinge ja voolu nihkenurk oleks $90^{o} - \varphi$. Voolumähis lülitatakse ühte liinijuhtmesse, pingemähis kahe ülejäänud liinijuhtme vahele, n-ö võõrale pingele. Vektordiagrammist (joonis 6.40b) nähtub, et sel juhul vattmeetri näit

$$Q_{PW} = U_{BC} I_A \cos(\dot{I}_A \dot{U}_{BC}) = U_l I_l \cos(90^\circ - \varphi) = U_l I_l \sin\varphi.$$

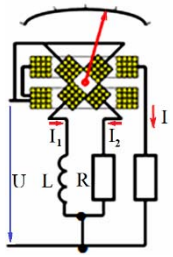


Joonis 6.40. Reaktiivvõimsuse mõõtmine ühe vattmeetriga: lülitus (a) ja vektordiagramm (b)

Ahela reaktiivvõimsuse $Q = \sqrt{3} U_l I_l \sin\varphi$ leidmiseks korrutame vattmeetri näidu $\sqrt{3}$-ga:

$$Q = \sqrt{3} Q_{PW}.$$

Võimsusteguri mõõtmine. Võimsustegurit saab määrata, kui kaudselt mõõta voolutugevust, potentsiaalilangu ja aktiivvõimsust: cos $\varphi = P/IU$. Võimsustegurit saab mõõta numbriliste ja ka elektromehaaniliste mõõteriistadega (joonis 6.41).



Joonis 6.41. Võimsusteguri mõõtmine elektrodünaamilise fasomeetriga

Võimsusteguri mõõtmine elektrodünaamilise **fasomeetriga**. Sellise fasomeetri logomeetrilise mõõtemehhanismi moodustavad kaks paigalseisvat ja kaks liikuvat pooli. Jadamisi ühendatud püsipoole läbib tarbija vool *I* ja tekitab ühtlase magnetvälja. Liikuvad poolid on kinnitatud osutiga ühisele teljele. Ühe liikuva pooli ahelas paikneb eeltakisti, mistõttu teda läbiv vool on faasis potentsiaalilanguga.

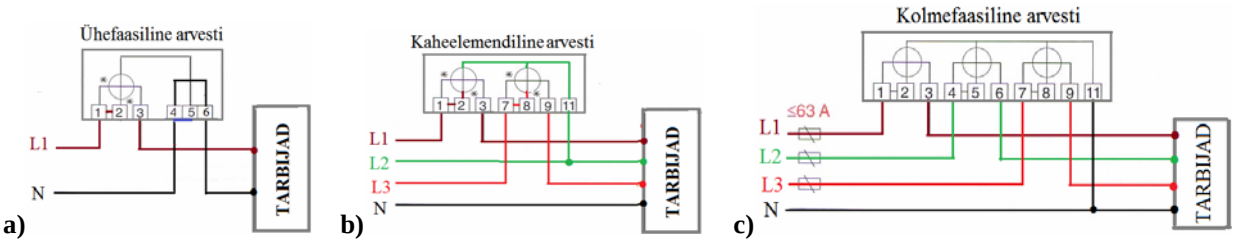
Teise liikuva pooli ahelas olev induktiivpool põhjustab voolu potentsiaalilangust mahajäämise. Seega mõjuvad mõõtemehhanismi liikuvale osale vastassuunalised momendid. Fasomeetri mõõtemehhanismi liikuva osa hälve oleneb vooluahela voolu ja potentsiaalilangu faasinihkenurgast, seega võib skaalat gradueerida võimsusteguri cos φ ühikutes. Tavaliselt varustatakse fasomeetrid kahepoolse skaalaga, kusjuures mõõteulatus võimsusteguri suhtes on +1…–1. Mõõteriista näidud olenevad sagedusest, sest sageduse muutumisel omandab teise väärtuse ka teise liikuva pooli reaktiivtakistus.

6.8. Elektrienergia ja elektrikvaliteedi mõõtmine

Elektrienergia mõõtmiseks vahelduvvooluahelais on ajalooliselt kasutatud ühe-, kahe- ja kolmeelemendilisi induktsioonisüsteemi arvesteid, alalisvooluahelais on olnud kasutatavaimad elektrodünaamilised arvestid. Praegu toimub kõikides tehnikavaldkondades üleminek numbrilisele tehnikale. Üleminekuajal on kasutusel ühe-, kahe- ja kolme kanaliga numbrilised arvestid.

Arvestite lülitusviisid aktiivenergia W_a mõõtmiseks ühe- ja kolmefaasilises ahelas on sarnased joonistel 6.37, 6.38 ja 6.39 kujutatud vattmeetrite vastavate lülitustega.

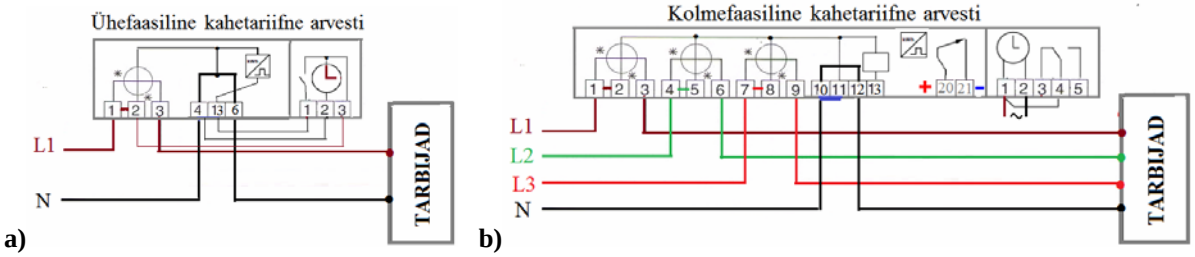
Ühefaasiliste tarbijate korral kasutatakse ühefaasilist arvestit, mille lülitusskeem on joonisel 6.42a. Sarnast lülitust kasutatakse ka sümmeetrilise kolmefaasilise tarbija korral. Siis gradueeritakse arvesti näit kolmekordseks. Mittesümmeetrilise kolmefaasilise tarbija korral saab aktiivenergiat W_a kolmefaasilises ahelas mõõta kahe- või kolmeelemendilise arvestiga (joonis 6.42b ja c). Induktsioonarvestitel koosnevad nad kahest või kolmest ühefaasilisest mõõtemehhanismist, mille elektromagnetite süsteemid mõjuvad ühisele teljele kinnitatud alumiiniumketastele. Loendurmehhanisme on üks. Kolmejuhtmelises ahelas tehakse mõõtmised kaheelemendilise arvestiga (joonis 6.42b). Mähised ühendatakse sel juhul sarnaselt kahe vattmeetri lülitusega (joonis 6.39b). Kolmeelemendilised arvestid leiavad kasutamist mõõtmistel nelja-juhtmelistes ahelates.



Joonis 6.42. Ühefaasiline arvesti (a). Kaheelemendilise arvesti lülitus (b). Kolmefaasiline arvesti (c)

Sarnaselt toimub energia arveldus ka numbrilistes arvestites. Nende tarkvara selles õpikus ei vaadelda.

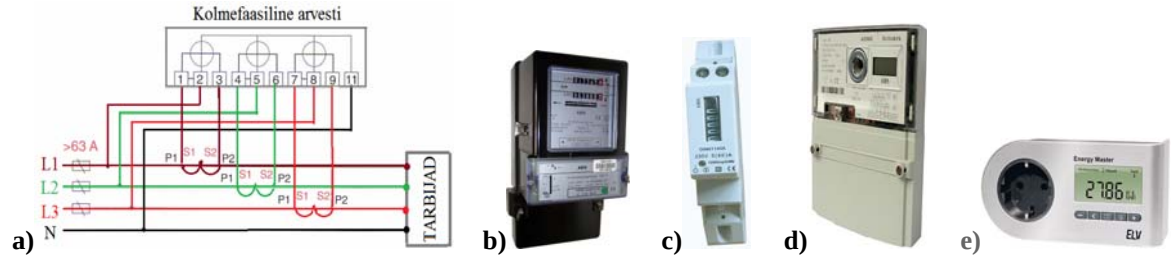
Praktikas leiavad kasutamist ühe- ja kolmefaasilised arvestid, nii induktsioon-, kuid põhiliselt numbrilised nn digitaalarvestid. Kasutatakse ühe- ja kahetariifseid arvesteid (joonis 6.43). Päeval on elektrienergia tarve suurem, öösel väiksem. Elektrijaamade tehnilis-majanduslikud näitajad on parimad nimitöö olukorras. Et koormuse ühtlustamist soodustada, on öine ja nädalalõpu elekter odavam kui tööpäevadel. Seda erinevust arvestab kahetariifne arveldussüsteem. Joonisel 6.43 on kahetariifsete arvestite lülitusskeemid. Kell tagab tariifijärgsed ümberlülimised. Näidu kauglugemiseks kasutatakse impulss- või digitaalväljundit.



Joonis 6.43. Ühe- (a) ja kolmefaasilise (b) kahetariifse arvesti lülitus

Elektrienergia mõõtmine digitaalarvestiga tugineb voolu ja pinge mõõtmisele sisemiste voolu- ja pingemuundurite abil. Pingemuunduriteks on pingejagurid, mis on kaitstud liigpingete eest. Voolumuunduriteks on võimenditega varustatud õhksüdamikuga trafod. Mõõdetud suurused kuvatakse ekraanil. Seal on ka indikaator, mis näitab, kas faas on pingestatud või mitte.

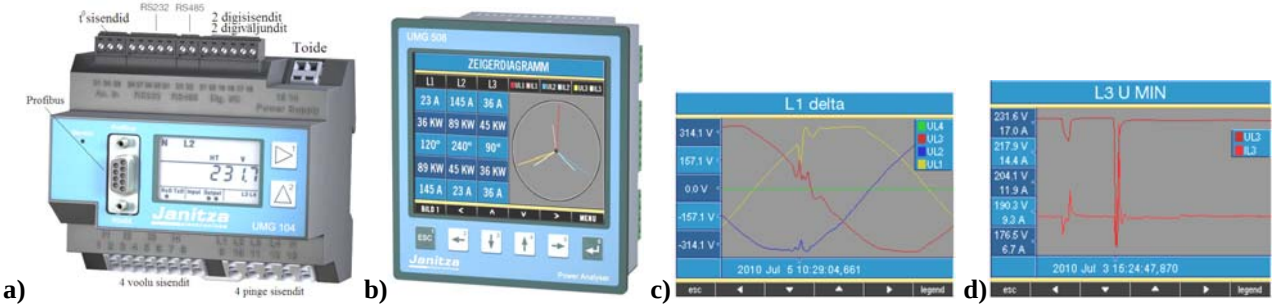
Otse mõõteahelasse lülitatavaid energiaarvesteid valmistatakse kuni 63 A suuruse nimivooluga. Võimsamate tarbijate korral kasutatakse voolutrafosid (joonis 6.44). Joonisel on arvestite kujundusnäiteid: b – kahetariifne induktsioonarvesti, c – ühe- ja d – kolmefaasiline digiarvesti. Joonisel 6.44e on esitatud pistikupesasse paigaldatav **elektritarbimise registraator**. Seade registreerib pistikupesast toidetava seadme või seadmegrupi elektri hetketarbimist. Tarbimise mõõtmine algab 0,1 W võimsusest. Seade arvutab elektritarbimise ka eurodesse, esitab kulu- ja tarbimisandmed prognoosipäevaks, nädalaks, kuuks ja aastaks. Registreerib maksimaalset ja minimaalset energiatarbimist. Omatarve: <0,4 W. Mõõdetavad suurused: *U, I,* $\cos\varphi$*, P, Q, WP, Wr, f, kWh, EUR*.



Joonis 6.44. Kolmefaasilise arvesti lülitus, kus voolusignaal võetakse voolutrafodelt (a). Ühe- (b) ja kolmefaasiline (a) digiarvesti välisvaate näide

Reaktiivenergiat W_r sümmeetrilise koormuse korral mõõdeti kahe ühefaasilise arvesti abil, mille mähised lülitatakse joonisel 6.42b toodud skeemi järgi. Energia W_r leidmiseks tuleb arvestite näitude vahe korrutada $\sqrt{3}$-ga. Digiarvestid mõõdavad tavaliselt nii aktiiv- kui ka reaktiivenergiat sümmeetrilise ja ebasümmeetrilise koormuse korral.

Võimsuse analüsaator. Tänapäeval on laialt levinud erinevad **elektritarbimise analüsaatorid (Power Analyser, Energy Analyser, Power Meter).** Nad tagavad kvaliteetsed mõõtmistulemused elektritarbimise jälgimisel ja hindamisel. Samuti on võimalik mõõta võimsustegurit ja hinnata elektrienergia kvaliteeti tarbija juures. Joonisel 6.45 on kaks Saksa firma Janitza Electronics GmbH 500 MHz signaalprotsessoriga varustatud võimsuse analüsaatorit, mida saab kasutada moraalselt vananenud analoog- ja digitaalmõõdikute väljavahetamiseks, elektritarbimisinfo kogumiseks ning analüüsimiseks kas kohapeal või juhtimiskeskuses, elektrienergia kvaliteedi jälgimiseks, registreerimiseks ning analüüsiks, seadmete ja protsesside jälgimiseks ning distantsjuhtimiseks. Neil on laiaulatuslikud mõõtmisvõimalused, harmooniliste analüüs kuni 40. harmooniliseni, siirdevoolude ja voolutõugete registreerimine ning etteantud piirväärtustega sündmuste registreerimine. Analüsaator tuvastab 50 mikrosekundist pikemad siirdeprotsessid ja seejärel salvestab. Salvestust saab taas esitada sündmuste sirvija abil.



Joonis 6.45. Firma Janitza Electronics GmbH kaks kilpi paigaldatavat võimsusanalüsaatorit. Registreeritud siirdeprotsessi (c) ja sündmuse (d) näide

Sarnaste võimalustega võimsusanalüsaatorid on tootmises ka kaasaskantavatena. Joonisel 6.46 on ühefaasiline (a) ja kolmefaasilinne (b) võimsus- ja energiaanalüsaator.

Joonis 6.46. Kaasaskantavad võimsusanalüsaatorid: a – ühefaasiline, b – ampertangidega kolmefaasiline komplekt

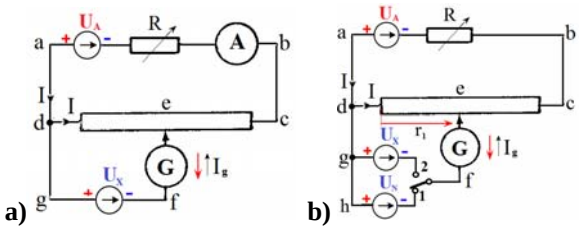
Need on pingele kuni 1000 V ja vooludele kuni 100 A. Perioodi kohta on 256 mõõtetulemust. Mälumaht on 2 GB. Salvestavad suurimad ja väikseimad väärtused. Kuvavad *U, I,* $\cos\varphi$, $\tan\varphi$, *P, Q, S, WP, Wr, f, kWh*

väärtusi. Harmooniliste analüüs toimub kuni 50. harmooniliseni. USB liides. 10 eri tüüpi häiringute arv kuni 4000. Salvestusmaht: 1 kuu minutilise näitude intervalliga.

6.9. Kompensatsioonimeetod

Kompensatsioonimeetodi puhul võrreldakse tundmatut allikapinget või pinget tuntuga.

Vastav põhimõtteskeem on joonisel 6.47a. Lülituse ülemises ahelas *abcd* kulgeb abiallikast U_A põhjustatud töövool I. Viimase suurust saab muuta reostaadi R abil. Alumisse ahelasse *defg* kuuluvad mõõdetav allikapinge U_x, galvanomeeter G ja takistus $r_k = r_{de}$ punktide *de* vahel. Viimane moodustab osa ülemisse ahelasse kuuluvast nn **kompensatsioonitakistusest** r_{dc}.



Joonis 6.47. Allikapinge mõõtmine kompensatsioonimeetodil. Põhimõtet selgitav (a) ja tegelik lülitus (b)

Reostaadi liuguri paiknemisel vasakpoolses piirasendis (skeem a) läbib vool galvanomeetrit noolega näidatud suunas ülalt alla. Kui liugurit nihutada parempoolsesse piirasendisse, siis eeldusel, et $Ir_{dc} >> U_x$, muutub voolu suund galvanomeetris vastupidiseks (must nool). Järelikult peab liugur teekonnal ühest piirasendist teise läbima punkti, kus voolu mõõteriistas pole. Niisugune olukord leiab aset juhul, kui $Ir_k = U_k = U_x$. Otsitav allikapinge U_x on niisiis tasakaalustatud ehk kompenseeritud tuntud potentsiaalilanguga $Ir_k = U_k$. Teades töövoolu I ja kompenseerivat takistust r_k, pole raske määrata U_x väärtust.

Tegelikud mõõtelülitused ampermeetrit ei sisalda. See-eest kuulub lülitusse lisaks eelkäsitletuile veel kolmas ahel *defh* (joonis 6.47b). Kompenseerimine toimub normaalelemendi U_N abil.

Liuguriga reguleeritakse välja töövool, st saavutatakse olukord, kus vool galvanomeetris puudub (lüliti on asendis *1*). Sel puhul on normaalelemendi U_N kompenseeritud töövool esile kutsutud potentsiaalilanguga takistusel. Olgu praegu punktide *d* ja *e* vaheline takistus r_1. Siit järeldub, et

$$U_N = Ir_1. \tag{6.7}$$

Nüüd viiakse lüliti asendisse *2* ja kõik kordub taas. Saavutatagu galvanomeetri nullvool seekord punktide *d* ja *e* vahelise takistuse r_2 puhul. Seega,

$$U_x = Ir_2. \tag{6.8}$$

Lahendades ühiselt seosed (6.7) ja (6.8), saame: $U_x = U_N \frac{r_2}{r_1}$.

Normaalelement annab väga püsiva väärtusega allikapinge (küllastunud elemendil 1,01860 ± 0,00010 V). Kui kompenseerimiseks kasutada täpseid takistusi, jääb kujunev mõõteviga küllalt väikeseks (alla 0,01%). Kompensatsioonimeetodi kasuks räägib ka asjaolu, et mõõtmise ajal puudub vool nii mõõdetavas kui ka normaalelemendis. Seega puuduvad potentsiaalilangud mõõteahelas ning mõõtmine toimub mõõdetavat allikat koormamata. Kompensatsiooni täpsuse tagamiseks peab galvanomeeter olema võimalikult tundlik.

6.10. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine

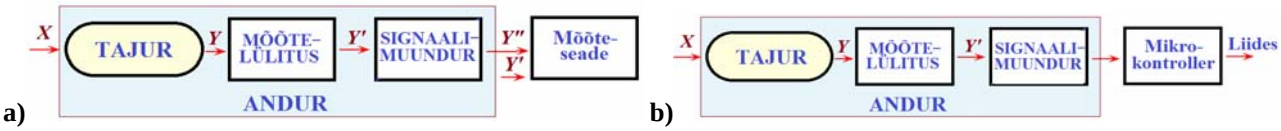
Tööstuslik tootmine pole mõeldav tehnoloogiliste protsesside range juhtimise ja kontrollita. Seejuures tuleb jälgida väga erinevaid füüsika- ja keemianähtusi. Kõige erinevamate mitteelektriliste suuruste – mehaaniliste, soojuslike, gaasi kontsentratsiooni, ainete omadusi iseloomustavate parameetrite jm määramisel kasutatakse laialdaselt elektrilisi mõõtemeetodeid ja -riistu. Need on kasutajasõbralikud, täpsed ja töökindlad.

Elektriline mõõtmine võimaldab mõõdetavaid suurusi registreerida kauge vahemaa tagant suure täpsuse ja tundlikkusega. Suhteliselt lihtne on sel viisil välja arendada tehnoloogiliste protsesside ja masinate automaatjuhtimissüsteeme. Tänapäeva mõõte- ja juhtimissüsteemid põhinevad jõuliselt areneval arvutitehnikal. Seetõttu kasvab oluliselt elektriliste mõõtemeetodite ja -riistade osatähtsus. Nad muutuvad oluliseks teguriks tava- ja tööstusautomaatikas ning omandavad järjest tähtsamat rolli süsteemide struktuurielementidena.

Mitteelektrilise suuruse mõõtmiseks elektrilisel teel tuleb mitteelektriline suurus *X* kõigepealt muundada elektriliseks suuruseks *Y*. Nimetatud ülesannet täidab **andur**, mis koosneb **tajurist, mõõtelülitusest ja normivast signaalimuundurist.** Andur peab tagama täpse funktsionaalse seose mitteelektrilise sisendsuuruse ja elektrilise väljundsuuruse vahel.

Enamikus andurites toimub mõõdetava suuruse muundamine kahes etapis. Esimeses muundatakse mitteelektriline elektriliseks, teises viiakse mõõtesignaal normeeritud kujule. Tajuri (primaarmuunduri) väljundsuuruse mõõtmiseks kasutatakse erinevaid mõõtelülitusi.

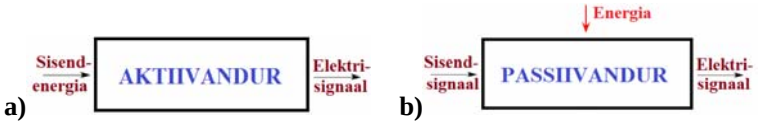
Kuna tajuri väljundsignaal vajab lisatöötlemist (liiga nõrk signaal, vajadus andurit ja mõõteseadist sobitada, näitu lineariseerida, filtreerida jm), kasutatakse **mõõtelülitust** (joonis 6.48). Seejärel teisendatakse mõõtesignaal normeeritud kujule (kasutatakse impulsskoodi muundurit või muundatakse analoogsignaal digitaalseks vms) ja edastatakse mõõteseadisele või näiteks mikrokontrollerile. Andurile järgneb tavaliselt mõõteseadis või mingi süsteemi sisend. Mõõteseadiseks võib olla number- või ka analoognäiduriist, mille näit on otse mitteelektrilise suuruse ühikuis. Suurema mõõtmistäpsuse saavutamiseks rakendatakse keerukamate süsteemide puhul mõõteahelas mõnikord tagasisidet. Andmetöötlus- või automaatikasüsteemide osana on andurid esimesed elemendid, mille ülesandeks on edastada mõõdetavat infot mitteelektrilise suuruse kohta (joonis 6.48b).



Joonis 6.48. Mitteelektrilise suuruse elektriline mõõtmine (a) ja kasutamine (b) automaatikasüsteemi sisendis

Andureid on kahte tüüpi: **aktiiv-** ja **passiivandurid** (joonis 6.49). Aktiivandur muundab ühte liiki energia teiseks ilma välise energiaallikata või ergutuseta. Passiivandur ei saa mõõdetava mitteelektrilise suuruse energiat vahetult muundada, kuid ta juhib energiat, mis tuleb teisest allikast.

Anduri teostamiseks kasutatakse erinevaid füüsikalisi nähtusi ja tööpõhimõtteid. Andur võib olla mõõdetava suurusega kontaktis või kontaktivaba. Vajadus andurite järgi on suur ja pidevalt lisandub uusi lahendusi.



Joonis 6.49. Aktiivandur (a) ja passiivandur (b)

Anduritele esitatavad põhinõuded: kõrge tundlikkus, lineaarsus, täpsus, kiiretoimelisus, lai talitlustemperatuuri- ja mõõtevahemik, häiringu- ja töökindlus, kalibreerimislihtsus, pikk eluiga, keskkonnakindlus, ohutus, väike kaal, gabariit ja hind.

Andurite liigitus. Andureid liigitatakse tajurite erinevate tunnuste alusel: näiteks muundamispõhimõtte (füüsikalised või keemilised nähtused, mille alusel nad talitlevad), eesmärgi, väljundsignaalide tüübi, materjalide ja tootmisprotsessi alusel. Kasutusel on elektrilise väljundiga mehaaniliste, termiliste, elektromagnetiliste ja optiliste suuruste tajurid. Nad toimivad erinevate füüsikaliste nähtuste alusel. Levinud on takistuse, mahtuvuse, induktiivsuse ja allikasisepinge muutustele tuginevad tajurid. Tajurite sisendsuurusteks on sageli mehaanilised, soojuslikud, elektromagnetilised või optilised suurused.

Takistuse muutusele on üles ehitatud tenso-, termistor- ja pooljuhttajurid, mis mõõdavad rõhku, jõudu, massi, paisumist, kiirendust, taset, temperatuuri, niiskust ja gaasimõõtvad andurid. **Mahtuvuse muutusele**

tuginevad rõhku, jõudu, massi, kiirendust, niiskust ja taset mõõtvad andurid. **Induktiivsuse muutuse** alusel toimivad rõhku, jõudu, massi, kiirendust, pöördemomenti, pöörete arvu ja magnetvälja mõõtvad andurid. **Optoelektroonilistele efektidele** on rajatud kiirgust, pöörete arvu, nurka, nihet ja momenti mõõtvad andurid. **Piesoelektrilisele efektile** toetuvad rõhku, jõudu, kiirendust, vahemaad, tuld, suitsu ja temperatuuri jagunemist mõõtvad andurid. **Halli efektile** on üles ehitatud jõudu, nurka, pöörete arvu ja magnetvälja mõõtvad andurid.

Kuna mehaanilisi suurusi on palju, siis toimub anduris mehaaniliste suuruste täiendav muundamine. Kasutatakse erinevate sisendsuuruste (jõu, momendi, rõhu, kiirendus**e)** taandamist mehaanilisele deformatsioonile. Selleks kasutatakse Hooke'i seadust, mille järgi on elastsete kehade deformatsioon võrdeline mõjuva jõuga.

Kasutusvaldkonna alusel jagunevad andurid järgmiselt: rõhu- ja jõuandurid; kiirus- ja kiirendusandurid; vibratsiooni- ja tasemeandurid; nihkeandurid; magnetvälja andurid; temperatuuri- ja niiskusandurid; radioaktiivse kiirguse andurid; vaakumandurid; gaasiandurid jne.

Väljundsignaali alusel jaotatakse andurid järgmiselt: analoog- ja digitaalandurid – muundavad mõõdetavad mitteelektrilised suurused vastavalt analoog- ja digitaalseteks väljundsignaalideks; pseudodigitaalsed andurid – muundavad mõõdetavad muutujad sageduseks või ajaintervalliks (vahetu või kaudne muundamin**e)**; lülitusandurid – reageerivad mõõdetava suuruse läviväärtuse (piirväärtuse) ületamisele ja lülitavad väljundsignaali madalale või kõrgele tasemele.

Andureid jaotatakse tajuri tööpõhimõtte järgi ka parameetrilisteks, generaator- ja sagedusandureiks. **Parameetrilises anduris** muundab mõõdetav suurus anduri mingit tunnussuurust – takistust R, induktiivsust L, mahtuvust C jne. **Generaatoranduris** tekitab mõõdetav suurus harilikult allikasisepinge. **Sagedusanduri** väljundsuuruseks on sagedus (või periood).

Vaatleme lähemalt mõningaid parameetrilisi tajureid. Sagedamini kasutatakse sääraseid parameetrilisi tajureid, kus mõõdetav mitteelektriline suurus mõjutab aktiivtakistust.

6.11. Mitteelektriliste suuruste tajurite iseloomustus

MEHAANILISTE SUURUSTE TAJURID

Tensotajurite töö tugineb deformatsiooniefektile, millega kaasneb elastse juhtme geomeetria ja aktiivtakistuse väike muutus. Tensotajurid on asendamatud mehaaniliste pingete mõõtmisel. Valmistatakse traat-, lint- ja pooljuhttensotajureid. Traattajur valmistatakse 0,02...0,04 mm läbimõõduga väikese takistusega temperatuuriteguri ja suure takistusega konstantaan- või kroomnikkeltraadist, mille otsad keevitatakse vasest väljundjuhtmete külge. Andur liimitakse koos õhukese alusega uuritava masinaosa pinnale. Masinaosa deformeerumisel teeb samad kujumuutused kaasa ka tajur. Takistustraadi pikkuse suhteline muutus on võrdeline takistuse suhtelise muutusega ja katsetatava masinaosa sisepingetega. Pooljuhttensotajureid valmistatakse germaaniumist, ränist, galliumarseniidist. Nende temperatuurist sõltuv tõmbetundlikkus on 50...60 korda kõrgem kui traattensotajuritel, kuid nende tunnusjoon on mittelineaarne. Kõiki tajureid valmistatakse fotokeemilistel meetoditel.

Takistustajur kujutab endast erilahendusega reostaati, mille liugur liigub sisendsuurusega – lineaar- või nurknihe vm suurus (jõud, rõhk jne), mis on eelnevalt muudetud lineaarseks või nurknihkeks. Seega on tajuri takistus R tehtud sõltuvaks mõõdetavast mitteelektrilisest suurusest $X : R = f(X)$. Jälgitava suuruse igale väärtusele vastab liuguri kindel asend, mis lubab mõõdetud takistuse väärtuse r järgi määrata väärtuse X. Takistustajur võimaldab mõõta vedelike taset ja kogust, joonnihkeid ja mitmeid teisi mehaanilisi tunnussuurusi.

Kontaktivabade takistustajurite töö võib tugineda erinevatele efektidele. Eelis on kontaktpindade hõõrdumise ja kulumise puudumine. Näitena võib tuua fotoefektil põhineva fototundlikust materjalist potentsiomeetri. Punktis, kuhu valguskiir fototundlikule alal langeb, muutub materjal juhtivaks ja moodustab kontakti. Valguskiir on siin liuguri rollis.

Magnetilised takistustajurid on takistid, mille väärtus muutub magnetvälja mõjul. Kui selline kettal paiknev takisti pöördub koos kettaga magnetvälja, siis tema takistus suureneb järsult. Mida suurem osa magnettakistist on magnetväljas, seda suurem on takistus.

Induktiivtajurid koosnevad õhupiluga magnetsüdamikule paigutatud poolist. Pooli parameetrid olenevad sisendsuurusest, milleks tavaliselt on lineaar- või nurknihe. Sisendsuuruse X mõjul muutuvad õhupilu parameetrid ja pooli magnetahela induktiivtakistus. Tajurid töötavad vahelduvvoolul. On olemas tava- ja diferentsiaaltajurid. Diferentsiaaltajurid võimaldavad tõsta tundlikkust, parendada lineaarsust ja mõõtmistäpsust. Iga induktiivtajuri võib muuta teise mõõtemähise paigutamisega magnetsüdamikule **vastastikinduktiivtajuriks** ehk **trafotajuriks**. Esimest mähist nimetatakse ergutusmähiseks. Diferentsiaaltajuritel on lisatud kaks täiendavat sekundaarmähist.

Mahtuvustajurites muundatakse mõõdetav mitteelektriline suuruse muutus mahtuvuse muutuseks. Tavaliselt on sisendsuuruseks lineaar- või nurknihe (nurgamuutus). Tajur lineaarnihke mõõtmiseks koosneb paigalseisvast ja liikuvast elektroodist, mille vahel oleva õhupilu pikkus saab muutuda. Teine võimalus on elektroodide kattumispinna muutus. Kolmas – dielektrilise läbitavuse muutus, näiteks vedelikku sukeldunud ja väljaulatuva elektroodide osa suhte muutumisel.

Otsetoime nihkedigitajuri väljundsignaal on kahendkoodis digitaalne. Siin kasutatakse loogilise 0 või 1 signaali määramiseks kahte erinevat olekut: magnetiliseks lugemiseks – mittemagneetuv või ferromagnetiline pind; elektriliseks lugemiseks – isoleeriv või juhtiv pind; optiliseks lugemiseks – läbipaistmatu või läbipaistev pind. Sageli kasutatakse optilist lugemist. Siin on igale rajale eraldi valgusallikas ja fototransistor-vastuvõtja. Vahetu kahendkoodi saamiseks tuleb saadud infot töödelda eriseadmega.

Generaator-tüüpi püsimagnettajurite töö tugineb elektromagnetilisele induktsioonile. Tajurid koosnevad püsimagnetist või elektromagnetist ja mähisest. Sisendsuuruse, lineaarse või nurkliikumise muutus kutsub esile mähise aheldusvoo ja indutseeritud allikapinge muutuse.

Liikuva mähisega püsimagnettajurid toimivad lineaarse või nurkliikumise muutusele. Indutseeritud allikapinge on võrdeline liikumiskiirusega. Kasutades integreerivat või diferentseerivat muundurit, võib väljundis saada signaali, mis on võrdeline vastavalt nihkega X või kiirendusega.

Kolmanda elemendi liikumisele tugineva püsimagnettajuri püsimagnet ja mähis seisavad paigal. Raudankur liigub magneti õhupilus ja põhjustab mähise aheldusvoo ja indutseeritud allikapinge muutuse.

Piesoelektriliste tajurite töö tugineb piesoelektrilisele efektile (p 6.5). Kui piesoelektriline materjal asetada elektrivälja, tekkib temas mehaaniline pinge või muutuvad geomeetrilised mõõtmed. Piesoelektrilised tajurid on generaator-tüüpi. Elektrilised laengud tekkivad välise jõu mõjul. Jõudude mõõtmiseks kasutatava tajuri tekitatud laengud ja pinge jäävad samaks ainult siis, kui mõõteahelal on lõpmata suur sisendtakistus. Piesotajurite töösagedused on 0,5...100 Hz. Kasutades täiendavalt ühte või kahte integreerivat elementi, võib mõõta lisaliikumisparameetreid: kiirused või amplituudid (näiteks vibratsiooni parameetrid: amplituud, kiirus ja kiirendus).

Magnetoelastsete tajurite töö tugineb magnetoelastsele efektile, mis avaldub ferromagnetiliste materjalide magnetilise läbitavuse muutuses välistest jõududest põhjustatud mehaaniliste pingete toimel. Vastupidist nähtust nimetatakse **magnetostriktiivseks** efektiks. See avaldub magnetvälja paigutatud ferromagnetiliste materjalide geomeetriliste mõõtmete muutuses. Kui ferromagnetilise eseme mõõtmed suurenevad, on see positiivne magnetostriktsioon, kui vähenevad – negatiivne magnetostriktsioon. Raual on positiivne, niklil negatiivne magnetostriktsioon. Tajuriga saab mõõta jõude, mehaanilisi pingeid ja momente. Magnetostriktiivse efekti põhjal on välja töötatud ultraheliallikaid.

Magnetoanisotroopsete tajurite töö tugineb ferromagnetiliste materjalide magnetilisel ebaühtlusel – mehaanilise mõju all eri piirkondade magnetilised läbitavused muutuvad erinevaks. Kui tajurit ei mõjuta jõud, siis materjali ebaühtlus ei avaldu ja väljundsignaal puudub. Ergutusmähise tekitatud aheldusvoog ei lõiku mõõtemähisega ja selles ei teki allikapinget. Jõu rakendumisel tekkivad südamikus mehaanilised survepinged. Positiivse magnetostriktsiooni korral väheneb magnetiline läbitavus rakendatud jõuga rööp-

suunas, jõuga ristsuunas magnetiline läbitavus aga suureneb. Selle tulemusena moonduvad magnetvälja väljajooned. Osa väljajoontest ahelduvad mõõtemähisega ja tekitavad seal jõuga võrdelise allikapinge.

TEMPERATUURITAJURID

Tajureid kasutatakse mitte ainult temperatuuri, vaid ka paljude muude termiliste protsessidega seotud mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks, nagu nihe ja mõõtmed, kiirus, gaasi ja vedeliku kulu, niiskus, gaaside keemiline analüüs jne.

Termoelektrilised ehk termopaartajurid on generaatortajurid. Neil on ulatuslik kasutusala. Termopaarid koosnevad kahest omavahel ühes punktis kokku keevitatud termilisest elektroodist. Kui nn kuuma elektroodi hoida mõõdetaval temperatuuril ja külmatugitemperatuuril, siis tekkib termoelektriline allikapinge, mis sõltub kahe temperatuuri vahest. Termilised elektroodid on valmistatud kallihinnalistest materjalidest. Neid pole mõttekas pikki teha ja seepärast kasutatakse spetsiaalseid ühendusjuhtmeid.

Termotakistustajurite takistus oleneb temperatuurist ja on piiritletud tajuri ja keskkonna vahelise soojusliku tasakaaluga. Tajuriteks on suure temperatuurisõltuvusega voolujuhid või pooljuhid. Laialdaselt kasutatakse elektrolüütilist vaske. Tööpiirkond on kuni 180 °C. Kõrgematel temperatuuridel nad oksüdeeruvad. Takistuse sõltuvus temperatuurist on lineaarne vahemikus 20 kuni 180 °C. Plaatinatermotakistid e plaatinatakistustemomeetrid sobivad kasutamiseks temperatuurini ... 1475 °C. Nad on laia levikuga, piiranguks on mittelineaarne takistuse temperatuuritegur. Kasutatakse ka nikkel- ja raudtermotakisteid.

Termotakistustajuritena kasutatakse ka pooljuhtmaterjale. **Termistortajuritel** on negatiivne, **posistoritel**, mittelineaarne positiivne takistuse temperatuuritegur. Termistortajuritel on suur eksponentsiaalne temperatuuritegur laias temperatuurivahemikus. Neid toodetakse tilga-, lameda- ja silindrikujulistena.

Soodsa hinnaga termotakistustajuritena kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks (vahemikus –80 °C kuni 150 °C) ka **termodioode** ja **termotransistore**. Tööpõhimõte tugineb päripingestatud pn-siirde takistuse mittelineaarsele temperatuurisõltuvusele.

RÕHUTAJURID

Rõhu all mõistetakse kindlale pinnale rakendatud jõu mõju. SI-süsteemi rõhuühik on Pa (Pascal). Üks Pa on määratud kui üks N (Newton) ruutmeetrile. Atmosfäärirõhuks loetakse rõhku maapinnal, merepinnal rõhu on väärtus 101,325 kPa, mis kõrguse suurenedes väheneb. Täielik vaakumirõhk on 0 Pa. Rõhutajurite ehituses kasutatakse sageli õhukest kile- või plaatvaheseina, mis paindub rõhu rakendamisel ja kõrvalekalle sõltub rakendatud rõhu suurusest.

Vastastikinduktiivne tajur. Sisaldab diferentsiaaltrafot, mille magnetsüdamik on ühendatud tajuri vaheseinaga. Rõhu muutumisel vahesein paindub, mille tulemusena diferentsiaaltrafo südamik nihkub sümmeetriateljelt ühes või teises suunas. Trafo kaks sekundaarmähist on ühendatud vastasfaasi. Primaarmähist toidetakse siinuspingega. Kui südamik on trafo sümmeetriateljel, siis väljundsignaal on null. Kui südamik nihkub, siis olenevalt nihkest väljundpinge muutub. Nihke suuna määramiseks saab kasutada faasinihet sisend- ja väljundsignaalide vahel.

Mahtuvustajuri vahesein deformeerub rõhu rakendamisel. Viimane täidab kondensaatori plaadi rolli, mille nihkudes kondensaatori mahtuvus muutub. Sobiva elektroonikaskeemiga saab mahtuvuse muutuse teisendada anduri väljundsignaali muutuseks.

Piesoelektrilisel tajuril kasutatakse vaheseinaga kontaktis oleva ühe või mitme piesokristalli piesoelektrilist efekti (punkt 6.5). Kui membraan nihkub, siis piesokristall tekitab laengu, mis oleneb vaheseinale rakendatud rõhust.

Tensotajureid kasutatakse väga laialdaselt. Nad paigutatakse deformeeruvale vaheseinale. Rõhu muutudes muutub vaheseina ja tensotajuri kuju ning tajuri takistus. Takistuse muutus vastab tajurile rakendatud rõhule.

Optilised tajurid toimivad valguse peegeldumise või ülekande põhimõttel. Esimesel paigutatakse peegel vaheseinale, mis olenevalt selle paindumisest peegeldab teatud hulgal temale suunatud valgust tagasi vastuvõtjale. Valguse ülekandega tajurites vaheseinale kinnitatud tõke vähendab rõhu tõustes vastuvõtjale langeva valguse hulka.

VOOLUHULGA TAJURID

Vedelike või gaaside liikumist torudes või avatud kanalites iseloomustatakse vooluhulga ja voolamiskiirusega. Vooluhulk on aine kogus, mis läbib torusid või avatud kanaleid kindla ajavahemiku jooksul. Vedeliku vooluhulga saab arvutada voolamiskiiruse ja läbitava toru või kanali ristlõike pindala korrutisega. **Pöörlevas vooluhulga tajuris** muundatakse propelleri või turbiini pöörlev liikumine vooluhulgaga võrdeliseks elektriliseks signaaliks. Vooluhulga suurenemisel suureneb ka rootori pöörlemiskiirus ja indutseeritav allikapinge.

Rõhu mõõtmisel põhinev vooluhulga tajur. Voolu torusse paigaldatakse kalibreeritud laieneva avaga rõhkude vahet tekitav tõke. Rõhku võrreldakse enne ja pärast tõket. Voolu väärtus määratakse rõhkude vahe alusel. **Venturi toruga vooluhulga tajur** mõõdab samuti rõhkude erinevust. Venturi toru kujutab endast torus paiknevat vahelüli, mille moodustavad kooniliselt kitsenev, väiksema läbimõõduga ja kooniliselt laienev toruosad. Rõhku võrreldakse Venturi toru kõige laiemas ja kitsaimas osas. Sarnaselt toimib ka torus paikneva **düüsiga vooluhulga tajur**.

Ultraheli vooluhulgatajurid mõõdavad ultrahelisignaali ajalist viivitust voolu läbimisel voolusuunas ja vastuvoolu. Ultrahelisignaali liikumiskiirus vedeliku voolusuunas on kiirem kui vastuvoolu. Kasutatakse pidev- või impulssultrahelisignaali aga ka Doppleri efekti. Doppleri efekt on vastuvõetava sageduse muutus signaaliallika ja/või vastuvõtja liikumisel teineteise suhtes. Sagedus suureneb, kui allikas ja vastuvõtja lähenevad, ja väheneb, kui nad kaugenevad.

Magnetinduktiivse vooluhulga tajuri töö tugineb kahe rööpelektroodi vahelises ruumis olevas magnetväljas risti väljajoontega liikuvate elektroodi vahekauguse pikkusega võrdsete mõtteliste elektrit juhtiva vedeliku voolutorudes indutseeritud allikasisepingele. Protsess sarnaneb traadist voolujuhiga (joonis 1.12). Indutseeritud allikapinge on võrdeline aine kiirusega. Need andurid on täpsed, aga kallid.

Vooluhulga keeristajurid tuginevad keeriste tekkimisele vedelikes või gaasides aine voogu paigutatud tõkke mõjul. Tajur ei sisalda liikuvaid osi. Keeriste hulk ja sagedus on võrdeline vooluhulgaga. Tajurid sobivad suurte vooluhulkade mõõtmiseks, kuid väikeste puhul on viga suurem.

Keeriste arvu mõõtmisel kasutatakse termistore, ultraheli- ja optilisi andureid.

OBJEKTI TUVASTUSTAJURID

Kontakttajuriteks objekti tuvastamisel sobivad lülitid, millel on objektiga mehaanilise kontakti tulemusel sees/väljas signaalid. Kui objektilt surve puudub, siis lüliti tagastub.

Lähedustajurid. Neil puudub kontakt liikuva objektiga. Olenevalt füüsikalisest tööpõhimõttest võib eristada on induktiiv-; pöörisvoolu-; mahtuvus- ja ultrahelitajureid **Eelis**: töökindlus, **puudus**: väljundsignaali sõltuvus mitte ainult objekti kaugusest, vaid ka selle kujust ja materjalist.

Optoelektroonilised tajurid koosnevad valgusallikast ja vastuvõtjast, mis reageerib temale langevale valgustugevusele. Vastuvõtja ignoreerib ümbritsevat valgust ja vastab ainult oma moduleeritud valgusallikale. Väga eredad valgusallikad võivad takistada tajuri tavatööd. Optiliste tajuritel on objekti tuvastuseks kolm põhimeetodit: difusioon-, barjäär- ja peegelmeetod.

Difusioonmeetodi kasutamisel peegeldub objekti möödumisel tajuri eest osa valgusallika valgusest tagasi vastuvõtjasse. Mida suurem ja siledam on objekt ning heledam selle värvus, seda kaugemalt saab objekti registreerida.

Barjäärimeetodi korral suunatakse allika valguskiir vastasolevasse vastuvõtjasse. Objekt tuvastatakse valguskiire katkemise põhjal. Optiliste tajurite puhul on barjäärimeetod parim.

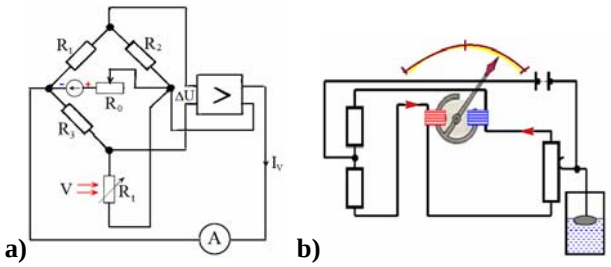
Peegelmeetodi korral peegeldab valgusallika kiire tagasi allika vastas olev peegel. See võib olla infrapunakiir või nähtav valgus. Kui objekt katkestab valguskiirt, siis tagasipeegeldunud valgusvoog väheneb ja objekt tuvastatakse. On kasutusel ka polariseerivad filtrid, mis paigutatakse valgusallika ja vastuvõtja ette ning nende polarisatsioonitasandid on pööratud 90°. Polariseeritud valgus peegeldub peeglilt, mis samuti muudab polarisatsioonitasandit, ja nii saab kiir läbida vastuvõtja polarisatsioonifiltrit. Kui valguskiir peegeldub objektilt, siis kiire polarisatsioonitasand ei muutu ja vastuvõtja polarisatsioonifilter kiirt ei edasta.

NIISKUSTAJURID

Niiskus mõjutab paljude tehnoloogiliste protsesside toodangu kvaliteeti. Seetõttu kasutatakse tööstuses laialdaselt gaaside niiskuse mõõtmist. Kasutusel on temperatuuri langusel; kondensatsioonil; imendumisel; poorsel ränil; keraamilistel materjalidel põhinevad niiskusandurid. Keraamiliste andurite peamised eelised on mehaaniline tugevus, keemiline takistus, temperatuuri- ja füüsikaline takistus, võime talitleda kõrgetel temperatuuridel.

6.12. Mitteelektriliste suuruste elektrimõõtmiste näited

Termotakistustajurites kasutatakse ära elektrijuhi või pooljuhi takistuse sõltuvus temperatuurist, ümbritseva keskkonna kiirusest, tihedusest ja koostisest. Soojusliku tasakaalu olukorras olenevad juhtme temperatuur ja elektriline takistus ühelt poolt voolu tugevusest, teiselt poolt soojuse siirdumise intensiivsusest ümbritsevasse keskkonda. Seega võib juhtme takistuse järgi otsustada soojuskadu esile kutsuvate tegurite üle. Termotakistustajurid leiavad rakendamist temperatuuri mõõtmisel (takistustermomeetrid), gaasisisalduse määramisel (gaasianalüsaatorid), gaaside liikumiskiiruse kindlakstegemisel (termoanemomeetrid). Termoanemomeeter koosneb termotakistustajurist ja automaatselt tasakaalustavast sildlülitusest (joonis 6.50a)**.** Termotakisti R_t paigutatakse uuritavasse gaasivoogu. Jõudeolukorras väljundvool I_v võimendis puudub. Liikuv gaas toimib andurile jahutavalt. Anduri temperatuur hakkab langema, mille tagajärjel sild kaotab tasakaalu. Otsekohe tekib võimendi sisendis potentsiaalilang ΔU , mis omakorda põhjustab väljundvoolu I_v tekke. Viimane kuumutab tajurit, kuni sild uuesti saavutab tasakaalu. Väljundvool I_v näitab gaasi (ka vedeliku) liikumise kiirust.



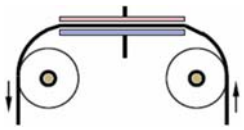
a) b)

Joonis 6.50. Takistustajuriga termoanemomeeter (a) ja vedeliku taseme mõõtja (b)

Joonisel 6.50b on esitatud takistustajuriga vedeliku tasememõõtja näide. Olenevalt vedeliku tasemest liigutab ujuk paagis reostaadi liugkontakti kas üles või alla. Nii rikutakse täiturelemendi mähistes voolude võrdsust. Seetõttu kaldub mõõturi osuti etteantud tasemest (osuti on keskel) kas vasakule või paremale.

Mahtuvusanduriks on lame- või silinderkondensaator, mille mahtuvus oleneb mõõdetavast mitteelektrilisest suurusest. Viimane võib olla talitluslikult seotud kondensaatori elektroodide pinna suurusega, elektroodide vahekauguse või dielektriku läbitavusega.

Joonisel 6.51 on mahtuvusanduriga paksusemõõtja kasutamiseidee. Siin muutub anduri mahtuvus materjali paksuse muutudes.



Joonis 6.51. Mahtuvusanduriga materjali paksuse mõõtja

Induktiivandurit kasutatakse nihete, jõu, lehtmaterjali paksuse määramisel. Anduris oleneb elektromagneti õhupilu laius mõõdetavast mehaanilisest suurusest.

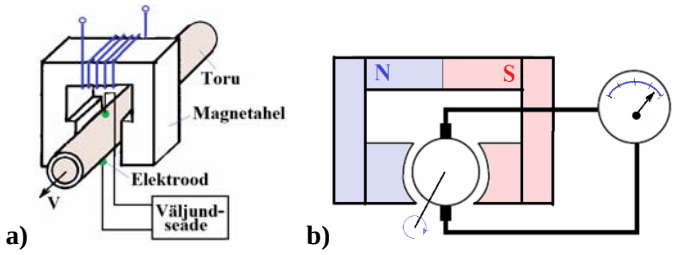
Generaatorandureist on levinuimad termoelektrilised, induktsioon- ja piesoelektrilised andurid.

Termoelektrilisi andureid kasutatakse peaasjalikult temperatuuri mõõtmiseks. Anduri põhilüliks on termopaar, mille töötav ots paigutatakse uuritavasse keskkonda. Tekkiv termoallika sisepinge oleneb termopaari töötava ja vabade otste temperatuuride vahest. Põhiliselt kasutatakse termopaare koos automaatse

potentsiomeetritega. Meerik lubab jälgitava temperatuuri ka üles märkida. Samuti saab temperatuuri reguleerida automaatpotentsiomeetri vahendusel. Lihtsamal juhul ühendatakse termopaar magnetoelektrilise mõõtemehhanismiga, mille skaala on gradueeritud temperatuuriühikuis.

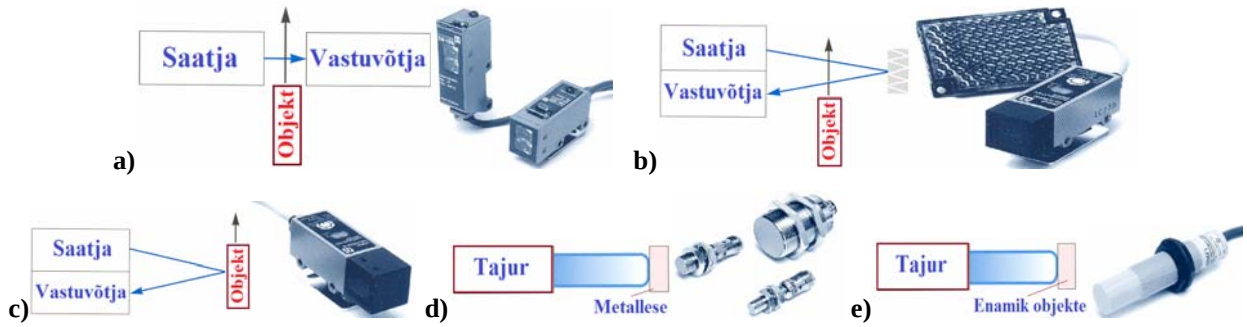
Induktsioonanduris indutseeritakse allikasisepinge mõõdetava mitteelektrilise suuruse (joonnihke, pöörlemissageduse jne) toimel. Joonisel 6.52a on näidatud elektromagnetilise kulumõõturi ehitus. Mittemagnetmaterjalist toru kaudu suunatakse elektrit juhtiv vedelik läbi vahelduvvooluga toidetava elektromagneti magnetvälja. Selle tagajärjel juhitakse vedelikus indutseeritud allikasisepinge kahe elektroodi abil mõõteseadme sisendisse. Allikasisepinge suuruse järgi saab otsustada toru läbinud vedeliku hulga üle. Kulumõõtur toimib inertsivabalt. Vedeliku füüsikalistest tunnussuurustest (rõhust, temperatuurist, tihedusest jne) näit ei sõltu.

Joonisel 6.52b on induktsioontahhomeetri eskiis. See kujutab endast väikest alalisvoolugeneraatorit. Magnetahel koosneb terasikkest, püsimagnetist ja pooluskingadest, mille vahel pöörleb mähistega varustatud ankur. Ankru mähistes indutseeritakse allikasisepinge, mis on võrdeline jälgitava pöörlemiskiirusega.



Joonis 6.52. Elektromagnetiline kulumõõtur (a) ja induktsioontahhomeeter (b).

Optilised andurid. Valgusallikast ja vastuvõtjast koosnev optoelektrooniline andur (joonis 6.53a) reageerib vastuvõtjas saatja signaali katkestamisele liikuva objekti poolt. See on töökindel ja vanim meetod. Saatja ja objekti vahekaugus võib ulatuda 30 meetrini. Joonisel 6.53b on lahendus, kus valgusallikas ja vastuvõtja paiknevad koos ja saatja valguskiir suunatakse peegli kaudu vastuvõtjasse. Joonisel 6.53b objekti möödumisel tajurist peegeldub osa valguskiirest tagasi vastuvõtjasse.



Joonis 6.53. Optoelektroonilised andurid: a ja b – valguskiire katkestamisega, c – objektilt tagasipeegeldumisega andur; induktiivne (d) ning mahtuvuslik (e) lähedustajur firmalt OMRON

Joonisel 6.54a, b, c on toodud kolme gaasianduri välisvaade. Joonisel 6.54d on ülitäpne pöördenurga andur, millel ühe ringi peal on 8192 fikseeritavat asendit ning joonisel 6.54e magnetiline pöördenurga digiandur.

Joonis 6.54. Gaasiandurid (a, b, c) ning ülitäpne (d) ja magnetiline pöördenurga digiandur (e)

Elektrikaare andurid. Registreerivad elektrikaarega kaasnevat valguskiirgust või ahelas pinge, takistuse või voolu muutust või temperatuuri ja rõhu muutusele jaotusseadme osas.

Need on lihtsamad näited mitteelektriliste suuruste elektrilise mõõtmise kohta. Igapäevases mõõtepraktikas tuleb kasutada tunduvalt keerukamaid lülitusi. Olgu tähendatud, et üht ja sama liiki andurit saab kasutada erisuguste mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks või jälgimiseks. Sageli töötavad mõõtelülitused koos elektronvõimendiga, et tagada suuremat mõõtetäpsust.

Eesti keeles on andurite alal olemas piisavalt põhjalikud õpikud:

1. T. Lehtla. Andurid. Tallinn: TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut, 1996. 124 lk.

2. Z. Nenova, S. Ivanov, T. Nenov. Andurid tööstusautomaatikas. Tallinn: TTÜ elektriajamite ja jõuelektroonika instituut, 2011. 111 lk.

3. A. Annus, H. Lind, M. Tarma. Andurid. Tallinn: Valgus, 1958. 244 lk.

6.13. Kordamisküsimused

1. Mõõtmistehnika põhimõisted.
2. Kuidas liigitatakse mõõtevead?
3. Voolu mõõtmise viisid.
4. Pinge mõõtmise viisid.
5. Uudsete mõõtetrafode ideed.
6. Takistuse mõõtmine.
7. Võimsuse mõõtmine
8. Elektrienergia ja elektrienergia kvaliteedi mõõtmine.
9. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine.
10. Mitteelektriliste suuruste tajurite iseloomustus.
11. Mitteelektriliste suuruste elektrimõõtmiste näited.

7. MÕÕTERIISTAD

7.1. Põhimõisted
7.2. Elektromehaaniliste mõõteriistade ehitus
7.3. Magnetelektriline mõõtemehhanism. Tingtähis
7.4. Elektromagnetiline mõõtemehhanism. Tingtähis
7.5. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism. Tingtähis
7.6. Induktsioonmõõtemehhanism. Tingtähis . Halli anduriga elektriarvesti.
7.7. Elektronmõõteriistad
7.8. Numbermõõteriistad
7.9. Meerikud ja ostsillograafid (ostsilloskoobid)
7.10. Elektritarbimise ja -kvaliteedi mõõteriistad
7.11. Elektrimõõteriistade tingmärgid
7.12. Kordamisküsimused

7.1. Põhimõisted

Elektriseadmete talitluse jälgimiseks toodetava ja tarbitava elektrienergia arvestamiseks on kasutusel mitmesugused elektrimõõteriistad. **Elektrimõõteriistaks** nimetatakse seadet, mille ülesandeks on mingi suuruse võrdlemine mõõtühikuga. Nad mõõdavad voolu, pinget, võimsust, võimsustegurit, sagedust, elektrienergiat jm. Osa elektrimõõteriistu on ette nähtud elektriseadmete seisundi määramiseks (isolatsiooni kontroll, takistuse mõõtmine).

Üha ulatuslikumalt rakendatakse elektrimõõtmisi kõigis mõõtetehnika harudes, sest teiste võtetega võrreldes tagavad elektrilised moodused suure mõõtmistäpsuse ja kõrge tundlikkuse, nõuavad vähe aega ning on lihtsalt teostatavad.

Tänapäeval toimub jõuline üleminek analoogtehnikalt digitehnikale. Analoogmõõteriistad on veel osaliselt kasutusel kilbi-, õppe- ja teaduslaborite mõõteriistadena. Võib täheldada ka elektrimõõteriistadele esitatavate nõuete teisenemist. Üksikmõõtmine ei anna alati usaldatavat pilti jälgitavast nähtusest. Seepärast eelistatakse keerukamatel juhtudel mõõteinformatsiooni voogu, mis omakorda tingib ülemineku üksikmõõteriistadelt keerukatele mõõtesüsteemidele.

Enamik elektrimõõteriistu, näiteks ampermeetrid, voltmeetrid jm näitavad elektrilise suuruse väärtust mõõtmise hetkel. Selliseid mõõteriistu nimetatakse analoog- ehk **näidumõõteriistadeks**. Mõõteriistu, mis annavad mõõtmistulemuse diagrammina või numbriliselt, nimetatakse **registreerivateks mõõteriistadeks** ehk **meerikuteks**.

Elektrimõõteriistad jagunevad **näidumõõteriistadeks** ja **võrdlusmõõteriistadeks**. Esimeste hulka kuuluvad numbrilise näiduga ja osutimõõteriistad ning arvestid. Võrdlusmõõteriistadeks on kompensatsiooniriistad ja mõõtesillad.

Näidumõõteriistadest on kõige kauem kasutatud elektromehaanilisi mõõteriistu, milles mõõteriista liikuva osa hälve saadakse magnet- või elektriväljade liitmise tulemusena.

Tööpõhimõttelt jagunevad elektromehaaniliste näidumõõteriistade mõõtemehhanismid järgmiselt: magnet-elektrilised, elektromagnetilised, elektrodünaamilised, ferrodünaamilised, induktsioonsüsteemilised, elektrostaatilised ja magnetinduktsioonmõõtemehhanismid. Meie käsitleme lühidalt esimest viit liiki mõõtemehhanisme. Enamikku elektrimõõteriistu saab kasutada mõõtmiseks kas ainult alalisvoolu- või ainult vahelduvvooluahelates. Kuid on olemas ka nn universaalsed mõõteriistad, millega saab mõõta nii alalis- kui vahelduvvoolu või -pinget.

Sageli kasutatakse elektrimõõteriistu mitte üksnes mõõdetava väärtuse teadasaamiseks, vaid ka signalisatsiooniks, kontrolliks ja juhtimiseks. Seesugune funktsioonide avardumine suurendab toodetavate mõõtevahendite nimestikku ja muudab rangemaks neile esitatavad metroloogilised nõuded. Iseäranis jõudsalt

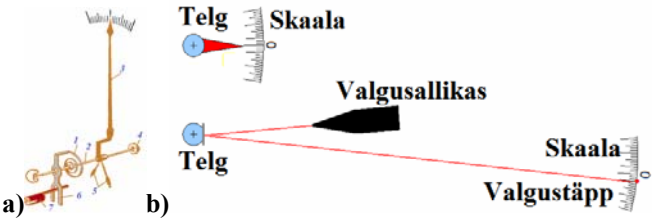
areneb viimasel ajal numbermõõtetehnika. Põhiliselt levivad jälgivmõõtesüsteemid, mis võimaldavad kontrollida massilisi mõõtmistulemusi ja kiiresti töödelda neid infotöötluslülis või arvutil.

7.2. Elektromehaaniliste mõõteriistade ehitus

Elektrimõõteriistad koosnevad kolmest põhilülist: mõõteahelast, mõõtemehhanismist ja lugemisseadisest. Enamasti ei saa mõõdetav suurus (pinge, takistus, võimsus jne) vahetult esile kutsuda mõõteriista liikuva osa hälvet. Sellisel juhul kasutatakse mõõdetavat suurust abisuuruse – voolu – saamiseks, mille magnetväli saab liitudes mõõteriista magnetväljaga põhjustada hälbe. Loomulikult peab see abisuurus olema mõõdetava suurusega üksüheses sõltuvuses.

Mõõteahela ülesandeks ongi mõõdetava suuruse muundamine niisuguseks elektriliseks suuruseks, mis vahetult mõjutab mõõtemehhanismi.

Mõõtemehhanism muundab mõõteahelast saabuva elektrienergia mõõteriista liikuva osa (joonis 7.1a) liikumapanemiseks vajaminevaks mehaaniliseks energiaks. Iga mõõteriista mõõtemehhanism koosneb liikumatust ja liikuvast osast. Liikuva osa pöördenurga (harvemini joonnihke) järgi määratakse mõõdetava suuruse väärtus. Seega avaldab mõõdetav suurus X mõju mõõtemehhanismile, andes viimasele üle mingi energiahulga ja kutsudes sellega esile liikuva osa pöördumise mõõdetavast suurusest oleneva nurga α võrra: $\alpha = f(X)$. Väikese pöördemomendiga täpsetel mõõteriistadel kasutatakse valgusnäidikut – mõõtemehhanismi liikuva osa teljele kinnitatud peeglike suunab mõõteriista sees paiknevast valgusallikast pärineva valguskiire skaalale, mistõttu seal saadakse liikuv valgustäpp.



Joonis 7.1. Mõõtemehhanismi liikuva osa ehitus (a), pöördtelje ja osutiga ning valgusallika ja peegelskaalaga täppismõõtesüsteem (b): 1 – spiraalvedru; 2 – telg (mõnedel mõõteriistadel poolteljed); 3 – osuti; 4 – tugilaager; 5 – vastukaalud; 6 – korrektori hark; 7 – korrektorkruvi

Lihtsamal juhul on mõõteriista liikuva osa hälve α võrdeline mõõdetava suurusega X: $\alpha = SX$.

Suurust S = α/X nimetatakse mõõteriista **tundlikkuseks**.

Üldjuhul määratakse tundlikkus mõõteriista liikuva osa pöördenurga juurdekasvu ja vastava mõõdetava suuruse juurdekasvu suhte piirväärtusena.

Seega, $$S = \left| \lim \frac{\Delta\alpha}{\Delta X} \right|_{x \to 0} = \frac{d\alpha}{dX}.$$

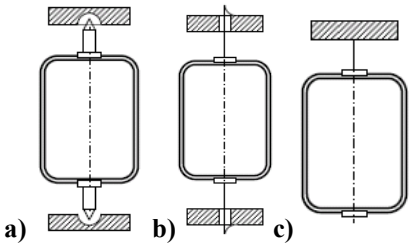
Mõõdetav suurus $$X = \frac{\alpha}{S} = C\alpha,$$

kus $C = 1/S$ on **mõõteriista konstant**. Mõõteriista konstant on arvuliselt võrdne mõõdetava suuruse väärtusega, mis vastab ühele skaalajaotisele. Eriti tuleb seda konstanti silmas pidada mitme mõõtepiirkonnaga riistade puhul. Eri piirkondade tarvis kujuneb konstant isesuguseks. Mõõdetav väärtus leitakse hälbe (skaalajaotises) korrutamisel mõõteriista konstandiga.

Tavaliselt kannab mõõtemehhanismi liikuvat osa telg (või kaks pooltelge), mille teritatud otsad – **kärnid** – on hõõrdumise vähendamiseks paigutatud pronksist laagritesse (joonis 7.2a). Väga harva kasutatakse vääriskivist (rubiin, ahhaat) laagrit. Valmistatakse ka mõõteriistu, mille liikuv osa ripub tõmmitsail (joonis 7.2b) või riputil (joonis 7.2c). Teljele kinnitatakse veel osuti koos vastukaaludega ja **aktiivosa**, milleks võib olla pool, terassüdamik, alumiiniumketas.

Mõõteriistas tekkiv pöördemoment M oleneb temas energia W_m muutumise kiirusest pöördenurga α järgi:

$$M = \frac{\partial W_m}{\partial \alpha}.$$



Joonis 7.2. Mõõteriista liikuva osa kinnitus kärnidel (a), tõmmitsail (b) ja riputil (c)

Selleks et igale mõõdetava suuruse väärtusele vastaks mõõteriista liikuva osa kindel hälve, tuleb pöördemoment tasakaalustada vastassuunalise pöördenurgast oleneva momendiga. Vastumomenti võib tekitada mitmeti. Eristatakse mehaanilise ja magnetilise vastumomendiga elektrimõõteriistu ning logomeetreid.

Enamikus näidumõõteriistades rakendatav mehaaniline vastumoment tekitatakse spiraalvedrude või tõmmitsate abil. Sobivaks materjaliks on pronks või ka muud mittemagnetilised sulamid. Sel viisil saadav vastumoment on rangelt võrdeline pöördenurgaga.

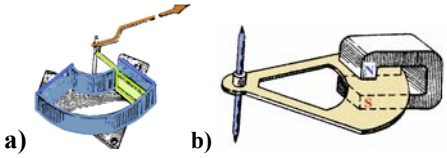
$$M_v = K\alpha,$$

kus K on erivastumoment, mis iseloomustab vedru jäikust ja on antud mõõteriista jaoks püsiv suurus. Magnetiline vastumoment saadakse mõningates elektrimõõteriistades liikuva ja liikumatu püsimagneti vastastikusel toimel. Logomeetrites tekitatakse nii vastu- kui ka pöördemoment elektromagnetiliste jõudude toimel.

Mõõteriista lülitamine uuritavasse elektriahelasse muudab paratamatult teataval määral ahela loomulikku tööolukorda, sest hälbe andmiseks tarbib mõõteriist energiat. Väikesevõimsuseliste koormuste mõõtmisel võib mõõteriista omatarve mõõtmistulemusi moonutada. Seepärast püütakse mõõtemehhanismid ehitada nii, et omatarve jääks minimaalseks.

Lugemisseadis ühendab endas näidiku ja mõõteskaala. Tehnilistel mõõteriistadel on harilik skaala ja näidikuks osuti. Kõrgema klassi mõõteriistad varustatakse peegelskaala ja nugaosutiga. Väikese pöördmomendiga täpsetel mõõteriistadel kasutatakse valgusnäidikut – mõõtemehhanismi teljele kinnitatud peeglike suunab riista sees paiknevast valgusallikast pärineva valguskiire skaalale, mistõttu seal saadakse liikuv valgustäpp.

Mõõdetava suuruse muutumisel siirdub mõõteriista liikuv osa uude tasakaaluasendisse. Et üleminek oleks kiire ja samal ajal sujuv, on kõik näidumõõteriistad varustatud summutiga, mis summutab osuti võnkumised sel momendil, kui osuti kaldub mõõtemehhanismi liikuva osa mõjul vajaliku skaalajaotuseni. Tööpõhimõtte ja ehituse järgi eristatakse õhk- ja magnetinduktsioonsummuteid. **Õhksummuti** töötab silindri sees liikuvale kolvile mõjuva õhurõhu erinevuse tõttu, mis pidurdab kolvi liikumist. Tekkiv summutusmoment oleneb riista liikuva osa liikumiskiirusest. **Magnetinduktsioonsummuti** tööpõhimõte on järgmine. Mõõtemehhanismi liikuvale osale kinnitatud alumiiniumleht (joonis 7.3b) liigub püsimagneti magnetväljas.



Joonis 7.3. Õhk- (a) ja magnetinduktsioonsummuti (b)

Mõttelised lehesisesed voolujuhid lõikavad välja väljajooni, tekkib aheldusvoo muutumine ajas, indutseeritakse allikasisepinged, mis tekitavad voolu, mille ümber tekkib magnetväli. Algse väljaga liitub alumiiniumlehe voolude väli, magnetvälja salvestatud energia suureneb, ebaühtlase jaotusega koguväli tekitab lehesisestele voolujuhtidele mõjuvad pidurdavad jõud (täiendav magnetväljaenergia muundub pidurdavaks mehaaniliseks energiaks).

Põhiliselt on levinud õhk- ja magnetinduktsioonsummutid (joonis 7.3). On olemas ka suhteliselt väikese töökindlusega vedeliksummutid, mis piirab nende levi.

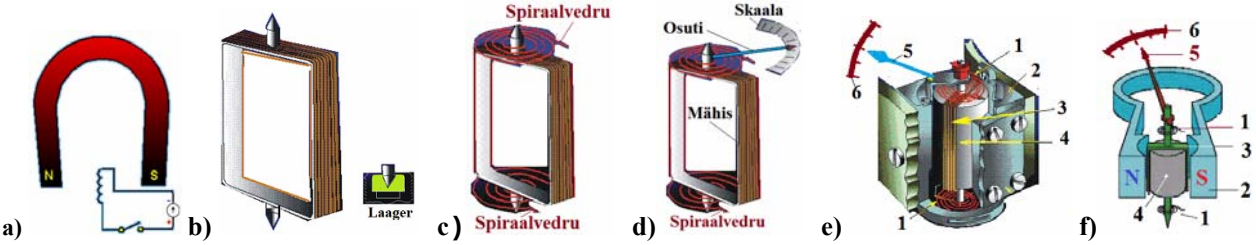
Mõõteriista näit ei lange mõõteahela tunnussuuruste mittepüsivuse ja mõõtemehhanismi ehituslike puudujääkide tõttu kunagi päris täpselt kokku mõõdetava suuruse tegeliku väärtusega. Seega on igal mõõteriistal teatav viga. Eristatakse põhi- ja lisaviga. **Põhivea** määravad mõõteriista seesmised tegurid (hõõrdumine, liikuvate osade tasakaalustamatus, skaala täpsus, vedrude jääkdeformatsioon jm). **Lisaviga** põhjustavad mõõteriista väär asend, ümbritseva keskkonna temperatuur, sageduse kõikumine ja teised välised asjaolud. Seepärast tuleb mõõteriista ülesseadmisel ja mõõtmiste tegemisel alati täpselt juhinduda mõõteriista kasutuseeskirjadest.

7.3. Magnetelektriline mõõtemehhanism. Tingtähis ⋂. ⋂×.

Magnetelektrilistes mõõtemehhanismides kasutatakse vooluga mähise ja püsimagneti magnetvälja vastastikust toimet. Mõõteriista liikuv osa on kas alumiiniumraamile (see võib ka puududa) peenikesest isoleeritud traadist keritud pool või püsimagnet. Levinuimad on esimest liiki mõõteriistad. Neid valmistatakse kahes teostuses: välise ja raamisisese magnetiga.

Et magnetid on äärmiselt kõvadest materjalidest (alni, magniko jt), ei ole neid tavaliselt võimalik mehaaniliselt töödelda. Seetõttu valatakse magnetid lihtsakujulistena, nende voo suunamiseks tarvilik magnetahel koostatakse aga pehmest rauast (terasest) koosteosadest.

Välise magnetiga mõõtemehhanismis (joonis 7.4) kujundatakse poolusekingade 2 ja silindrilise terassüdamiku 4 vahele jäävas õhupilus ühtlane magnetväli. Voolu juhtimiseks liikuvasse pooli 3 ja ühtaegu vastumomendi loomiseks on rakendatud spiraalvedru 1.



Joonis 7.4. Magnetelektrilise mõõtemehhanismi toimimisidee (a). Laagritele toetuv, kärnidel kinnituv mähisega alumiiniumraam moodustab mõõteriista liikuva osa (b). Vastumomenti tekitavad spiraalvedrud, mis ühendavad mähise mõõteahelaga (c). Mõõtemehhanismi liikuv osa (d). Välise magnetiga magnetoelektriline mõõtemehhanismi kujundusnäited (e ja f): 1 – spiraalvedru, 2 – poolusking, 3 – liikuv pool, 4 – silindriline terassüdamik, 5 – osuti (näidik)

Kui ω keerust koosnevale poolile, mida läbib vool I, mõjub magnetväli vootihedusega B, siis tekkiv pöördemoment $M = \omega BlbI = \omega\Phi I = \Psi I$,

kus l ja b on vastavalt raami (mähise) pikkus ja laius ning Ψ pooli aheldusvoog.

Mõõtemehhanismi liikuva osa väljakujunenud hälbe α korral tasakaalustub pöördemoment vastumomendiga:

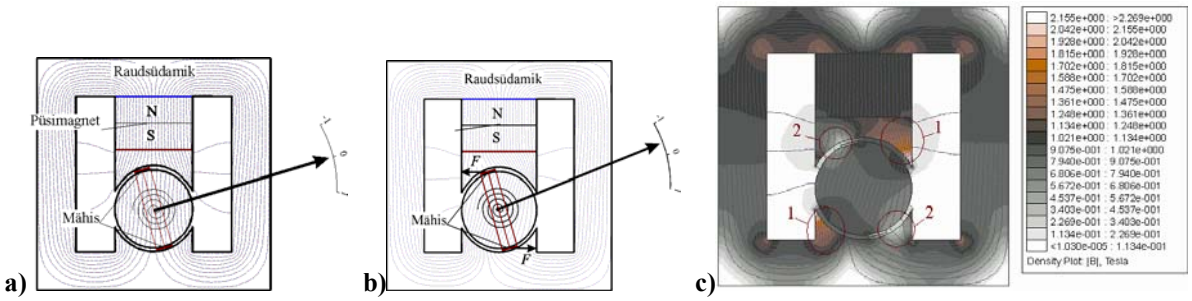
$$M = M_v \quad \text{ehk} \quad \Psi I = K\alpha,$$

kus K on spiraalvedrude elastsust arvestav tegur.

Osuti hälve α on võrdeline mõõdetava vooluga $\alpha = \frac{\Psi I}{K} = \frac{\omega Blb}{K} I = S_I I$.

Seega on välise magnetiga magnetelektrilised mõõteriistad ühtlase skaalaga.

Pöördemomendi teke. Joonis 7.5 iseloomustab püsimagneti ja vooluga mähise magnetväljade liitumist, mille tulemusel tekib jõupaar, mis pöörab raami algasendist uude tasakaaluasendisse. Sel puhul muutuvad raami pöördemoment ja vedru vastumoment võrdseks.

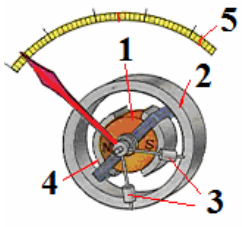


Joonis 7.5. Magnetoelektriline mõõtemehhanism. Voolu puudumisel pöördemomenti ei teki (a). Raami pöördemomendi teke, kui vool läbib raami mähist (b). Magnetvoo tiheduse suurenemise (1) ja kahanemise (2) alad (c)

Joonisel 7.5a puudub vool liikuvas poolis (mähises). Pingestamata vedru pöörab osutiga võlli asendisse, mil osuti teravik on suunatud mõõteskaalal nulljaotisele. Voolu tekkel muundub allika elektrienergia liikuva laengu (mähise magnetvälja) energiaks, mis liitub püsimagneti väljaga. Tekkiv liitväli on ebaühtlane (joonis 7.5c). Tekkivad kaks ala: 1 – kus magnetvoo tihedus suureneb, ja 2 – kus kahaneb. Selle tulemusel tekib jõupaar *F* (joonis 7.5b), mis püüab pöörata raami suunas, mis tagaks liitvälja moonutuse vähenemist.

Raamisisese magnetiga mõõtemehhanismis (joonis 7.6) on südamikuks püsimagnet 1, mida ümbritseb pehmest terasest rõngasike 2. Kuna mähise magnetvälja võimendab magnetahel, siis on võimalik vähendada mõõteriista mõõtmeid. Puudusena tuleb märkida riista skaala ebaühtlust. Olukorda saab mõneti leevendada erikujuliste poolusekingade abil. Voolu *I* korral tekkib mõõtemehhanismi pooli klemmidel potentsiaalide vahe $U = IR = C_I aR$.

Siin on *R* mõõtemehhanismi pooli takistus. Järelikult saab magnetoelektrilist mõõtemehhanismi kasutada ka potentsiaalide vahe ja potentsiaalilangu mõõtmiseks.



Joonis 7.6. Raamisisese magnetiga magnetelektriline mõõtemehhanism: 1 – püsimagnet, 2 – rõngasike, 3 – pooluskingad, 4 – vastukaalud

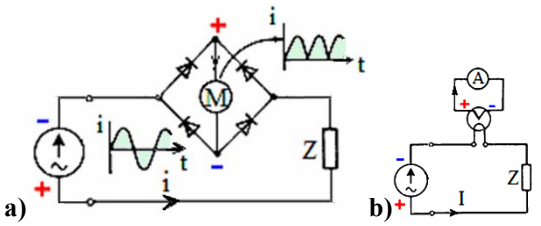
Püsimagnet, mis tekitab õhupilus suure magnetvoo tiheduse, tagab mõõtemehhanismile kõrge voolutundlikkuse, väikese omatarbe ja väikese tundlikkuse väliste magnetväljade suhtes. Temperatuurikõikumised mõõtmistäpsusele märgatavat mõju ei avalda, sest neist tingitud vedrumaterjali elastsusmooduli muutumine tasandatakse magneti temperatuuri muutumisel aset leidva magnetvoo tiheduse muutumisega õhupilus.

Liikuva magnetiga mõõteriistas saadakse pöördemoment kohtkindlat pooli läbiva mõõdetava voolu ja magneti välja koostoimel. Sellises mõõtemehhanismis puuduvad vedrud, konstruktsioon on äärmiselt lihtne, seega on mõõteriist ka odav. Niisugused mõõteriistad taluvad hästi liigkoormust, kuid hüstereesi mõju tõttu jääb nende mõõtmistäpsus väiksemaks. Neid kasutatakse ligikaudseiks mõõtmisteks, näiteks autode armatuurlaual. Magnetelektriliste mõõteriistade **eelised**: täpsed, vähetundlikud väliste magnetväljade suhtes, väike omatarve. **Puudused**: mõõtmisteks vahelduvvooluahelais on vaja kasutada muundureid.

Pöördemomendi *M* suund muutub voolu suuna muutudes. Magnetelektrilise mõõteriista lülitamisel vahelduvvooluahelasse mõjuvad poolile suuruselt ja suunalt kiiresti muutuvad mehaanilised jõud, mille keskmine väärtus võrdub nulliga ning mõõteriista osuti oma nullasendist kõrvale ei kaldu. Seetõttu ei ole mõeldav magnetoelektriliste mõõteriistade vahetu kasutamine vahelduvvooluahelais. Siiski leiavad nad

rakendamist vahelduvsuuruste mõõtmisel. Vahelülina kasutatakse seejuures muundurit, mis teisendab vahelduvvoolu kas pulseerivaks või alalisvooluks. Tuntumad on detektorsüsteem ja termoelektriline muundur. Tuleb aga arvestada, et muundur vähendab mõõtmistäpsust.

Detektorsüsteem sisaldab alaldit (joonis 7.7a). Mõõdetav vahelduvvool muudetakse pulseerivaks alalisvooluks, mida siis mõõdab magnetelektriline mõõtemehhanism. Väikeste voolude ja pingete mõõtmiseks varustatakse need mõõtesüsteemid trafoga, et tagada küllaldast tundlikkust. Mõõtemehhanismi liikuva osa hälve on võrdeline pöördemomendi keskmise väärtusega perioodi kohta, järelikult ka mõõdetava voolu keskväärtusega. Siinuseliste suuruste mõõtmisel võib mõõteriista skaala olla gradueeritud efektiivväärtustes. Detektorsüsteemiga (alalditega) mõõteriistade **eelis** on lai sageduste vahemik (kuni 20 kHz), väike energiatarve ja suur tundlikkus. **Puuduseks** on mõõtmistulemuse olenevus mõõdetava signaali kujust ja väike täpsus.



Joonis 7.7. Detektorsüsteemiga (a) ja termoelektrilise alaldamisega magnetelektrilise mõõtemehhanismiga mõõteriist (b)

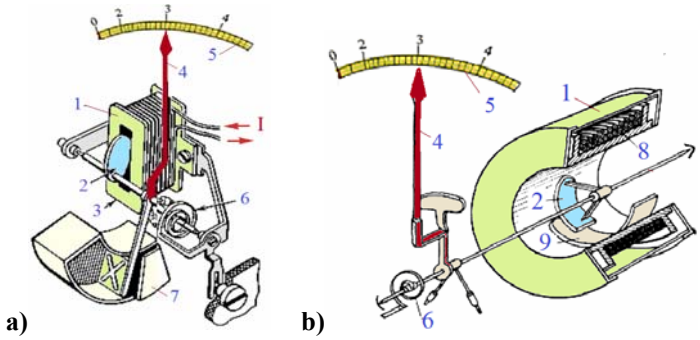
Termoelektrilised mõõteriistad sisaldavad termopaari (joonis 7.7b). Mõõteriist ühendatakse jadamisi termopaari ja voolupiirava takistiga. Mõõdetav vool soojendab traatkuumuti (kuumenev elektrijuht) vahendusel termopaari keevispunkti. Kuumutis vabanev soojushulk q on võrdeline mõõdetava vahelduvvoolu efektiivväärtuse ruuduga. Termopaari keevituspunkti temperatuur, samuti tema vabade otste vahel tekkiv allika alalispinge sõltuvad otseselt eralduvast soojushulgast q elektrijuhi ja termopaari ühenduskohas. Seega on mõõtemehhanismi liikuva osa hälve võrdeline mõõdetava vahelduvvoolu efektiivväärtuse ruuduga.

Termoelektriliste mõõteriistade **eeliseks** on küllalt suur mõõtmistäpsus laias sagedusvahemikus ja võimalus mõõta mittesiinuselisi voolu ning pinget. **Puuduseks** on väike ülekoormatavus, mittelineaarne skaala ja suur omatarve.

7.4. Elektromagnetiline mõõtemehhanism. Tingtähis

Elektromagnetilises mõõtemehhanismis leiab rakendamist mõõdetava voolu magnetvälja toime ferromagnetilisest materjalist südamikule. Kasutusel on lame- ja ümarpooliga elektromagnetilised mõõtemehhanismid.

Lamepooliga mõõtemehhanismis (joonis 7.8a) juhitakse mõõdetav vool läbi kohtkindla pooli 1.



Joonis 7.8. Lamepooliga (a) ja ümarpooliga (b) elektromagnetiline mõõtemehhanism: 1 – paigalseisev pool, 2 – liikuv terassüdamik, 3 – kest, 4 – osuti, 5 – skaala, 6 – spiraalvedru, 7 – magnetsummuti, 8 – pooli mähis, 9 – kohtkindel terassüdamik

Liikuvaks südamikuks olev väike terasplaat 2 paikneb võllil, millele on kinnitatud vastumomendi loomiseks vajalik spiraalvedru 6. Pooli voolu magnetväli magneedib südamiku. Tekkiv mehaaniline jõud F tõmbab ekstsentriliselt teljele kinnitatud magnetpehmest terasest ankru pooli südamiku sisse. See pöörab ankru telge, mille küljes on mõõteriista osuti. Mähise voolusuuna muutudes muutub ka ferromagnetmaterjali magnetvoo

suund. Nii tõmbub ka nüüd ankur mähise sisse ja osuti kaldub algses suunas. Ümarpooliga mõõtemehhanism (joonis 7.8b) koosneb liikumatust poolist 1, mille sisse on kinnitatud kohtkindel pehmemagnetterasest kaarjas plaatsüdamik 9. Teine südamik 2 asub võllil. Kui pooli läbib vool, magneetuvad südamikud ühenimeliselt ning tõukuvad. Võllile kinnitatud südamik sunnib riista liikuvat osa pöörduma.

Liikuv südamik püüab võtta asendi, mille puhul magnetvoog oleks maksimaalne, mil toimub maksimaalne mähise magnetvoo võimendumine. Magnetväljas salvestatud energia $W_m = \frac{1}{2} LI^2$ omandab siis suurima väärtuse.

Pooli läbiva voolu suuna muutumisel vahetuvad ka ferromagnetilise südamiku magnetpoolused, mistõttu liikuva osa pöörde suund jääb endiseks. Seega **sobib** elektromagnetiline mõõtemehhanism mõõtmisteks nii **alalis-** kui ka **vahelduvvooluahelais**. Mõõteriista liikuva osa pöördumisega nurga α võrra kaasnev magnetvälja energia muutumine määrab mõjuva pöördemomendi väärtuse:

$$M = \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} = \frac{1}{2} I^2 = \frac{\partial L}{\partial \alpha}.$$

Liikuv osa võtab asendi, mille puhul spiraalvedrude poolt tekitatav vastumoment M_v saab võrdseks pöördemomendiga M: $M = M_v$ ehk $\frac{1}{2} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha} = K\alpha.$

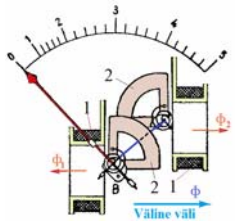
Elektromagnetilise mõõtemehhanismi liikuva osa hälve

$$\alpha = \frac{1}{2K} I^2 \frac{\partial L}{\partial \alpha}. \qquad (7.1)$$

Avaldisest (7.1) on näha, et elektromagnetilise mõõteriista osuti hälve on võrdeline mõõdetava voolu ruudu ja mõõtepooli induktiivsuse tuletisega pöördenurga α järgi. Liikuvale terasplaadile vastava kuju andmise, samuti sobiva asendi otsimisega pooli suhtes saab mõõteriista skaalat teataval määral ühtlasemaks muuta. Üldiselt on elektromagnetiliste mõõteriistade skaala algusosas kokku surutud.

Et mõõteriista terassüdamik on suhteliselt väike ja magnetväli moodustatakse mõõdetava voolu poolt (väli jääb nõrgaks, sest suurem osa magnetvoo teekonnast kulgeb läbi õhu), jääb elektromagnetilise süsteemi tundlikkus väikeseks. Seepärast ei saa valmistada elektromagnetilisi mõõteriistu nõrkade voolude (kuni mõnikümmend milliamprit) ning madalate pingete (kuni mõni volt) mõõtmiseks. Häiringuna mõjuvate väliste magnetväljade mõju kõrvaldamiseks ümbritsetakse mõõtemehhanism ferromagnetmaterjalist varjega.

Kasutatakse ka **astaatilist mõõtemehhanismi** (joonis 7.9).



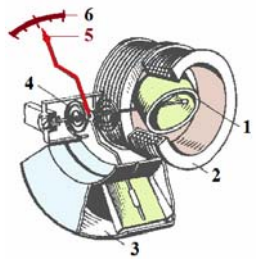
Joonis 7.9. Astaatiline mõõtemehhanism: 1 – kohtkindel pool, 2 – liikuv terassüdamik

See koosneb kahest jadamisi lülitatud poolist ja kahest südamikust. Mõlemad terassüdamikud kinnitatakse ühisele võllile. Poolid paiknevad nii, et magnetvood on teineteise vastu suunatud, mistõttu häiringuna mõjuv välisväli mõjule ei pääse (kui ühe mähise poolt tekitatav pöördemoment suureneb, siis teise mähise poolt tekitatav pöördemoment väheneb samapalju). Seega oleneb võllile mõjuv pöördemoment ainult poole läbivast voolust.

Elektromagnetiliste mõõteriistade **eelised**: saab kasutada mõõtmisteks nii alalis- kui vahelduvvooluahelais, taluvad liigkoormust, ehituselt lihtsad, odavad, töökindlad. Elektromagnetiliste mõõteriistade puuduseks on skaala ebaühtlus.

7.5. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism. Tingtähis

Elektrodünaamilises mõõtemehhanismis rakendatakse kahe vooluga kontuuri magnetväljade vastastikust toimet. Mehhanismil on kaks pooli – paigalseisev ja liikuv (joonis 7.10), viimane paikneb paigalseisva sees. Paigalseisev mähis on väikese keerdude arvuga ning lülitatakse ahelasse jadamisi. Mähist läbib ahela töövool. Liikuva mähise keerdude arv on suur. Ahelasse lülitatakse rööbiti. Paigalseisva **pooliga** 2 tekitatakse magnetväli, milles liikuv mähis (pool) võib pöörduda. Oluline on seepärast paigalseisva pooli magnetväli. Selle võib tekitada õhus või ferromagnetilises keskkonnas. Vastavalt sellele nimetatakse mõõteriista kas elektro- või ferrodünaamiliseks. Vastumomendi saamiseks, samuti voolu juhtimiseks liikuvasse pooli kasutatakse kaht spiraalvedru.



Joonis 7.10. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism. Pöördemomendi tekitamine: 1 – liikuv pool, 2 – paigal seisev pool, 3 - summuti, 4 – spiraalvedru, 5 – osuti, 6 – skaala

Liikuva pooli keerdudele mõjuv elektromagnetiline jõud F on võrdeline vooluga I_2 liikuvas poolis ja püsipooli magnetvooga Φ_1. Et viimane on omakorda võrdeline püsipooli vooluga I_1, siis mõõteriista liikuvale osale toimiv pöördemoment $M = k_1\Phi_1 I_2 = k_2 I_1 I_2$, kus k_1 ja k_2 on võrdetegurid. Teataval määral sõltub pöördemoment M ka liikuva pooli pöördenurgast püsipooli suhtes. Kui see pöördenurk ei ole eriti suur, osutub pöördemomendi muutumine tühiseks, pealegi saab seda kompenseerida poolidele vastava kuju andmisega, samuti vastastikuse asendi sobitamisega.

Väljakujunenud hälbe korral tasakaalustab pöördemomenti M vastumoment M_v:

$$M = M_v \quad \text{ehk} \quad k_2 I_1 I_2 = K\alpha.$$

Seega elektrodünaamilise mõõtemehhanismi liikuva osa hälve

$$\alpha = \frac{k_2}{K} I_1 I_2. \tag{7.2}$$

Selle avaldise kohaselt on elektrodünaamilise mõõteriista näit võrdeline mõõtemehhanismi poole läbivate vooludega.

Lülitamisel vahelduvvooluahelasse läbivad poole voolud i_1 ja i_2, mis üldjuhul ei ole faasis. Kui $i_1 = I_{1m}\sin\omega t$ ja $i_2 = I_{2m}\sin(\omega t + \psi)$, siis kujuneb pöördemomendi keskväärtus

$$M = \frac{1}{T}\int_0^T k_2 i_1 i_2 dt = \frac{k_2}{T}\int_0^T I_{1m}\sin\omega t I_{2m}\sin(\omega t + \psi)dt = cI_1 I_2\cos\psi, \tag{7.3}$$

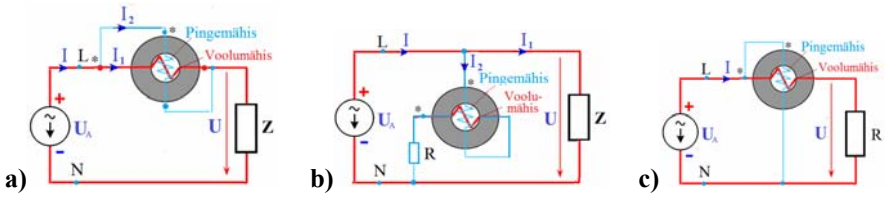
kus I_1 ja I_2 on poole läbivate siinusvoolude efektiivväärtused; c – mõõtemehhanismi konstruktsioonist olenev võrdetegur ning ψ – voolude I_1 ja I_2 vaheline faasinihkenurk.

Mõõtemehhanismi liikuva osa suure inertsi tõttu on hälve võrdeline pöördemomendi keskväärtusega, st vahelduvvooluahelas töötava elektrodünaamilise mõõteriista hälve

$$\alpha = kI_1 I_2\cos\psi. \tag{7.4}$$

Elektrodünaamilise mõõtemehhanismi magnetväli on nõrk, olles seetõttu tugevasti mõjutatav välistest väljadest. Sellest tingitud lisavea kõrvaldamiseks mõõtemehhanism varjestatakse. Teiseks võimaluseks on valmistada mõõteriistad astaatilistena.

Elektrodünaamilise ampermeetri puhul tuntakse kaht mõõtepoolide lülitust. Väikeste voolude (kuni 0,5 A) mõõtmiseks on poolid ühendatud jadamisi tarbijaga. Suuremate voolude (üle 0,5 A) korral rakendatakse poolide rööplülitust (joonis 7.11a).



Joonis 7.11. Elektrodünaamiline ampermeeter (a), voltmeeter (b) ja vattmeeter (c)

Elektrodünaamilistes voltmeetrites on kasutusel mõõtepoolide jadalülitus. Mõõtepiirkonna muutmiseks lisatakse ahelasse veel **eeltakisti** (joonis 7.11b). Pinge mõõtmisel on elektrodünaamilise voltmeetri hälve

$$\alpha_U = c_U U^2.$$

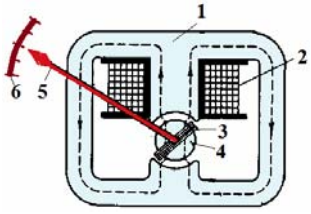
Nagu näha, peame ka elektrodünaamilise voltmeetri puhul arvestama skaala ruutiseloomuga.

Kahe pooli olemasolu lubab elektrodünaamilist mõõtemehhanismi kasutada mitte ainult voolu ja pinge, vaid ka võimsuse $P = UI\cos\varphi$ mõõtmiseks. Võimsuse mõõtmist iseloomustati põhjalikult p 6.6.

Elektrodünaamiliste mõõteriistade **eelised**: sobivad kasutamiseks nii alalis- kui ka vahelduvvooluahelas, suur mõõtetäpsus (täpsusklassid 0,1; 0,2 ja 0,5), pikaajaline näitude stabiilsus.

Elektrodünaamiliste mõõteriistade **puudused**: tundlikud liigkoormuste suhtes (liikuvasse pooli voolu juhtimiseks kasutatavate spiraalvedrude tõttu), välised väljad mõjutavad mõõtmistulemusi, suhteliselt kallid, väike pöördemoment.

Kui tahetakse saada suuremat pöördemomenti (oluline näiteks meerikute puhul), eelistatakse **ferrodünaamilist mõõtemehhanismi. Tingtähis** ⊜**.** Paigalseisev pool 2 paikneb seal pehmest magnetmaterjalist südamikul 1, liikuv pool 3 aga samast materjalist silindril 4 (joonis 7.12).



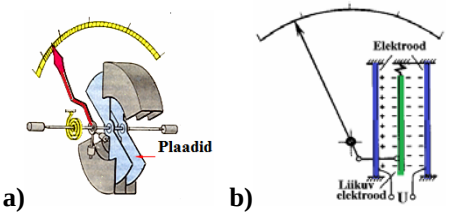
Joonis 7.12. Ferrodünaamiline mõõtemehhanism: magnetpehmest materjalist ike (1) ja silinder (4). Paigalseisev (2) ja liikuv (3) pool

Ferromagnetilise südamiku tõttu magnetväli võimendub, järelikult suureneb ka pöördemoment. Väliste väljade tõttu on ferrodünaamilised mõõteriistad vähem tundlikud ja neil on väike omatarve. Mõõtmistäpsuselt jäävad nad aga alla elektrodünaamilistele mõõteriistadele. Neil on täiendavad mõõtevead, mis tekkivad pöörisvoolude, hüstereesi ja mittelineaarse magneetimiskõvera tõttu.

Elektrostaatiline mõõtemehhanism. Tingtähis ⏚

Tööpõhimõtteks on kahe või enama lähestikku asetseva erinimeliselt laetud plaadi või juhi vahel tekkiva tõmbejõu määramine (joonis 7.13). Seadme võlli pööre või liikuva osa nihe toimub plaatidele rakendatud potentsiaalide vahe mõjul. Seetõttu kasutatakse neid peamiselt voltmeetrite valmistamisel. Ehituselt kujutab elektrostaatiline mõõtemehhanism endast muutuva mahtuvusega õhkkondensaatorit, mille mahtuvus muutub kas vastastikku paiknevate elektroodide pinna või elektroodide vahekauguse muutmisega. Võlli ja osuti pöördenurk α on ruutsõltuvuses potentsiaalide vahest *U*.

Erivõtetega (kuju, mõõtmed, paigutus) on võimalik saavutada 15 ... 100% ulatuses, et skaala on lineaarne.



Joonis 7.13. Elektrostaatiline mõõtemehhanism: a – vastastikku paiknevate elektroodide pinna ja b – elektroodide vahekauguse muutusega mõõtemehhanism

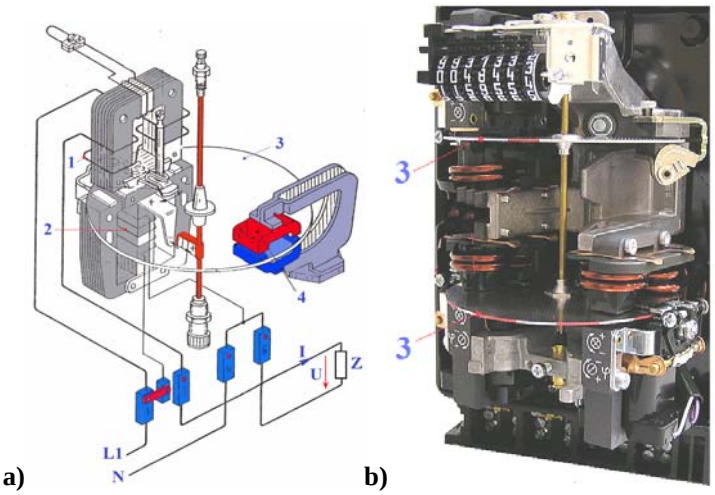
Elektrostaatiliste mõõteriistade **eelised**: sobivad nii alalis- kui ka vahelduvvoolu voltmeetriteks; mõõtetulemused ei olene keskkonna temperatuurist, pingekõvera kujust, välismagnetväljadest ja sagedusest; neil on väga väike omatarve. **Puudused**: tundlikkus väliste elektriväljade ja õhuniiskuse suhtes; madal tundlikkus ja täpsus ning skaala on mittelineaarne.

7.6. Induktsioonmõõtemehhanism. Tingtähis ⊙. Halli anduriga elektriarvesti

Induktsioonmõõteriistu on kasutatud väga pikka aega, kuid seoses üleminekuga digitehnikale on induktsioonarvestite kasutamine drastiliselt vähenenud ja lõppeb peagi täiesti. Seetõttu käsitleme lühidalt nende mõõteriistade tööd, mis tugineb pöördmagnetvälja kasutamisele. Pöördemoment luuakse siin tavaliselt kahe elektromagneti magnetvälja toimel mõõtemehhanismi liikuvale osale (joonis 6.14a), milleks on alumiiniumketas 3. Ühe välja tekitab voolumähis 1 ja teise pingemähis 2. Iseloomulikuks induktsioonsüsteemseks mõõteriistaks on elektrienergia arvesti.

Arvesti varustatakse loendurmehhanismiga, mis tiguülekande kaudu on seotud ketta teljega. See loeb ketta pöördeid ning näitab tarbitud energia väärtust.

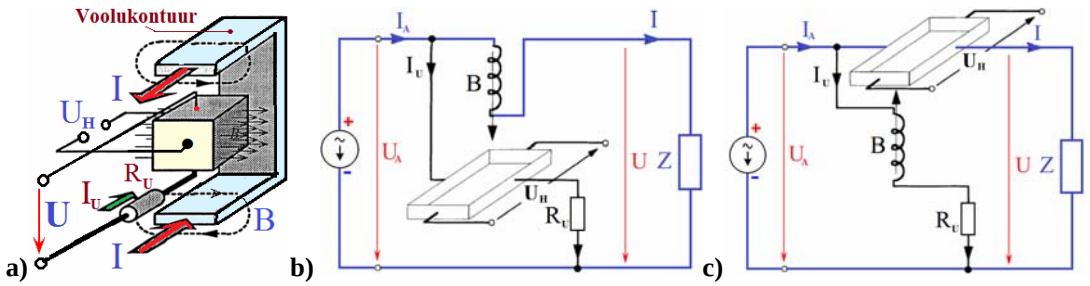
Eelised: induktsioonarvestid on väga töökindlad mõõteriistad. Neil on suur pöördemoment, nad on vähetundlikud väliste magnetväljade suhtes ja taluvad märgatavat ülekoormust. **Puudused**: kasutatavad ainult vahelduvvooluahelates; väike täpsus, suur omatarve, näidud olenevad sagedusest ja temperatuurist ning neil on piiratud võimalused tänapäeva automaatika lahenduste tarbeks. Induktsioonarvestite lülitusviise on vaadeldud p. 6.6.



Joonis 7.14. Ühefaasilise ühe- (a) ja kahe-elemendiga (b) induktsioonarvesti illustratsioon. Nende mõõtemehhanismi konstruktsioonilahendus ja mähiste lülitus (a)

Halli anduriga elektriarvesti

Tajuri lülitus on joonisel 7.15. Tajuri tundlik plaat paigaldatakse ahela voolukontuuri magnetvälja. Voolukontuur ümbritseb plaati kolmest küljest. Plaadile rakendatakse tarbija potentsiaalilang *U*. See on võrdeline vooluga I_U, mis kulgeb läbi plaadi. Tarbija vool I (joonisel a ja b), läbides tajuri ümber paiknevat voolukontuuri, tekitab vooluga I_U risti suunatud magnetvoo vootihedusega B. Joonisel c on voolud vastupidi.



Joonis 7.15. Võimsuse mõõtmine Halli tajuriga

Halli tajuris tekkiv allikapinge U_H on mainitud juhtumil võrdeline tarbija võimsusega $U_H = I_U B_I \frac{R_H}{d}$.

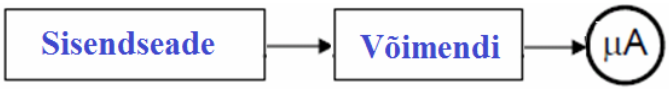
Arvesti anduri mõõtelülituses, signaalimuunduris ja mõõteseadmes toimub tajuri väljundsignaali integreerimine, võimsuse alusel energia arveldamine ning arvesti väljundinfo formeerimine.

Elektri arveldus tänapäeval toimub valdavalt digiarvestitega (p. 6.6).

7.7. Elektronmõõteriistad

Elektronmõõteriistas on elektromehaanilise näidumõõteriistaga ühendatud sageli küllalt keerukas elektronlülitus, saavutamaks nõutavaid mõõteriista omadusi (näiteks suurt tundlikkust). Mõõteriista otstarbe järgi on erinevaid skeemilahendusi. Elektronvoltmeetriga mõõdetakse pingeid alates mikrovoltidest kuni kümnete kilovoltideni, sagedustel sadade megahertsideni. Elektronvoltmeetrite sisendtakistus on väga suur, mistõttu omatarve tühine. Sisendmahtuvus on väike.

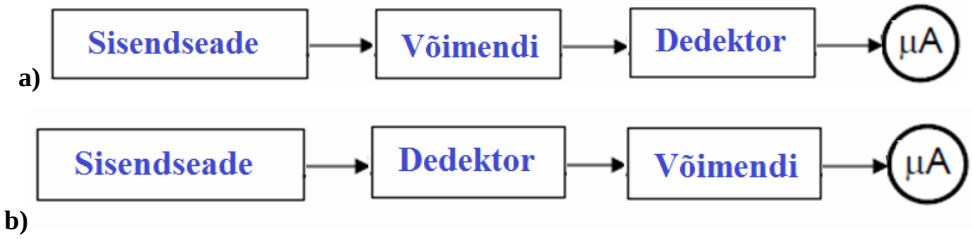
Alalispingevoltmeetri koosteosad on esitatud joonisel 7.16. Sisendseadmeks on pingejagur, mille abil toimub mõõtepiirkonna muutmine. Sisendseade peab ühtlasi tagama mõõteriistale suure sisendtakistuse.



Joonis 7.16. Alalispinge elektronvoltmeeter

Mõõteriista väljundis oleva näiduriistana rakendatakse tavaliselt magnetelektrilisi mikroampermeetreid. Et tõsta mõõdetava signaali võimsust näiduriista hälbe saamiseks vajalikule tasemele, paikneb viimase ja sisendseadme vahel alalisvooluvõimendi. Mõõtmistäpsuse huvides peab võimendustegur olema võimalikult püsiv. Seetõttu eelistatakse tagasisidestatud sildlülitusi.

Lihtsaim **vahelduvpinge-elektronvoltmeeter** koosneb kahest põhilülist – detektorist ja näiduriistast. Mõõteulatuse avardamiseks lisatakse tavaliselt veel sisendpingejagur (joonis 7.17). **Detektori** ülesandeks on muundada mõõdetav vahelduvpinge temaga võrdeliseks alalispingeks. Et detektor kujutab endast dioodlülitust, nimetatakse neid voltmeetreid ka **dioodvoltmeetreiks**. Võimendina kasutakse kas vahelduvvoolu (a) või alalisvooluvõimendit (b).



Joonis 7.17. Vahelduvpinge-elektronvoltmeeter võimendiga vahelduvvoolu (a) ja alalisvoolu (b) poolel

Võimendi kasutamine lubab suurendada mõõteriista tundlikkust. Joonisel 7.17 on detektorsisendiga voltmeetri koosteosad. Pinge alumine mõõtepiir võib seesugusel riistal olla kuni 0,1 V. Mõõdetavate pingete

sageduspiiri (kuni mõnisada MHz) määrab sisendahela omavõnkesagedus f_0. Ühendusjuhtmete lühendamiseks kujundatakse detektor riistavälise mõõtepeana – proovikuna. Viimase sisendpistikud ühendatakse vahetult nende punktidega, mille vahelist pinget mõõdetakse. Suurima tundlikkuse annab võimendi-dedektor-lülitus (joonis 7.17). Siin piiravad tundlikkust üksnes võimendisisesed häiringud. Mõõteulatus küünib mõnest mikrovoldist mõne voldini, välise pingejaguri korral aga mõnesaja voldini.

Elektronmõõteriistade **eelised**: väike omatarve, saab kasutada kõrgetel sagedustel.

Elektronmõõteriistade **puudused**: keerukas mõõteskeem, vajavad lisatoiteallikat, näit sõltub tugevasti mõõdetava pinge või voolukõvera kujust, väike mõõtetäpsus (tavaliselt täpsusklass 4,0).

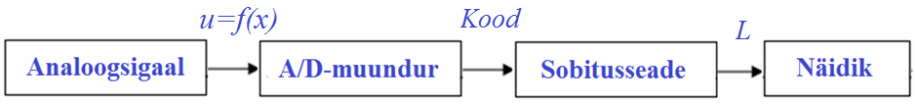
7.8. Numbermõõteriistad

Numbermõõteriist on mõõteseadis, milles mõõdetava suuruse või tema analoogi (s.o mõõdetavaga võrdelise füüsikalise suuruse) pideval muutumisel toimub hindamine kindla kohtade arvuga numbri järgi. Seega numbermõõteriistad töötavad automaatselt välja mõõteinfo diskreetsed signaalid ning esitavad need numbrilisel kujul.

Numbermõõteriistad sobivad enamiku elektrisuuruste mõõtmiseks. Levinumad on numbernäiduga voltmeetrid, oommeetrid, fasomeetrid ja sagedusmõõturid. Elektriliste signaalide mõõtmisel kasutatakse analoog-digitaalmuundureid (ADM) ja ka digitaal-analoogmuundureid (DAM). Viimased muundavad näiteks numbriliselt esitatud pinge väärtused tagasi analoogkujule. Kasutusel on ka mõõtevõimendid väikeste pingete suurendamiseks kindel arv kordi. See võimaldab neid täpsemalt mõõta. Kõrgete pingete korral kasutatakse pingejagureid (p. 6.4), et vähendada ohutuse tagamiseks pinget kindel arv kordi.

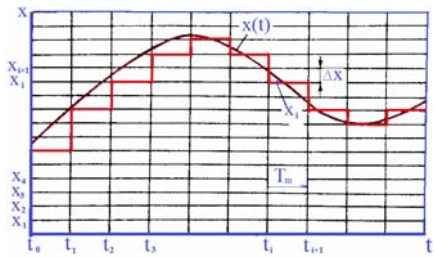
Tööstussagedusega pidevatoimelisi analoogsignaale saab asendada diskreetsetega, kus hetkväärtusi mõõdetakse teatud ajavahemiku *Dt* tagant. Sellist muundamist nimetatakse **diskreetimiseks** ajas ja *Dt*-d **diskreetimissammuks** ehk -intervalliks.

Numbrilise mõõteriista struktuurskeem on esitatud joonisel 7.18. See sisaldab sisendanaloogsignaali sõlme, analoog-digitaalmuundurit, vajadusel sobituslüli ning numbriindikaatorit ehk **näidikut**. Pidevsuuruse teisendab diskreetseks analoog-digitaalmuundur. Kõigepealt muundab sisendsõlm-analoogandur (takistus-salv, faasitundlik lülitus vm) mõõdetava suuruse X sellega võrdeliselt seotud analoogsuuruseks $u = f(x)$, mis sobib diskreetimiseks. Analoog-koodmuunduri väljundis saadakse diskreetne arvkood K, mille sobitusseade kujundab väljundnäidikusse antavaks koodiks L. Kõiki protsesse juhib ja sünkroniseerib juhtplokk, mida skeemil pole.



Joonis 7.18. Numbermõõteriista koosteosad

Numberkujule teisendatult väljendub pidevsuurus X diskreetsuuruse X_i kaudu. Viimane säilitab pidevsuuruse X teatava vahemiku X_i kuni X_{i+1} ulatuses püsiva väärtuse (joonis 7.19). Seesugust teisendamist nimetatakse **kvantimiseks**, kusjuures vahe $\Delta X = X_{i+1} - X_i$ annab **kvantimissammu,** s.o signaali kõrvuti seisvate diskreetsete väärtuste vahe. Praktikas kasutatakse signaali muundamisel sageli diskreetimist ja kvantimist konstantsete *DX* ja *DX* väärtustega üheaegselt.



Joonis 7.19. Mõõdetava pidevsuuruse kvantimine

Kvantimissamm määrab kvantimisastmete arvu ehk mõõteriista **lahutusvõime** $M = X_m / \Delta X$, kus X_m on riista ülemine mõõtepiir.

Pidevsuuruse asendamine diskreetsega põhjustab teatava nn **kvantimisvea** tekke. Kui mõõdetav pidevsuurus ümardatakse alati lähema diskreetse väärtuseni, kujuneb vea suuruseks $\pm \Delta X / 2$.

Teine numbermõõteriistadele iseloomulik viga tuleneb aja diskreetimisest, sest ei muundamine ega numbriindikatsioon toimu pidevalt, vaid teatava ajavahemiku järel. Mõõteriista tabloole ilmuvad mõõdetava suuruse väärtused vastavad kindlatele hetkedele $t_1, t_2, \ldots, t_i \ldots$, mistõttu jääb arvesse võtmata jälgitava suuruse võimalik muutumine muundamiseks kuluva aja $T_m = t_{i+1} - t_i$ vältel. Kui jälgitav suurus muutub kiirusega dX / dt, siis **aja diskreetimisviga**

$$\Delta X_t = (dX / dt) T_m .$$

Aja diskreetimisest tulenevat dünaamilist viga saab vähendada, rakendades lineaarinterpolatsiooni numbernäidu kahe naaberväärtuse vahel.

Muundamiseks kuluva aja T_m pöördväärtus annab **muundamissageduse** ehk mõõtmiskiiruse (mõõtmiste arvu sekundis):

$$F_m = \frac{1}{T_m} .$$

Numbermõõteriistades muundatakse mõõdetav suurus temaga võrdeliseks vooluimpulsside jadaks. Pooljuhtlülitused tagavad kuni $10^5 \ldots 10^6$ mõõtmist sekundis. Mõõtetulemusi töödeldakse vastava programmi abil ja esitatakse näidiku vahendusel.

Numbermõõteriistade eelised: täpsus, kiirus, mugav näidulugemine, häiringukindlus, näidu kohtade arv määratakse automaatselt, tulemused sobivad otsesisestamiseks arvutisse.

Numbermõõteriistade puudused: suhteliselt keerukad ja kallid.

7.9. Meerikud ja ostsillograafid (ostsilloskoobid)

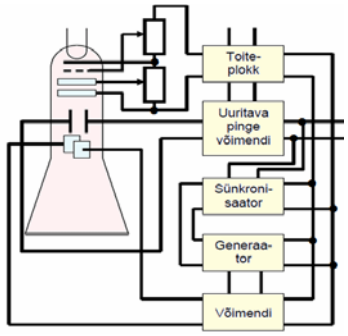
Nii tootmisprotsesside kui ka teaduslike katsete puhul osutub sageli tarvilikuks jälgitavaid suurusi automaatselt üles märkida. Sel eesmärgil kasutati varem laialdaselt **meerikuid**. Nüüd asendavad neid tavaliselt erinevad digitaalsed protsessi jälgimise ja salvestamise seadmed

Ostsillograafid (elektrivõnkeid registreerivad aparaadid – „kirjutavad“ valgustundlikule paberile) ja **ostsilloskoobid** (elektrivõnkeid valguskiirte abil nähtavaks tegevad aparaadid) võimaldavad visuaalselt jälgida, mõõta ja registreerida elektrisignaale, uurida nende kuju ja muid tunnussuurusi. Ajalooliselt kasutati elektromehaanilisi valguskiirostsillograafe (töö sagedusalas 0...15 kHz). Praegu kasutatakse elektronostsilloskoope (mõnest hertsist sadade gigahertsideni). Viimased jagunevad analoog- ja digitaalostsilloskoopideks. Analoogostsilloskoopi nimetatakse ka elektronostsilloskoobiks.

Elektronostsilloskoop on laia kasutusalaga mõõteriist, mille abil saab jälgida ja fikseerida pidevaid, impulss-, mitteperioodilisi, juhuslikke jm elektrisignaale. Tema põhilüliks on **elektronkiiretoru** koos juhtimis- ja toiteahelatega. Elektronkiire juhtimine käib üldjuhul kolme: *x*-, *y*- ja *z*-kanali kaudu (joonis 7.20). Neist esimene hälvitab kiirt rõht- ja teine püsttelje sihis. *z*- kanal on ette nähtud elektronkiire poolt ekraanil tekitatava helendava täpi muutmiseks.

Uuritav pinge u_y antakse elektronkiiretoru püsthälvitusplaatidele – **signaalplaatidele**. Selle pinge poolt loodud väli on praktiliselt ühtlane, mistõttu kiire hälve osutub võrdeliseks hälvituspingega. Kuna uuritav pinge u_y võib suures ulatuses muutuda, tagatakse optimaalne väljundpinge tase *y*-kanalisisendis paikneva **pingejaguri** abil. Et vähendada ostsilloskoobi ebasoovitavat tagasimõju uuritavale elektriahelale, on kõnealusesse kanalisse lülitatud suure sisendtakistusega **katoodjärgur**. Veel võib *y*-kanal sisaldada pingeimpulsside tõusu- ja langunähtuste uurimiseks tarvilikku **viitliini**.

Rõhthälvitusplaate on vaja selleks, et uuritava pinge u_y mõjul püstsihis toimuvaid kiire käike laotada tasapinnaliseks kõveraks. Sel eesmärgil antakse rõhthälvitusplaatidele tavaliselt hammaspinge u_x, mis saadakse **hammaspinge-** ehk **laotusgeneraatorist**. Hammaspinge kasvab ühtlaselt ajavahemiku t_1 vältel, et siis kiiresti langeda tagasi algtasemeni.



Joonis 7.20. Elektronostsilloskoobi koosteosad: 1 – toiteplokk, 2 – signaalivõimendi, 3 – sünkronisaator, 4 – generaator, 5 – võimendi

Ekraanil paigutub helendav täpp hammaspinge toimel aja t_1 kestel ümber rõhtsihis, liikudes seejuures ühtlase kiirusega: ajavahemiku t_2 kestel viskub täpp tagasi lähtepunkti. Kui uuritav pinge u_y ja hälvituspinge u_x mõjuvad üheaegselt, joonistab kiir välja uuritava pinge kõvera, sest täpi nihkumine püstsihis on võrdeline uuritava pinge hetkväärtusega, nihkumine rõhtsihis vastab aga hammaspinge kasvamisele.

Kui hammaspinge sagedus f_x on võrdne uuritava pinge sagedusega f_y või on nende sageduste suhe täisarv ($f_y = nf_x$), kordab helendav täpp punkt-punktilt oma teekonda igakordsel liikumisel üle ekraani, millega saavutatakse seisva kujutise mulje. Seesugust sageduste ühitamist nimetatakse **sünkroniseerimiseks**.

Pinged hälvitusplaatidele antakse läbi vastavate võimendite. Et ostsilloskoop ei muudaks uuritavate võnkumiste kuju, peavad võimendid arendama moonutusvaba võimendust laias sagedusalas. Saadava ostsillogrammi mõõtkava määramiseks nii rõht- kui püstsihis sisaldab ostsilloskoop veel kestuse ja amplituudi **kalibraatoreid**. Ajaintervallide mõõtmisel saavutatakse nõutav täpsus **ränistabilisaatori** abil. Olulisemad abiseadmed on ajamärkegeneraator, amplituudväärtuse kalibraator, viitliin ja mäluseadis. Eriti kiirete (sagedus üle 1 GHz) protsesside jälgimiseks kasutatakse stroboskoopilisi ostsilloskoope.

Harva korduvate või üksikute signaalide registreerimiseks valmistatakse **mäluga** ostsilloskoope, mis on suutelised säilitama mitme tunni vältel jälgitava protsessi salvestuse. Elektronostsilloskoopide eeliseks on kõrge tundlikkus ja väike inerts. Neid kasutatakse pinge, sageduse, faasinihke, takistuse või muude eelnevalt elektriliseks muundatud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks ja uurimiseks. Keerukamate nähtuste tundmaõppimisel rakendatakse mitmekiirelisi ostsilloskoope (joonis 7.21a).

a) b) c)

Joonis 7.21. Firma Tektronix ostsilloskoobid ja proovikud: a – analoog-, b – digitaalostsilloskoop, c – proovik

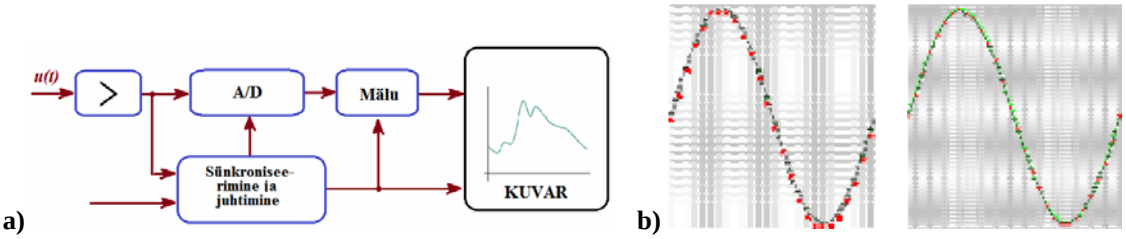
Joonisel 7.21c on näha ostsilloskoobi proovik: 1 – prooviku ühendus ostsilloskoobiga, 2 – prooviku maandusklemm, mis ühendatakse enne mõõtmist maanduskontuuriga ja 3 – ühendus mõõdetava signaaliga. Mõõtmiste eel tuleb proovik täpselt reguleerida (justeerida). Joonisel 7.21b on kaks digitaalostsilloskoopi: üks laboririist, teine kaasaskantav.

Lihtsamad mõõtmised ja sätted. Lihtsamate signaalide mõõtmiseks on tarvis pärast prooviku ühendamist ja reguleerimist ühendada ostsilloskoop signaaliahelaga ning vajutada AUTOSET-nuppu. Ostsilloskoop sobitab automaatselt horisontaalse ja vertikaalse skaala sätted ning hakkab andmeid koguma ja signaalikuju näitama. Kuvatakse signaali amplituud laineharjast laineharjani, perioodi pikkus ja sagedus. Ostsilloskoopidel on

võimalik muuta vertikaalset ja horisontaalset mõõtepiirkonda vastavalt vajadusele suuremaks või väiksemaks. Ostsilloskoopidega, millel puudub AUTOSET-võimalus, tuleb signaali uurimiseks valida sobiv skaala. Selleks muudetakse vaheldumisi vertikaalse ja/või horisontaalse skaala suurust, kuni signaal on näha nii nagu sooviti. Samuti on võimalik muuta sisendsignaalide positsiooni ekraanil. Näiteks kahe signaali faasi võrdlemiseks on hea liigutada need vertikaalsel skaalal üksteise kohale.

Digitaalostsilloskoop. Erinevalt analoogostsilloskoopidest kujundatakse nende ekraanile tulev kujutis numbriliselt, nagu televiisori monitoridelgi. Selliste riistade ekraanil ei näe me mitte ajas "jooksvat" pilti, vaid mingi mõõteperioodi jooksul kogutud andmete statistilise töötluse esitlust.

Digitaalostsilloskoobi lihtsustatud skeem on joonisel 7.22. Ostsilloskoobi sisendisse antava uuritava pinge *u(t)* võimendab sisendvõimendi mingi võimendusteguriga K_u. Suure sisendsignaali korral asendab võimendit pingejagur. Edasi signaal digitaliseeritakse A/D-muunduri abil taktgeneraatori poolt määratud taktis. A/D-muunduri väljundarvud salvestatakse mällu, millele aadressiloendur lisab ühe impulsi sama taktgeneraatori poolt. Mällu salvestatakse peale A/D-muunduri väljundarvude ka signaalitöötluse info (võimendi või pingejaguri ülekandetegur, taktgeneraatori taktimpulsside sagedus), mida joonis 7.22 ei kajasta.



Joonis 7.22. Digitaalostsilloskoobi skeem

Digitaalostsilloskoobis salvestatakse mäluseadmesse ajas muutuva sisendpinge *u(t)* hetkväärtusi. See toimub kindla sagedusega, täpse ajavahemiku möödumisel, üksteisele järgnevatel ajahetkedel. Diskreetimis- ehk lugemivõtusagedus oleneb valitud laotuskiirusest, mida saab määrata vastava ümberlüliti asendiga. Mõõtetulemused salvestatakse vahemälus. Näiteks kui vahemälus on 3000 reas olevat mälupesa, siis salvestamine toimub järgnevalt: vahetult enne mõõtmist nihutatakse kõikide mälupesade sisu ühe koha võrra ettepoole ja lõpus oleva mälupesa sisu kustutatakse. Nii on mõõtmise hetkeks mälupesa alati vaba ja siia salvestatakse A/D-muunduri poolt mõõdetud väärtus. Seetõttu on ostsilloskoobi tööajal vahemälus igal ajahetkel 3000 varem mõõdetud sisendsignaali hetkväärtust. Sünkroniseerimisimpulss suunab vahemälu hetkeseisu ostsilloskoobi püsimälusse ja lugemivõtu aeg fikseeritakse. Ajaarvestus toimub sünkroniseerimisimpulsi suhtes.

Digitaalostsilloskoobi mõõtetäpsus oleneb vertikaalsest lahutusvõimest, mida väljendatakse bittides (digitaalarvu suurusjärguga) väljundis. Mida suurem on bittide arv *n*, seda kõrgem on lahutusvõime ja väiksem kvantimisviga $\pm \Delta X / 2$ (joonis 7.19). Näiteks kolmebitise A/D-muundurianaloogi sisendpinge ulatus hakitakse ($2^3 = 8$) kaheksaks diskreetseks vahemikuks, 8 biti korral jagatakse analoogsisend ($2^8 = 256$) aga kahesaja viiekümne kuueks täpse suurusega vahemikuks, mis on kõige lähemal signaali tegelikule väärtusele mõõtmishetkel. Nii väheneb 8 biti korral oluliselt kvantimisviga. Vea vähenemist iseloomustavad joonisel 7.21b esitatud kahe erineva vertikaalse lahutusvõimega digitaalostsilloskoobi poolt registreeritud sama siinuselise sisendsignaali kõverad. Näeme, et suurema bittide arvu korral on mõõtepunktide kokkulangevus tegeliku siinussignaaliga märgatavalt parem.

Mõõtesignaali visualiseerimiseks saab kasutada kas analoogsisenditega või digitaalsisenditega kuvarit (elektronkiiretoru või displeipaneeli). Selleks et kuvada reaalajas kõrgsageduslikke signaale, peab kuvar olema kiiretoimeline. Reaalaja töö korral ilmub signaali kujutis ekraanile praktiliselt hetkeliselt pärast sisendsignaali *u(t)* lülitamist ostsilloskoobi sisendile ning ekraanil kajastuvad kohe ka kõik sisendsignaali kujumuutused. Kui reaalajas töö pole vajalik, siis kuvari töökiirusele erilisi nõudeid ei esitata. Eelnevalt salvestatud digitaalinfo kuvamine seisva kujutisena võib toimuda aeglasemas tempos. Analoogsisendiga kuvari kasutamisel on vaja mälustvõetavad arvud eelnevalt D/A-muunduri abil muundada analoogsignaaliks. Digitaalindikatsiooni korral pole D/A-muundur vajalik. Kuvari protsessor teostab infoedastust ja lisab

kuvatava tekstiinfo. Tekstiinfoks on x-teljel aja väärtused, y-teljel pinge väärtused, samuti täiendavad andmed mällu salvestatud mõõtetulemuste päritolu ja salvestamisaja kohta.

7.10. Elektritarbimise ja -kvaliteedi mõõteriistad

Mõistliku elektrikasutuse tagamiseks on otstarbekas abivahendina kasutada **elektritarbimise analüsaatoreid (Power Meter)**. Samuti on võimalik hinnata reaktiiv- ja aktiivvõimsuse suhet ja tarbija elektrikvaliteedi olukorda. Joonisel 7.23a elektritarbimise analüsaatori all reas oleva 6 lülitinupu vajutamisel kuvatakse analüsaatori ekraanile järgmine tarbimist iseloomustav info: tarbijavoolu ja lubatava voolu; pinge ja sageduse; tarbitava ja lubatud võimsuse; võimsusteguri, voolu- ja pingemoonutusteguri jooksvad väärtused; maksimaalse lubatud võimsuse ja toitepinge väärtus; tööaja ja selle aja jooksul tarbitud energia näit. Elektrienergia kvaliteeti hinnatakse toitepinge ja selle sageduse tunnussuuruste alusel. Eestis kehtib elektrikvaliteedi standard EVS EN 50160. Kvaliteedi hindamiseks on välja töötatud erimõõteriistad, mis teostavad ettenähtud ajavahemiku vältel vajalikud mõõtmised ja väljastavad põhjaliku info elektrikvaliteedi kohta. Joonisel 6.23b esitatud kolm kolmefaasilist elektrikvaliteedi analüsaatorit võimaldavad reaalajas jälgida, salvestada ning analüüsida kolmefaasiliste toitesüsteemide elektrikvaliteedi. Seadmekomplekt sisaldab kaasaskantavat elektrikvaliteedi analüsaatorit, nelja ampertangide komplekti, krokodillnäpitsatega ühendusjuhtmeid pingesignaalide sisestamiseks, RS232 kaablit ning tarkvara.

Joonis 7.23. Võimsusteguri mõõtmine elektritarbimise analüsaatoriga (a). Erinevate firmade kolmefaasiliste elektrikvaliteedi analüsaatorite näited (b)

7.11. Elektrimõõteriistade tingmärgid

Tingmärke kasutatakse mõõteriista mõõtesüsteemi, tunnussuuruste ja eri riistade eristamiseks elektriskeemidel. Riista numbrilauale kantakse vooluliik (alalis-, vahelduv), täpsusklass, mõõtesüsteem, kasutamistingimused ja häiringu magnetväljade kaitsetase. Viimast märgitakse rooma numbritega I, II, III ja IV. Mida väiksem number – seda parem **varjestus**.

Järgnevalt esitatakse põhilised mõõteriistadega seonduvad tingtähised.

TINGMÄRGID MÕÕTERIISTA NUMBRILAUAL

Skaala on mõõteriistal mõõdetava suuruse väärtuse kindlakstegemiseks. Peale skaala kantakse numbrilauale veel tingmärgid, mis annavad mõõteriista üksikasjaliku tehnilise iseloomustuse. Mõõteriista valimiseks ja mõõteriista õigeks kasutamiseks on neid tingmärke tarvis teada.

Mõõteriista numbrilauale kirjutatakse mõõteriista liik või liiki tähistav täht. Skeemidel tähistatakse mõõteriistu tähega, mida ümbritseb ring või kastike.

Numbrilauale märgitakse mõõteriistaga mõõta lubatud voolu liik (alalis-, vahelduvvool), mõõteriista süsteem, täpsusklass (täpsusklassi tähistavad numbrid ümbritsetakse mõnikord ringjoonega).

Igal mõõteriistal on kindlad kasutustingimused, mida samuti näidatakse numbrilaual. Varjestatust väliste magnetväljade eest tähistatakse rooma numbritega I, II, III, IV. Mida väiksem on rooma number, seda paremini on riist varjestatud väliste magnetväljade eest.

Tähtedega märgitakse numbrilaual ka mõõteriista töötingimusi – normaalseid keskkonna temperatuuri- ja niiskustingimusi.

Vooluliigi järgi: – alalis-, ~vahelduv-, -/~ alalis- ja vahelduvvoolu ning **3~50 Hz** kolmefaasilise voolu tarbeks.

MÕÕTERIISTA TÖÖTINGIMUSED

Töökeskkonna NSVLi-aegne märgistus õppelaborite elektromehaanilistel analoogmõõteriistadel:

А – mõõteriist töötab normaalselt temperatuurivahemikus +10 °C kuni +35 °C ja 80% suhtelises niiskuses;

Б – mõõteriist töötab normaalselt temperatuurivahemikus –20 °C kuni +50 °C ja kuni 80% suhtelises niiskuses.

В – mõõteriist töötab normaalselt temperatuurivahemikus –40 °C kuni +60 °C ja kuni 98% suhtelises niiskuses.

Mõõteriista numbrilauale märgitakse tema isolatsiooni proovipinge, valmistajatehase märk, mõõteriista number, väljalaskeaasta ja mõõteriista tüüp.

Isolatsiooni proovipinge arvväärtuse tähised **2 kV või 2** on esitatud viisnurga sees.

MÕÕDETAV ELEKTRILINE SUURUS

Tingmärk	Mõõteriista nimetus	Mõõdetav suurus
A	**Ampermeeter** µA-mikroampermeeter mA-milliampermeeter MA-megaampermeeter	voolutugevus
V	**Voltmeeter** mV-millivoltmeeter kV-kilovoltmeeter MV-megavoltmeeter	pinge
Ω	**Oommeeter** kΩ-kilooomeeter MΩ-megaoomeeter	takistus
W	**Vattmeeter** kW-kilovattmeeter MW-megavattmeeter	vahelduvvoolu aktiiv- ja alalis-voolu võimsus
Hz	**Hertsmeeter** KHz-kilohertsmeeter MHz-megahertsmeeter	sagedus
φ °	**Fasomeeter**	võimsustegur
	Arvesti	elektrienergia
AVO	**Multimeeter** (Tester)	voolutugevus, pinge ja takistus

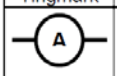
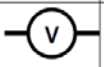
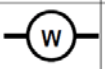
MÕÕTEASEND

Tingmärk	Mõõteriista asend mõõtmisel
	horisontaalasend
	vertikaalasend
	etteantud nurga all (näiteks 30°)

ELEKTRIMÕÕTERIISTAD ELEKTRISKEEMIDEL

Tingmärk	Nimetus	Tingmärk	Nimetus
	Elektrimõõteriist		Termoandur
	Registreeriv mõõteriist		Rõhuandur
	Integreeriv mõõteriist		Valgusandur
	Elektrimõõteriist – näitena milliampermeeter		Impulsiloendur
	Voolumähis		Pingemähis
	Ühefaasiline vattmeeter		Kolmefaasiline vattmeeter
	Arvesti		Aegrelee
	Programmkell		Digitaalvoltmeeter
	Lülituskell		Digitaalampermeeter
	Ostsilloskoop		Ostsillograaf

MÕÕTERIISTADE TINGTÄHISED

Tingmärk	Mõõteriista nimetus	Mõõdetav suurus
	**Ampermeeter** µA-mikroampermeeter mA-milliampermeeter kA-kiloampermeeter MA-megaampermeeter	voolutugevus
	**Voltmeeter** mV-millivoltmeeter kV-kilovoltmeeter MV-megavoltmeeter	pinge
	Oommeeter kΩ-kilooommeeter MΩ-megaoommeeter	takistus
	**Vattmeeter** kW-kilovattmeeter MW-megavattmeeter	vahelduvvoolu aktiiv- ja alalisvoolu võimsus
	Hertsmeeter kHz-kilohertsmeeter MHz-megahertsmeeter	sagedus
	Fasomeeter	võimsustegur
	Arvesti	elektrienergia
	Multimeeter (Tester)	voolutugevus, pinge ja takistus

MÕÕTERIISTA MÕÕTESÜSTEEMID

Tingmärk		Mõõtesüsteemi talitlus
tavaline	logomeeter	
		magnetelektriline
		elektromagnetiline
		elektrodünaamiline
		ferrodünaamiline
		induktsiooniline
		vibratsioon
		termiline
		bimetall

KÜMNENDARVU JÄRGUÜHIKUD

Aste	Nimetus	Tähis	Aste	Nimetus	Tähis
10^{24}	jotta	Y	10^{-24}	jokto	y
10^{21}	zetta	Z	10^{-21}	zepto	z
10^{18}	eksa	E	10^{-18}	atto	a
10^{15}	peta	P	10^{-15}	femto	f
10^{12}	tera	T	10^{-12}	piko	p
10^{9}	giga	G	10^{-9}	nano	n
10^{6}	mega	M	10^{-6}	mikro	µ
10^{3}	kilo	k	10^{-3}	milli	m
10^{2}	hekto	h	10^{-2}	senti	c
10^{1}	deka	da	10^{-1}	detsi	d

7.12. Kordamisküsimused

1. Elektromehaaniliste mõõteriistade liigitus ja kasutusvaldkond.
2. Magnetelektrilise, elektromagnetilise ja elektrodünaamilise mõõtemehhanismiga mõõteriistade kasutusvaldkonnad.
3. Induktsioonmõõtemehhanismi ja Halli anduriga elektriarvesti.
4. Elektron- ja numbermõõteriistade ehitus ja kasutusvaldkond.
5. Meerikute ja ostsillograafide üldiseloomustus.
6. Elektritarbimise ja -kvaliteedi mõõteriistade iseloomustus.

8. REAKTORID. TERASSÜDAMIKUGA POOL SIINUSPINGEL

8.1. Teraseskadu
8.2. Transformatoorse allikapinge võrrand ja kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagramm
8.3. Voolukõvera kuju
8.4. Terassüdamikuga pooli vektordiagramm
8.5. Terassüdamikuga pooli aseskeem
8.6. Elektrilised reaktorid
8.7. Kordamisküsimused

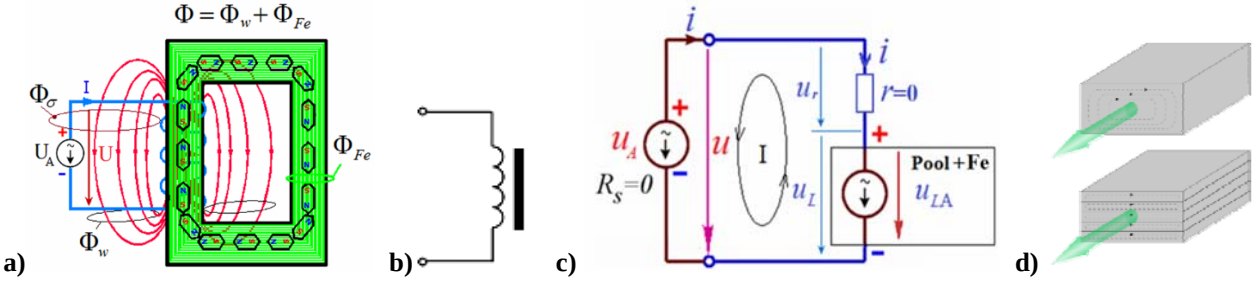
8.1. Teraseskadu

Terassüdamikuga pooli tööpõhimõte. Kui rakendada w keeruga poolile (joonis 8a) toiteallika pinge U_A, tekkib poolis vool I, mis omakorda tekitab pooli magnetvoo Φ_w. Ferromagnetilise südamiku tõttu tekkib pooli magnetvoogu võimendav magnetvoo osa Φ_{Fe}. Liitumisel tekkiv kogu magnetvoog Φ võrdub kahe osa voo summaga $\Phi = \Phi_w + \Phi_{Fe}$. Magnetvoog Φ, aheldudes pooli mähise kõigi keerdudega w, tekitab ajaliselt muutuva aheldusvoo ψ, mis indutseerib mähises w allika pinget tasakaalustava allikapinge U_{LA}. Seejuures omandab vool I kindla väärtuse, mis on üheselt määratud vajaliku magnetvoo Φ_1 suurusega, mille puhul mähises indutseeritud allikapinge võrdub toiteallika pingega $U_{LA} = U_A$. Mida suurema magnetvoo võimendamisvõimega on pooli terassüdamik (kõrgema magnetilise läbitavusega μ on pooli südamiku materjal), seda väiksema voolu I väärtuse juures saavutame vajaliku magnetvoo väärtuse Φ, mille juures $U_{LA} = U_A$. Pooli tööpõhimõtet avav **lühivastuse stenogramm (kondikava) on**

$$U_A \to I \to \Phi_w \to \Phi_{Fe} \to \Phi_w + \Phi_{Fe} = \Phi \to w \cdot \Phi = \psi \to \frac{d\psi}{dt} \to U_{LA}.$$

Seega $U_A = U_{LA}$. Kõik see kehtib ka hetkväärtuste kohta. Seega, kui toiteallikapinge on siinuseline, siis on siinuseline ka seda tasakaalustav pooli allikapinge. Siit järeldub, et aheldusvoog peab muutuma koosinus-funktsiooni järgi.

Terassüdamikuga pool ja ta tingmärk on joonisel 8.1.



Joonis 8.1. Terassüdamikuga pool (a), tingmärk (b), aseskeem (c) ja südamiku õhukestest plekkidest valmistamise idee

Märkus: Joonisel (a) on eksitav, ristuvate magnetjõujoontega eskiis. Domeenide magnetvoo osa kasvuga suureneb magnetvälja energiatihedus. Seega sulguvad mitteristuvad punased jõujooned vooluga mähisele lähemal ja ei ristu rohelistega.

Tavaliselt räägitakse, et poolide induktiivsuse suurendamise eesmärgil valmistatakse nende südamikud suure magnetilise läbitavusega ferromagnetilisest materjalist (joonis 8.1a). Terassüdamikuga pooli magnetvoog on samasuguse voolu korral palju suurem kui õhksüdamikuga poolil. Kui ideaalses (r = 0) õhksüdamikuga poolis on vool 90° pingest järel, siis terassüdamikuga poolis on voolu ja pinge vaheline nihkenurk alati väiksem kui 90°, sest südamikus muundub osa elektrienergiast soojuskiirguseks, tekkivad soojuslikud kaod. See on terassüdamikuga pooli oluline erinevus õhksüdamikuga poolist. Kadu südamikus nimetatakse **teraseskaoks,** ajalooliselt **rauaskaoks**, mis koosneb **pöörisvoolukaost** ja **hüstereesikaost.**

Siinustoitepinge puhul on terassüdamikus tegemist perioodiliselt muutuva magnetvooga. Elektromagnetilise induktsiooni seaduse kohaselt tekitab ajaliselt muutuv magnetvoog juhtivas keskkonnas potentsiaalide vahe – allikasisepinge, mis on voolu põhjuseks kinnises (terassüdamik on elektrijuht) kontuuris. Seega tekkivad terassüdamikuga pooli südamikus **pöörisvoolud**, mille suurus iseloomustab elektrienergia osalise muundumise intensiivsust soojusenergiaks. Pöörisvooludest tingitud energiakadu ajaühikus nimetatakse **pöörisvoolukaoks**, mis oleneb südamiku materjali eritakistusest ja massist, vootihedusest ning magnetvoo muutumise sagedusest. Pöörisvoolukadu võib arvutada kogemustel põhineva valemiga

$$P_F = p_F m f^2 B_m^2,$$

kus p_F on pöörisvoolude erikadu, W/kg; m – südamiku mass, kg; f – sagedus, Hz ja B_m – vootiheduse amplituud teslades, T.

Pöörisvoolukao vähendamise eesmärgil valmistatakse terassüdamikud (joonis 8.1d) õhukestest plekkidest (paksusega 0,25...0,5 mm), kusjuures plekid on magnetvoo sihis (risti pöörisvooludega) ja üksteise suhtes elektriliselt isoleeritud. Elektrotehnilisest terasest pleki koostises on ka 0,5...4,5% räni, mis tunduvalt vähendab selle elektrilist juhtivust. See vähendab veelgi pöörisvoolusid, kusjuures teraspleki magnetilised omadused ei halvene.

Terassüdamiku perioodiline ümbermagneetimine on samuti seotud energiakuluga. On teada, et ferromagnetilise materjali ümbermagneetimine toimub hüstereesisilmuse järgi. Ajaühikus ümbermagneetimiseks vajalikku energiat nimetataksegi **hüstereesikaoks**, mis oleneb, nagu pöörisvoolukadugi, südamiku materjali omadustest ja selle massist, ümbermagneetimise sagedusest ning vootihedusest. Hüstereesikadu võib samuti arvutada kogemustel põhineva valemiga

$$P_h = p_h\, m f B_m^n,$$

kus p_h on hüstereesi erikadu, W/kg; m – südamiku mass, kg; f – sagedus, Hz ja B_m – vootiheduse amplituud teslades, T. Laia levikuga elektrotehniliste teraste puhul astendaja $n = 2$, kui $B_m \geq 1\,\mathrm{T}$, ja $n < 2$, kui $B_m < 1\,\mathrm{T}$.

Seega teraseskadu $P_{Fe} = P_F + P_h.$

8.2. Transformatoorse allikapinge võrrand ja kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagramm

Terassüdamikuga pooli induktiivsus ei ole püsiv suurus, sest ferromagnetilise materjali küllastuse tõttu ei ole magnetvoog võrdeline magneetimisvooluga, vaid oleneb sellest, kui suur osa kogu terassüdamiku domeenidest juba osaleb pooli magnetvoo võimendamises, kindla ferromagnetmaterjali korral oleneb magnetvootiheduse väärtusest. Seepärast ei saa poolis indutseeritud allikapinge leidmisel kasutada seost $u_{LA} = L di/dt,$ kuna $L \neq \text{const}.$ Seega tuleb lähtuda üldisemast seaduspärasusest

$$u_{LA} = w\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (8.1)$$

kus w on pooli keerdude arv ja Φ – vooluga pooli ja ferromagnetsüdamiku tekitatud magnetvoog.

Olgu meil siinusallikapingele $u_A = U_m \sin \omega t$ lülitatud terassüdamikuga pool (joonis 8.1c).

Kirchhoffi pingeseaduse põhjal, võttes kontuuri I läbimissuunaks (vastupäeva), saame potentsiaalilangudest lähtudes $u - u_r - u_L = 0$ ehk $u = u_r + u_L.$

Seega võrdub toiteallika väljundpinge tarbijate (toimub energiamuundumine või salvestamine) ehk välisahela potentsiaalilangude summaga.

Allikapingest lähtudes saame, et allikapingete summa võrdub potentsiaalilangude summaga:

$u_A - u_{LA} = u_r = ir$, kuna meil $u_L = u_{LA}$, siis $u_A = u_r + u_{LA} = ir + u_{LA}.$

Avaldame siit pooli voolu $$i = \frac{u_A - u_{LA}}{r}. \qquad (8.2)$$

Väljendades toiteallikapinge potentsiaalilangude kaudu: $u_A = u_r + u_L$.

Kui kasutada seost $u_A = ir + u_{LA}$ ja eeldada, et pooli takistus on tühine ($r \approx 0$), saame seose (8.2) asemel $u_A = u_{LA}$. Seega pooli allikasisepinge võrdub toiteallika pingega, muutub ka siinuseliselt ja on toiteallikasisepingega **faasis**.

Pool on tarbija talitluses (voolu suund ei ühti allikavoolu loomuliku suunaga: allika plussklemmilt läbi välisahela miinusklemmile):

$$u_{LA} = U_{LAm} \sin \omega t. \qquad (8.3)$$

Võrdsustades seosed (8.1) ja (8.3), saame $w\frac{d\Phi}{dt} = U_{LAm} \sin \omega t$ ehk $d\Phi = \frac{U_{LA}\sqrt{2}}{w} \sin \omega t dt$,

millest $$\Phi = \frac{U_{LA}\sqrt{2}}{w\omega} \int \sin \omega t d(\omega t) = -\frac{U_{LA}\sqrt{2}}{w\omega} \cos \omega t + K,$$

kus $K = 0$ siinusvoo korral. Pärast $\omega = 2\pi f$ asendamist saame magnetvoo amplituudväärtuseks

$$\Phi_m = \frac{U_{LA}\sqrt{2}}{w 2\pi f} = \frac{U_{LA}}{\sqrt{2}\pi f w} \qquad (8.4)$$

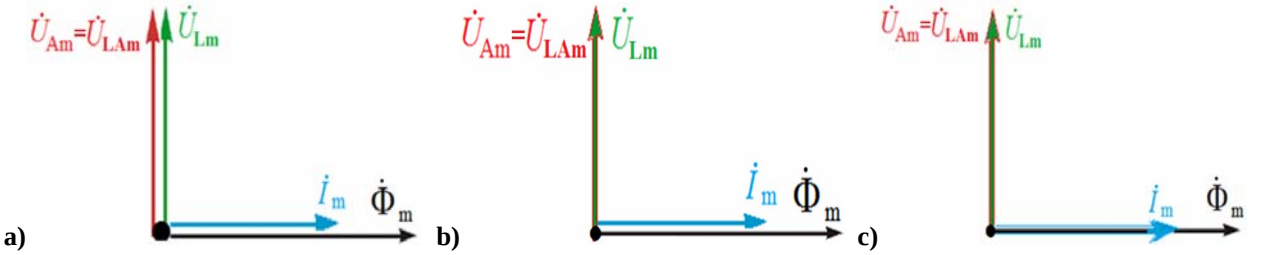
ja efektiivväärtus $$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t = -\Phi_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Seosest (8.4) saame avaldada pooli allikapinge efektiivväärtuse

$$U_{LA} = \sqrt{2}\pi f w \Phi_m = 4{,}44 f w \Phi_m. \qquad (8.5)$$

See avaldis kannab pooli **transformatoorse allikapinge** nime.

Kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagramm. Kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagrammi joonisel 8.2a joonestatakse järgmiselt: kanname mõõtkavas suvalises suunas allikapinge diagrammvektori U_{Am}, seejärel kanname sellega risti magneetimisvoolu vektori I_m ja rööbiti magnetvoo Φ_m vektori.



Joonis 8.2. Kaovaba terassüdamikuga poolivektordiagramm: a – samasuunalised vektorid on näidatud rööbiti, b – võrdsetest pingevektoritest on üks kujutatud jämedama, teine peenema joonega, c – mõlemal vektori paaril on üks vektor kujutatud jämedama, teine peenema joonega

Seejärel kanname toiteallika pingega samas suunas samasuure tasakaalustava pooli allikapinge vektori U_{LAm}. Energiasalvestina (tarbijana ja vastuallikana) toimiva ideaalse ferromagnetsüdamikuga pooli potentsiaalilangu U_L vektor, mis oma suunalt langeb kokku ahela voolu suunaga, on võrdne toiteallikapinge vektoriga $U_{Am} = U_{Lm}$. Seega, kaovaba pooli korral on vektorid võrdsed ning kattuvad. See muudab nende kujutamise keerukamaks. Joonisel 8.2a on vektorid kujutatud rööbiti ja joonisel 8.2b ja c kattuvatena.

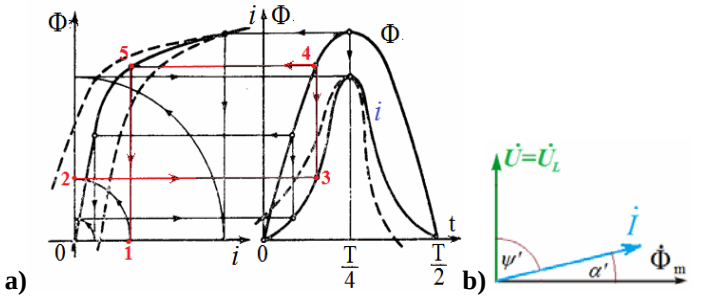
Seejuures kattuvatel vektoritel on üks nendest näidatud peenema, teine jämedama joone abil. Tähtis on, et vektorid oleks selgesti eristatavad.

Näeme, et kaovaba terassüdamikuga pooli vektordiagramm vastab induktiivpooli vektordiagrammile (joonis 4.27b).

8.3. Voolukõvera kuju

Nagu eespool öeldud, puudub ferromagnetilise südamiku magnetilise küllastuse tõttu võrdelisus magnetvoo ja magneetimisvoolu vahel. Põhjus on selles, et pooli magnetvälja võimendamisvõime oleneb sellest, kui suur osa domeene on juba orienteerunud pooli magnetvälja suunas ning liitnud domeenide „isiklikud“ magnetväljad pooli väljaga. Toiteallika sisepinge ja pooli allikapinge muutuvad võrdseks olukorras, kus pooli voolu erinevate hetkväärtuste korral domeenide isiklike magnetväljade liitumisintensiivsus on erinev (ferromagnetsüdamikul on suur võimendusvõime küllastamata olekus ja sügavküllastuse korral võimendusvõime praktiliselt kaob). Seetõttu ei ole vool poolis enam siinuseline ka siinuspinge ning -voo korral, sest igal poolperioodil ja igal ajahetkel saavutatakse u_A ja u_L võrdsus erineva võimenduse juures. Küllastuse korral võib voolukõvera kuju leida joonisel 8.3a esitatud konstruktsiooni abil, kus nooled abijoontel näitavad konstrueerimissuunda.

Arvestamata hüstereesi, leiame sellel joonisel magnetvoo ja keskmise magneetimiskõvera $\Phi = f(i)$ abil voolukõvera, mis oluliselt erineb siinuskõverast.



Joonis 8.3. Terassüdamikuga pooli voolukõvera kuju (a) ja sellele formaalselt vastav vektordiagramm (b)

Nii leitud vool on ilmselt faasis magnetvooga, kuid selle voolu efektiivväärtus $I \neq I_m / \sqrt{2}$. Harmooniliste analüüsi abil võime leida voolu ekvivalentse efektiivväärtuse. Analüüsi tulemusena saadud parandusteguri ξ kaudu ekvivalentne vool

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}\xi}, \tag{8.6}$$

kus $\xi > 1$, kui südamik küllastub ehk voo tihedus $B_m > 1\ \mathrm{T}$ ja $\xi \approx 1$, kui küllastus puudub ehk $B_m \leq 1\ \mathrm{T}$.

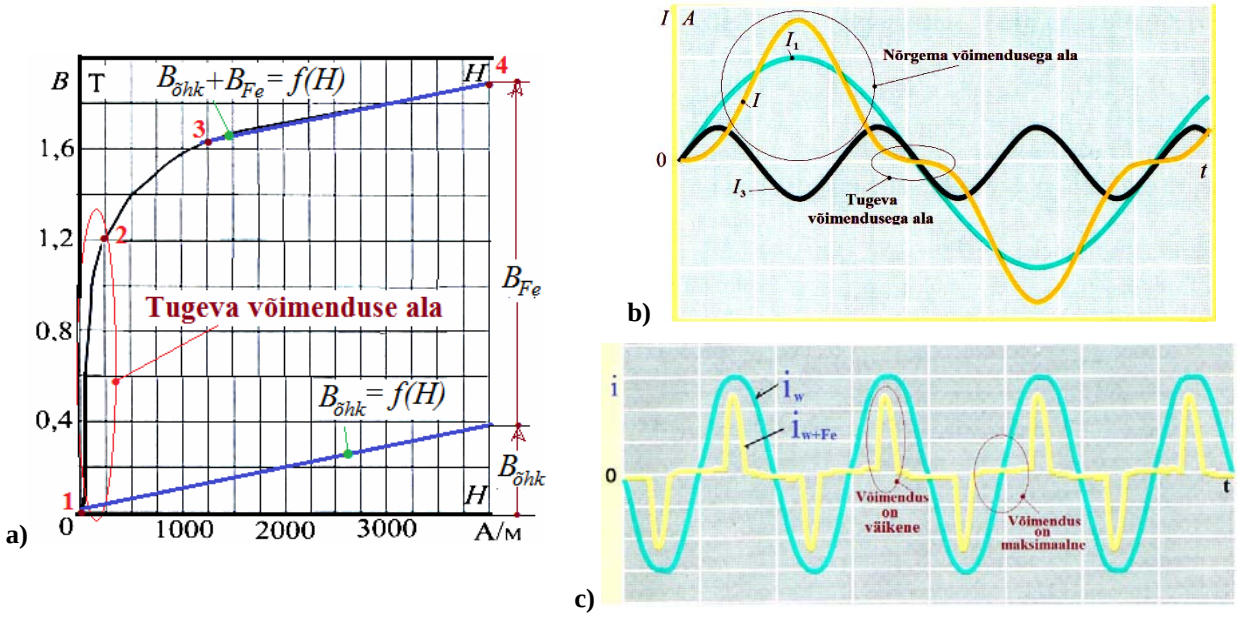
Sisuliselt toimub terassüdamiku pidev ümbermagneetimine mitte keskmise magneetimiskõvera, vaid hüstereesisilmuse järgi. Seetõttu tuleb punktid voolukõveral leida magnetvoo suurenemisel silmuse parempoolse haru ja magnetvoo vähenemisel silmuse vasakpoolse haru kaudu. Sarnaselt eelmisega saame nüüd voolukõvera, arvestades hüstereesi olemasolu (kriipsjoon joonisel 8.3a). Näib, et vool on magnetvoost nurga α' võrra ees. Voolu võrdväärne efektiivväärtus oleks leitav sarnaselt seosega (8.6). Arvestades hüstereesi olemasolu, saame hüstereesikao kaudu leida nurga

$$\psi' = 90^\circ - \alpha' \quad \text{ja siit} \quad \psi' = \arccos\frac{P_h}{U_A I}. \tag{8.7}$$

Märkus: lähtudes ferromagnetilise südamikuga pooli tööpõhimõttest, välistab õpiku koostaja arusaama põhjal sellise mittesümmeetria tekke vastastikmõju (sisuliselt sisemine parameetriline tagasiside), sest siinustoitepingele vastab pooli siinusallikapinge ja see on võimalik ainult koosinusfunktsiooni järgi muutuva aheldusvoo korral. See tagasiside likvideerib joonisel 8.3 kujutatud voolukõvera mittesümmeetria.

Nii saaksime vektordiagrammi, mis on joonisel 8.3b. Siin pole näidatud allikaväljundpinge vektorit U. Viimane on pooli potentsiaallangu vektorist U_L suurem. Nende leidmist vaadeldakse punktis 8.4.

Voolukõvera moonutuse põhjustab piiratud domeenide arv ferromagnetsüdamikus. Joonisel 8.4a on esitatud trafo plekist valmistatava ferromagnetsüdamiku magneetimiskõver $B = f(H)$. Väikeste väljatugevuste piires (punktide 1 ja 2 vaheline vahemik) on pooli voolust põhjustatud magnetvälja abil võimalik välja suunas „ära pöörata“ väga palju domeene, mis lisavad oma „isiklikud” magnetväljad pooli väljale, võimendades seda. Siin on pooli töö kõige tõhusam – väikese magneetimise vooluga saab luua tugeva magnetvälja. Magneetimiskõvera põlve piirkonnas (punktide 2 ja 3 vaheline vahemik) on aga enamik domeene liitnud oma magnetvood pooli voole ja südamiku magnetvälja võimendamisvõime kahaneb. Magneetimiskõvera nn küllastuse piirkonnas (punktide 3 ja 4 vaheline vahemik) on sisuliselt kõik domeenid liitnud oma magnetvood pooli voole ja südamiku magnetvälja võimendamisvõime on väikene. Edasine magnetvälja energia suurenemine on võimalik vaid pooli mähisevoolu suurendamise teel. Seetõttu toimub küllastusalas magnetvoo suurenemine, magnetvälja energia suurenemine vaid pooli voolu kasvu arvelt.



Joonis 8.4. Trafo pleki magneetimiskõver (a) ja voolukõvera muutus, kui magnetsüdamikul võimendus on suur ja väikene (b ja c); väikese (b) ja suure (c) võimendusega materjali korral

Joonisel 8.4a näeme, et ferromagnetsüdamikuga pooli magneetimiskõver $B = B_{õhk} + B_{Fe} = f(H)$ kulgeb küllastuse piirkonnas, punktide 3 ja 4 vahelises vahemikus, peaaegu rööbiti õhksüdamikuga pooli (kui Fe südamik eemaldada) magneetimiskõveraga $B_{õhk} = f(H)$. Seega jääb küllastusalas B_{Fe} ligilähedaselt püsisuuruseks.

Pooli tööpõhimõttest lähtuvalt peavad ajas siinuseliselt muutuva allikapinge korral magnetvoog ja pooli aheldusvoog muutuma ajas vastavalt koosinusfunktsioonile. Aheldusvoo muutumise kiirus peab igal ajahetkel täpselt võrduma allikapinge hetkväärtusega. Koosinuseliselt muutuva magnetvoo loomisel osalevad pooli vool ja Fe südamiku domeenid oma isiklike magnetväljadega. Seetõttu oleneb tulemus sellest, milline on Fe südamiku lähteseisund. Kui töö toimub magneetimiskõvera küllastamata osas (joonise 8.4a punktide 1 ja 2 vahelises vahemikus, kus on piisavalt domeene, et kaasata neid magnetvälja energia salvestamisse), siis vajalik magnetvoog luuakse pooli voolu väikesel osalusel, põhiliselt domeenide magnetvoogude arvelt. Kui aga allikapinge edasisel suurenemisel jätkub töö magneetimiskõvera lõigul 2...3, siis suur osa domeene on liitnud oma energiaväljad pooli energiaväljaga ja edasine tugevnemine toimub suures osas pooli voolu suurenemise arvelt. Kui töö jätkub magneetimiskõvera lõigul 3...4, siis valdav osa domeene on liitnud oma energiaväljad pooli energiaväljaga ja edasine tugevnemine toimub põhiliselt pooli voolu suurenemise arvelt. Joonisel 8.4b ja c esitatud pooli voolukõverad iseloomustavad vaadeldud seisukohti. Voolukõverate kuju oleneb südamiku materjali võimendusvõimest ja sellest, kas töö toimub ainult tugeva võimendusega alal või ka küllastuses. Mõlemal juhul töötab pool nii küllastamata kui ka küllastusega alal. Joonis b on iseloomulik vähem kvaliteetsele trafoplekiga südamikule, millel on sujuv magneetimiskõvera põlv. Joonis c seevastu vastab väga suure

võimendusvõimega südamikule, millel on põlv oluliselt täisnurksem. Siin on üleminek võimenduselt selle puudumisele järsum ja voolu suurenemine kiirem.

Joonisel 8.4b on mittesiinuseline vool I jagatud põhiharmooniliseks I_1 ja kolmandaks harmooniliseks I_3. Joonisel 8.4c on lisaks ferromagnetsüdamikuga pooli voolule I_{w+Fe} (tinglikult tähistab indeks, et voolu loomises osalevad nii pool kõigi oma W keeruga kui ka Fe-südamik) näidatud voolukõvera I_w kuju, kui Fe-südamik oleks poolist eemaldatud.

Kokkuvõte. Et pooli aheldusvoog muutuks koosinuseliselt ja pooli allikapinge siinuseliselt nagu toitepinge seal, kus südamikul võimendusvõime puudub, tuleb ajas muutuva aheldusvoo väärtuse saavutamiseks võtta toitevõrgust suuremat voolu. Muutuva võimendusteguri tõttu kaetakse puudu jäävate domeenide osa magnetvoo tekitamisel võrgust võetava täiendava voolu poolt tekitatava magnetvooga. See muudab voolu siinusallikapinge korral mittesiinuseliseks.

8.4. Terassüdamikuga pooli vektordiagramm

Vektordiagrammi koostamiseks vajame lisaks algpõhjusele, allikapingele, tekkiva voolu ja potentsiaallangude väärtusi. Allikapinge ja pooli voolu nihkenurga φ abil saab leida voolu komponendid. Magnetvooga faasis olev voolu reaktiivkomponent ongi sisuliselt pooli magneetimisvool. Voolu aktiivkomponendi suuruse määravad kaod terassüdamikus ja pooli mähises. Teraseskadu koosneb hüstereesi- ja pöörisvoolukaost. Mähist vaatleme alul kaovabana. Nii saame voolu nihkenurga φ

$$\varphi = \arccos\frac{P_h + P_F}{U_A I} = \arccos\frac{P_{Fe}}{U_A I}.$$

kusjuures nurka $\alpha = 90^\circ - \varphi$ nimetatakse **kaonurgaks**. Järelikult voolu aktiivkomponent

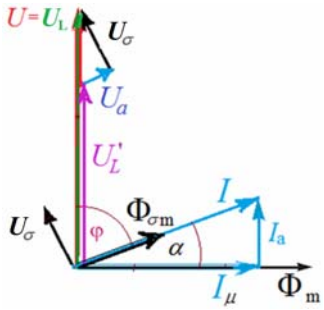
$$I_a = I\cos\varphi = \frac{P_{Fe}}{U_A}$$

ja reaktiivkomponent $I_\mu = I\sin\varphi$.

Pooli vool $I = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2}$.

Allikapinge U_A määrab algmõjuna kõik ülejäänud vektordiagrammi koosteosad, nende suurused ja suunad. Kadudega terassüdamikuga pooli (reaalse pooli aktiivtakistus $r \neq 0$) potentsiaalilangud koosnevad kolmest osast: pooli potentsiaalilangust U_L, potentsiaalilangudest pooli ja teraseskadusid arvestaval aktiivtakistustel U_a ning nn potentsiaalilangust pooli puisteinduktiivtakistusel. Vool poolis tekitab pooli aktiivtakistusel $U_a = U_{Cu} = Ir_{Cu}$. Siin tähistab r_{Cu} pooli aktiivtakistust. Potentsiaalilang U_a liitub pooli potentsiaalilangule U_L'. Pooli oomtakistil on U_a faasis vooluga I. Peale selle peab pooli potentsiaalilang U_L sisaldama ka puiste potentsiaalilangukomponenti U_σ. Peale ferromagnetilises südamikus sulguva, domeenide poolt põhjustatud magnetvoo Φ_1 (joonis 8.1a), eksisteerib veel mähise voolu põhjustatud magnetvoog Φ_σ, mis sulgub suures osas väljaspool südamikku – õhus. Seda osa voost nimetatakse **puistemagnetvooks** Φ_σ.

Kadudega terassüdamikuga pooli vektordiagrammi joonisel 8.5 joonestatakse järgmiselt.



Joonis 8.5. Terassüdamikuga pooli vektordiagramm

Kanname mõõtkavas suvalises suunas allikapinge vektori U_A. Seejärel kanname temaga risti magneetimisvoolu vektori I_μ, mis on allikapingest järel 90°. Vooluga I_μ rööbiti kanname magnetvoo Φ_m vektori. Magneetimisvooluga kaasneb ka vases- ja teraseskadudest põhjustatud voolu aktiivkomponent I_a. Pooli voolu *I* leiame I_μ ja I_a vektorite liitmise teel. Viimastena kanname allikapinge poolt esile kutsutud samas suunas ja sama suure pooli potentsiaalilangude vektorid.

Kuna puistevoog Φ_σ levib mitteferromagnetilises keskkonnas, on ta vooluga *I* faasis, sellega võrdeline ning ei tekita lisa teraseskadu. Ajas muutuva puistevoo poolt indutseeritud puisteallikapinge

$$u_\sigma = w\frac{d\Phi_\sigma}{dt},$$

ehk voolu võrdelisuse tõttu aheldusvoo muutumise kiirusega saame

$$u_\sigma = \frac{d(w\Phi_\sigma)}{dt} = \frac{d\Psi_\sigma}{dt} = \frac{d(L_\sigma i)}{dt} = L_\sigma\frac{di}{dt}.$$

Pooli puisteallikapinge efektiivväärtuse saab leida ka transformatoorse allikapinge võrrandi abil:

$$U_\sigma = 4{,}44 f w \Phi_{\sigma m}$$

ning see on 90° puistevoost ees. Puisteallikapinge, mis on avaldatav ka puisteinduktiivsuse ja voolu kaudu:

$$\dot{U}_\sigma = \dot{I}j\omega L_\sigma = \dot{I}jx_\sigma,$$

kus x_σ on puisteinduktiivtakistus. Puistevoog $\Phi_{\sigma m}$ ja puisteallikapinge U_σ puisteinduktiivtakistusel on ka kantud vektordiagrammile joonisel 8.5.

Arvestades pooli aktiivtakistust ja puiste olemasolu, saame allikapinge U_A ja terassüdamikuga pooli potentsiaalilangu U_L tasakaaluvõrrandi:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_L = \dot{U}_L' + \dot{I}r_{Cu} + \dot{I}jx_\sigma = \dot{U}_L' + \dot{I}(r_{Cu} + jx_\sigma). \qquad (8.8)$$

Seega on vastastikku seotud kõik suurused terassüdamikuga pooli vektordiagrammil. Leiame ka nihkenurga φ allikapinge ja voolu vahel.

Kui aktiivtakistus $r \neq 0$, siis tekkib poolis soojuskadu. Poolis tekkivat kadu ajaühikus nimetatakse **vaseskaoks** ehk **mähiseskaoks**: $P_{Cu} = I^2 r_{Cu}$.

Seega, pooli poolt tarbijana tarbitav aktiivvõimsus $P = P_{Cu} + P_{Fe}$ ja pooli võimsustegur

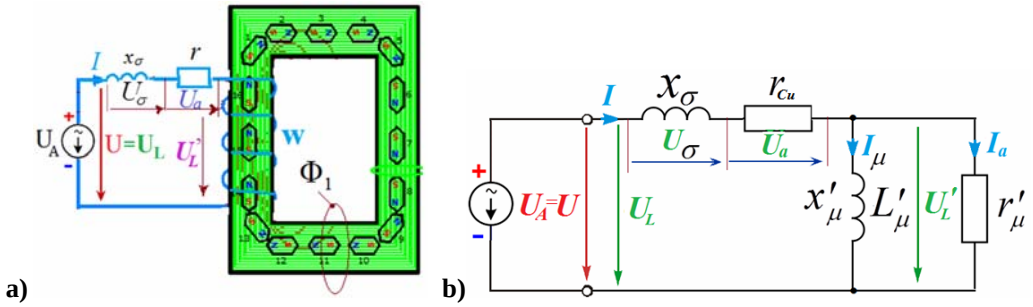
$$\cos\varphi = \frac{P_{Cu} + P_{Fe}}{U_A I}; \qquad (8.9)$$

siit nurk (joonis 8.5) $\varphi = \arccos\frac{P}{U_A I}$.

8.5. Terassüdamikuga pooli aseskeem

Terassüdamikuga pooli **aseskeem** kujutab endast lülitust, mis allikapinge U_A korral tarbiks terassüdamikuga pooliga ühesugust voolu *I* ühesuguse faasinihke φ juures. Aseskeemi mõiste kohaselt tarbib aseskeem reaalse terassüdamikuga pooliga ühesugust võimsust. Üldisemas mõttes on **aseskeem mingi originaali** (siin terassüdamikuga pooli) **elektriline mudel, iseloomustades uuritavat objekti õigesti nii elektriliselt ja ka energeetiliselt**, jättes osaliselt kõrvale füüsikalise tõepärasuse. Aseskeeme on otstarbekohane kasutada elektrilise arvutuse juures, kusjuures ahelate ekvivalentsest teisendusest lähtudes võib ühele originaalile vastata mitu aseskeemi.

Vaatleme terassüdamikuga pooli esmalt idealiseerituna (joonis 8.6a), st eeldame, et tal puudub aktiivtakistus ja puiste. Neid võtame arvesse sellise pooliga jadamisi ühendatud takistiga r ja pooliga, mille induktiivtakistus on x_σ. Takistus r tuleb valida nii, et selles eralduks voolu I korral ekvivalentne võimsus P_{Cu} ja induktiivtakistus x_σ tuleks võtta võrdseks terassüdamikuga pooli puisteinduktiivtakistusega. Seega on r ja x_σ eraldatud terassüdamikuga poolist, kusjuures sellise osalise asenduse tulemusena on võimalik üle minna täielikule aseskeemile (joonis 8.6b). Ideaalse pooli võib nüüd asendada kahe rööpharuga. Ühes neist on puhtaktiivne takistus r'_μ, mis valitakse nii, et vool selles tekitaks terases kaoga võrreldes võimsuse $P_{Fe} = I_a^2 r'_\mu$, ehk $r'_\mu = U_L'/I_a$



Joonis 8.6. Terassüdamikuga pool (a), segalülituses olevate takistitega pooli aseskeem (b)

Teises rööpharus on aga puhtinduktiivne pool, mille induktiivsus

$$L'_\mu = \frac{w\Phi_m}{I_\mu\sqrt{2}} \text{ või } x'_\mu = \omega L'_\mu = \frac{U_L'}{I_\mu}.$$

Nii saame aseskeemi (joonis 8.6b), mis on kooskõlas ka vektordiagrammiga (joonis 8.5). Tõepoolest

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_\mu^2}$$

ja kehtib seos (8.8).

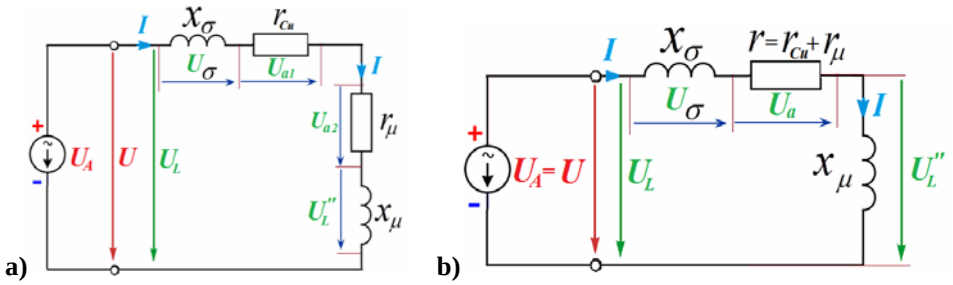
Asendades rööpharud ekvivalentse jadaahelaga, saame uue aseskeemi (joonis 8.7), kus aktiivtakistus

$$r_\mu = \frac{P_{Fe}}{I^2} \text{ ja } x_\mu = \sqrt{\left(\frac{U_{a2} + U_L''}{I}\right)^2 - r_\mu^2}.$$

Joonisel 8.7 esitatud aseskeemi põhjal saab leida võimsusteguri

$$\cos\varphi = \frac{r_{Cu} + r_\mu}{\sqrt{(r_{Cu} + r_\mu)^2 + (x_\sigma + x_\mu)^2}},$$

mis annab sama tulemuse nagu valem (8.9), kui lugejat ja nimetajat korrutada I^2-ga.



Joonis 8.7. Kahe (a) ja ühe (b) aktiivtakistiga terassüdamikuga pooli jadalülitusega aseskeem

Joonisel 8.7a võime terassüdamikuga pooli aseskeemi kujutada kahe pooli jadalülitusena. Üks poolidest on ilma terassüdamikuta, teine terassüdamikuga. Esimese pooli näivtakistus on $\dot{Z} = r_{Cu} + jx_{\sigma}$, teisel $\dot{Z}_{\mu} = r_{\mu} + jx_{\mu}$. Viimases avaldises on r_{μ} aktiivtakistus, mis arvestab südamiku teraseskadu, x_{μ} on reaktiivtakistus, mis arvestab südamiku magnetvoo poolt poolis indutseeritud allikasisepinget. Esimese pooli avaldises on r_{Cu} aktiivtakistus, mis arvestab terassüdamikuga pooli mähises(vases)kadu, x_{σ} on reaktiivtakistus, mis arvestab pooli puistemagnetvoo poolt poolis indutseeritud puisteallikasisepinget U_{σ}.

Joonisel 8.7b koosneb terassüdamikuga poolipotentsiaalilang U_L, samuti nagu joonisel 8.5 oleval vektordiagrammil, kolme potentsiaalilangu vektori summast $\dot{U}_L = \dot{U}_L'' + \dot{U}_a + \dot{U}_{\sigma} = \dot{U}_A = \dot{U}$ ja nende summa võrdub kaovaba allika korral allikasisepingega U_A ja väljundpingega U. Seetõttu vastab terassüdamikuga pooli joonisel 8.5 esitatud vektordiagramm täielikult nii joonise 8.6 kui ka joonise 8.7 aseskeemi vektordiagrammile.

8.6. Reaktorid

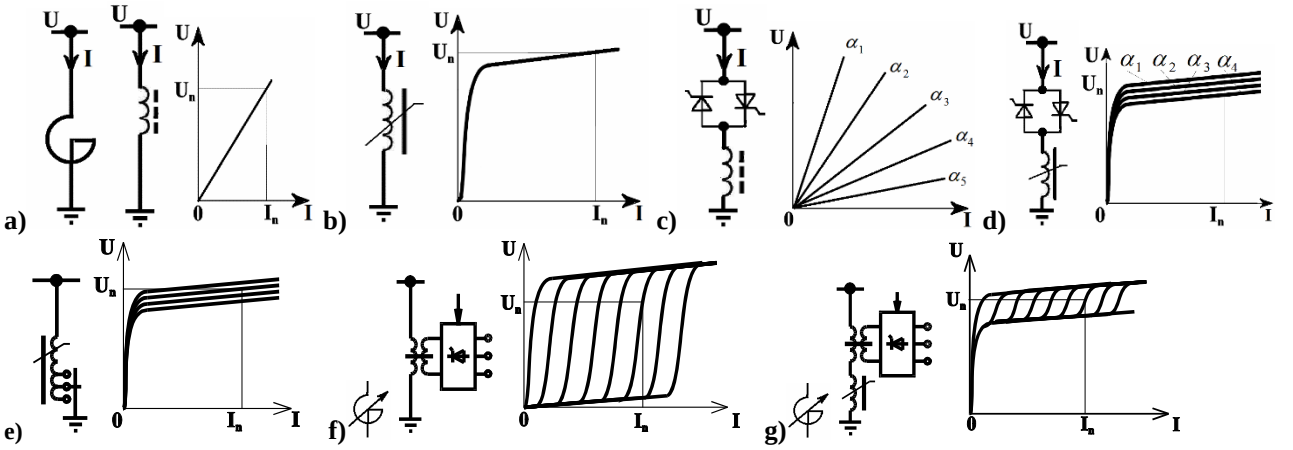
Elektroenergeetikas kasutatakse induktiivvoolu ehk **induktiivse reaktiivvõimsuse tarbijaid reaktoreid**. Eristatakse piki- ja põikreaktoreid (jada- ja rööplülituses olevaid reaktoreid). Põikreaktoreid on otstarbekas kasutada näiteks elektrivõrkude koormussõlmedes pinge reguleerimiseks ja piki reaktoreid lühisvoolude piiramiseks. Põiki reaktorid võimaldavad kompenseerida kõrgepingeliinide liigset laadimisvõimsust, võimaldades vähendada väikese koormusega ülekandeliinide energiakadu. Nende abil on võimalik tagada ratsionaalsed pingenivood, piirates pinge kõikumiste suurust 1...2% U_n, vähendada ülekande energiakadu 15...20% ning vähendada kalli kommutatsiooni aparatuuri kasutusintensiivsust.

Loetletud eesmärkide saavutamine toimub järgmiselt: liigse mahtuvusliku võimsuse kompensatsioon ja reaktiivenergia voo vähendamine ülekandeliinides, trafodes tagab nendes voolu ja energiakao vähenemise. Ratsionaalse pinge taseme tagamine likvideerib kõrgema pingega kaasneva täiendava sundtarbimise. Pingekõikumiste likvideerimine tagab elektri parema kvaliteedi. Need meetmed suurendavad ka seadmete ja ülekandeliini koosteosade tööiga.

Püsiparameetritega reaktorid. Tugevvoolutehnikas kasutatavaid õhk- ja ferromagnetsüdamikuga induktiivpoole nimetatakse **reaktoriteks**. Väikese ja keskmise võimsusega reaktorite põhilised kasutusvaldkonnad on tavatöö ja avariitalitluse voolutõugete piiramine. Sageli kasutatakse neid lühisvoolude piiramiseks. Väiksemate voolude korral saab jaotusseadmetes avariivoolude väljalülitamiseks kasutada odavamaid ja kergemaid võimsuslüliteid. Reaktoreid kasutatakse ka võimsate asünkroonmootorite käivitusvoolude piiramiseks. Need reaktorid lülitatakse tarbijaga jadamisi. Keskpinge- ja kõrgepingevõrkudes kasutatakse ühefaasiliste lühiste korral maaühendusvoolude piiramiseks **maandusreaktoreid**. Need ühendatakse võrgu neutraalpunkti ja maanduskontuuri vahele. Õhksüdamikuga reaktori pinge-voolu tunnusjoon on esitatud joonisel 8.8a. Sarnase pinge-voolu tunnusjoonega on ka nende terassüdamikuga reaktorite tunnusjooned, mille sammastel vahelduvad magnetilised ja mittemagnetilised sambaosad. Joonisel 8.8a on esitatud sellise reaktori ja ka kõikide reaktorite üldine tingtähis.

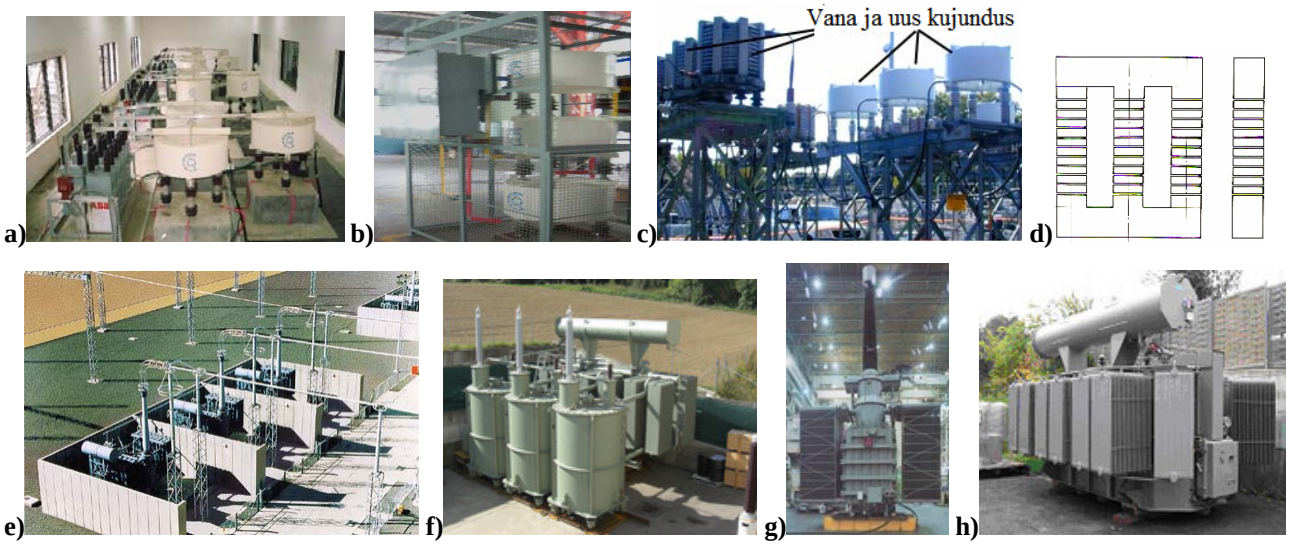
Joonisel 8.9 on esitatud energeetiliste õhk- (a, b, c) ja terassüdamikuga (d...h) reaktorite fotod. Vana kujundusega õhksüdamikuga reaktoreid (c) nimetatakse betoonsammaste tõttu betoonreaktoriteks, moodsate, monoliitse jahutuskanalitega konstruktsiooniga lihtsalt reaktoriteks (a, b). Ferromagnetsüdamikuga (terassüdamikuga) püsiparameetritega reaktorite sammastel vahelduvad ferromagnetilised ja mittemagnetilised sambaosad (d). Selle tulemusel nende magneetimistunnusjooned muutuvad lineaarseks ja siinusallikapinge korral on reaktori vool siinuseline.

Muutuvate parameetritega reaktorid. Nendeks on ferromagnetsüdamikuga juhitavad ja küllastusreaktorid, mille tingtähised ja pinge-voolu tunnusjooned on joonisel 8.8. Siin b, d ja e – on küllastusreaktor ja tema tunnusjooned. Joonisel 8.8d on reguleerimiseks kasutatud vastuparalleellülituses olevaid türistore ja joonisel 8.8e koormuse all toimivat mähise väljavõtete ümberlülitit. Nii on võimalik saada ühe tunnusjoone asemel türistoride muutumatu tüürnurga või mähise väljavõtete arvule vastav tunnusjoonte parv.



Joonis 8.8. Terassüdamikuga reaktorite tingtähised ja pinge-voolu tunnusjooned: a – reaktorite üldine ja küllastusreaktori tingtähised ning pinge-voolu tunnusjoon; b – küllastusreaktor; türistoridega (c) ja väljavõtete ümberlülimisega (e) küllastusreaktor; f – juhitav reaktor; g – juhitav küllastusreaktor

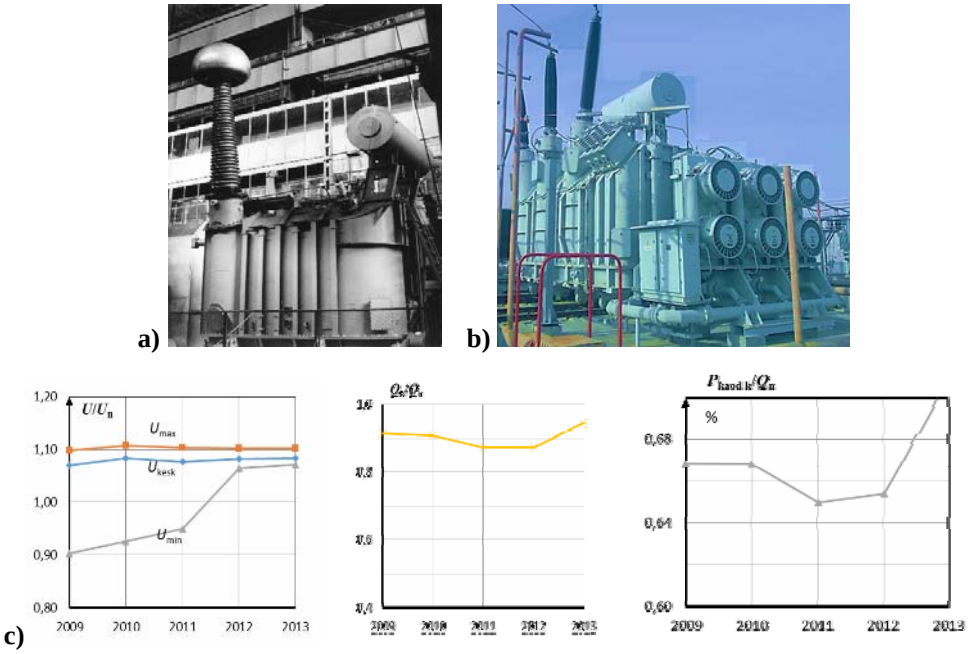
Joonisel 8.8a ja c on magnetiliste ja mittemagnetiliste sambaosadega reaktori tingtähised ja pinge-voolu tunnusjooned türistoride viie erineva muutumatute tüürnurga väärtuste korral. Joonisel 8.8f on juhitav reaktor ja tema pinge-voolu tunnusjoonte parv erinevate konstantsete juhtvoolu väärtuste puhul. Joonisel 8.8 g on kahe eelneva reaktori omadusi ühildav juhitav küllastusreaktor ja selle tunnusjooned. Nende reaktoritüüpide põhiliseks kasutusalaks on töö rööptalitluses, seega töö põikreaktoritena.



Joonis 8.9. Õhk- (a, b, c) ja terassüdamikuga (e...h) reaktorite välisvaated; d – mittemagnetiliste vahetükkidega reaktori magnetahel

Põikreaktorid. Need on reeglina pinge reguleerimiseks, parimad on juhitavad reaktorid, mille induktiivtakistust on võimalik kiirelt, sujuvalt ja täpselt suures ulatuses reguleerida. Nende eelistatavam kasutusvaldkond on ülikõrgepinge ülekandeliinide läbilaskevõime suurendamine, reaktiivvõimsuse ja pinge reguleerimine. Et ette kujutada reaktorite kasutamise vajadust, selleks täheldame, et 1150 kV (kõige kõrgema nimipingega) vahelduvvoolu ülekandeliini iga kilomeeter genereerib *ca* 6 Mvari, 10 km seega 60 Mvari, 100 km 600 Mvari mahtuvusliku reaktiivvõimsust. Selline ülekandeliin koos vastava aparatuuriga valmis 1980. aastatel NSVLis. Välja töötamata olid vaid ökonoomsed juhitavad reaktorid, mis alakoormatud ülekande korral oleks nõutaval tasemel kompenseerinud mahtuvusliku reaktiivvõimsust. Esimene sarnaste omadustega ühefaasiline eelmagneetimisvoolu reguleerimisega juhitav reaktor pingele 525 kV võimsusega 60 Mvar valmis 1992. aastal Zaporožje trafotehases (joonis 8.10a). Reaktori tööprojekti aluseks oli Tallinna Tehnikaülikoolis lepingulise uurimistöö raames tehasele üle antud neli 525 kV 180 MVA reaktori eskiisprojekti ning TTÜs varem väljatöötatud reaktorite inseneriarvutuse alused. Tööprojekti valmimisel osalesid täiendavalt ka

Üleliidulise Elektrotehnika Uurimisinstituudi ja Alma-Ata Energeetikainstituudi spetsialistid. Varem valmisehitatud 1150 kV vahelduvvoolu ülekandeliin vastavate omadustega juhitavate reaktorite puudumise tõttu võeti kasutusele pingel 750 kV. Zaporožje trafotehases oli 2013. aastaks valmistatud 39 juhitavat reaktorit 10…25 MVA pingele, 35…110 kV ja 52 juhitavat reaktorit 63…180 MVA pingele 110...500 kV.



Joonis 8.10. Ignalina AEJ 330 kV 180 MVA juhitava reaktori välisvaade (a) ja reaktori kasutustõhusust iseloomustavad põhitunnusjooned (b)

Lähim võimas (180 MVA, 330 kV) Zaporožjes valminud juhitav reaktor töötab Ignalina aatomielektrijaama 330 kV jaotlas. See on Leedu energiasüsteemi tähtsaim sõlmpunkt, kuhu koonduvad Leedu, Läti, Venemaa ja Valgevene 6 ülekandeliini pingel 330 kV, neist üks on 750 kV gabariitidega. Mainitud sõlmes on prioriteetne ülesanne lubatud pingetaseme tagamine. See tagab süsteemi stabiilsuse ja seadmete töökindluse. Liinide poolt genereeritava mahtuvusliku reaktiivvõimsuse ülejääk on eriti suur ööpäevase ja suvise koormusmiinimumi ajal, moodustades kuni 500 Mvari. Selle kompenseerimiseks kasutati algselt kaht elektrijaama turbogeneraatorit, mis alaergutuse korral tarbivad kuni 280 Mvari reaktiivvõimsust. Süsteemi stabiilsuse tagamiseks ei tohi neid koormata üle 150 Mvari. Selline generaatorite talitlus on lubatud, kuid mitte normaalne. Probleemi leevendamiseks toimus rahvusvaheline konkurss, mille võitis ABB ja Vene firma ees Leedu firma Ekobana. Koostöös eri maade partneritega lahendas firma kogu probleemide kompleksi. Reaktor on töötanud alates 2008. a augustist tänaseni laitmatult.

Joonis 8.10b ja c iseloomustavad reaktorit, tema kasutusintensiivsust, pinge stabiliseerimisnäitajaid ja kadude suhet reaktori nimivõimsusesse. Võrreldes sarnase rakendusega teiste, sujuva reguleerimisega seadmetega, on juhitavate reaktorite valmistamis- ja talitluskulud märgatavalt väiksemad. Neid saab vahetult lülitada suvalise pingetasemega liinile või alajaama lattidele.

8.7. Kordamisküsimused

1. Terassüdamikuga pooli tööpõhimõte.
2. Miks kasutatakse ferromagnetilisest materjalist südamikku?
3. Teraseskadu südamikus.
4. Miks muutub terassüdamikuga pooli voolukõvera kuju? Kuidas on see seotud magnetahela materjali magnetvoo võimendamise võimega igal ajahetkel?
5. Terassüdamikuga pooli vektordiagramm.
6. Terassüdamikuga pooli aseskeem.

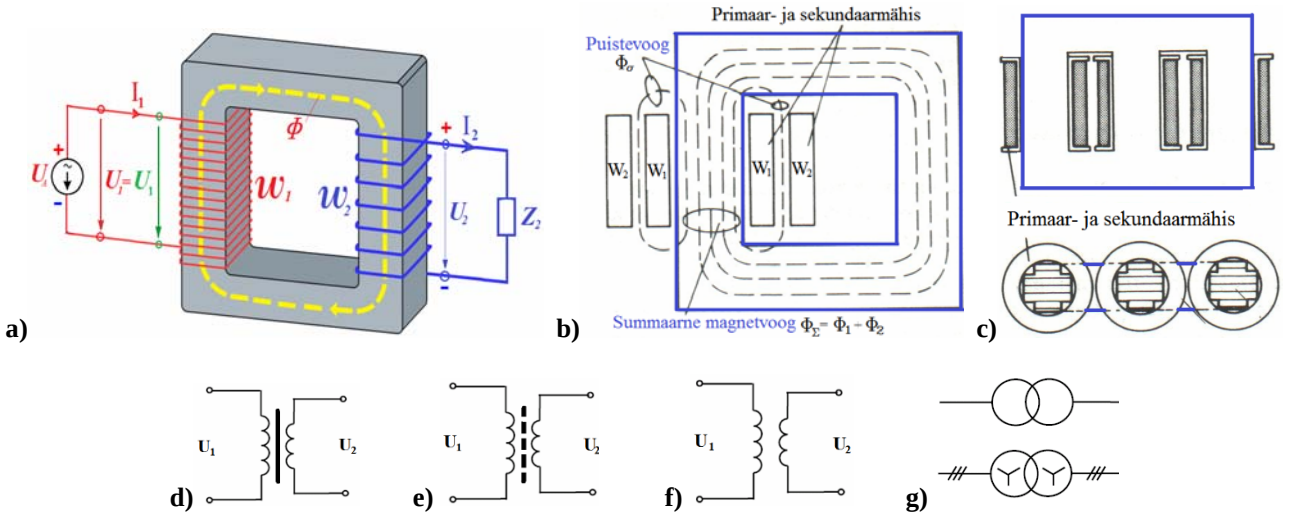
9. TRAFOD

9.1. Trafo otstarve ja ehitus
9.2. Trafo tööpõhimõte
9.3. Trafo tühijooks
9.4. Koormatud trafo
9.5. Trafo aseskeem
9.6. Trafo lühis
9.7. Trafo pingemuutus ja välistunnusjooned
9.8. Trafo kasutegur
9.9. Kolmefaasilised trafod
9.10. Eriotstarbelised trafod
9.11. Kordamisküsimused

9.1. Trafo otstarve ja ehitus

Trafo on elektromagnetiline seadis, mis muundab muutumatu sageduse juures mingi vahelduvvoolu toiteallikapinge teistsuguseks allikapingeks. Erineva nimiväärtustega allikapinget vajavad eri tarbijad. See võimaldab tagada elektriohutust, seadmete säästlikku kujundust ja tõhusat kasutamist. Trafod on tähtsad koosteosad iga elektriülekande ja jaotusseadmete juures. Suure võimsuse ülekanne on soodsam kõrgepingel, sest vool on siis väiksem (võimsus on ju võrdeline pinge ja voolu korrutisega). Väiksema voolu korral on aga väiksem energiakadu ülekandeliinis ning juhtmed võivad olla väiksema ristlõikega.

Trafol (joonis 9.1) on vähemalt kaks mähist, mis asuvad ühisel terassüdamikul. Mähistega südamiku osa nimetatakse **sambaks**, mähisteta osi **iketeks**. Trafol ühendatakse üks mähis elektriallikaga (generaator, toitevõrk) ja seda nimetatakse **primaarmähiseks**. Teist mähist, mis annab energiat tarbijale, nimetatakse **sekundaarmähiseks**.



Joonis 9.1. Ühe- (a ja b) ja kolmefaasiline trafo (c); d – ferromagnetsüdamikuga trafo; e – ferriitsüdamikuga audiotrafod 100 Hz...20 kHz; f – õhksüdamikuga trafo, > 20 MHz; ning trafode tingmärke (g)

Kõiki primaarmähisega seotud suurusi tähistame indeksiga 1 ja sekundaarmähisega seotud suurusi indeksiga 2, näiteks primaarpinge U_1 ja sekundaarpinge U_2. Kui $U_1 > U_2$, siis trafo on pinget madaldav, $U_1 < U_2$ puhul aga pinget kõrgendav. Suurema nimipingega mähist nimetatakse **ülempingemähiseks** ja väiksema nimipingega mähist **alampingemähiseks**. Primaarmähises tekitab vahelduvvool trafo magnetahelas vahelduva magnetvoo. Osa magnetvoogu ei sulgu mööda magnetahelat, see on kümneid kordi põhimagnetvoost Φ_Σ väiksem **puistevoog** Φ_σ, mille loovad primaar- ja sekundaarmähise voolud oma energiaväljadega $\Phi_\Sigma = \Phi_1 - \Phi_2$. Sekundaarmähise magnetvoog Φ_2 on vastasmärgiline primaarmähise

magnetvooga Φ_1. See selgub trafo tööpõhimõtet selgitavalt jooniselt 9.3, et ajas muutuv põhimagnetvoog Φ_Σ, aheldudes näiteks esimese primaar- ja sekundaarmähise keeruga, indutseerib neis identsed allikasisepinged $U_{11} = U_{21}$. Nendest on U_{11} tarbijatalitluses oleva allika pinge, U_{21} aga allikatalitluses, kus vool voolab allika „+"-klemmilt „–"-klemmile, tarbijatalitluses oleval primaarmähise esimeses keerus aga vastupidi. Puistevoo moodustab põhiliselt primaarmähise magnetväli Φ_{1w}. Magnetahel on valmistatud ferromagnetilisest materjalist, mille põhiomadus on võimendada primaarmähise poolt tekitatud magnetvälja. Seega lisandub primaarmähise voolu voole südamiku voog $\Phi_1 = \Phi_{1w} + \Phi_{1Fe}$. See osa primaarmähise magnetvoost $\Phi_1 - \Phi_\sigma$, mis aheldub ka sekundaarmähisega, kutsub viimases esile allikasisepinge tekke. Nii tekkib ka sekundaarmähisesse elektriallikas. Trafo toimib tõhusalt, kui primaar- ja sekundaarmähis paiknevad ühise samba ümber, mitte nii, nagu tavaliselt kujutatakse selgitavatel joonistel.

Joonis 9.2. Trafod. Väikese võimsusega trafode ferromagnetsüdamikud (a) ja trafod (b...h); planaartehnoloogiaga trafo (e). Jõutrafod: õlijahutusega (j...l, n...p) ja õhkjahutusega kuivtrafo (g, i, m). Kolmefaasilise trafo sammaskonstruktsioon (l, t). 10 MVA, 15/6,3 kV epoksiidvaigust isolatsiooniga kuivtrafo (m). Raudtee piirgabariitidega jõutrafo transport tehasest paigalduskohta (r). Jõutrafo ehitus (p). Katsejaama trafo (n, o). Ühe- (s) ja kolmefaasiline (t) sammas- ning manteltrafod (u, v). Magnetahela (õ) ja mähise näide (ä)

Trafod võivad olla **ühe- või kolmefaasilised**. Võimsad jõutrafod, mida kasutatakse energiasüsteemides, on tavaliselt kolmefaasilised. Eriotstarbelised trafod, mis töötavad kõrgetel sagedustel, võivad olla ka terassüdamikuta. Jahutuse seisukohalt lähtudes võib trafod liigitada õhk- ja õlijahutusega trafodeks. Joonisel 9.1f on ühefaasilise trafo tingmärk ja elektrivõrkude skeemides kasutatav kolmefaasilise trafo tingmärk, kus on ka näidatud, et primaar- ja sekundaarmähised on mõlemad tähtlülituses. Joonisel 9.2 on esitatud väiketrafode ferromagnetsüdamike (a) ja trafode (b...h) fotod.

Jõu- ehk võimsustrafod vajavad tavaliselt soojuskadude trafost väljaviimiseks jahutussüsteeme. Selleks paiknevad trafode aktiivosad (mähised ja magnetahel) tavaliselt trafo paagis. Levinud on heade isolatsiooniomadustega trafoõliga õlijahutussüsteemid. Ferromagnetseadmete kõik olulised näitajad on suurte võimsuste korral paremad kui väikese võimsusega seadmetel. Seetõttu püütakse suurte võimsuste korral kasutada võimalikult suure nimivõimsusega trafosid. Võimsuse kasvu piiravad nende transport-gabariidid (r). Parim tulemus saadakse, kui trafopaak on kujundatud nii, et talle kinnitatakse rattapaarid selliselt, et paagipõhi on relsside kohal nii lähedal kui lubatud. Võimsate jõutrafode transpordiks kasutatakse erilahendustega mere-, raudtee- (r) ja autotransporti. Elektroonika ja automaatika tarbeks kasutatakse põhiliselt õhkjahutusega kuivtrafosid (a...h). Mähiste väljavõtted on markeeritud, toodud klemmliistule või on tehtud „jalgadena“ trükiplaatide radadega ühendamiseks (d). Magnetahel koostatakse trafoplekist (d...p), lintplekist (h) või ferriitmaterjalist (a ja b).

Epoksiidvaigust isolatsiooniga kuivtrafod. Epoksiidvaigust isolatsiooniga trafo mähised on valatud epoksiidvaigu sisse ja on hooldusvabad. Nende tuleoht on minimaalne, nad on keskkonnasõbralikud, olles keskpinge trafodele parim valik. Mikroskoopiliste õhumullide ja gaaside tekke vältimiseks isoleermaterjalis valatakse mähised epoksiidvaiku ning tehakse termotöötlus vaakumis. Mähiste hea silindriline kuju ja sile pind vähendavad saastumist. Mähised on mehaaniliselt tugevad ja veekindlad. Mähiste erikonstruktsioon võimaldab viia miinimumi pinge erinevused mähise sees ja osalahenduse tekkevõimalused. Mähised valmistatakse alumiiniumist, mille soojuspaisumistegur on lähedane epoksiidvaigule, vajadusel ka vasest. Seetõttu soojenemisest-jahtumistest tekkivad mehaanilised jõud on väikesed. Madalpingemähis valmistatakse keskpingemähise kõrgusele vastavast lintalumiiniumist. Keerdudevaheliseks isolat-siooniks on epoksiidvaigu kile. See muudab mähise pärast termotöötlust tugevaks, vastupidavaks, säilitades ajaliku elastsuse.

Trafode kasutamine. Trafo primaarmähise ja ferromagnetsüdamiku poolt moodustatud ajas muutuv vahelduv laengute energiaväli (magnetväli) kutsub (indutseerib) igas primaar- ja sekundaarmähise juhtmekeerus esile **võrdse väärtusega** allikasisepinge. Primaarmähises toimib see allikana tarbija talitluses, tarbijaga ühendatud sekundaarmähises allikapingena. Nende teke sarnaneb elektronide lahtirebimise protsessiga neutraalsetelt aatomitelt generaatori mähistes. Viimastes liikusid mähised ja koos nendega aatomitelt lahti rebitavad elektronid, mis tekitasid mikrovoolud koos vastavate magnetväljadega, mis liitudes püsimagneti väljaga tekitasid elektrone lahti rebivad jõud. Trafomähiste korral toimib ajas muutuv primaarmähise magnetvoog, mis aheldub sekundaarmähise elektronide energiaväljaga, tekitades väljade liitumise ja elektrone lahti rebiva jõu. Primaarmähise keerdude arv valitakse, lähtudes nimitoitepingest ja magnetahela mõõtmetest, mille määrab häid tehnilis-majanduslike näitajaid tagav magnetvoo tihedus magnetahelas. Sekundaarmähise keerdude arv valitakse nii, et saadakse vajaliku suurusega allikasisepinge. Näiteks kui juhtmekeeru sisepinge on võrdne 40 V, siis 20 kV saavutamiseks sekundaarmähisel peab olema 500 keerdu sest 500 x 40 = 20 000 V. Kui generaatori pinge on 5000 V, siis primaarmähisel on 125 keerdu. Trafo ülekandetegur võrdub mähise keerdude arvu suhtega 500 : 125 = 4. Kui on mitu sekundaarmähist, siis neil võivad olla erinevad keerdude arvud.

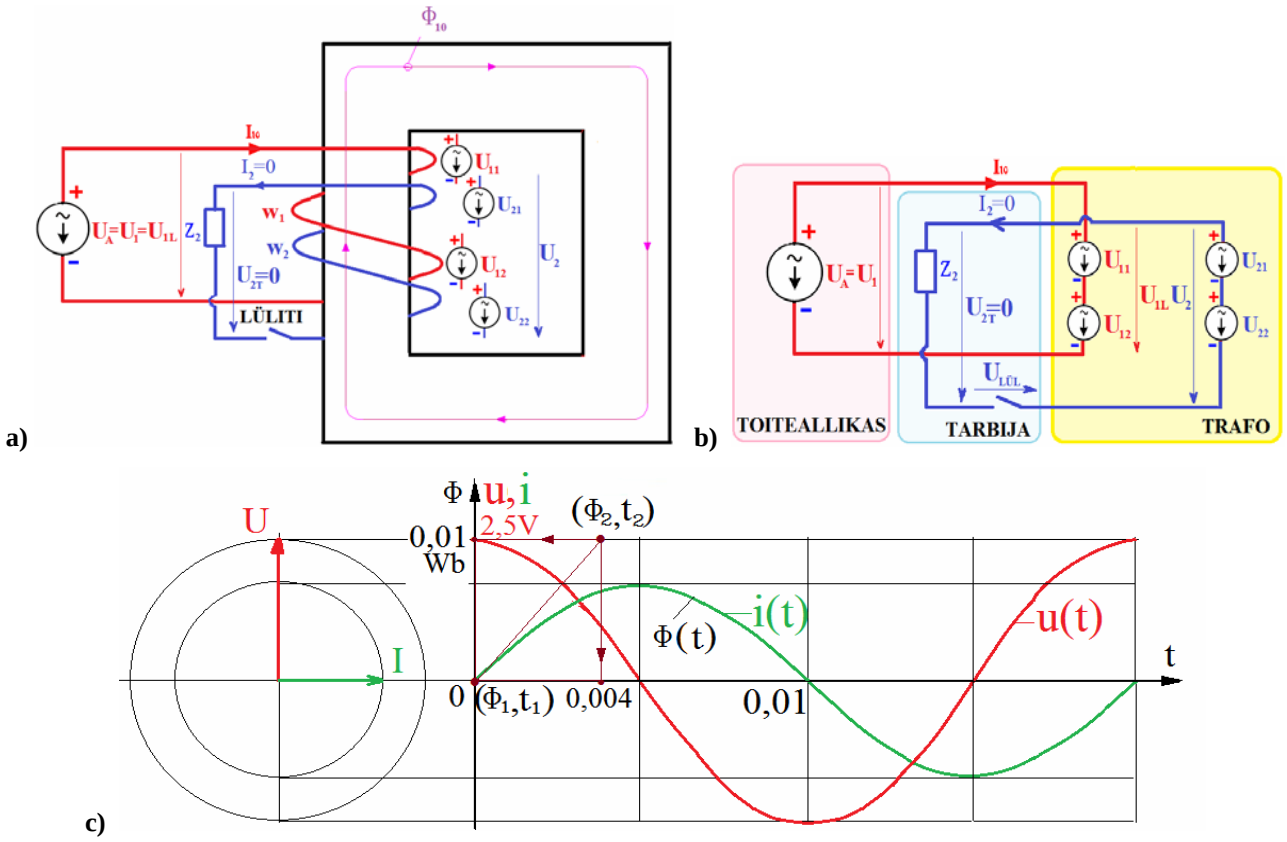
Kui ühendada trafo sekundaarmähis ülekandeliiniga, siis kandub elektrienergia tarbijatele piki ülekandeliini. Kuidas kandub elektrienergia primaarmähiselt sekundaarmähisele? Mähiste vahel puudub metalliline (galvaaniline) ühendus ja esmapilgul näib, et voolud mähistes ei sõltu teineteisest. Kõigi trafos toimuvate nähtuste algpõhjuseks, algmõjuks on elektriallika (toitevõrgu) laengud ning nende energiaväli (elektro-magnetväli). Seetõttu vaatame tasakaalustatavate vastumõjude teket trafo erinevate talitluste korral. Et erineva konstruktsiooni ja faaside arvuga trafode tööpõhimõtted on ühesugused, siis edaspidi käsitleme põhiliselt ühefaasilist kahe mähisega trafot, millel on elektrotehnilisest terasest plekkidest südamik. Süda-miku põhiülesanne on võimendada trafo primaarmähise poolt tekitatud magnetvälja ning tugevdada

magnetilist sidet primaar- ja sekundaarmähise vahel. Joonisel 9.2s...v on kujutatud levinuimad ühe- (s) ja kolmefaasilised (t) sammas- ning (u, v) vastavad mantelkonstruktsiooniga trafode aktiivosad. Mantel-konstruktsiooni (u) nimetus tuleneb sellest, et sambal paiknevat primaar- ja sekundaarmähist haaravad ümberringi paiknevad alumine, ülemine ja kaks külgiket, moodustades tinglikult katva mantli.

Kolmefaasilise trafo aktiivosa kujundus ja siseehitus on näha joonisel 9.2j...m. Võimsa trafo mähise tõhusat jahutust tagav kujundusnäide on joonisel 9.2n.

9.2. Trafo tööpõhimõte

Tühijooks. Trafo tööd on lihtsam mõista, kui kujutada trafo mähiseid sambal nii, nagu nad tavaliselt ka paiknevad (joonis 9.3). Joonisel on järgmised tähised: U_{1A} – primaarmähisele rakendatud allika (toitevõrgu-) allikasisepinge, mis ideaalse, kadudeta allika ja toitevõrgu korral võrdub allikaväljundpingega U_1; U_2 – sekundaarmähise allikaväljundpinge; I_{10} – primaarmähise **tühijooksuvool** ehk **magneetimisvool**; I_2 – sekundaarmähise **tarbijavool (koormusvool)**; primaarmähise keerdude arv w_1 on võetud $w_1 = 2$, samuti ka sekundaarmähise keerdude arv $w_2 = 2$; U_{L1} – primaarmähises tekkiv tasakaalustav endainduktsiooni allikapinge; Z_2 – tarbija näivtakistus; Φ_{10} – tühijooksu magnetvoog (joonisel kujutatud ühe väljajoonega). Eeldame, et allikaväljundpinge U_1 on siinuseline. Trafo töö mõistmiseks jälgime allikapingete, voolu ja magnetvoo suurusi mingil kindlal ajahetkel ja kujutame neid vastavalt joonisel. Seega vaatleme trafot, mille primaar- ja sekundaarmähisel on mõlemal 2 mähisekeerdu.



Joonis 9.3. Trafo tühijooks: a – lüliti on avatud ning tasakaaluolukord $u_{1L} = d\psi_{10}/dt = u_1$ on tekkinud kindla tühijooksuvoolu I_{10} väärtuse juures; b – ahela aseskeem, kus trafo neli mähisekeerdu on asendatud allikatega; c – endainduktsiooni allikasisepinge avaldise märgi määramine

Joonisel 9.3. on lüliti avatud asendis, seega sekundaarmähises (w_2) voolu ei tekki $I_2 = 0$ ja trafo on tühijooksutalituses $I_1 = I_{10}$. Allikaväljundpinge U_{1A} tekitab punasega kujutatud primaarmähises (w_1) tühijooksuvoolu I_{10}, mis läbib primaarmähise mõlemat keerdu ning tänu voolule mähises ja ferromagnetsüdamiku võimendusvõimele kutsub esile magnetvoo Φ_{10} tekke, mis sulgub trafo südamikus. Trafo primaarmähisel on kaks keerdu, seega keerde haarav aheldusvoog ψ_{10} (ühine voog, mis aheldab kogu

mähist) $\psi_{10} = 2\Phi_{10}$. Kuna allikapinge muutub ajas, siis muutub ajas ka vool I_{10}, magnetvoog Φ_{10} ja aheldusvoog ψ_{10}. Primaarmähises w_1 tekkib igal ajahetkel toiteallika väljundpinget u_1 tasakaalustav endainduktsiooni allikasisepinge u_{1L}. Pinge hetkväärtuse määrab aheldusvoo muutumise kiirus. See seos on $u_{1L} = d\psi_{10}/dt = u_1$.

Märkus. Joonis 9.3c selgitab, et viimases võrrandis on aheldusvoo muutumise kiirus „+"-märgiga, mitte tavapärase „–"-märgiga, nagu valdavalt õpikutes. Kui oleks „–"-märk, siis vastavalt joonisel valitud puutuja koordinaatide alusel saaksime endainduktsiooni allikasisepinge u_{1L} hetkväärtuseks

$u_{1L} = -\frac{d\Phi_1}{dt_1} \approx -\frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = -\frac{0{,}01 - 0}{0{,}004 - 0} = \frac{0{,}01}{0{,}004} = -2{,}5V \neq u_1 = +2{,}5V$. Seega, tasakaal puudub.

Kui aga kiirus on „+"-märgiga, siis $u_{1L} = \frac{d\Phi_1}{dt_1} \approx \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t_1} = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{0{,}01 - 0}{0{,}004 - 0} = \frac{0{,}01}{0{,}004} = 2{,}5V = u_1 = +2{,}5V$.

Nii on tasakaalutingimus täidetud.

Allikapinget tasakaalustava endainduktsiooni allikasisepinge hetkväärtus koosneb iga mähisekeeru allikapingete hetkväärtuste summast $u_{1L} = u_{11} + u_{12}$. Joonisel 9.3b on kõik neli mähisekeerdu trafo magnetahela sambal asendatud nelja allikaga. Nende allikate sisepinged on kõik võrdsed. Toiteallika väljundpinge U_1 tasakaalustavad primaarmähise kahe keeru allikasisepinged $U_1 = U_{11} + U_{12} = U_{1L}$. Sekundaarmähise jadalülituses oleva kahe keeru allikapinged liituvad ja moodustavad mähise allikaväljundpinge $U_{21} + U_{22} = U_2$. Tühijooksul on lüliti avatud, seetõttu tasakaalustab pinget U_2 igal ajahetkel potentsiaalilang lüliti avatud klemmidel $U_2 = U_{LÜL}$. Potentsiaalilang tarbija takistusel $U_{2T} = 0$, kuna vool $I_2 = 0$ (tarbijas energiamuundumist ei toimu).

Seega kasvab vool i_{10} täpselt nii suureks, et tema poolt tekitatud magnetvoog Φ_{10} ehk primaarmähise aheldusvoo ψ_{10} muutumiskiirus oleks selline, et primaarmähises tekitatud endainduktsiooni allikapinge u_{1L} võrduks täpselt toiteallika väljundpingega $u_{1L} = d\psi_{10}/dt = u_1$. See ongi tühijooksul oleva trafo töö olemus. Vaatame kokkuvõttena, kuidas kujuneb trafo tühijooksuvoolu i_{10} suurus. Lühivastuse stenogramm on järgmine:

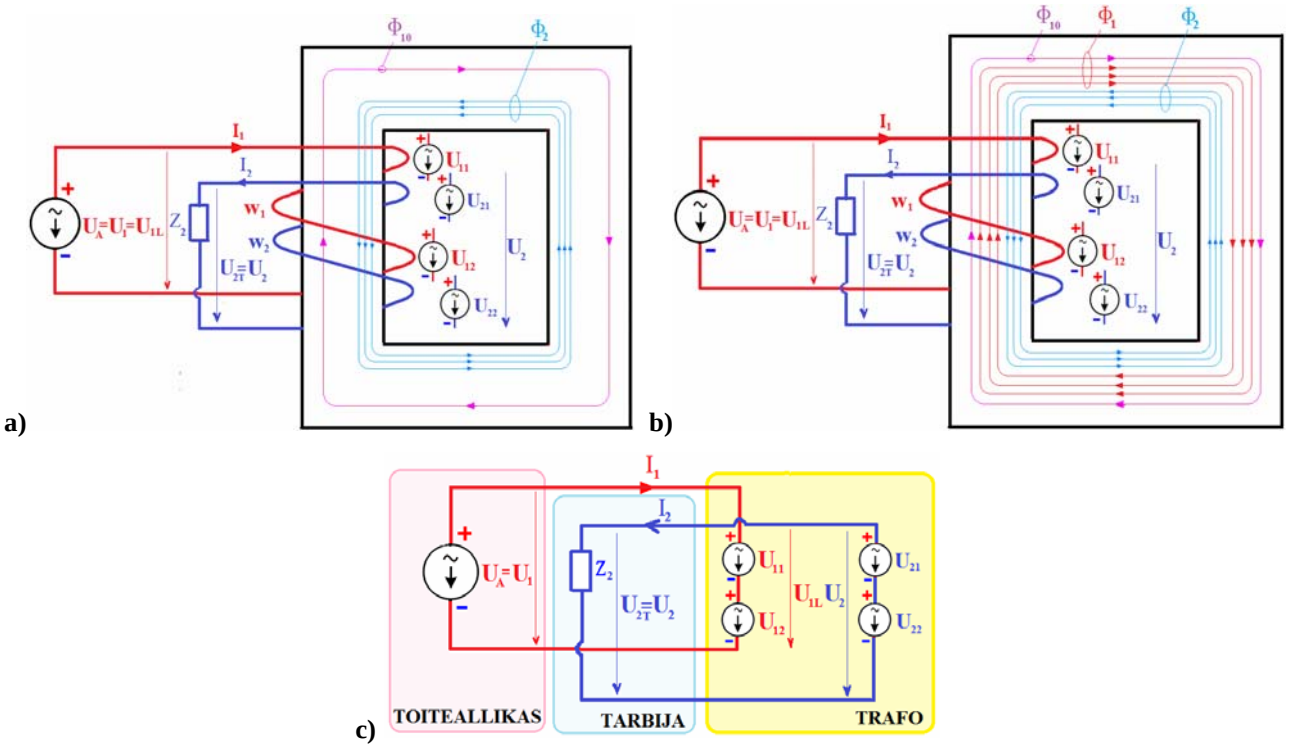
$U_1 \to I_{10} \to \Phi_{1w} \to \Phi_{1Fe} \to \Phi_{1w} + \Phi_{1Fe} = \Phi_{10} \to w_1 \cdot \Phi_{10} = \psi_{10} \to \frac{d\psi_{10}}{dt} = U_{1L} = U_1$ ja sekundaarmähise väljundpinge $\Phi_{10} \to w_2 \cdot \Phi_{10} = \psi_{20} \to \frac{d\psi_{20}}{dt} = U_2$.

Seega, igal ajahetkel tasakaalustab **mõju** (allikaväljundpinge) primaarmähise igas keerus tekitatud (indutseeritud) **tasakaalustava mõju** (keeru allikapingete summa u_{1L}). Vool i_{10} kasvab igal ajahetkel täpselt nii suureks, et tekkiks hetkeline tasakaal, mil $u_1 = u_{1L}$. Trafo südamiku ümber on keritud ka sekundaarmähis (w_2) ning selle mähisega aheldub sama voog Φ_{10}, mistõttu tekitatakse ka sekundaarmähise igasse keerdu (indutseeritakse) sama suur allikasisepinge. Keerupinged liituvad ja moodustavad sekundaarmähise allikaväljundpinge U_2. Niisiis, meie näite korral $U_2 = U_{21} + U_{22}$, kuna sekundaarmähises energiamuundumist ei toimu (vool võrdub nulliga) ja mõju primaarmähise voolule puudub. Selline on ka teiste elektriseadmete toimimise olemus. Tühijooksu voolu suurus iseloomustab, kui intensiivselt toimub elektrienergia muundumine soojusenergiaks trafo primaarmähises ja ferromagnetsüdamikus.

Seega tagab $u_1 = u_{1L}$ võrdsuse aheldusvoo ψ_{10} muutumise kiirus. Mida suurema võimendusvõimega (kõrgema magnetilise läbitavusega μ) on trafo südamiku materjal, seda väiksema voolu I_{10} väärtusega saavutame vajaliku tühijooksu magnetvoo Φ_{10} suuruse, mil $u_1 = u_{1L}$. Väiketrafodel võib ebakvaliteetse ferromagnetmaterjali korral tühijooksuvoolu suurus ulatuda kuni 10%-ni nimivoolust I_n. Võimsate trafode korral I_{10} on I_n-st 200...300 korda väiksem (0,5...0,33)% I_n-st.

Trafo töö koormusega. Olenemata sellest, kas lüliti joonisel 9.3 on avatud või suletud, tekitab trafo tühijooksu magnetvoog Φ_{10}, aheldudes sekundaarmähise keerdudega w_2, ajas muutuva aheldusvoo, mis indutseerib sekundaarmähisesse allikasisepinge U_2. Joonisel 9.4 tähistab U_1 toiteallika väljundpinget, mis on võrdne primaarmähise potentsiaalilanguga ja kadudeta (ideaalse) trafo korral ka endainduktsiooni allikapingega U_{1L}. Sekundaarmähise allikaväljundpinget tähistab U_2, mis ideaalse trafo korral võrdub mähise sisepingega U_2=U_{2A}. Kui sekundaarmähise klemmidele on lülitatud tarbija Z_2, siis tühijooksul valitsenud tasakaalu olukord enam ei toimi. Tasakaalu rikub U_2 poolt põhjustatud voolu I_2 teke. Voolu suuna määrab U_2 suund, mis on vastupidine U_{1A} suunaga. Sekundaarmähise koormusvool I_2 tekitab oma magnetvoo Φ_2, mis liitub primaarmähise poolt põhjustatud vastassuunalise magnetvooga Φ_1 (joonis 9.4a). Järelikult ei ole magnetvoogude Φ_1 ja Φ_2 summa enam võrdne magnetvoo väärtusega tühijooksul Φ_{10}. Joonisel 9.4a on kujutatud hetke, kui lüliti on sisse lülitatud ning sekundaarmähise voolu I_2 voolamiseks on tekkinud kinnine kontuur. Tänu sekundaarmähise allikapingele ning kinnise voolukontuuri olemasolule kulgeb I_2 U_2 mõjul läbi tarbija takistuse Z_2.

Voolu I_2 suund on vastupidine I_{10} suunaga ning tekitab seega tühijooksu magnetvoole (Φ_{10}) vastupidise suunaga magnetvoo Φ_2. Vastupidise suunaga voog Φ_2 nõrgestab primaarvoogu, mis tagas tühijooksu voolu I_{10} väärtusel tasakaaluolukorra, et $U_{1A} = U_{1L}$. Kuna Φ_2 tekkel vähenes Φ_{10}, tekkib olukord, kus pinge u_{1L} väärtus hakkab langema ning tasakaaluolukord ei kehti, sest U_{1A} on suurem kui U_{1L}. Tasakaaluolukorra säilitamist selgitab joonis 9.4b. Tasakaalu taastekitamiseks suureneb trafo primaarvool I_1, millega kaasneb primaarmähise magnetvoo Φ_1 suurenemine seni, kuni igal ajahetkel on täidetud tingimus $u_{1A} = u_{1L} = d\psi / dt$. Kuna allikapinge (võrgu toitepinge) efektiivväärtus ei muutu ajas, siis Φ_1 kasv kestab seni, kuni tekib taas uus tasakaaluolukord, mida võib esitada võrrandiga $\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{10}$. Millal lõpeb voolu I_2 suurenemine? See kestab seni, kuni koormuse *RLC*-elementidel tekkivate potentsiaalilangude summa muutub võrdseks trafo sekundaarmähises indutseeritud allikapingega U_2. Seega, $U_2 = U_{2R} + U_{2L} + U_{2C}$. Kui lisada trafo sekundaarmähise koormusele rööbiti teine tarbija, siis tekkib ka selles tarbijas vool. Suurenenud vool suurendab magnetvoogu Φ_2, mistõttu Φ_1 – Φ_2 on väiksem kui tühijooksule vastav magnetvoo väärtus Φ_{10}. Tasakaalu taastamiseks peab vool I_2 jällegi suurenema seni, kuni $\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{10}$.



Joonis 9.4. Koormatud trafo: a – lüliti on suletud, kuid tasakaaluolukord ei ole veel saabunud; b – lüliti on suletud ning on tekkinud tasakaaluolukord $U_1 = U_{1L}$; c – ahela aseskeem, kus trafo neli mähisekeerdu on asendatud allikatega

See kestab seni, kuni uue koormuse *RLC*-elementidel tekkivate potentsiaalilangude summa muutub võrdseks trafo sekundaarmähises indutseeritud allikapingega U_2. **Sellised tasakaaluolekud tekivad meelevaldse arvuga tarbijate korral igal ajahetkel.**

Kokkuvõte. Trafo töötab pidevalt tasakaalu talitluses, kus määravaks on asjaolu, et allikapinge väärtus võrdub igal ajahetkel primaarmähise endainduktsiooni allikasisepinge väärtusega. Nii saab olla ainult tingimusel, et igal ajahetkel peab olema täidetud tingimus, et primaar- ja sekundaarmähiste magnetvoogude vahe võrdub täpselt magnetvoo väärtusega tühijooksutalitluses $\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{10} = \Phi$. Seega **on koormatud trafo magnetvoog võrdne tühijooksu vooga**.

Trafo ülekandetegur. Kahe mähisega ühefaasiline trafo erineb eelmises peatükis käsitletud terassüdamikuga poolist vaid sekundaarmähise olemasolu poolest. Kui primaarmähisele rakendada vahelduv allikapinge U_{1A}, siis tekkib mähises vool ja terassüdamikus vahelduv magnetvoog Φ, mis **indutseerib primaar- ja sekundaarmähise igas keerus võrdse allikapinge.** Seega primaarmähise tarbijatalitluses olev allikapinge

$$u_{1L} = w_1 \frac{d\Phi}{dt}, \tag{9.1}$$

ja sekundaarmähise allikatalitluses olevate keerdude allikapinge

$$u_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \tag{9.2}$$

Seostes (9.1) ja (9.2) on w_1 ning w_2 vastavalt primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvud. Kui magnetvoog muutub siinuseliselt, siis transformatoorse allikapinge võrrandi kohaselt primaar- ja sekundaarmähiste allikapingete (9.1) ja (9.2) efektiivväärtused on vastavalt

$$U_{1L} = 4{,}44 f w_1 \Phi_m \tag{9.3}$$

ja

$$U_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m. \tag{9.4}$$

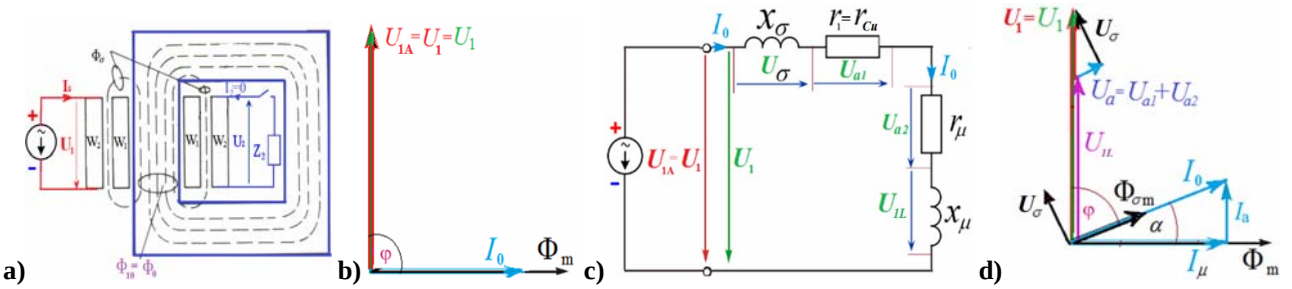
Primaar- ja sekundaarmähise allikapingete suhet nimetatakse trafo **ülekandeteguriks**:

$$k_{12} = \frac{u_{1L}}{u_2} = \frac{U_{1L}}{U_2} = \frac{w_1}{w_2},$$

mis seoste (9.1) ja (9.2) või (9.3) ja (9.4) järgi võrdub arvuliselt ka mähiste keerdude arvu suhtega. Kui me ei arvesta potentsiaalilangu mähiste takistustel, on ülekandearv leitav ligikaudselt ka primaarmähise potentsiaalilangu ja sekundaarmähise klemmipinge suhtena; kui jätame arvestamata ka energiakaod trafos, siis on primaar- ja sekundaarvõimsused võrdsed ehk $U_1 I_1 = U_2 I_2$, millest saame leida ligikaudse ülekandearvu voolude pöördsuhtena. Nimetatud kaalutluste alusel $k_{12} \approx \frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1}$. (9.5)

9.3. Trafo tühijooks

Trafo tühijooksu lülitus on joonisel 9.5a. Trafo primaarmähis on lülitatud allikapingele U_1, mis on võrdne ka potentsiaalilanguga primaarmähisel U_1, kuid sekundaarmähis ei ole ühendatud tarbijaga. Tühijooksul tarbib trafo vaid primaarmähises tasakaalustava allika loomiseks vajalikku induktiivset magneetimisvoolu I_0. Vool sekundaarmähises $I_2 = 0$ ja primaarmähises on tühijooksuvool $I_1 = I_0$.



Joonis 9.5. Trafo tühijooks (a), kadudeta (b) ja kadudega (d) trafo faasivektorite diagramm. Trafo primaarpoole aseskeem (c)

Tühijooksus sarnaneb ühefaasilise kahe mähisega trafo tööolukord eelmises peatükis käsitletud terassüdamikuga pooli tööga. Kui primaarmähisele rakendub siinuseline allikapinge $u_1 = U_m \sin \omega t$, siis tühijooksuvool I_0 (või magneetimisergutus $I_0 w_1$) tekitab koosinus seaduse järgi muutuva voo $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$, mis omakorda indutseerib primaar- ja sekundaarmähistes siinuseliselt muutuva allikapinge. Kontrollime, mis seaduspärasuse järgi peab muutuma magnetvoog. Täpne tasakaal saab olla, kui igal hetkel allika toite- ja mähise allikapinged on võrdsed. Järelikult on siinuselise allikapinge korral mähise allikapinge siinuseline: $u_{1L} = U_{1m} \sin \omega t = w_1 \frac{d\Phi}{dt}$. Siit $d\Phi = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin \omega t dt$.

Integreerides viimase avaldise, saame $\Phi = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t d = \Phi_m \cos \omega t$. Seega, et tekkiks mähisel siinuseline allikapinge, peab seda **tekitav magnetvoog muutuma ajas koosinusseaduse järgi**. Magnetvoo Φ kõver jääb pingekõverast 90° võrra maha, nagu on (pöörisvoolu, hüstereesikadu ning primaarmähise vaseskadu mitte arvestades) näidatud joonisel 9.5b esitatud faasivektorite diagrammil.

Seoste (9.1) ja (9.2) alusel
$$u_{1L} = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_1 \Phi_m \cos \omega t, \tag{9.6}$$

$$u_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = \omega w_2 \Phi_m \cos \omega t. \tag{9.7}$$

Faasivektorite diagramm kao arvesse võtmisel. Trafo primaarpoole aseskeem (joonis 9.5c) sarnaneb ferromagnetsüdamikuga pooli omaga. Aseskeemi võime kujutada kahe primaarmähise jadalülitusena. Üks mähistest on ilma terassüdamikuta, teine terassüdamikuga. Esimese mähise näivtakistus on $\dot{Z} = r_{Cu} + jx_\sigma$, teisel $\dot{Z}_\mu = r_\mu + jx_\mu$. Viimases avaldises on r_μ aktiivtakistus, mis arvestab südamiku teraseskadu, x_μ on reaktiivtakistus, mis arvestab südamiku magnetvoo poolt primaarmähises indutseeritud allikasisepinget U_{1LA}, mis on võrdne ja samasuunaline potentsiaalilanguga U_{1L}. Esimese pooli avaldises on r_{Cu} aktiivtakistus, mis arvestab terassüdamikuga pooli mähise vaseskadu, x_σ on reaktiivtakistus, mis arvestab pooli puistemagnetvoo poolt poolis indutseeritud puisteallikasisepinget U_σ. Seega $r_{Cu} = r_1$ on primaarmähise aktiivtakistus ja x_σ on primaarmähise puisteinduktiivtakistus x_1. Joonisel 9.5c tähistab pinge U_1 (punase värviga) toiteallika väljundpinget, rohelise värviga U_1 – primaarmähise potentsiaalilangu. Primaarmähist läbides tekitab tühijooksuvool puistevoo Φ_σ ja trafo magnetahela võimenduse abil tühijooksu talitlusele vastava voo Φ_0. Need kaks voo-osa indutseerivad primaarmähises puisteallikapinge ja mähise allikapinge vastavalt U_σ ning U_L. Arvestades pöörisvoolu, hüstereesikadu ning primaarmähise vaseskadu, tekkivad veel kaks allikapinge osa, mida arvestame potentsiaalilangudega U_{a1} ja U_{a2}. Kirchhoffi teise seaduse järgi hetkväärtuste põhjal $u_1 = u_\sigma + u_{a1} + u_{a2} + u_{1L}$. Selle alusel saame efektiivväärtuste kaudu primaarmähise potentsiaalilangude tasakaalu vektorvõrrandi kujul:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_\sigma + \dot{U}_{a1} + \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{1L} \tag{9.8}$$

Potentsiaalilangu määrame tühijooksuvoolu ja primaarmähise puisteinduktiivtakistuse x_σ kaudu, tähistades $x_\sigma = x_1$, siis $\dot{U}_\sigma = \dot{I}_0 j x_1$,

mille asetamisel võrrandisse (9.8) saame samasuguse tulemuse kui terassüdamikuga pooli korral:

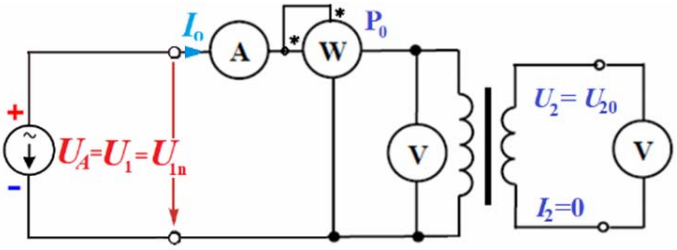
$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{1L} + \dot{I}_0(r_1 + jx_1) = \dot{U}_{a2} + \dot{U}_{1L} + \dot{I}_0\dot{Z}_1, \tag{9.9}$$

kus $\dot{Z}_1 = r_1 + jx_1$ on primaarmähise nn sisenäivtakistus. Kuna tühijooksul sekundaarmähises voolu ei ole, puuduvad sekundaarmähise puistevoog ning potentsiaalilangud. Järelikult võrdub sekundaarmähise väljundpinge selle allikapingega: $\dot{U}_{20} = \dot{U}_2$.

Esitatud suurused ja seosed on kujutatud trafo tühijooksu faasivektorite diagrammil (joonis 9.5d), mis praktiliselt ei erine terassüdamikuga pooli omast (joonis 1.5). Tuleb märkida, et potentsiaalilangude kolmnurk joonisel 9.5d on selguse mõttes kujutatud ülemäära suurena. Tegelikult moodustab tühijooksuvool vaid 10…0,5% voolust trafo nimivõimsusel, kusjuures võimsamatel trafodel on tühijooksuvool suhteliselt väiksem. Nurka φ_0 saab leida seose (1.9) abil, kusjuures vaseskao võib lugeda praktiliselt nulliks tühijooksuvoolu väiksuse tõttu. Seega,

$$P_0 = p_{Fe} + I_0^2 r_1 \approx p_{Fe}. \tag{9.10}$$

Trafo tühijooksukatse. Kui trafo primaarmähisele rakendada nimiprimaarpinge $U_1 = U_{1n}$ ja mõõta tühijooksuvool I_0, tühijooksuvõimsus P_0 ning sekundaarpinge U_{20}, siis on meil tegemist **tühijooksukatsega**. Tühijooksukatse skeem on esitatud joonisel 9.6. Tühijooksukatse põhieesmärk on katseliselt määrata trafo **ülekandetegur**, **nimiteraseskadu** ja trafo **aseskeemi magneetimisharu parameetrid**.



Joonis 9.6. Trafo tühijooksukatse skeem

Ülekandeteguri saab leida skeemil oleva kahe voltmeetri näidu alusel seosest

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} \approx \frac{U_{1n}}{U_{20}},$$

sest tühijooksul $U_{1L} \approx U_{1n}$ potentsiaalilangu $I_0 z_1$ väiksuse tõttu ja U_{2L} võrdub sekundaarmähise tühijooksu pingega $U_{2L} \approx U_{20}$.

Valemi (9.10) alusel on tühijooksul mõõdetud võimsus P_0 ligikaudu võrdne nimiteraseskaoga:

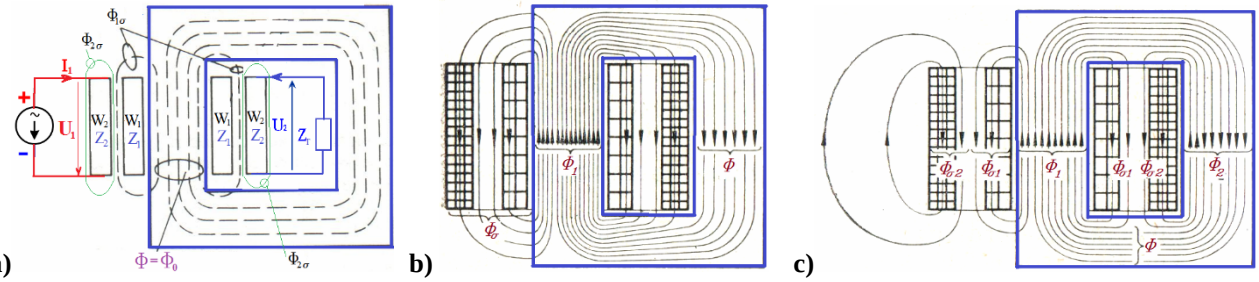
$$P_0 \approx p_{Fe},$$

sest tühijooksuvoolu väiksuse tõttu $p_{Cu} = I_0^2 r_1 \approx 0$. Kuna primaarmähis on lülitatud nimipingele, saame hõlpsasti mõõta tühijooksukatsel teraseskadusid, mis eralduvad trafos tööolukorras, kui primaarpinge on võrdne nimipingega. Nimiteraseskadu on vaja teada aga trafo töökarakteristikute arvutamiseks.

9.4. Koormatud trafo

Kui sekundaarvool $I_2 \neq 0$, siis on trafo koormatud ja toimub elektrienergia muundamine või salvestamine. Pinge trafo primaarmähisel U_1 võib lugeda sõltumatuks trafo koormusest, kui toitevõrgu võimsus on märksa suurem trafo võimsusest. Olgu $U_1 = U_{1n} = \text{const}$. Koormusolukorrale vastav skeem on joonisel 9.7, kus z_1, z_2 ja

z_T on vastavalt primaar-, sekundaarmähise ja tarbija takistused. Eraldi on tähistatud primaar- ja sekundaarmähiste puistemagnetvood $\Phi_{1\sigma}$ ja $\Phi_{2\sigma}$.



Joonis 9.7. Koormatud trafo magnetvoog: a – trafo primaar- ja sekundaarahela lülitus, b – magnetvoo tegelik jagunemine, c ja a – üldine puistevoog on lahutatud kaheks koosteosaks $\Phi_{1\sigma}$ ja $\Phi_{2\sigma}$

Kuna koormusel on mõlemas mähises vool, siis tekitavad magnetahelas üheaegselt magnetvoo nii primaar- kui ka sekundaarmagneetimisergutus. Seejuures on sekundaarmagneetimisergutus südamikku lahtimagneetiva toimega. Seega põhjustab voolu teke sekundaarmähises ja samaaegne primaarvoolu tugevnemine üldise puistevoo Φ_σ suurenemise ja sekundaarmähisega ahelduva magnetvoo Φ (joonis 9.7) väikese vähenemise. Et suhteliselt keerukat magnetvoo jagunemist lihtsustada, eristatakse primaar- ja sekundaarmähise puistemagnetvoogusid $\Phi_{1\sigma}$ ja $\Phi_{2\sigma}$. Tegelik magnetvoogude jagunemine võib osaliselt erineda. Seda on võimalik põhjalikumalt arvestada, kasutades ferromagnetseadmete modelleerimisprogramme.

Me eeldasime, et toiteallikapinge on konstantne, seega on ka primaarmähise allikapinge konstantne, muidu pole mõju ja tasakaalustav mõju võrdsed. Seega peab primaar- ja sekundaarmähise magneetimisergutuste vektorsumma olema võrdne tühijooksu magneetimisergutusega. Õpikutes väljendatakse seda seost tavaliselt järgmiselt: $\dot{I}_1 w_1 + \dot{I}_2 w_2 = \dot{I}_0 w_1.$

Siit $\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 - \dot{I}_2 w_2.$

Selline kirjaviis ei ühti trafo tööpõhimõtet avavatel joonistel 9.3 ja 9.4b kujutatuga. Jooniselt 9.3 näeme, et tühijooksul tekkib tasakaal välise toiteallika väljundpinge ja primaarmähise allikasisepinge vahel siis, kui

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1.$$

Koormatud trafo korral (joonis 9.4b) tekkib tasakaal välise toiteallika väljundpinge ja primaarmähise allikasisepinge vahel siis, kui primaarmähis katab ka sekundaarmähise lahtimagneetiva voolu toime. Seega,

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + \dot{I}_2 w_2, \tag{9.11}$$

millest $$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 \frac{w_2}{w_1} = \dot{I}_0 + \dot{I}_2 \frac{1}{k_{12}}. \tag{9.12}$$

Tähistades $$\dot{I}_2 \frac{1}{k_{12}} = I_2' \tag{9.13}$$

ja nimetades I_2' **taandatud sekundaarvooluks**, saame seose (9.12) kujul $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'.$ (9.14)

Siit tühijooksuvool $\dot{I}_0 = \dot{I}_1 - \dot{I}_2'.$ Trafo magnetilise tasakaalu seosest (9.11) selgub, et primaarne magneetimisergutus $I_1 w_1$ tasakaalustab lahtimagneetiva sekundaarse magneetimisergutuse ja hoiab magnetvoo väärtuse südamikus muutumatuna võrdsena tühijooksu magnetvooga Φ_0. Taandatud sekundaarvoolu I_2' seoses (9.14) võime aga vaadelda primaarvoolu täiendava osana, mis iseloomustab sekundaarmähise tarbijate energia muundamisprotsesse. Seega on primaarvool tühijooksuvoolu ja taandatud sekundaarvoolu geomeetriline summa.

Jättes valemis (9.14) tühijooksuvoolu selle väiksuse tõttu arvestamata, saame, et $\dot{I}_1 \approx \dot{I}_2'$ ja taandatud sekundaarvoolu avaldist (9.13) arvestades jõuame ka magneetimisergutuste tasakaalu kaudu seoseni (9.5). Magneetimisergutus $I_2 w_2$ tekitab koormusel peale lahtimagneetiva magnetvoo veel puistevoo $\Phi_{2\sigma}$ (joonis 9.7), mis on aheldatud sekundaarmähise keerdudega ja sulgub peamiselt läbi õhu. Puistevoog indutseerib sekundaarmähises puisteallikapinge $u_{2\sigma} = w_2 \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt}$, mille efektiivväärtus siinusvoo korral valemi (9.3) järgi $U_{2\sigma} = 4{,}44 f w_2 \Phi_{2\sigma m}$.

9.5. Trafo aseskeem

Trafo aseskeem on takistite kombineeritud lülitus, mis kirjeldab reaalse trafo kõiki olulisi parameetreid ja nendevahelisi seoseid elektriskeemi abil. Aseskeemis säilivad muutumatutena ka reaalse trafo faasinurgad potentsiaalilangude ja voolude vahel ning võimsuse jaotus. Aseskeemi on otstarbekohane kasutada trafo arvutuse juures, kusjuures aseskeemi konstrueerimine rajaneb ühe mähise keerdude arvu taandamisel teise mähise keerdude arvule. Sageli taandatakse sekundaarsuurused primaarseile, seega primaarpinge tasemele. Vahel on otstarbekas taandada sekundaarpinge poolele. Taandamise tulemusena saadakse samaväärne trafo, mille ülekandetegur $k_{12} = 1$. Sellise taandatud trafo primaar- ja sekundaarmähise allikapinged on võrdsed. Nimetatud asjaolu võimaldab reaalse trafol galvaaniliselt eraldatud primaar- ja sekundaarahelad aseskeemis omavahel ühendada ning lubab koostada trafo vektordiagrammi samas mõõtkavas primaar- ja sekundaarsuurustega, sest $k_{12} = 1$.

Taandatud suurused tähistatakse tavaliselt priimiga (′). Sekundaarmähise keerdude arvu taandamisel primaarmähise keerdude arvule peab kehtima $w_2' = w_1$. Et $w_1 / w_2 = k_{12}$, siis $w_2' = w_2 k_{12}$. Kui $w_2' = w_1$, siis on ka võrdsed samal sambal paiknevate võrdsete keerdude arvuga primaar- ja sekundaarmähiste allikapinged $U_{2A}' = U_{1A} = U_A$, nagu see oli kujutatud joonisel 9.3 ja 9.4. Sama tulemuse saame ka

$$U_{1A} = \frac{w_1}{w_2} U_{2A} = k_{12} U_{2A} = U_{2A}' = U_A.$$

Sekundaarvoolu taandamisest oli juttu juba jaotises 9.4 võrrandis (9.13). Muutumatu võimsuse korral trafo sekundaarahela näivvõimsus

$$S_2 = U_{2A} I_2 = U_{2A}' I_2' = k_{12} U_{2A} I_2',$$

mis kehtib siis, kui taandatud sekundaarvool $I_2' = \frac{1}{k_{12}} I_2$.

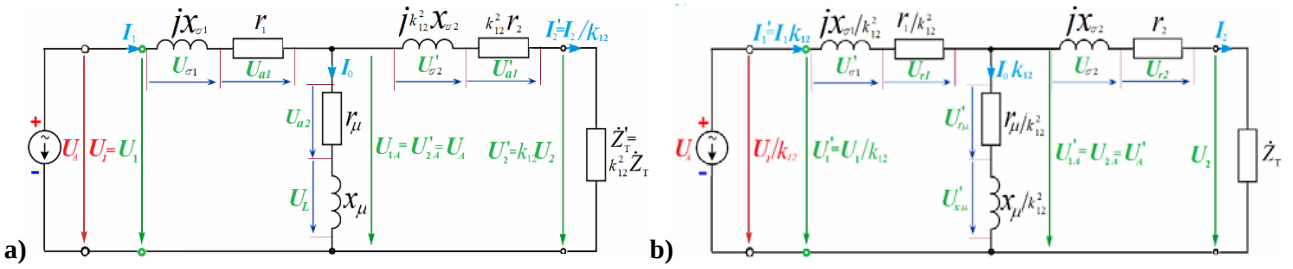
Eespool esitatud tingimuste täitmiseks peavad muutuma ka sekundaarahela takistused. Sekundaarmähise vaseskao kaudu saame $I_2^2 r_2 = I_2'^2 r_2' = \frac{1}{k_{12}^2} I_2^2 r_2'$,

millest $r_2' = k_{12}^2 r_2$.

Sarnaselt tuleb taandada kõik sekundaarahela parameetrid:

$$x_2' = k_{12}^2 x_2, \quad r_t' = k_{12}^2 r_t \text{ jt.}$$

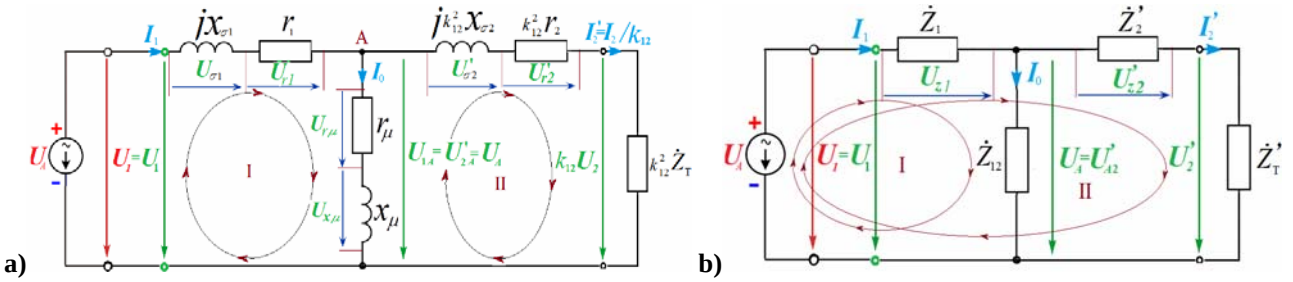
Kasutades terassüdamikuga pooli aseskeemi trafo aseskeemi primaarpoolt ja magneetimisharu arvesse võtva põhiosana, lisades taandatud sekundaarahela koos tarbijaga, saame joonisel 9.8a kujutatud aseskeemi.



Joonis 9.8. Primaarpoolele (a) ja sekundaarpoolele (b) taandatud trafo T-kujuline aseskeem

Joonisel 9.9a on joonise 9.8a aseskeem, millele on täiendavalt märgitud Kirchhoffi kahe seaduse tarbeks kaks kinnist kontuuri ja üks sõlm A. Koostades kontuuridele I ja II võrrandid ning ka sõlmele A, saame järgneva võrrandisüsteemi:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_{1A} = \dot{U}_{\sigma 1} + \dot{U}_{r1} + \dot{U}_{r\mu} + \dot{U}_{x\mu}, \\ \dot{U}'_{2A} &= \dot{U}_{1A} = \dot{U}_A = \dot{U}'_{\sigma 2} + \dot{U}'_{r2} + k_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}'_2 + \dot{I}_0. \end{aligned}\right\} \qquad (9.15)$$



Joonis 9.9. Primaarpoolele taandatud primaar-, sekundaar- ja magneetimisharust koosnev trafo T-kujuline aseskeem

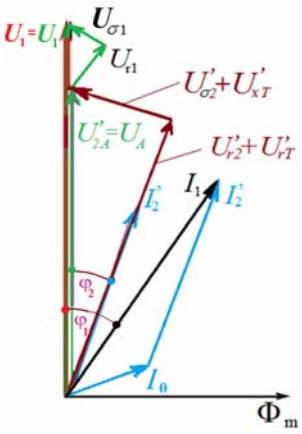
Sarnase võrrandisüsteemi võime koostada ka sekundaarpoolele taandatud (joonis 9.8b) trafole. Formaalne erinevus on vaid II kontuuri tarbija pinge kirjapildis. Trafo T-kujulistes aseskeemides eristatakse kolme haru: vasakul ülal – **primaarmähise**, paremal ülal – **sekundaarmähise** ja vertikaalne keskel – trafo **magneetimisharu**. Nende harude näivtakistused skeemile joonis 9.8a on: $\dot{Z}_1 = r_1 + jx_1$, $\dot{Z}'_2 = k_{12}^2 r_2 + jk_{12}^2 x_2$ ja $\dot{Z}_\mu = r_\mu + jx_\mu$. Tarbija näivtakistus, taandatuna primaarpoolele $\dot{Z}'_T = k_{12}^2 r_T + jk_{12}^2 x_T$. Asendades takistused näivtakistustega, saame joonisel 9.9b kujutatud aseskeemi.

Vaadeldes ka joonisel 9.9b kahte kontuuri I ja II ning üht sõlme A ja rakendades Kirchhoffi kahte seadust, saame trafo T-kujulist aseskeemi võrrandisüsteemi kujuks:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1\dot{Z}_1 + \dot{I}_0\dot{Z}_{12}, \\ \dot{U}_1 &= \dot{I}_1\dot{Z}_1 + \dot{I}'_2\dot{Z}'_2 + \dot{I}'_2\dot{Z}'_T, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}'_2 + \dot{I}_0 \end{aligned}\right\}, \qquad (9.16)$$

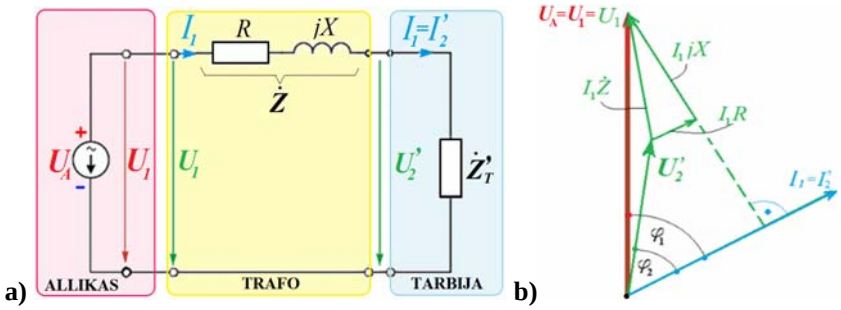
kus kaks esimest võrrandit on aseskeemi (joonis 9.9b) esimese ja teise kontuuri kohta Kirchhoffi teise, pingeseaduse järgi kirjutatud võrrandid ja kolmas võrrand tugineb Kirchhoffi esimesele, vooluseadusele.

Aseskeemi (joonis 9.9a) vektordiagramm joonisel 9.10a on võrrandisüsteemi (9.15) arvutustulemuste graafiline kirjeldus. See vastab aktiiv-induktiiviseloomuga tarbijale. Aktiiv-mahtuvusliku tarbija korral võib trafo sekundaarpinge $\dot{U}_2$ olla suurem sekundaarmähise allikapingest $\dot{U}_{2A}$.



Joonis 9.10. Trafo aseskeemile vastav vektordiagramm

Sarnase vektordiagrammi võib koostada joonise 9.9b aseskeemi ja seda kirjeldava võrrandisüsteemi (9.16) alusel. Tuleb veel kord rõhutada, et joonisel 9.10 ja 9.11 esitatud koormatud trafo pingete ja voolude faasivektorite diagrammil on primaarmähise pingete kolmnurk ja tühijooksuvool parema jälgimise tagamiseks näidatud tegelikkusest palju suurematena. Et paremini tajuda ja arvestada trafo mõju elektriülekandel, on kasulik trafo aseskeemi veelgi lihtsustada. Selleks jätame trafo tühijooksuvoolu I_0 selle väiksuse tõttu arvesse võtmata. Eeldame, et $\dot{Z}_\mu = r_\mu + jx_\mu = \infty$. Siis saame trafo lihtsustatud aseskeemi (joonis 9.11a), millele vastab üks võrrand: $\dot{U}_1 = \dot{I}_1(\dot{Z}_1 + \dot{Z}'_2) + \dot{U}'_2 = \dot{I}_1\dot{Z} + \dot{U}'_2$, sest $I_0 = 0$ puhul $\dot{I}_1 = \dot{I}'_2$.



Joonis 9.11. Trafo lihtsustatud aseskeem (a) ja sellele vastav vektordiagramm (b)

Lihtsustatud aseskeemi näivtakistus $\dot{Z} = R + jX$, kus $R = r_1 + r'_2$ ja $X = x_1 + x'_2$. Lihtsustatud aseskeemile vastav vektordiagramm on joonisel 9.11b.

9.6. Trafo lühis

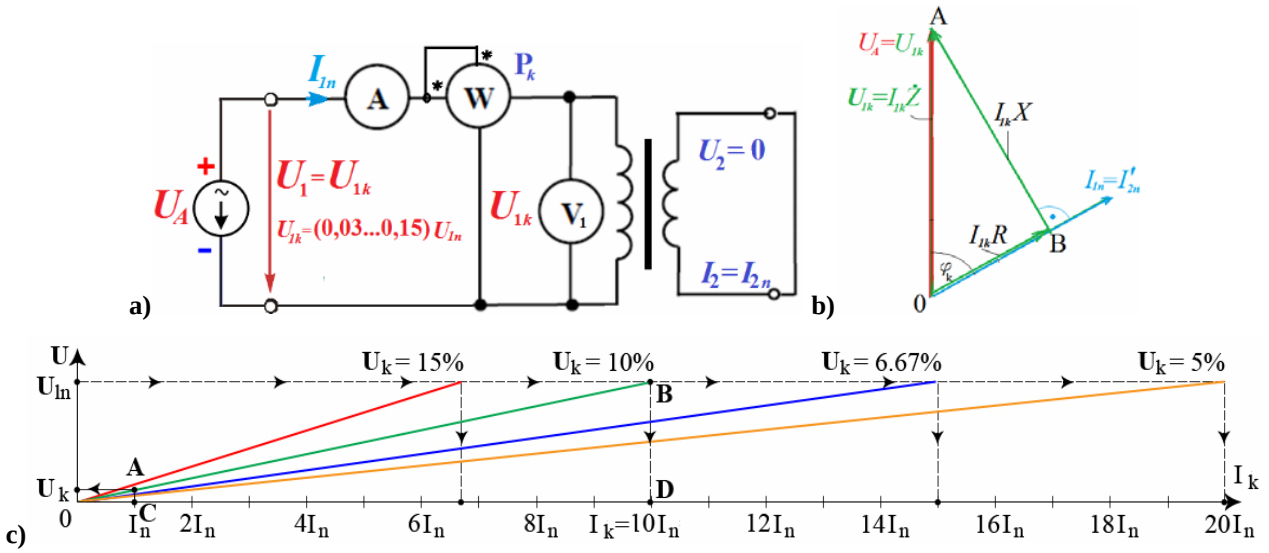
Trafo on lühises siis, kui sekundaarmähise otsad on omavahel galvaaniliselt ühendatud. Tarbija takistus $\dot{Z}_T = 0$, järelikult on null ka sekundaarmähise allikaväljundpinge U_2. Sellises talitluses kujuneb nimipingel lühisevool lubamatult suureks – lühise tagajärjel võib trafo muutuda töökõlbmatuks. Lühis võib tekkida ootamatult trafo tavatalitluse käigus. Lühisega kaasnevad siirdeprotsessid, mis võivad ohustada trafot. Suurte voolutõugetega kaasnevad löögitaolised mehaanilised jõud ja üliintensiivne soojuse eraldumine trafos.

Trafo lühisekatse. Trafo käitumise prognoosiks lühisel ja tema aseskeemi parameetrite määramiseks tehakse **lühisekatse**. See võimaldab katseliselt määrata **nimivaseskao** ja lihtsustatud **aseskeemi parameetrid.** Lühisekatse skeem on joonisel 9.12a. Sekundaarmähis on lühistatud ja seega $U_2 = 0$. Primaarmähis on aga lülitatud sellisele nn **lühisepingele** (3…15% nimipingest), et lühisevool primaarmähises võrduks nimivooluga $I_{1k} = I_{1n}$. Lühisekatsel mõõdetakse peale lühisevoolu ka lühisepinget U_{1k}, lühisevõimsust P_k ja trafo temperatuuri ϑ katse ajal. Pinge vähendamisel väheneb ka magnetvoog südamikus, mille tagajärjel sellega võrdeline tasakaalustav allikapinge moodustab 2…5% nimiallikapingest. Et teraseskadu on võrdeline magnetvoo ruuduga, võib need lühisekatsel praktiliselt jätta arvestamata $(p_{Fe} \approx 0)$ ja kogu lühisevõimsus eraldub vaseskaona mähistes. Seega,

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{2k}^2 r_2 \tag{9.17}$$

ja et $I_{1k} = I_{1n}$ ja $I_{2k} = I_{2n}$, siis lühisevõimsus on võrdne nimivaseskaoga:

$$P_k = p_{Cu}.$$



Joonis 9.12. Trafo lühisekatse skeem (a) ja lühise vektordiagramm (b). Trafo lühisekatse põhjal lühisevoolu suuruse I''_K määramine erinevate trafo lühisepingete korral (U_K = 5; 6,67; 10 ja 15%) (c)

Potentsiaalilang $U_2 = 0$ (siis ka $U'_2 = 0$). Kogu lühisepinge on tasakaalustatud mähiste puiste- ja oomilise potentsiaalilanguga. Kirjeldatud olukord on sarnane trafo lihtsustatud aseskeemiga, sest magneetimisvool on siin tühine. Siis aga $I_{1k} = I'_2$ ja võrduse (9.17) asemele saame:

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_2'^2 r'_2 = I_{1k}^2 (r_1 + r'_2) = I_{1k}^2 r_{1k} = I_{1k}^2 R;$$

siit saame avaldada lihtsustatud aseskeemi lühise aktiivtakistuse

$$R = \frac{P_k}{I_{1k}^2}. \tag{9.18}$$

Lühise näivtakistus $Z_{1k} = Z_1 + Z_2' = Z$. Siis $Z = \dfrac{U_{1k}}{I_{1k}}$ (9.19)

ja lihtsustatud aseskeemi puisteinduktiivtakistuse saame seostest (9.18) ja (9.19):

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Kuna lühisekatse tehakse madaldatud pingel, on mähiste temperatuur teraseskao puudumise tõttu väiksem kui trafo nimivõimsusel. Selleks et kasutada lihtsustatud aseskeemi parameetreid trafo arvutusel nimitalitlusel, tuleb *R* ja *Z* ümber arvutada mähiste nimitemperatuurile, milleks tavaliselt loetakse +75°C.

Kui on tegemist vaskmähistega, siis valemi $R_{75} = R\dfrac{235 + 75}{235 + \vartheta}$

ja uueks näivtakistuseks saame:

$$Z_{75} = \sqrt{R_{75}^2 + X^2}.$$

Kõrgema töötemperatuuri korral, isolatsiooni klassid F ja H nimitemperatuuriga +115°C (standard EVS-EN 60034-8) tuleb kasutada täpsustatud ümberarvutust tegelikule töötemperatuurile.

Joonisel 9.12b on trafo lühise vektordiagramm, mis sarnaneb lihtsustatud aseskeemi vektordiagrammiga, arvestades seda, et $U_2' = 0$. Nihkenurk lühisepinge U_{1k} ja voolu $I_{1k} = I_{1n}$ vahel on leitav vaseskao ja lühise näivvõimsuse kaudu võimsustegurist $\cos\varphi_k = \dfrac{P_k}{U_{1k} I_{1n}}$, mis on lühisel 0,4…0,8 piirides ning on väiksem suurematel trafodel. Jooniselt 9.12b on potentsiaalilang $I_{1k}R$ lühispinge aktiivkomponent $I_{1k}R = U_{1k}\cos\varphi_k$. Sarnaselt on lühisepinge reaktiivkomponent $I_{1k}X = U_{1k}\sin\varphi_k$. Siin on X lühise reaktiivtakistus. Kolmnurka *OAB* nimetatakse **lühisekolmnurgaks**. Lühisepinge väärtus U_{1k} iseloomustab trafo olulisi omadusi. Lühisepinget ja selle komponente väljendatakse protsentides nimipingest, mähiste töötemperatuuril. Protsentuaalne lühisepinge märgitakse trafo nimisildile. Lühisepinge väärtus võimaldab määrata trafo pingemuutust koormusel. Samuti saab määrata nimiprimaarpingel **väljakujunenud lühisevoolu väärtust** $I_{1kn} = 100 I_{1n} / u_{k\%}$.

Joonis 9.12c illustreerib graafiliselt katseid erinevate trafode korral. Katse käigus, tõstes trafo toitepinget nullist väärtuseni U_k = U, kasvavad voolu ja pinge väärtused vastavalt sirgele OA. Kui me aga suurendaksime toitepinget väärtuseni U_{1n} (nimipingeni), siis nimipingel oleks trafo sekundaarpoolel väljakujunenud lühisevoolu väärtus I_k, mille suurus on avaldatav sarnastest kolmnurkadest OAC ja OBD. Olgu meil U_k = 10%. Seega U_k = 0,1 U_{1n}. Siit 0,1 U_{1n} vastab 1,0 I_n ja 1,0 U_{1n} vastab I_k. Selle põhjal leiame

$$I_k = \frac{I_n U_{1n}}{0{,}1 U_{1n}} = 10 I_n.$$

Kui U_k = 0,05; 0,067; 0,1 ja 0,15U_{1n}, siis $I_k = 20 I_n$; $15 I_n$, $10 I_n$ ja $6{,}7 I_n$. Seega %-des väljendatud U_K korral lühisevool $I_k = I_n \dfrac{100}{U_{k\%}}$,

siin I_k – lühisevool, A; I_n=I_{n2} – trafo nimisekundaarvool, $U_{k\%}$ – trafo lühisepinge %.

Trafo nimisekundaarvool $I_{2n} = \dfrac{S_n 1000}{\sqrt{3} U_{2n}}$,

kus S_n on trafo sildijärgne nimivõimsus kVA, U_{2n} – trafo nimiliinipinge alampinge poolel.

Trafo parameetrite määramine. Trafo tööd on mugav analüüsida aseskeemide abil. Selleks on vaja aseskeemi parameetreid. Neid on võimalik määrata arvutuste teel või katseliselt. Viimane on teostatav trafo tühijooksu- ja lühisekatse abil.

Tühijooksu katse viiakse läbi joonise 9.6 skeemi kohaselt vastavalt p. 9.3 kirjeldatule. Primaarmähise pinget tõstetakse järk-järgult nullist nimipingeni. Fikseerides mõõteriistade näidud, koostatakse näitude alusel tunnusjooned $I_0 = f(U_{10})$; $P_0 = f(U_{10})$ ja $\cos\varphi_0 = f(U_{10})$. Lisaks **ülekandetegurile** $k_{12} \approx \dfrac{U_{1n}}{U_{20}}$, määratakse protsentuaalne tühijooksuvool nimivoolust $i_{0\%} = I_0 \dfrac{100}{I_{1n}}$. See on enamuses 2...8%. Edasi **magneetimisharu näivtakistus** ja komponendid $Z_\mu = r_\mu + jx_\mu$. Leiame $Z_\mu \approx U_0 / I_0$. Edasi $r_\mu = Z_\mu \cos\varphi_0$ ning $x_\mu = \sqrt{Z_\mu^2 - R_\mu^2} = Z_\mu \sin\varphi_0$.

Tühijooksukadu $P_0 = U_1 I_0 \cos\varphi_0$. Jooniselt 9.6 näeme, et tühijooksul on ahelas jadamisi vaid primaarmähise ja magneetimisharu näivtakistused. Seega, $P_0 = I_0^2 (r_1 + r_\mu)$. Kuna r_μ on palju suurem kui r_1, siis võib tühijooksu võimsuse lugeda võrdseks teraseskaovõimsusega $P_0 \approx I_0^2 r_\mu = p_{Fe}$. Allikapinge kasvades suurenevad I_0 ja P_0 võrdeliselt pinge ruuduga; võimsustegur väheneb teraseskao suurenemise tõttu.

Lühisekatse. Katse viiakse läbi joonise 9.12 skeemi põhjal. Lühistatud sekundaarmähise korral suurendatakse allikapinget nullist väärtuseni, millal trafo mähistes on nimivoolu suurune lühisevool. Mõõtetulemused registreeritakse ja koostatakse lühistunnusjooned $I_k = f(U_k)$; $P_k = f(U_k)$ ning $\cos\varphi_k = f(U_k)$. Kuna primaarmähise takistuste väärtused ei sõltu voolust ja pingest, kasvab pinge kasvades vool lineaarselt. Ka $\cos\varphi_k \approx const$. Lühisekatsest leiame (9.19) alusel lühise näivtakistuse $Z_k = U_k / I_k = R_k + jX_k$. Lühisekontuuri aktiivtakistus $R_k = Z_k \cos\varphi_k$. Induktiivtakistus $x_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = Z_k \sin\varphi_k$. Lühisetakistused $R_k = r_1 + r_2'$ ja $X_k = x_1 + x_2'$. Mähiste aktiivtakistused on ükshaaval piisava täpsusega mõõdetavad. Induktiivtakistuste mõõtmine on raskesti teostatav. Seda tavaliselt ei tehta. Küllaldase täpsusega $x_1 = x_2' = 0{,}5X_k$.

Lühisekao võrrand $P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_2^2 r_2$ arvestab, et kao põhiosa eraldub mähistes $P_k \approx P_{Cu}$. Ka lühisekadu ja lühisepinge taandatakse temperatuurile 75 °C või 115 °C. Mõõdetud lühisepinge U_k järgi leitakse **lühisepinge aktiiv- ja reaktiivkomponendid** $U_a = U_k \cos\varphi_k$ ja $U_r = U_k \sin\varphi_k = \sqrt{U_k^2 - U_a^2}$.

9.7. Trafo pingemuutus ja välistunnusjooned

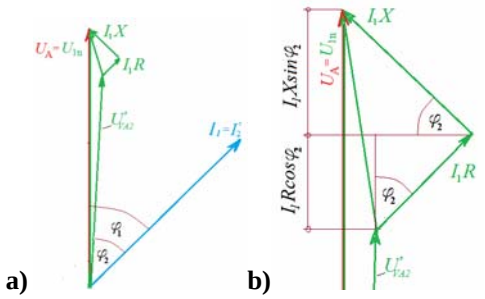
Potentsiaalilangu tõttu muutub trafo mähiste näivtakistusel sekundaarpinge U_2. Sõltuvust $U_2 = f(I_2)$ nimetatakse **trafo välistunnusjooneks. Pingemuutuseks** nimetatakse trafo tühijooksu ja koormuse sekundaarpingete vahet muutumatu primaarpinge korral

$$\Delta U_2 = U_{20} - U_2.$$

Pingemuutus väljendatakse konstantse nimipinge suhtes. Arvestades seda, et $U_{20}' = U_{1n}$, saame nn. **protsentuaalse pingemuutuse**

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100 = \frac{U_{1n} - U_2'}{U_{1n}} 100\%, \qquad (9.20)$$

kus vahe $U_{1n} - U_2'$ on leitav joonisel 9.13a lihtsustatud aseskeemi pingete ja voolude faasivektorite diagrammi alusel.



Joonis 9.13. Trafo lihtsustatud aseskeemi pinge ja voolude faasi-vektorite diagramm protsentuaalse pingemuutuse leidmiseks

Kuna siin $\varphi_1 \approx \varphi_2$, siis võime leida küllaldase täpsusega pingete algebralise vahe, mille saame vektordiagrammi potentsiaalilangude kolmnurgast (suurendatud mõõtkavas on see joonisel 9.13b):

$$U_{1n} = U_{VA2}' + I_1 R \cos\varphi_2 + I_1 X \sin\varphi_2.$$

Asetades leitud vahe seosesse (9.20), saame protsentuaalse pingemuutuse:

$$\Delta U\% = \frac{100 I_1 R}{U_{1n}} \cos\varphi_2 + \frac{100 I_1 X}{U_{1n}} \sin\varphi_2,$$

kus *R* ja *X* on lühisekatsest leitud lihtsustatud aseskeemi parameetrid.

Iseloomustame koormust suhtelise suurusena nimikoormuse suhtes. Selleks kasutatakse **koormustegurit** β, mis avaldub: $\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} \approx \frac{I_1}{I_{1n}}$. (9.21)

Avaldame protsentuaalse pingemuutuse koormusteguri (9.21) kaudu, tähistades

$$\frac{100 I_{1n} R}{U_{1n}} = \Delta U_a \quad \text{ja} \quad \frac{100 I_{1n} X}{U_{1n}} = \Delta U_r,$$

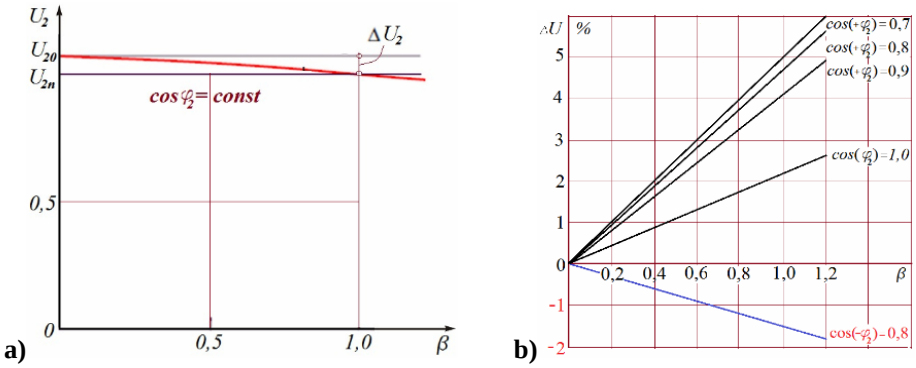
saame protsentuaalse pingemuutuse sobiva avaldise

$$\Delta U\% = \beta(\Delta U_a \cos\varphi_2 + \Delta U_r \sin\varphi_2). \tag{9.22}$$

Nüüd võime teades, et $U_2 = U_2' / k_{12}$, seoste (9.20) ja (9.22) alusel leida trafo välistunnusjoone (joonis 9.14a)

$$U_2 = f(\beta, \cos\varphi_2), \tag{9.23}$$

kusjuures on vaja teada, et mahtuvuslikul koormusel tuleb $\sin\varphi_2$ võtta negatiivsena.



Joonis 9.14. Trafo sekundaarpinge olenevus koormustegurist püsiva võimsusteguri korral (a). Trafo väliskarakteristikud mahtuvusliku $\cos(+\varphi_2)$ **ja induktiivse koormuse** $\cos(-\varphi_2)$ **korral (b)**

Joonisel 9.14b on trafo, mille U_k = 5,4% ja $\cos\varphi_k$ = 0,4. Näitest selgub, et trafo pingemuutus oleneb koormuse suurusest ja iseloomust. Mahtuvuslikul koormusel on pingemuutus negatiivne, mistõttu koormuse suurenemisel pinge tõuseb, induktiivsel koormusel väheneb alla nimipinge väärtuse. Tavaliselt on trafo pingemuutus suhteliselt väike, 2...4%. Sagedased, suhteliselt suured koormuse muutused võivad põhjustada väreluse, seda eriti hõõglampide korral. Neil valgus väreleb, mis väsitab silmi ja halvendab töötegemisvõimet.

9.8. Trafo kasutegur

Trafo üks olulisem töötunnusjoon on kasuteguri olenevus koormusest. Seda väljendab kasuteguri sõltuvus koormustegurist: $\eta = f(\beta)$. Trafo kasutegur $\eta = P_2 / P_1$, on avaldatav sekundaar- ja primaarvõimsuse suhtena. Viimaseid on võimalik vahetult mõõta. Kvaliteetsete mõõteseadmete kasutamine tagab rahuldava täpsuse. Võimalik on ka kasuteguri määramine trafo kaovõimsuse $\Delta P = P_1 - P_2$ kaudu.

$$\eta = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}. \tag{9.24}$$

Valemis (9.24) koosnevad kaod trafos terases- ja vaseskaost: $\Delta P = p_{Fe} + p_{Cu}$, mille nimiväärtused saab leida vastavalt tühijooksu- ja lühisekatsest. Jaotisest 9.3 selgus, et teraseskadu ei olene koormusest ja kui $U_1 = U_{1n} = \text{const}$, siis $p_{Fe} = P_0$. Vaseskadu on aga võrdeline voolu ruuduga ning jaotise 9.5 alusel

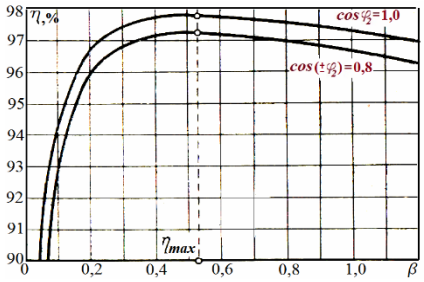
koormusteguri kaudu $p_{Cu} = \beta^2 P_k$. Kao suurus lühisel P_k on määratud nimivoolu väärtusel $I_k = I_n$. Seega saame kasuteguri (9.24) avaldada kujul

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{P_2 + P_0 + \beta^2 P_k},$$

kus kasuliku võimsuse $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ võib väljendada trafo nimivõimsuse ja võimsusteguri kaudu. Seosest (9.21) $I_2 = \beta I_{2n}$ ning nimivõimsus $S_{2n} = U_{2n} I_{2n}$. Nüüd saame lõplikult trafo kasuteguri avaldise:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_{2n} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \tag{9.25}$$

kus $\cos\varphi_2$ on tarbija võimsustegur. Joonisel 9.15 on sõltuvus $\eta = f(\beta)$ kahe püsiva võimsusteguri väärtuse korral. Kõverad algavad nullist, sest kui $\beta = 0$, siis (9.25) alusel $\eta = 0$.



Joonis 9.15. Trafo kasuteguri olenevus koormustegurist

On oluline teada, et **trafo nimivõimsus antakse näivvõimsusena** S_{2n}, sest tarbija võimsustegur $\cos\varphi_2$ ei ole trafo projekteerimisel ega valmistamisel tavaliselt teada.

Võimsate trafode kasuteguri maksimum, mis võib olla isegi üle 99%, on projekteeritud tavaliselt umbes poolele koormusele $(\beta = 0{,}5)$. See on otstarbekohane elektrivarustuse töökindluse tagamise seisukohast. Töökindluse tagamiseks projekteeritakse olulised alajaamad kahe trafo toitega. Sellega tagatakse avariitalitluse tarbeks vajalik võimsuse reserv. Tavatalitluses töötavad need alakoormatud trafod siis põhiosa ajast suure kasuteguriga tööpiirkonnas (joonis 9.15).

Kasuteguri avaldisest võime leida suurimale kasutegurile vastava koormusteguri, võttes võrrandis (9.25) esimese tuletise β järgi ja võtta $d\eta / d\beta = 0$. Siis

$$\beta = \sqrt{P_0 / P_k}\,. \tag{9.26}$$

Suurim kasutegur on seega siis, kui $P_0 = \beta^2 P_k$, mis vastab olukorrale, et **teraseskadu ja vaseskadu on võrdsed**. Kui $\beta = 1$, siis trafo töötab nimitalitluses. P_0 / P_k suhe oleneb trafo talitluse iseloomust ning vase ja trafopleki hinnast. Teraseskadu $p_{Fe} \approx P_0$ on muutumatu ja esineb alati, vaseskadu oleneb koormusest. Seepärast on kasulik suurendada vaseskadu. Vaseskao suurendamine on soovitatav siis, kui trafod töötavad pikka aega väikese koormusega (eespool vaadatud paralleeltöö ja jaotusvõrgu trafode töö suvel). Nendest asjaoludest lähtudes esineb suurim kasutegur siis, kui $\beta = 0{,}5...0{,}6$.

Muutuva koormuse korral kasutatakse üldhinnangu saamiseks aastast kasutegurit η_a. Kasutegur on võrdne sekundaarahelast väljastatud W_2 ja primaarahelasse sisestatud W_1 elektrienergia koguste suhtega $\eta_a = \frac{W_2}{W_1}$.

Siit

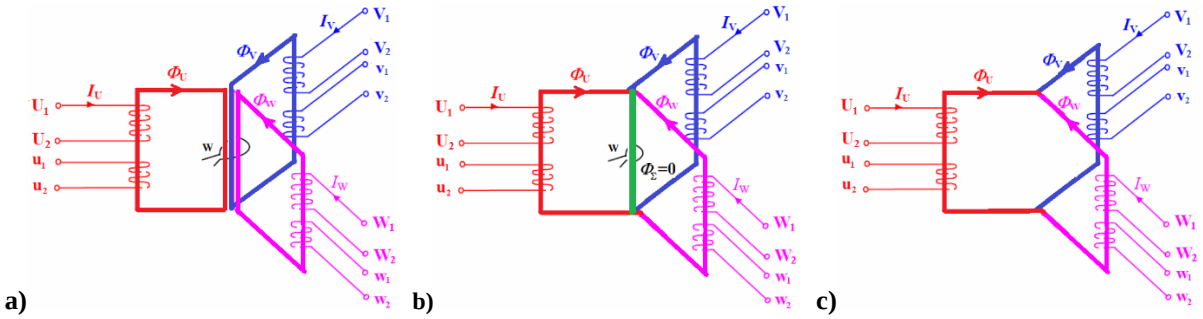
$$\eta_a = 1 - \frac{8760 P_0 + \beta^2 P_k T_{nk}}{\beta S_{2n} \cos\varphi_2 T_{nk} + 8760 P_0 + \beta^2 P_k T_{nk}}. \tag{9.27}$$

Siin on T_{nk} trafo nimivõimsuse P_{2n} kasutamise aeg aastas ja 8760 – aastane tundide arv. Aastane kasutegur on väiksem joonisel 9.15 kujutatust. See kasutegur võimaldab hinnata, kui majanduslikult kasutatakse trafot.

9.9. Kolmefaasilised trafod

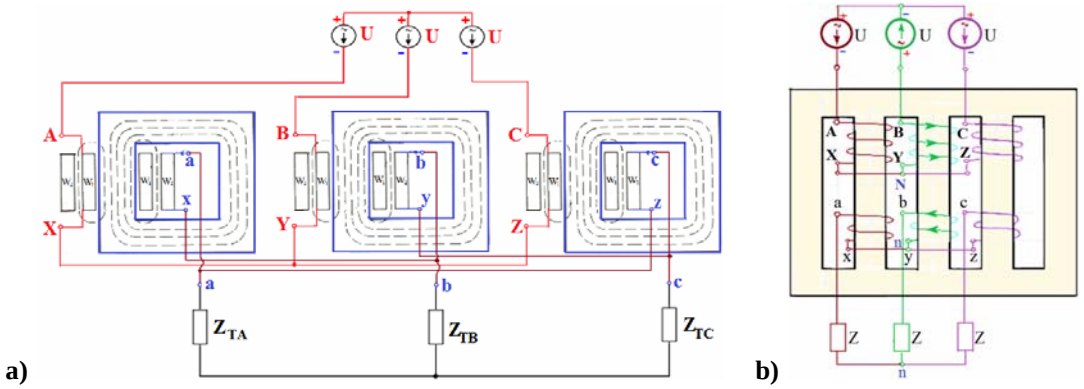
Kolmefaasilise vahelduvvooluenergia muundamisel teistsuguse pingega kolmefaasiliseks energiaks võib kasutada kolme ühefaasilist trafot või ühte kõikidele faasimähistele ühise magnetahelaga kolmefaasilist trafot. Sel puhul kulub samasuguse energiahulga muundamisel vähem terast magnetsüdamiku materjalina. Kolme ühefaasilise puhul on iga faasi magnetahel teistest faasidest sõltumatu. Omavahel on ühendatud nende mähised. Kolme ühefaasilise korral on eeliseks asjaolu, et avarii korral on võimalik töötada ka kahe trafoga ja suurte võimsuste korral ühefaasilise trafo kergem kaal ja väiksem gabariit. Puuduseks on suurem ruumivajadus, kallim hind ja tülikam igapäevatöö.

Kolme ühefaasilist trafot on kolmefaasilises süsteemis võimalik kasutada joonisel 9.16a esitatud skeemi kohaselt. Kui on tegemist, nagu tavaliselt, sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemiga, siis on magnetvood ajaliselt nihutatud üksteise suhtes 120° nurkade võrra ja nende summa on mis tahes ajahetkel null: $\dot{\Phi}_\Sigma = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C = 0.$



Joonis 9.16. Kolmefaasilise trafo moodustamine: a – kolmest ühefaasilisest trafost; b – sümmeetriline kesksambaga magnetahel; c – sümmeetriline kolme sambaga magnetahel

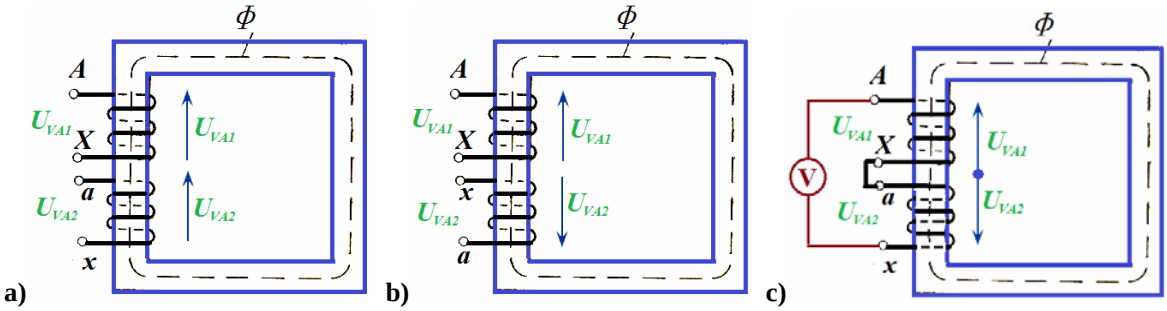
Seega ei indutseerita keerus w (joonis 9.16a) allikasisepinget. Ühendades ühefaasiliste trafode need sambad, saame kolmefaasilise trafo (joonis 9.16b), kus tegelikult puudub vajadus keskmise samba järele, sest voog $\Phi_\Sigma = 0$. Jättes ära keskmise samba, saame sümmeetrilise kolmefaasilise trafo (joonis 9.16c), mille töötamispõhimõte ei erine kolme ühefaasilise trafo omast. Sellise ehitusega kolmefaasilist trafot on keerukas valmistada, nii kasutatakse tegelikult mittesümmeetrilise magnetahelaga kolmefaasilist trafot, mille skeem on joonisel 9.17b. Niisuguse trafo südamik on mittesümmeetriline eri faaside magnetvoogude suhtes, sest nende keskmised teepikkused on erinevad. Nii on keskmisel sambal oleva faasi tühijooksuvool väiksem kui äärmistel. See mittesümmeetria väheneb, kuna ikke ristlõikepind tehakse 10...15% suurem kui sambal. Tegelikult avaldub sekundaarpingete süsteemis magnetahelast tingitud ebasümmeetria tähtsusetult vähe, kuid trafo maksumus on oluliselt väiksem sümmeetrilise südamikuga (joonis 9.16c) trafo omast. Sellise magnetahela võttis 1881. a kasutusele M. O. Dolivo-Dobrovolsky Saksamaal.



Joonis 9.17. Kolmefaasilise trafo moodustamine: a – kolme ühefaasilise trafo rühm; b – tasapinnalise kolme sambaga magnetahelaga trafo

Eelnevates peatükkides esitatud ühefaasiliste trafode seosed kehtivad ka kolmefaasilise trafo iga faasi kohta. Seda vaatamata asjaolule, et siin on eri faaside magnetahelad omavahel seotud.

Faasimähiste ühendamine. Vaatamata mähiste alguse ja lõpu tinglikule tähistusele, on hädavajalik ühene täpne märgistus. Joonis 9.18 selgitab probleemi. Olgu sambal ühesuguse keerdude arvuga primaar- ja sekundaarmähis. Siis indutseeritakse mõlemas mähises samas faasis olev võrdne allikapinge $\dot{U}_{1A} = \dot{U}_{2A}$,, igal ajahetkel on nendel omavahel kokkulangev faasivektori suund (joonis 9.18a). Vahetades klemmidel tähised (joonis 9.18b), tuleb arvestada, et $\dot{U}_{1A}$ ja $\dot{U}_{1A}$ on faasis 180° kraadi võrra nihutatud, olgugi et allikapingete indutseerimises midagi ei muutunud. Täpselt sama suur 180° kraadi suurune faasinihe toimuks ka siis, kui mähiste tähistus oleks muutumatu, kuid üks mähistest oleks keritud vastupidi. Kokkuleppeliselt on mähis „parempoolne“, kui keerud on mähitud parempoolse keerme suunas, ja „vasakpoolne“, kui vastupidi.

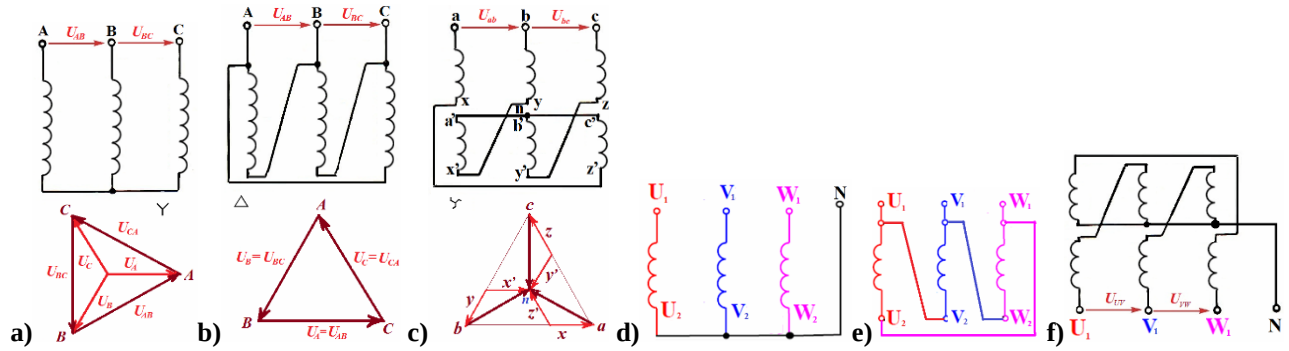


Joonis 9.18. Trafo mähiste klemmide tähistus. Mähkimissuuna ja indutseeritud allikapingete suuna arvestus

Selgub, et kui ühendada joonisel 9.18c parem- ja vasakpoolse kerimisega mähised järjestikku, siis äärmiste, *A* ja *x* klemmide vahel on pinge null. Seda võib kontrollida voltmeetriga. Kui ühendada aga omavahel klemmid *X* ja *x*, saame klemmide *A* ja *a* vahel pinge $\dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A}$, mis on meie näite puhul kahekordne.

Et vältida tekkida võivat segadust, on rahvusvaheliselt kokku lepitud mähiste ja **lülitusrühmade** tähistus-põhimõtted. Lülitusrühm iseloomustab primaar- ja sekundaarmähiste allikapingete omavahelist faasinihet. Jooniselt 9.18 selgub, et ühefaasilisel trafol on faasinihe kas null või 180°. Seega on lülitusrühmi kaks.

Trafo primaarmähise otsi tähistatakse suurte tähtedega, sekundaarmähist väikeste tähtedega. Kasutatakse kahte tähtede kombinatsiooni. Eristatakse mähise algust ja lõppu. Esimese variandi korral on mähise algused tähistatud *A, B* ja *C*, lõpud vastavalt *X, Y* ja Z. Teise variandi korral (joonis 9.16) on faasitähised *U, V* ja *W* ja mähise alguse indeks on 1, lõpul 2. Tähtlülituse korral tähistatakse neutraalpunkt vastavalt *N* ja *n*. Kolmefaasiliste trafode primaar- ja sekundaarmähised võivad olla nii täht-, kolmnurk- kui ka siksaklülituses. Teisest küljest võivad olla liinidega ühendatud nii mähiste algused kui ka lõpud.

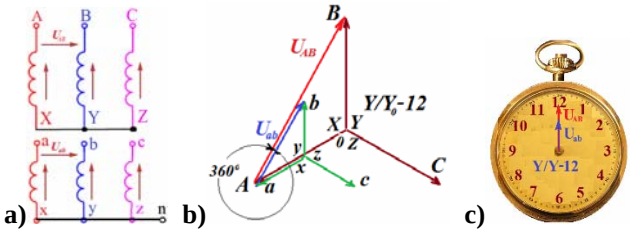


Joonis 9.19. Kolmefaasilise trafo mähiste lülitusskeemid: a, d – täht-, b, e – kolmnurk- ja c, f – siksaklülitus

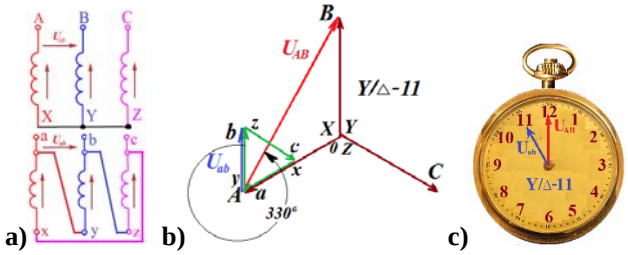
Kokkuleppe alusel iseloomustatakse primaar- ja sekundaarmähiste allikapingete omavahelist faasinihet osutite asendite kaudu kella numbrilaual. Ülempinge mähise liinipinget kujutatakse minutiosutina, mis on alati suunatud numbrile 12. Alampinge mähise samanimeline liinipingevektor on tunniosutiks, mis asetatakse vastavalt faasinihkele. Faasinihkele 0° vastab numbrilaual number 12 ja vastav lülitusrühm tähistatakse

numbriga 12 või 0. Seega on ühefaasilisel trafol lülitusgrupp kas 6 või 12. Kolmefaasiliste trafode mähiseid ühendatakse põhiliselt kolmel viisil: tavaliselt täht- (joonis 9.19a, d), kolmnurk- (joonis 9.19b, e) ja siksaklülitus (joonis c, f).

Neid lülitusi tähistatakse *Y* – täht-; Δ või *D* – kolmnurk- ja *Z* või ⅄– siksaklülitus; *N* või *n* – neutraalpunkt. Kolmefaasilise trafo korral on võimalik kokku 12 kombinatsiooni ehk **lülitusrühma**. Et kaheteistkümne lülitusrühma juures muutuvad primaar- ja sekundaarmähiste vastavate liinipingete vahelised nihkenurgad 30° järel, siis on formaalse sarnasuse põhjal võrreldud olukorda kella numbrilauaga (joonis 9.20). Nii on samastatud esimene rühm 30°≡ 1, 60°≡ 2, 90°≡ 3, 180°≡ 6, 300°≡ 10, 330°≡ 11 ja 360°≡ 12 või 0. Faasinihke nurka tähistatakse kellaosuti liikumissuunas. Iga tund tähistab 30° faasinihke nurga erinevust. Näiteks: esimene lülitusgrupp 1 = 30° – alampinge liinipinge vektor on ülempinge liinipinge vektorist 30° võrra järgi, rühm 11 = 330° – alampinge liinipinge vektor on ülempinge liinipinge vektorist 330° järgi või 30° võrra ees. Lülitused Y/Y, Δ/Δ, Δ/Z moodustavad paarisarvulised rühmad 2, 4, 6, 8, 10, 12 ja Y/Δ, Δ/Y, Y/Z – paarituarvulised rühmad 1, 3, 5, 7,9, 11.



Joonis 9.20. Kolmefaasilise trafo tähtlülitus (a) ja pingete vektordiagramm (b) Y/Y_0



Joonis 9.21. Kolmefaasilise trafo kolmnurklülitus (a) ja pingete vektordiagramm (b) Y_0/Δ

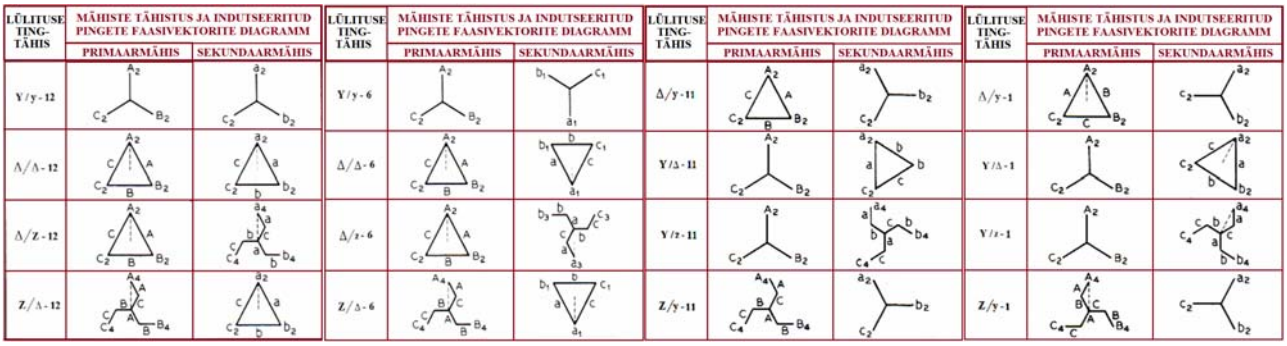
Trafode lülitusrühmade tähistamisel kasutatakse järgmist tähistamisviisi. Näiteks osutab tähises Yd11 esimene suur täht mähise lülitusele ülempinge poolel (Y), tähise teine, väike täht, siin *d* – tähise lülitusele alampinge poolel (d – kolmnurk-; y – täht-; z – siksaklülitus; n – neutraal). Tähise kolmas, siin number 11, tähistab faasinihet kellaosutite asendi järgi. Teine kasutusel olev lülitusrühmade tähistusviis on näiteks Y_0/Δ-11 (siin Y – täht-, Δ – kolmnurk-, ⅄ – siksaklülitus ja N – neutraal). Standardikohaste lülitusrühmade tähised on kujul Y/Y_0-12 ja Y_0/Δ-11, kus indeks null näitab, et lisaks liiniklemmidele on ka neutraalpunkt välja toodud.

Joonisel 9.17a on kolme trafo rühmal primaarmähised ühendatud tähtlülitusse (Y), sekundaarmähised on kolmnurklülituses (Δ). Vaatleme kolmefaasiliste trafode lülitusrühmi lähemalt. Joonisel 9.20 on Y/Y_0-12 lülitusrühma trafo, mille mähised on kujutatud ülestikku, eeldades, et nende mähkimissuund on sama. Siis on samad ka ühtedel sammastel paiknevate mähiste allikapinge vektorite suunad. Eeldame, et klemmid *A* ja *a* on elektriliselt ühendatud. Kui suuname vektordiagrammi nii, et vektor $\dot{U}_{AB}$ on suunatud kella numbrilaual (joonis 9.20c) numbrile 12, siis ka vektor $\dot{U}_{ab}$ on suunatud numbrile 12. See vastab lülitusrühmale Y/Y_0-12. Standard soovitab tootmise ja trafode kasutamise lihtsustamiseks võimalikest lülitusrühmadest kasutada vaid Y/Y-12 ja Y/Δ-11, kas maandatud või maandamata neutraalpunktiga. Joonis 9.21 selgitab Y/Δ-11 lülituse teket. Lülitusrühma Y_0/Δ-11 puhul on primaarmähis tähtlülituses, sekundaarmähis aga kolmnurklülituses joonisel 9.17 esitatud skeemi järgi. Siin on samanimeliste liinipingete vaheline nihkenurk 330°.

Alati märgitakse trafode sildile lülitusrühm. Seda on vaja teada trafode rööptalitluse kavandamiseks.

Jooniselt 9.19 selgub, et siksaklülituses summeeruvad pinged geomeetriliselt, mitte aritmeetiliselt ja sama pinge saavutamiseks vajatakse $2/\sqrt{3} = 1{,}16$ korda enam mähisekeerde. Seetõttu kasutatakse siksaklülitust võimsate eriotstarbeliste paljufaasiliste trafode valmistamisel, nagu alalditrafod. See võimaldab tagada elektri paremat kvaliteeti.

Joonis 9.22 näitab, mis lülitustega on võimalik erinevaid lülitusrühmi moodustada.

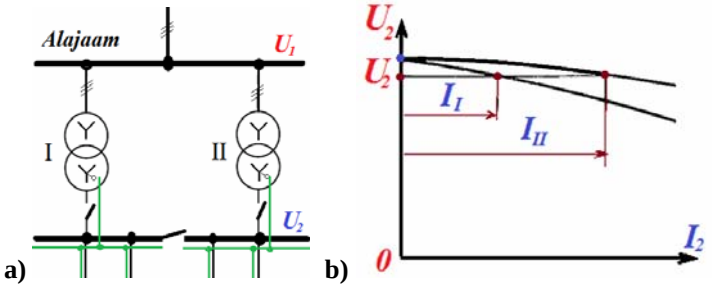


Joonis 9.22. Kolmefaasilise trafo lülitusrühma näited. Vasakult esimene – kui on faasis, teine – kui on vastasfaasis, kolmas – kui pinge edestab 30°, neljas – kui jääb maha 30°

Trafode rööptalitus. Tööstusettevõtete alajaamades on tavaliselt mitu trafot rööplülituses. Suure koormuse korral töötavad kõik trafod, puhkepäeval aga näiteks vaid üks territooriumi- või avariivalgustuse toiteks. Kolmefaasiliste trafode rööptalitluseks (joonis 9.23a) on vaja täita järgmised tingimused:

- trafode mähised peavad olema ühendatud samas faasijärjestuses;
- trafode ülekandetegurid peavad olema võrdsed (siis on võrdsed ka sekundaarpinged);
- trafod peavad kuuluma samasse lülitusrühma;
- trafode lühisepinged peavad olema võrdsed selleks, et koormus trafode vahel jaotuks võrdeliselt nende nimivõimsusega.

Esimesed kolm tingimust on nn **tühijooksu tingimused**, mille mittetäitmisel tekivad tasandusvoolud trafo sekundaarmähistes ka koormuse puudumisel, sest $\dot{U}_{2I} \neq \dot{U}_{2II}$. Neljas, nn **lühise tingimus** tuleneb trafode väliskarakteristikutest, mis peavad küllaldasel määral ühte langema. Väliskarakteristik leitakse lühiskatse andmete alusel.



Joonis 9.23. Trafode rööptalitlus (a) ja nende väliskarakteristikud (b)

Joonisel 9.23b on aga kujutatud juhtum, kus ühesuguse nimivõimsusega trafodel on erinevad väliskarakteristikud. Mingil pingel U_2 tekkib teise trafo sekundaarmähises suurem vool $I_{II} > I_I$, mistõttu teine trafo on üle koormatud.

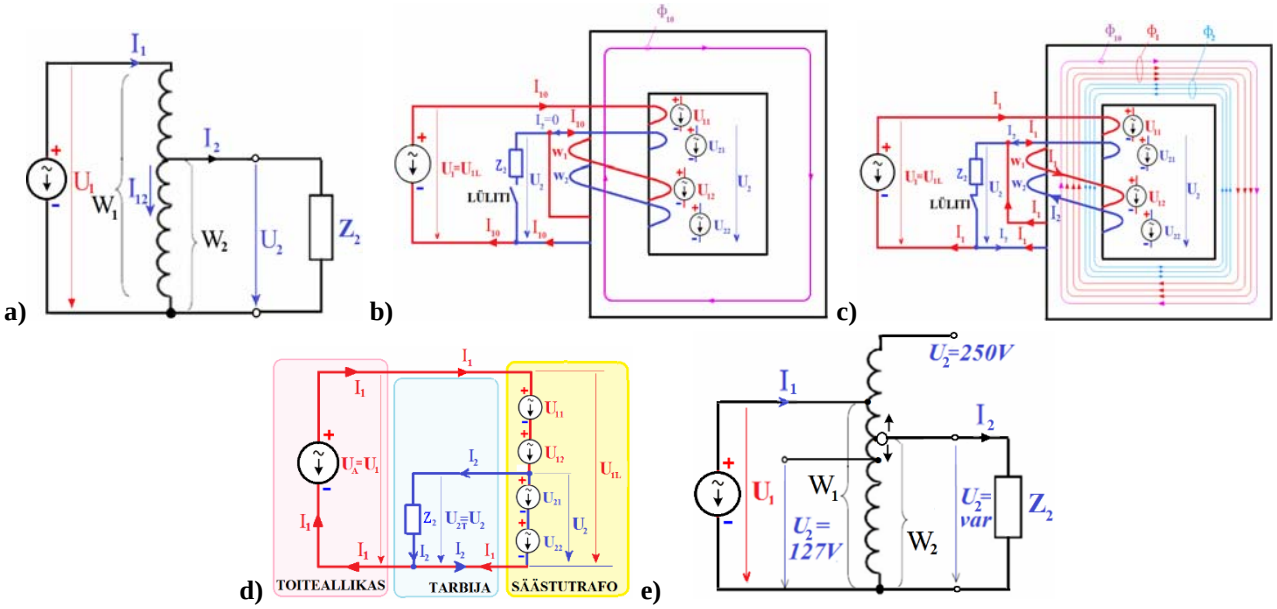
Lühise tingimus ei ole täidetav väga erinevate nimivõimsustega trafode korral, mistõttu neid ei saa lülitada rööptalitlusse.

9.10. Eriotstarbelised trafod

Sääste- ehk **autotrafo** alampingemähis moodustab osa ülempingemähisest. Selline trafo on küll odavam tavalisest, kuid primaar- ja sekundaarahel ei ole elektriliselt isoleeritud.

Olgu meil tegemist pinget madaldava autotrafoga, mille skeem on joonisel 9.24a. Primaarmähise keerdude arv w_1 ja sekundaarmähise (osa primaarmähisest) keerdude arv on w_2. Autotrafo ülekandetegur $k_{12} = w_1 / w_2$ ja sekundaarväljundpinge (pinge tarbija klemmidel) $U_2 \approx \dfrac{U_1}{k_{12}}$. Autotrafo tööpõhimõte sarnaneb trafo tööpõhimõttega. Tühijooksuvoolu väärtus (joonis 9.24b) kujuneb selliseks, et primaarmähise

aheldusvoo muutumise kiirus oleks täpselt nii suur, et igal ajahetkel tekkiv tasakaalustav mähise endainduktsiooni allikapinge u_{1L} on võrdne toiteallika pinge hetkväärtusega u_1.



Joonis 9.24. Ühefaasilise pinget vähendav säästetrafo (autotrafo) ja tema mähiste lülitusskeem (a); b – tühijooks; c – koormatud autotrafo; d – ahela aseskeem, kus trafo neli mähisekeerdu on asendatud allikatega ja mõnes TTÜ laboris kasutatava autotrafo lülitus (e)

Joonisel 9.24c ja d on tasakaalu teke koormatud autotrafos. Siin on kõik neli mähisekeerdu autotrafo magnetahela sambal asendatud nelja allikaga. Nende allikate sisepinged on kõik võrdsed. Allika pinget u_1 tasakaalustava endainduktsiooni allikasisepinge hetkväärtus koosneb iga mähisekeeru allikapingete hetkväärtuste summast $u_1 = u_{11} + u_{12} + u_{21} + u_{22} = u_{1L}$. Sekundaarmähise jadalülituses oleva kahe keeru allikapinged liituvad ja moodustavad mähise allikaväljundpinge $U_{21} + U_{22} = U_2$.

Kui sekundaarmähise klemmidele on lülitatud tarbija Z_2, siis tühijooksul valitsenud tasakaaluolukord enam ei toimi. Tasakaalu rikub U_2 poolt põhjustatud voolu I_2 teke. Voolu suuna määrab U_2 suund, mis on vastupidine U_{1A} suunaga. Sekundaarmähise koormusvool I_2 tekitab oma magnetvoo Φ_2, mis liitub primaarmähise poolt põhjustatud vastassuunalise magnetvooga Φ_1 (joonis 9.24c). Järelikult ei ole magnetvoogude Φ_1 ja Φ_2 summa enam võrdne magnetvoo väärtusega tühijooksul Φ_{10}. Joonisel 9.24c on kujutatud hetke, kui lüliti on sisse lülitatud ning sekundaarmähise voolu I_2 voolamiseks on tekkinud kinnine kontuur. Tänu sekundaarmähise allikapingele ning kinnise voolukontuuri olemasolule kulgeb I_2 U_2 mõjul läbi tarbija takistuse Z_2. Voolu I_2 suund on vastupidine I_1 suunaga ning tekitab seega tühijooksu magnetvooga (Φ_{10}) vastupidise suunaga magnetvoo Φ_2. Vastupidise suunaga voog Φ_2 nõrgestab primaarvoogu, mis tagas tühijooksu voolu I_{10} väärtusel tasakaalu olukorra, et $U_{1A} = U_{1L}$. Kuna Φ_2 tekkel väheneb Φ_{10}, tekkib olukord, kus pinge u_{1L} väärtus hakkab langema ning tasakaaluolukord ei kehti, sest U_{1A} on suurem kui U_{1L}. Tasakaalu taastekkimiseks suureneb trafo primaarvool I_1, millega kaasneb primaarmähise magnetvoo Φ_1 suurenemine seni, kuni igal ajahetkel on täidetud tingimus $u_1 = u_{1L} = d\psi / dt$. Kuna allikapinge (võrgu toitepinge) hetkväärtus muutub ajas, siis pidev Φ_1 kasv vastab iga hetkväärtuse tasakaaluolukorrale, mida võib sarnaselt trafoga esitada võrrandiga $\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_{10}$. Väljendades magneetimisergutuste kaudu, saame $w_1 \dot{I}_{10} = (w_1 - w_2)\dot{I}_1 - w_2 \dot{I}_{12}$. Siin on $\dot{I}_1$ primaarahela vool, mis läbib mähiseosa $(w_1 - w_2)$.

Vool $\dot{I}_{12}$ läbib mähisekeerdusid W_2, mis on ühised nii primaar- kui ka sekundaarmähisele. Mähiste w_1 ja w_2 magneetimisergutused peaaegu tasakaalustavad vastastikku, kuna tühijooksu magneetimisergutus on väike. Seega, $w_2 \dot{I}_{12} \approx (w_1 - w_2)\dot{I}_1$. Mähise ühises osas on tegemist voolude I_1 ja I_2 vahega ning vool keerdudes w_2 on väike:

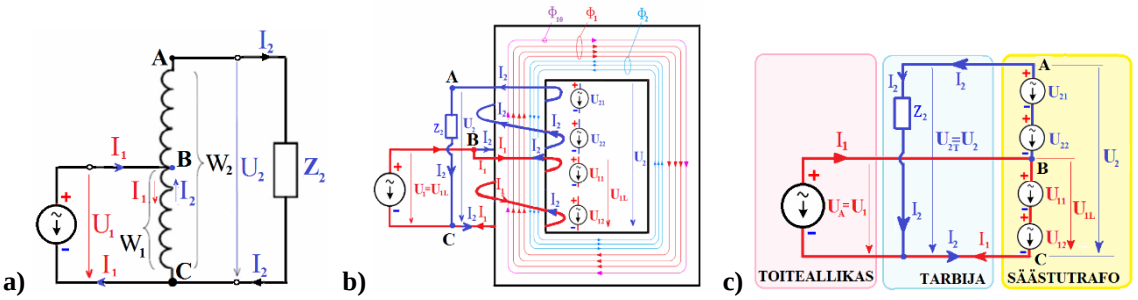
$$\dot{I}_{12} = \dot{I}_1 - \dot{I}_2 \approx (\frac{w_1}{w_2} - 1)\dot{I}_1 .$$

Vool $\dot{I}_{12}$ mähise ühisosas, siis kui mähise w_1 ja w_2 keerdude arvud on lähedased, võib osutuda oluliselt väiksemaks säästetrafo primaarvoolust.

Nimetatud asjaolu võimaldab mähiste ühisosa valmistada peenemast traadist, mille tõttu säästetrafo tuleb odavam kahe mähisega ühefaasilisest trafost ja mähise väiksema vase kulu tõttu on akna mõõdud magnetahelas väiksemad ja ka elektrotehnilise terase kulu väiksem. Võrreldes tavatrafoga, võib säästetrafo magnetahela samba ristlõige olla $(1-\frac{w_2}{w_1})$ korda väiksem.

Tihti on autotrafod muudetava sekundaarpingega. Levinuim on laboratoorne autotrafo, mille skeem on joonisel 9.24e. Selle trafo saab lülitada primaarpingele 230 või 127 V. Sekundaarpinge on liug- või rullkontakti abil sujuvalt muudetav 0…250 V piirides, mis on määratud ühe keeru pingega U_1 / w_1. Kui toitepinge $U_1 = 230$ V, siis ühest väljundist saab reguleeritava pinge, teisest 127 V ja kolmandast 250 V.

Lisaks reguleeritavale ja pinget vähendavale kasutatakse ka pinget tõstvaid säästetrafosid (joonis 9.25). Nende tööpõhimõte on sarnane pinget vähendava säästetrafoga. Primaarmähisel BC keerdude arvuga w_1 ja sekundaarmähisel AC keerdude arvuga w_2 on ühine mähiseosa BC, milles primaar- ja sekundaarvoolu suunad on vastupidised. Nii on selles mähises vool väiksem ja traadi ristõige väiksem.



Joonis 9.25. Ühefaasiline pinget tõstev säästetrafo (autotrafo): a – lülitus; b – tööpõhimõtte selgitus; c – allikatega aseskeem

Autotrafosid valmistatakse ka kolmefaasilistena.

Et autotrafo mähised ei ole elektriliselt teineteisest isoleeritud, siis ohutustehnilistel põhjustel ei valmistata neid suure ülekandeteguriga. Samuti **on keelatud neid kasutada ohutu pinge trafodena.**

Mõõtetrafod võib liigitada pinge- ja voolutrafodeks. **Pingetrafosid** kasutatakse voltmeetrite, vattmeetrite ja arvestite pingemähiste, sagedusmõõturite jne ühendamiseks kõrgepingeahelatesse mõõtepiirkonna laiendamise ning elektrilise isoleerimise eesmärgil. Elektriline isoleerimine on vajalik ohutustehnilistel põhjustel, sest mõõteriistad on tavaliselt inimestele kättesaadavad. Pingetrafode kaudu ühendatakse tihti ka automaatika- ja signalisatsiooniseadmed, näiteks pingereleed.

Pingetrafo sildil on jõutrafodega sarnased andmed ning samasugused on ka primaar- ja sekundaarmähise klemmide tähised.

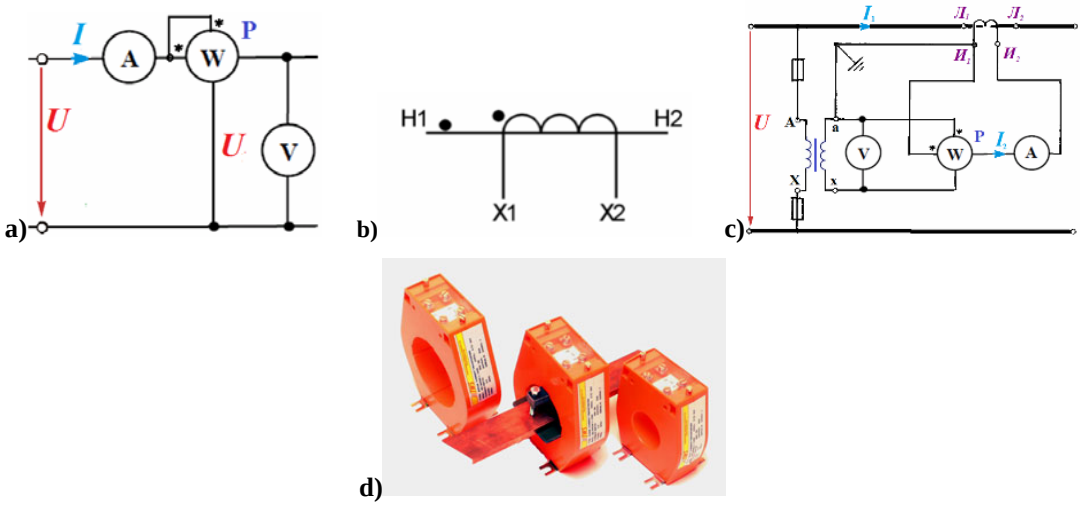
Mõõtetrafode puhul on oluline nende ülekandeteguri täpsus, sest see avaldab otseselt mõju mõõtmistulemustele. Pingetrafo sekundaarmähise klemmidelt mõõdetud pinge tuleb tegeliku pinge leidmiseks korrutada mõõtetrafo ülekandeteguriga. Kuna $U_1 \approx k_{12} U_2$, siis ei tohi sekundaarpinge oleneda pingetrafo koormusest. Järelikult peab mõõtmise täpsuse huvides pingetrafo töötama tühijooksule lähedases talitluses, sest vaid siis on sisemine potentsiaalilang tühine. Seepärast projekteeritakse ja ehitatakse pingetrafod tööks tühijooksul. Pingetrafodega ühendatavate mõõteriistade sisetakistus ongi suhteliselt suur. Tühijooksul on minimaalne ka faasiviga, sest siis on U_1 ja U_2 praktiliselt vastasfaasis.

Voolutrafosid kasutatakse ampermeetrite, vattmeetrite ja arvestite voolumähiste, voolureleede jne ühendamiseks samadel eesmärkidel nagu pingetrafosidki. Et vool sekundaarmähises $I_2 \approx I_1 k_{12}$, siis mõõtmise täpsuse huvides on vaja, et voolutrafo töötaks lühisetalitluses, sest vaid siis on magneetimisvool mõõdetava vooluga võrreldes tühine ja voolud praktiliselt vastasfaasis. Voolutrafodega ühendatavate mõõteriistade sisetakistus aga ongi väike.

Praktilisest seisukohast on oluline teada, et voolutrafode sekundaarahelas ei tohi tekkida katkestust, sest üleminekul lühisetalitlusest tühijooksule suureneb magnetvoog tunduvalt. Võrdeliselt voo ruuduga suureneb siis ka südamikus teraseskadu, mille tagajärjel voolutrafo võib üle kuumeneda.

Voolutrafo sildile on märgitud primaar- ja sekundaarmähise nimivool (või ka voolud, kui on tegemist muudetava ülekandearvuga voolutrafoga). Voolutrafo primaarmähise klemmid, mis ühendatakse mõõdetavasse ahelasse, tähistatakse tähtedega H_1 ja H_2 (NSVL ajal $Л_1$ ja $Л_2$) sekundaarmähise klemmid, mis ühendatakse mõõteriistaga, aga tähtedega X1 ja X2 ($И_1$ ja $И_2$).

Illustreeriva näitena on joonisel 9.26 voltmeetri, ampermeetri ja vattmeetri ühefaasilisse ahelasse ühendamise skeem vahetult (a) ning mõõteriistade mõõtepiirkonna laiendamise või isoleerimise vajadusel mõõtetrafode vahendusel (b).



Joonis 9.26. Mõõteriistade lülitamine ühefaasilisse ahelasse vahetult (a) ja mõõtetrafode vahendusel (c). Voolutrafode rahvusvaheline (b) ja NSVLi aegne (c) klemmide tähistus. Voolutrafode kujundusnäited (d)

9.11. Kordamisküsimused

1. Trafo tööpõhimõte. Miks muutub vool primaarahelas, kui sekundaarahela koormus muutub?
2. Trafo aseskeem. Aseskeemi parameetrite määramine tühijooksu ja lühiskatsest.
3. Trafo tühijooksu katse. Trafo aseskeemi parameetrid.
4. Trafo lühiskatse. Trafo aseskeemi parameetrid.
5. Toitesüsteemi ekvivalentse sisetakistuse määramine. Tarbijat toitva trafo osatähtsus.
6. Tarbijate mõju elektri kvaliteedile. Elektri kvaliteedi halvenemise mehhanism.
7. Kolmefaasilised trafod.
8. Eriotstarbelised trafod.

10. ASÜNKROONMASINAD

10.1. Sissejuhatus
10.2. Pöördmagnetväli
10.3. Asünkroonmootori otstarve, ehitus ja tööpõhimõte
10.4. Staatorimähised
10.5. Staatori elektrilise tasakaalu võrrand
10.6. Rootori allikapinge ja -vool
10.7. Asünkroonmootori aseskeem ja vektordiagramm
10.8. Asünkroonmootori võimsuste bilanss ja kasutegur
10.9. Rootori elektriliste suuruste sõltuvus libistusest
10.10. Asünkroonmasina töötunnusjooned
10.11. Asünkroonmootori käivitamine
10.12. Asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse reguleerimine (*speed control*)
10.13. Kahepoolse toitega asünkroongeneraator
10.14. Ühefaasiline asünkroonmootor
10.15. Kahefaasiline asünkroonmootor
10.16. Kordamisküsimused

10.1. Sissejuhatus

Elektrimasinate liigitus. Elektrimasinaid kasutatakse energiamuunduritena. See toimub kahe magnetvälja vastastikmõju vahendusel. Generaatoris muundatakse mehaaniline energia elektriliseks, mootoris (mootoritalitluses olevas generaatoris) vastupidi, elektrienergia mehaaniliseks energiaks. Generaatori käitab mingi ajam: auru-, hüdro-, gaasiturbiin, sisepõlemis- või diiselmootor. Mootorit kasutatakse erinevate seadmete ajamina.

Elektrimasinaid liigitatakse toitepinge, ergutussüsteemi, toimimise eripära ja rootori kujunduse alusel.

Alalisvoolu-(AV)-masinad:

- sõltumatu ergutusega;
- endaergutusega: rööp-, jada- ja liit- (kompaund) ergutusega masin.

Vahelduvvoolu-(VV)-masinad:

- sünkroonmasinad: püsimagnet-, ferromagnet- ja alalisvoolu ergutusega masin;
- asünkroonmasin: lühisrootoriga ja faasirootoriga masin.

Rootori kujunduse alusel:

- väljepoolustega masinad;
- peitpoolustega masinad.

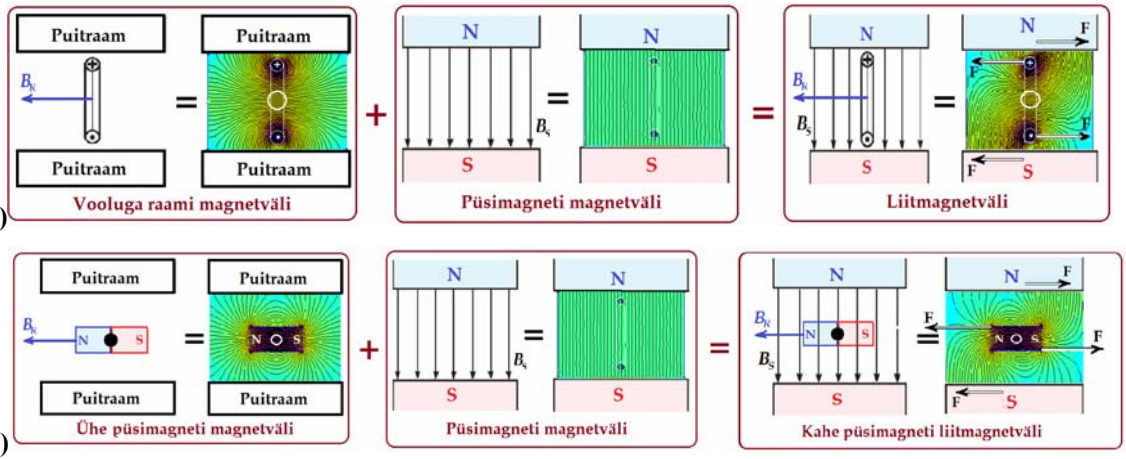
Neil kõigil on sarnased energiamuundamisprotsessid. Seepärast vaatame neid koos.

Energia muundamine elektrimasinates. Kursuse alguses (p. 1.1 joonis 1.9 ja joonis 1.12) nägime, et kogu elektri olemus on seotud laengute ja nende energiaväljadega. Laengute energiaväljade liitumisel muutub energiavälja tihedus ruumis. Tekkivad suure (ülisuure) ja väikese (üliväikese) energiatihedusega piirkonnad. Energia tiheduse ühtlustamiseks tekkivad vastastikjõud, mis mõjuvad moonutatud liitvälja esile kutsunud algallikatele – laengutele. Väljade võimendamiseks kasutatakse magnetahelaid, mis vahelduvmagnetväljade korral tehakse õhukesest 0,01...0,5 mm paksusest elektrotehnilisest terasest. Isoleerjuhist mähistes voolab vool.

Mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks. Mehaanilise energia muundamine toimub elektriallikates – elektrigeneraatorites. Liigutades voolujuhtivat keha (põhitunnus – elektronide ja aatomituumade vahelised jõud on nõrgad) vooluga juhtmete või mähiste; püsimagnetite kindla orientatsiooniga domeenide elementaarvoolude energiaväljas (magnetväljas), tekkib moonutatud liitenergiaväli ja vastastikjõud. Selle tulemusel rebitakse aatomitelt elektrone võrdeliselt neid aheldava energiavälja muutumise kiirusega. Toimub keha liigutava mehaanilise energia muundumine laengute elektrienergiaks (täpsemalt p. 1.2).

Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks. Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks toimub **elektrimootorites**, mis on **elektrigeneraatorid tarbija talitluses**. Seetõttu toimub muundamine samal viisil – laengute energiaväljade liitumisel tekkiva vastastikmõju vahendusel. Põhiliselt kasutatakse liikuvate laengute energiavälju (magnetvälju), olgugi et energiamuundamisprotsesse saab kujundada ka seisvate laengute energiaväljade (elektriväljade) abil. Seega kasutatakse elektrimootorite pöördemomendi tekitamiseks kahte magnetvälja. Neist üks luuakse sageli elektromagnetite ergutusmähiste ja alalisvooluallika või püsimagnetite domeenide elementaarvoolude abil ja nimetatakse **ergutusväljaks**. Teine väli tekitatakse töömähiste vahendusel, mis ühendatakse alalisvoolumootori korral alalisvooluallikaga, vahelduvvoolumootori korral vahelduvvooluallikaga.

Vaatleme joonisel 10.1 lihtsustatult eraldi kahte magnetvälja, nende liitmist (joonisel + märk) ja sellega kaasnevat (joonisel = märk) jõudude teket. Joonise 10.1a vasakul kolmandikul on kujutatud võllil paikneva vooluga raami magnetvälja rohelise taustaga piiratud alal. Tegelik väli on ka väljaspool vaadeldud ala.

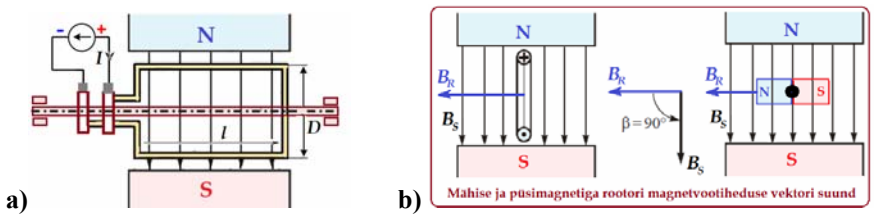


Joonis 10.1. Kahe allika laengute energiaväljade (magnetväljade) liitumine: a – vasakul – vooluga raami; keskel – püsimagnetpooluspaari; paremal – vooluga raami ja püsimagnetpooluspaari liitmagnetväli; b – vasakul – ühe püsimagneti, keskel – püsimagnetpooluspaari, paremal – ühe püsimagneti ja püsimagnetpooluspaari liitmagnetväli

Joonise 10.1a keskel on sarnaselt vaadeldud kahe püsimagnetpooluse magnetvälja ning paremal vooluga raami ja püsimagnetpooluste liitmagnetvälja. Vooluga raami ja püsimagneti magnetväljad eraldi on sümmeetrilised, nende liitmagnetväli on aga moonutatud ning välja energiatihedus ruumis on väga erinev (joonise 10.1a parem kolmandik). Suure väljajoonte tihedusega alal on ka energiatihedus suur. Seal, kus väljajooned puuduvad, on energiatihedus väike (joonisel ülal vasakul ja all paremal, nooleotsi ümbritseval alal). Kahe välja vastastikmõju mõjutab mõlemat laengute liikumist põhjustavat allikat, püüdes neid ruumis ümber paigutada nii, et liitväli muutuks sümmeetriliseks. Tekkib üks (välimine, kahe võrdse jõuga F) jõupaar, mis püüab panna püsimagneteid pöörlema päripäeva ning teine (sisemine, kahe võrdse jõuga F) jõupaar, mis püüab panna vooluga raami pöörlema vastupäeva. Kuna püsimagnetpoolused on jäigalt kinnitatud paigalseisvale staatorile ja pöörlemisvõimeline, juhtmekeerdudest koosnev raam laagritel olevale võllile, siis sisemise jõupaari mõjul pöördub raam koos võlliga vastupäeva. Sarnaselt toimub magnetväljade liitumine, kui laengute liikumise allikaks on ferromagnetmaterjali domeenid. Esimeseks on püsimagneti ja teiseks püsimagnetpooluspaari magnetväli (joonis 10.1b). Siin tekkivad samuti vastastikmõju tulemusel kaks jõupaari, millest sisemise jõupaari mõjul pöördub püsimagnet koos võlliga vastupäeva. Selleks et jõupaari poolt põhjustatud pöördemoment oleks suurem, on vaja vastavalt kujundada püsimagnetit ja ergutusväljapooluseid. Arvutil modelleeritud mõlemad liitenergia väljapildid on oma olemuselt sarnased. Mida tugevam on püsimagnetite domeenide liikuvate laengute energiaväljad, seda tugevamini on moonutatud liitenergiavälja pilt ja tugevamad tekkivad vastastikmõju jõud, mis püüavad moonutuste algallikaid mõjutada nii, et taastuks moonutusteta energia jagunemine ruumis.

Joonise 10.1 näites on kahe välja energiavoo (magnetvoo) vektorid B_R ja B_S nihutatud 90° võrra, mida on eraldi kujutatud joonisel 10.2b. Valdava osa elektromehaaniliste masinate ja seadmete töö põhineb eespool käsitletud kahe magnetvälja vastastikmõjul.

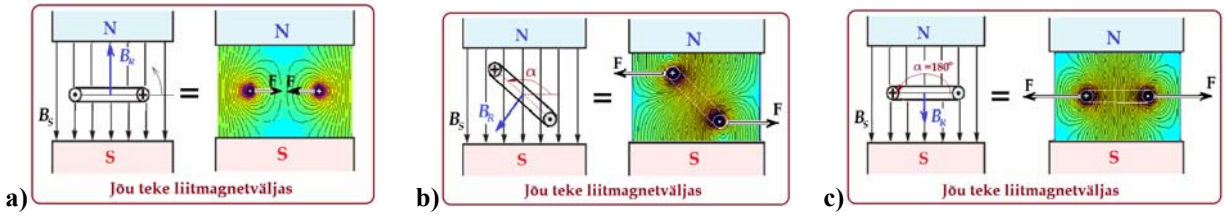
Vaatleme koos võlliga pöörlevale mähisekeerdudest raamile (joonis 10.2a) magnetväljas mõjuvaid jõude erinevate raami asendite korral, kui raami mähisepoolis on alalisvool. Selleks ühendatakse kahe koos võlliga pöörleva kontaktrõnga ja kahe liikumatu harja abil raami mähis alalisvoolutoiteallikaga. Raam saab pöörelda koos laagritele paigaldatud võlliga.



Joonis 10.2. Kahe allika laengute energiaväljade (magnetväljade) liitumine: a – raami mähise toide alalisvooluallikalt, b – kui vooluga raam või püsimagnet paiknevad püsimagnetpooluspaari magnetväljas ning magnetvootiheduse vektorid on nihutatud 90º kraadi võrra

Raamil on alumine ja ülemine külg, mille pikkus on *l*. Ülemises küljes kulgeb vool kontaktrõngast eemale, alumises kontaktrõnga poole. Raami külgedevaheline kaugus on *D*, mis on ka raami pöörlemisel moodustuva mõttelise silindri läbimõõt. Raami läbivate laengute (voolu) energiavälja ja püsimagnetmaterjali elementaarvoolude energiaväljade vastastikmõju toimel tekkivad joonisel 10.1 vaadeldud laengutele mõjuvad jõud *F*. Raami pööravaks jõuks on ülemisele ja alumisele küljele mõjuv jõupaar (*F, F*). Raami lühikülgedele mõjuvate jõu momentide summa on raami igas asendis võrdne nulliga. Pöördemomendi teket on otstarbekas vaadelda raami teljega risti olevas tasapinnas. Jooniselt 10.1a näeme, et siin on pöördemomenti tekitava jõupaari rakenduspunktide vahekaugus *D* maksimaalne. Sellele vastab magnetvootiheduse B_S ja B_R vektorite vaheline nihkenurk $\beta = 90º$. Raami pöördumisel jõupaari rakenduspunktide vahekaugus väheneb.

Joonisel 10.3 vaadeldakse liitvälja raami erinevate pöördenurkade α korral, vaade on kontaktrõngaste poolt. Kontaktrõngaid joonisel pole näidatud. Muutumatu voolu korral on raami külgedele mõjuva jõupaari vektorite suurus ja suund muutumatu. Joonisel 10.3a on aga vektorid lühemad, et nad joonisel omavahel ei kattuks. Joonisel (vasakul) on eraldi raami ja magnetpooluste väli, paremal võrdusmärgist, nende liitumistulemus ning tekkivad jõud.



Joonis 10.3. Kahe liikuvate laengute allika energiaväljade (magnetväljade) liitumine. Pöördemomenti tekitava jõupaari rakenduspunktide ja suuna muutumine pöördtelje suhtes raami asendi muutumisel

Raami ühele küljele mõjuva jõu *F* suurus on

$$F = B_S l i \,, \tag{10.1}$$

kus B_S – paigalseisva staatori (siin ergutusvälja) magnetvoo tihedus;
l – raami külje pikkus;
i – vool raamis.

Joonisel 10.3a on raam kujutatud algasendis, kus ta pöördenurk $\alpha = 0º$. Konstantse voolu korral raami küljele mõjuva jõu *F* suurus pöördenurga α muutumisel ei muutu, muutub aga jõupaari *F* – *F* õlg. Seega oleneb raamile mõjuv **pöördemoment** *M* pöördenurgast α järgmiselt:

$$M = FD \sin \alpha \tag{10.2}$$

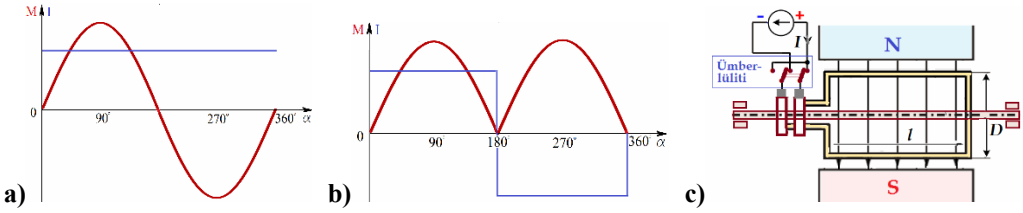
Siin on D pöörleva raami läbimõõt (aktiivkülgede vaheline kaugus).

Avaldiste (10.1) ja (10.2) põhjal saame

$$M = B_S liD \sin\alpha = B_S iA \sin\alpha\,, \tag{10.3}$$

kus $A = lD$ on raami pindala.

Kui voolu sisselülitamise momendil (joonis 10.3a) on pöördenurk α = 0º, võrdub pöördemoment nulliga ja raam jääb paigale. Kui aga algasendis on pöördenurk α ≠ 0º, hakkab raam pöörduma ja nurk α suurenema. Moment saavutab maksimaalväärtuse (joonis 10.2b), kui α = 90º ja hakkab seejärel vähenema (joonis 10.3b). Pöördenurgal α = 180º muutub moment jälle nulliks, sest jõud F mõjuvad ühel ja samal sirgel (joonis 10.3c). Kui raam läheb inertsiga sellest asendist üle, tekkib esialgse suhtes vastupidine moment, mis püüab raami asendisse α = 180º tagasi viia. Ühesuunalise voolu korral saab raam pöörduda ainult pool pööret ehk 180°. Raamile mõjuva pöördemomendi sõltuvus pöördenurgast α homogeenses magnetväljas muutumatu voolu korral on näidatud joonisel 10.4. Kui vool ei muutu ajas, siis raam pöördub alul 180 kraadi vastupäeva, seejärel 180 kraadi tagasi päripäeva. Pöörlevat liikumist ei tekkiks.



Joonis 10.4. Ühtlaste omadustega magnetväljas juhtmekeerule mõjuva momendi muutumine olenevalt pöördenurgast, kui voolu suund juhtmekeerus ei muutu (a) ja kui voolu suunda juhtmekeerus muudetakse iga poolpöörde järel (b)

Pidevat pöörlemist saab tekitada, kui muuta voolu suunda ajahetkedel, millal raami pöördenurk α = 180º ja α = 0º. Voolu suunda saab muuta pöörleva raami võllile paigutatud mehaanilise ümberlüliti ehk **kommutaatori** abil. Seda on kasutatud ajalooliselt kõige kauem alalisvoolumasinates. Samuti saab voolu suunda muuta joonisel 10.4c näidatud ümberlüliti abil. Selle põhimõtte tegelikul rakendamisel kasutatakse pooljuhtlüliteid (jõutransistore) ja mootori pöörleva osa ehk rootori asendi andurit. Asendianduri signaalide järgi muudetakse voolu suunda pöördenurga õigel väärtusel, milleks selles näites on 0º ja 180º. Sel põhimõttel töötavad **harjadeta alalisvoolumasinad** (*brushless DC machines*). Voolu suuna vahetamisel muutuvad raami külgedele mõjuva jõu suunad ja ka momendi suund vastupidiseks (joonis 10.4b). Voolu suuna perioodilise muutmise tulemusena arendab vooluga raam pidevalt ühesuunalist pöördemomenti (joonis 10.4*b*). Nende ehitust ja tööeripära vaadeldakse 11. peatükis.

Kuidas tagatakse vahelduvvoolumasinates väljade suunad nii, et raami pöördemoment toimiks pidevalt. Nagu eelnevalt nägime, on raamipöördemoment maksimaalne, kui vooluga raam ja püsimagnetpooluspaari magnetvootiheduse vektorid on nihutatud 90º kraadi võrra. Kui raam pöördub sellest asendist edasi veel 90º võrra, siis ta peatub, kui voolu suunda ei muudeta.

Vahelduvvoolumasinates tagatakse vajaliku nurga hoidmine rootori ja staatori magnetväljade vahel teisiti. Seal tekitatakse kolmefaasilise faasivoolu abil staatori **pöördmagnetväli**, mille pöörlemissagedus on määratud toitepinge sageduse ja staatori pooluspaaride arvuga. Rootori väli tekitatakse püsimagneti või ergutusvoolu abil, asünkroonmasinates pöördmagnetvälja abil. Rootori magnetvälja liitumisel staatori pöördmagnetväljaga tekkivad vastastikmõju jõud (joonis 10.1) ja pöördemoment. Viimane rakendub pöörlemisvõimelisele rootorile, püüdes muuta liitvälja sümmeetriliseks ja moonutusvabaks, seega pöörata rootorivälja koos rootoriga staatori väljaga samasuunaliseks. Kuid staatori väli pöörleb pidevalt eest ära. Seetõttu on pöördemoment pidev ja rootor hakkab pöörlema koos staatori väljaga. Masin toimib, ilma et oleks vaja mehaanilist või kontaktivaba ankruvoolu suuna muutmise kommutaatorit. See on vahelduvvoolumasinate suur eelis. Mehaaniline kommutaator on väikese töökindlusega ja kommutaator tõstab ka masina hinda. Ka elektrooniline kommutaator on suhteliselt keerukas ja kallis.

Elektrimasinas tekkiva elektromehaanilise momendi M saab avaldada ka staatori ja rootori magnetvootiheduste B_S ja B_R väärtuste kaudu. Kui lähtuda avaldisest (10.3) ja arvestada, et rootori väli

$$B_R = i\mu / G \ , \tag{10.4}$$

kus μ on magnetiline läbitavus ja G – raami kuju ja mõõtmeid arvestav tegur, siis pärast teisendusi

$$M = kB_R B_S \sin\beta \ . \tag{10.5}$$

Tegur k iseloomustab masina ehituse eripära ja $k = SG/\mu$. Siin on S mähise raami pindala. Nurk β on rootori ja staatori väljade vaheline nurk. Kui $\beta = 0$ (joonis 10.2*b*), siis ka võrdub pöördemoment M nulliga.

Seega oleneb moment elektrimasinas üldjuhul neljast tegurist: rootori ja staatori magnetvootihedusest, nende väljade suundadevahelise nurga siinusest ja masinaehituse eripära arvestavast tegurist.

Raamikujulise rootori kasutamisel sulguks staatori magnetvoog suures osas mitteferromagnetilises keskkonnas. Seal ei toimu magnetvälja võimendumist. Räägitakse, et õhuvahe „nõrgestab“ magnetvälja. Täpsem oleks märkida, et õhk seda ei võimenda. Selleks, et võimalikult tõhusalt kasutada ferromagnetmaterjalidepoolset välja võimendust võrgust võetava voolu osakaalu vähendamiseks staatorivälja loomisel, tehakse õhupilu rootori ja staatori vahel võimalikult väike. Sellepärast kasutataksegi rootorina ferromagnetmaterjalist silindrit, kusjuures rootori ja staatori vahele jääb minimaalne õhupilu.

Vahelduvvoolumasinaid on kahte tüüpi. **Sünkroonmasinates** pöörleb rootor (induktor) sünkroonselt paigalseisva staatori (ankru) tekitatud pöördväljaga. **Asünkroonmasinates** erineb rootori pöörlemiskiirus staatori pöördvälja pöörlemiskiirusest. Seda erinevust nimetatakse libistuseks. Neid masinaid vaadeldakse edaspidi eraldi peatükkides.

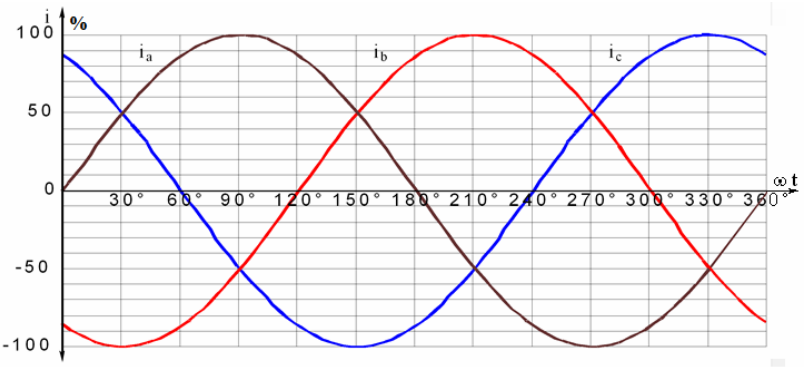
Asünkroonmootor on vahelduvvooluelektrimootor, mille pöörlemissagedus ei ole sünkroonne toiteallika tekitatud pöörlemissagedusega. Siin staatorimähis ühendatakse vahelduvvoolu elektriallikaga. Energiaülekanne pöörlevasse rootoriahelasse toimub sarnaselt nagu trafos, kus allika energia tekitab primaarmähise ajas muutuva magnetvoo vahendusel sekundaarmähises temaga ühendatud tarbijatele elektriallika. Asünkroonmootoris on tarbijaks rootoriahel. Asünkroonmootori töö tugineb staatorimähise pöördmagnetvälja ja rootorimähise magnetvälja vastastikmõjule. Elektrienergia staatoriahelast rootoriahelasse kandub siis, kui rootorimähise aheldusvoog muutub ajas, seega siis, kui rootor seisab või pöörleb staatori pöördmagnetväljast erineval pöörlemissagedusel ehk pöörleb **asünkroonselt**. Ingliskeelses kirjanduses nimetatakse rootoriahelasse toiteallika indutseerimise põhjal induktsioonmootoriks (*induction motor*). Pöördmagnetvälja tekke avastas 1885. a itaalia füüsik **Gallieo Ferraris**. 1888. a avaldas ta oma töö tulemused Torino Kuningliku Teaduste Akadeemia väljaandes. Samal aastal anti Nikola Teslale USAs patent number 381 968. Patenditaotluses avaldas ta oma mootori töö teoreetilised alused. 1889. a leiutas Mihhail Dolivo-Dobrovolski lühisrootoriga asünkroonmootori.

Asünkroonmootorid on lihtsa ehitusega, töökindlad ja odavad. Nende põhipuudus on halvad reguleerimisomadused. Tänu vektorjuhtimisega sagedusmuunduritele on tänapäeval mootori kiirus hästi reguleeritav ja töökarakteristikud on lähedased alalisvoolumasinate omadele. Kasutatakse **lühisrootoriga** ja **faasirootoriga asünkroonmootoreid**.

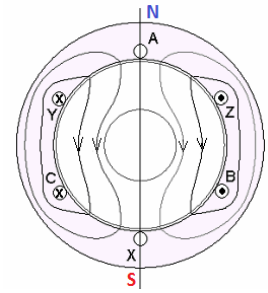
10.2. Pöördmagnetväli

Eespool märgiti kolmefaasilise süsteemi eeliste seas võimalust tekitada pöördmagnetvälja, millel rajaneb asünkroon- ja sünkroonmasinate töö. Seega on pöördmagnetvälja tekitamiseks sobilik kolmefaasiline (mitmefaasiline) toitesüsteem ja vähemalt kolm ruumis üksteise suhtes võrdsete nurkade võrra nihutatud seisvat pooli (mähist). Need mähised paiknevad mootori paigalseisval osal, **staatoril**, mis paikneb masina keres. Staator koos kerega kinnitab omavahel kõik masinaosad ja nad tagavad kohtkindla paigutuse. Laagrikilpides olevad veerelaagrid tagavad masinaosade kontsentrilise paiknemise. Laagritele kinnitatud võllil paikneb mootori pöörlev osa, **rootor**.

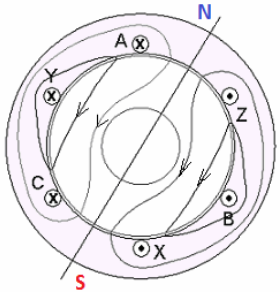
Vaatleme pöördmagnetvälja tekitamist joonisel 10.5 esitatud pildiseeria alusel, kus lõikes on näidatud kolm ühe juhtmekeeruga staatori mähise pooli. Need on joonestatud välja kaksteist korda nii, et voolud neis vastavad kolmefaasilise süsteemi voolude hetkväärtusele, kui nurk ωt muutub 30° kaupa nullist kuni 360º.



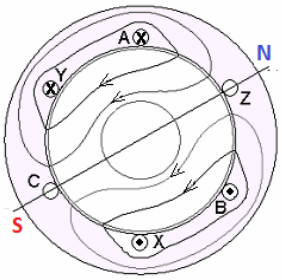
a)



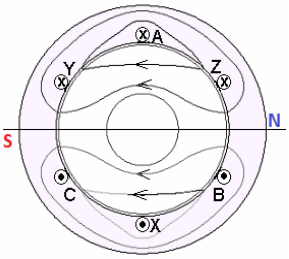
$\omega t = 0$, $i_A = 0$,
$i_B = -86{,}6$, $i_C = 86{,}6$



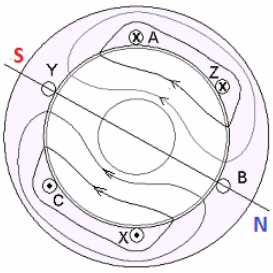
$\omega t = 30°$, $i_A = 50\%$,
$i_B = -100$, $i_C = 50$



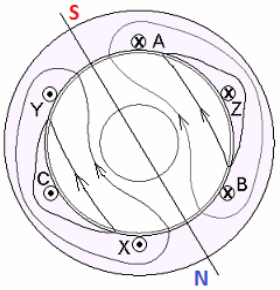
$\omega t = 60°$, $i_A = 86{,}6\%$,
$i_B = -86{,}6$, $i_C = 0$



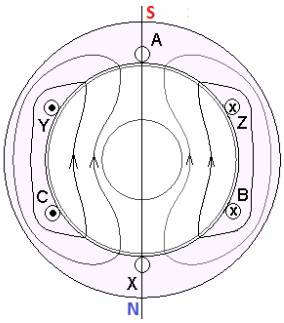
$\omega t = 90°$, $i_A = 100\%$,
$i_B = -50$, $i_C = 50$



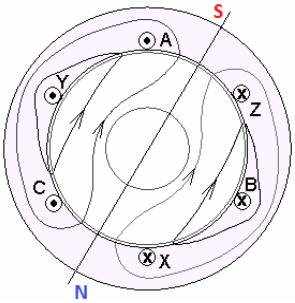
$\omega t = 120°$, $i_A = 86{,}6\%$,
$i_B = 0$, $i_C = -86{,}6$



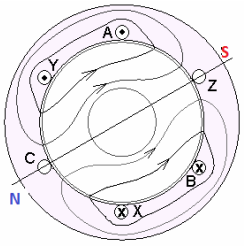
$\omega t = 150°$, $i_A = 50\%$,
$i_B = 50$, $i_C = -100$



$\omega t = 180$, $i_A = 0$,
$i_B = 86{,}6$, $i_C = -86{,}6$

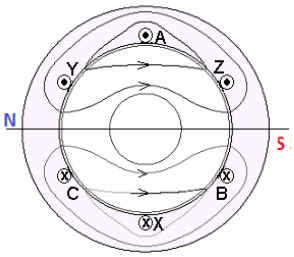


$\omega t = 210°$, $i_A = -50\%$,
$i_B = 100$, $i_C = 50$

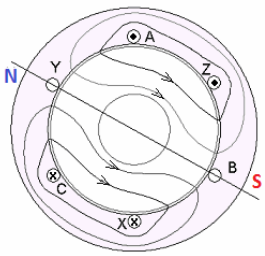


b)

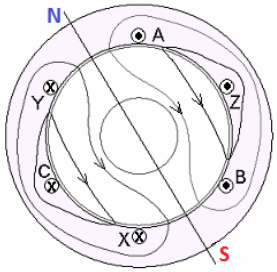
$\omega t = 240°$, $i = -86{,}6\%$,
$i_B = 86{,}60$, $i_C = 0$



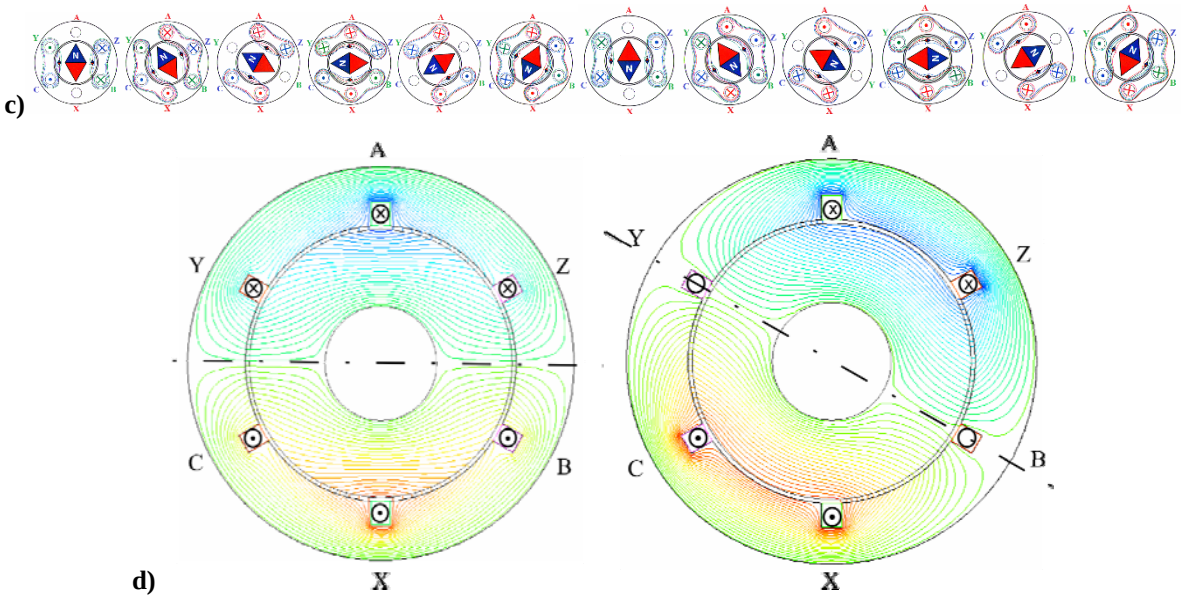
$\omega t = 270°$, $i_A = -100\%$,
$i_B = 50$, $i_C = 50$



$\omega t = 300$, $i_A = -86{,}6\%$,
$i_B = 0$, $i_C = 86{,}6$



$\omega t = 330°$, $i_A = -50\%$,
$i_B = -50$, $i_C = 100$



Joonis 10.5. Pöördmagnetvälja tekitamine. Faasivoolude kõverad (a) ja magnetväljajoonte jagunemine 12-l erineval ajamomendil (b, c) ning täpsem magnetväljajoonte jagunemine kahel erineval ajamomendil (d). Rootoril paiknev püsimagnet pöördub koos staatori väljaga (c), kui ωt = 90º ja ωt = 120º

Punkt juhtmekeeru lõikes tähistab voolu suunda vaataja poole ja rist joonise poole. Joonisel 10.5 ei ole näidatud kolme pooli ühendust kolmefaasilise toiteallikaga, kusjuures need poolid võivad olla nii täht- kui ka kolmnurklülituses. Hetkel, mil $\omega t = 0$, on vool faasis A null, faasides B ja C on voolude hetkväärtused võrdsed, kuid voolud on vastassuunalised. Kruvireegli järgi saab leida voolude poolt tekitatud magnetvälja suuna. Joonisel 10.5 on väljajoonte suunad näidatud noolekestega. Poolide tekitatud magnetvoo tiheduse vektorid on risti vastava pooli tasapinnaga ja mitteferromagnetilises keskkonnas võrdelised pooli vooluga. Vaadeldaval hetkel B_A = 0. Resulteeriv vootiheduse vektor $\dot{B}_0 = \dot{B}_B + \dot{B}_C$, olles suunatud vertikaalselt alla. Ülal on *N*-poolus, kus väljajooned väljuvad staatorist, all *S*-poolus, kuhu väljajooned suubuvad.

Järgmisel vaadeldaval hetkel, mil $\omega t = 30°$, on voolude i_A ja i_C hetkväärtused võrdsed, kusjuures need on pool amplituudväärtusest, vool faasis B on maksimaalne. Määrates nende voolude poolt tekitatud magnetvälja suuna kruvireegli abil ja arvestades magnetvoo võrdelisust vooluga, saame liitvälja vootiheduseks vektori $\dot{B}_{30} = \dot{B}_A + \dot{B}_B + \dot{B}_C$, mis on pöördunud 30° päripäeva. Sarnaselt vaatleme ka olukorda hetkel, mil $\omega t = 60°$. Siis on i_C null ning $\dot{B}_{60} = \dot{B}_A + \dot{B}_B$, olles pöördunud veelgi 30° nurga võrra. Kui $\omega t = 90°$, on vool faasis C muutnud oma suunda ja seega muutub ka selle voolu poolt tekitatud magnetvälja suund, vool faasis A on maksimaalne. Liitvälja vootihedus $\dot{B}_{90} = \dot{B}_A + \dot{B}_B + \dot{B}_C$ on nüüd suunatud vasemale ja välja telg on horisontaalne.

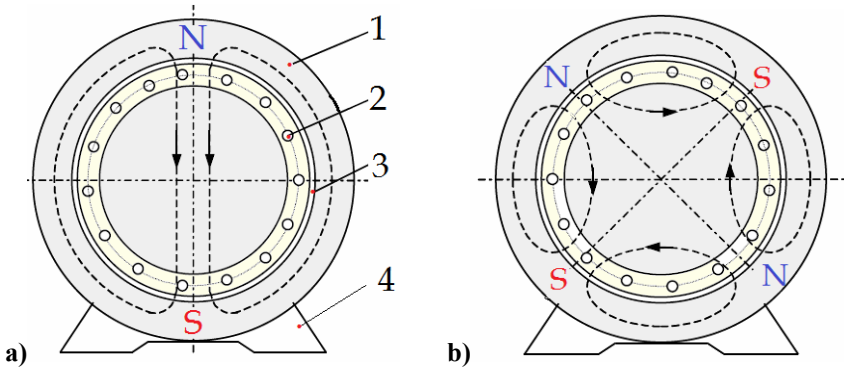
Joonisel 10.5d on illustratsiooniks täpsem väljajoonte jagunemine kahel ajamomendil, kui ωt = 90º ja ωt = 120º.

Arutlusest ilmneb, et summaarne magnetvoo tihedus on püsisuurus, olles 1,5 korda suurem ühe pooli poolt tekitatud vootihedusest juhul, kui selles on maksimaalne vool (amplituud). Samal ajal pöördub summaarse vootiheduse vektor päripäeva ja teeb täispöörde ühe vahelduvvoolu perioodi jooksul. Järelikult on välja pöörlemiskiirus võrdeline vahelduvvoolu sagedusega. Kui sagedus on 50 Hz, siis pöörleb magnetväli kiirusega 50 p/s ehk 3000 p/min. Tuleb märkida, et pöörlemiskiiruse (pöörlemissageduse) ühikuks SI-süsteemis on 1/s, kuigi väga levinud on pöörlemiskiiruse mõõtmine pöörete arvu järgi minutis.

Kolme faasi mähised on staatorisse paigaldatud üksteise suhtes ruumiliselt nihutatult ning neid toidetakse ajaliselt 1/3 perioodi võrra nihutatud siinuspingetega.

Joonisel 10.5 esitatud poolide asendi korral tekkib pöördmagnetväli, millel on üks põhja- ja üks lõunapoolus, seega üks poolusepaar $p = 1$. Seda on kujutatud joonisel 10.6a. Siin pole staatoril 1 mähist näidatud, 2 on lühisvarrastega rootor, 3 – staatorit ja rootorit eraldav õhupilu, 4 – mootori tugi ja kinnituskäpad. Joonisel 10.6b on kujutatud nelja pooluselist ehk kahe pooluspaariga masinat. Siin on kuue pooli abil võimalik aga

saada magnetvälja, millel on kaks põhja- ja lõunapoolust; poolusepaaride arv $p = 2$ ning ühe vahelduvvoolu perioodi vältel pöördub magnetväli vaid pool pööret ehk teeb täispöörde kahe vahelduvvoolu perioodi jooksul.



Joonis 10.6. Asünkroonmootori staatori magnetväli ühe (a) ja kahe (b) pooluspaari korral: 1 – staator, 2 – lühisvarrastega rootor, 3 – õhupilu, 4 – mootori tugi- ja kinnituskäpad

Üldjuhul oleneb välja pöörlemiskiirus vaid staatorivoolu sagedusest ja pooluspaaride arvust, kusjuures tavaliselt väljendatakse pöörlemiskiirus pööret minuti kohta ja

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p},\ \text{min}^{-1} \quad \text{või} \quad n_1 = \frac{f_1}{p},\ s^{-1}. \tag{10.6}$$

10.3. Asünkroonmootorite otstarve, ehitus ja tööpõhimõte

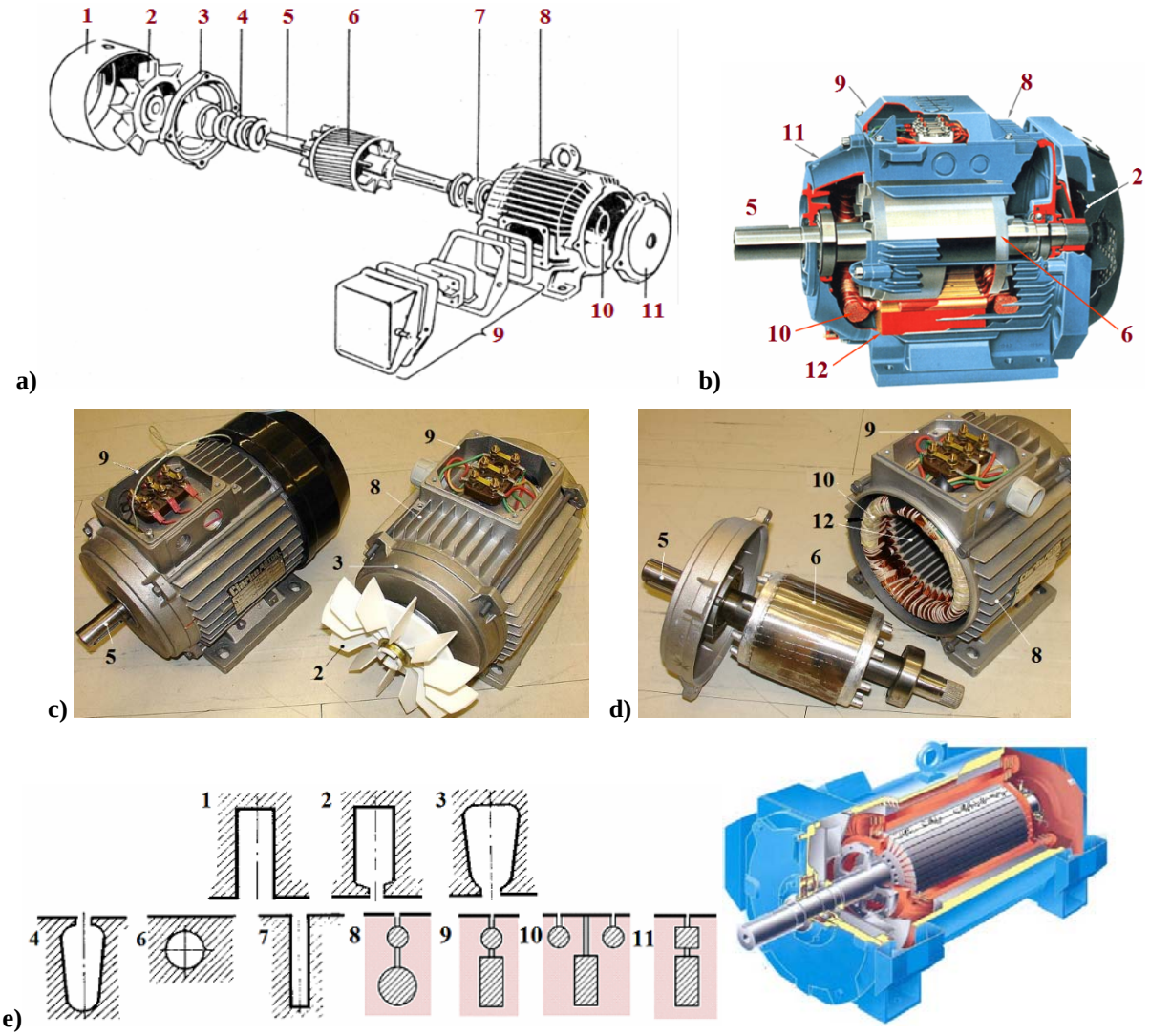
Asünkroonmasinat kasutatakse eelkõige mootorina, kus elektrienergia muundatakse mehaaniliseks energiaks pöördemomendi näol. Tuuleenergeetikas kasutatakse asünkroonmasinaid ka generaatorina, muundades mehaanilist energiat elektrienergiaks. Neid võib kasutada ka pidurina, mil ka mehaaniline ja elektrienergia muunduvad masinas soojusenergiaks. Asünkroonmasina abil on võimalik muundada elektrienergiat ka teiseliigiliseks elektrienergiaks, kusjuures võib muuta pinget, sagedust või faaside arvu.

Kõige levinumad on kolmefaasilised asünkroonmootorid (joonis 10.7), mis teiste elektrimootoritega võrreldes on kõige lihtsama ehitusega, suhteliselt kõige odavamad ja töökindlamad. Selles peatükis käsitlemegi põhiliselt kolmefaasilisi asünkroonmootoreid.

Joonisel 10.7 on järgnev tähistus: 1 – ventilaatori kate, 2 – ventilaator, 3 – laagrikilp, 4 – veerelaagrid, 5 – rootori võll, 6 – rootor, 7 – veerelaagrid, 8 – mootori kere, 9 – klemmikarp, 10 – pöördvälja tekitav mähis, 11 – laagrikilp, 12 – staatori magnetsüdamik. Asünkroonmootor koosneb järgmistest osadest, mis on skemaatiliselt kujutatud joonisel 10.7a. Paigalseisev **staator** 10 on terasplekkidest õõnessilinder, mille sisepind on uurestatud. Uuretes paikneb kolmefaasiline **staatorimähis** pöördmagnetvälja tekitamiseks. Tavaliselt on mähis täht- või kolmnurklülituses ja mähise algused ja lõpud on paigutatud klemmikarpi 9. Staatori uurded võivad olla väga erineva kujuga (näiteks uurded *1*…3 joonisel 10.7e). Staator on kinnitatud (pressitud) mootori keresse. Masinad valmistatakse erineva paigaldusviisi jaoks kas äärik- või käppkinnitusega. Olenevalt masina ehitusviisist võib masina võll normaalasendis olla kas horisontaalne või vertikaalne.

Võllil asuv pöörlev **rootor** on terasplekkidest silinder, mis on samuti varustatud uuretega. Rootori uurdeis (4…11) on rootorimähis. Staatori ja rootori vahel on suhteliselt väike õhupilu. Pöörisvoolukao vähendamise eesmärgil on staator ja rootor valmistatud tavaliselt 0,3…0,5 mm paksustest elektrotehnilisest terasest stantsitud plekkidest, mis on üksteisest isoleeritud.

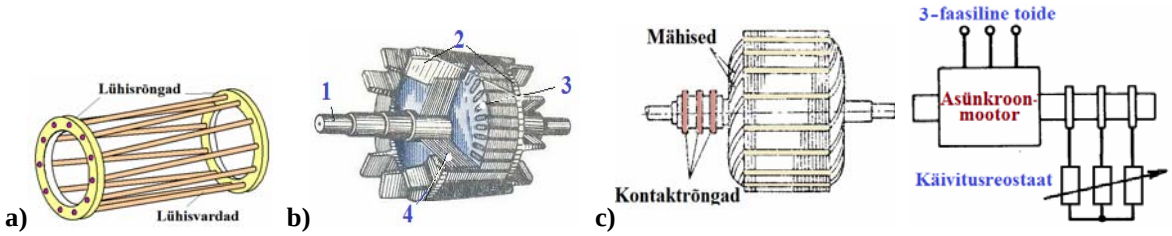
Kolmefaasiline staatorimähis koosneb tavaliselt paljude keerdudega poolidest – sektsioonidest, mis on vajaduse järgi ühendatud jadamisi või rööbiti. Staatorimähis ühendatakse kolmefaasilise pingesüsteemiga ja võib olla täht- või kolmnurklülituses.



Joonis 10.7. Asünkroonmootori skemaatiline lõige (a) ja üldvaated (b, c ja d), uurete kujusid (e)

Kui mootori **rootorimähis** on valmistatud lühismähisena (joonisel 10.4a), mis koosneb varrastest uurdeis ja neid elektriliselt ühendavatest lühisrõngastest, siis sellist mootorit nimetatakse **lühisrootoriga asünkroonmootoriks**. Lühismähis valmistatakse alumiiniumist survevalu menetlusel, kusjuures üheaegselt täituvad isoleerimata uurded ja moodustuvad lühisrõngad koos ventilatsiooni tarbeks vajalike tiivikutega nende küljes. Lühisrootoriga asünkroonmootorid on kontaktivabad ja levinuimad.

Kui rootori uurdeis on kolmefaasiline mähis, mis koosneb sektsioonidest ning on isoleeritud rootorist, siis on tegemist **faasirootoriga asünkroonmootoriga**. Rootori faasimähised on tavaliselt tähtlülituses, kusjuures mähiste algused on ühendatud võllil asuvate isoleeritud **kontaktrõngastega** (joonis 10.8d). **Harjade** kaudu saab rootorimähist ühendada välisahelaga. Joonisel välisahelaks on käivitusreostaat. Faasirootoriga (joonis 10.8b) asünkroonmootorit nimetatakse ka **kontaktrõngastega asünkroonmootoriks**.



Joonis 10.8. Asünkroonmootori lühismähisega rootor (a) ja selle mähis (b), faasimähisega rootor (c) ning selle ühendamine näiteks käivitusreostaadiga (d)

Asünkroonmootori töö põhineb pöördmagnetvälja ja rootori voolu magnetvälja vastastikusel toimel. Pöördmagnetväli, mille tekitab kolmefaasiline vool staatorimähistes, läbib õhupilu ja aheldub alul paigalseisva rootorimähisega (joonis 10.8c). Rootorivoolu põhjuseks on pöördmagnetvälja poolt rootorimähises indutseeritud allikasisepinge, mis on võrdeline rootori suhtelise kiirusega pöördmagnetvälja suhtes. See suhteline kiirus n_s on staatori magnetvälja püsi- ehk **sünkroonkiiruse** n_1 (leitav valemiga 10.6) ja rootori pöörlemiskiiruse n_2 vahe, mida nimetatakse **libistuspöörlemissageduseks**:

$$n_s = n_1 - n_2. \tag{10.7}$$

Asünkroonmootoris pöörleb rootor pöördväljaga samas suunas, kuid aeglasemalt staatori pöördväljast, seega, $n_2 < n_1$. Suhtelise kiiruse (10.7) ja sünkroonkiiruse suhet nimetatakse **libistuseks**

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \tag{10.8}$$

mida sageli väljendatakse protsentides. Libistust võib tõlgendada ka rootori suhtelise mahajäämisega staatori pöördväljast. Standardsete asünkroonmootorite nimilibistus on 1,5…4%, kusjuures suurem libistus on väiksema nimivõimsusega mootoritel.

Siit rootori pöörlemissagedus $n_2 = n_1(1 - s)$.

Kui suurendada pidurdavat momenti mootori võllil, siis suureneb libistus ehk kiiruste vahe $n_1 - n_2$. Järelikult suureneb ka rootorimähises indutseeritud allikasisepinge ja seega rootorivool. Nii muundataksegi rohkem elektrienergiat mehaaniliseks energiaks. Vool staatorimähises suureneb samuti sarnaselt primaarvoolule trafos, sest rootorivoolu põhjustatud magnetvoog on lahtimagneetiv (demagneetiv), nagu trafo sekundaarmähisevoolu magnetvoog.

Asünkroonmootori puuduseks loetakse seda, et laias kiiruste vahemikus ei ole võimalust lihtsalt ja sujuvalt muuta rootori pöörlemiskiirust. Ajalooliselt ehitati mitmekiiruselisi asünkroonmootoreid, kus kiirust on võimalik muuta astmeliselt poolusepaaride arvu muutmise teel. Mitmekiiruseline mootor asendab näiteks edukalt märksa väiksema töökindlusega käigukasti treipingi ajamis. Asünkroonmootori reverseerimine (pöörlemissuuna muutmine) on suhteliselt lihtne. Selleks on vaja vahetada vaid kaks staatorimähise toitejuhet, mille tagajärjel muutub faasijärjestus ning seega ka staatori magnetvälja pöörlemissuund. Et rootor pöörleb staatori magnetväljaga samas suunas, siis muutub ka võlli pöörlemissuund vastupidiseks.

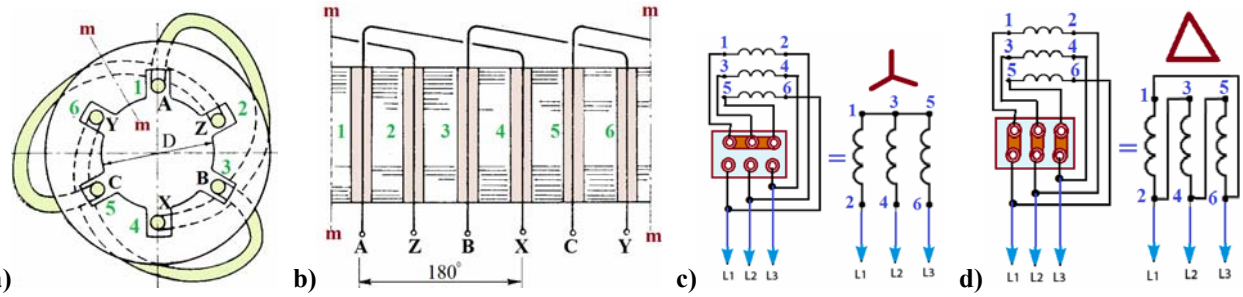
Lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamiseks lülitatakse tema staatorimähis võrku tavaliselt otse, milleks on vaja vaid kolmepooluselist lülitit (kontaktorit).

Kõik eespool esitatud asjaolud ongi kolmefaasilise lühisrootoriga asünkroonmootori suure leviku põhjuseks elektrienergia muundamisel mehaaniliseks energiaks.

10.4. Staatorimähised

Kolmefaasilise staatorimähise ülesandeks on pöörleva magnetvoo tekitamine. Joonisel 10.9a on skemaatiliselt kujutatud lihtsaima asünkroonmootori staatorimähis. Väljaspool uurdeid olevaid mähiseosasid nimetatakse **laupühendusteks**, nad on painutatud kõrvale selleks, et oleks võimalik rootor staatorisse paigutada. Keerukama mähise korral ei ole selline skeem ülevaatlik ja seepärast kasutatakse sirgestatud staatori sisepinna laotatud skeemi (joonis 10.9b). Lõikejoon on *m*–*m*. Kõik poolid (faasimähised) on lihtsuse mõttes vaid ühe keeruga ja võivad olla täht- (c) või kolmnurklülituses (d).

Joonisel 10.9 esitatud staatorimähise faas *A* on paigutatud uurdeisse *1* ja *4*, faas *B*, nihutatuna ruumis 120°, uurdeisse *3* ja *6* ning faas *C*, eelmise faasiga võrreldes veelgi 120° nihutatult, uurdeisse *5* ja *2*. Niisuguse kujunduse korral tekib läbimõõtmähis, sest mähisesamm $y \equiv 180^\circ$. Mähisesamm on avaldatav ka pikkusühikutes, olles ühe faasimähise või pooli eri külgede vaheline kaugus, mõõdetuna staatori sisepinnal või ka uurdeühikutes. Joonisel 10.10 on mähisesammuks näiteks 10 uuret.



Joonis 10.9. Lihtsaim kolmest poolist koosnev staatorimähis (a) ja selle laotatud skeem (b). Staatorimähiste alguste ja lõppude ühendamine klemmikarbis täht- (c) ja kolmnurklülituse (d) korral

Joonisel 10.9 esitatud mähis tekitab pöördmagnetvälja, millel on üks poolusepaar $p = 1$. Pooluste arv on seega $2p = 2$ ja magnetvoo pöörlemiskiirus valemi (10.6) kohaselt

$$n_1 = \frac{60f}{p}. \tag{10.9}$$

Staatori sisepinnal on mingil hetkel ühe pöördmagnetvälja pooluse poolt hõivatud pool staatori ümbermõõdust ehk **poolusejaotus**

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

kus D on staatori siseläbimõõt. Ka poolusejaotus võib olla väljendatud uurdeühikutes ja siis

$$\tau = \frac{Z}{2p} \tag{10.10}$$

uuret pooluse kohta, kusjuures Z on uurete arv. Läbimõõtmähise korral mähisesamm $y = \tau$ (joonis 10.10b).

Asünkroonmootori staatorimähist iseloomustab uurete arv pooluse ja faasi kohta:

$$q = \frac{Z}{2pm}, \tag{10.11}$$

kus m on faaside arv. Seosest (10.11) saame, et

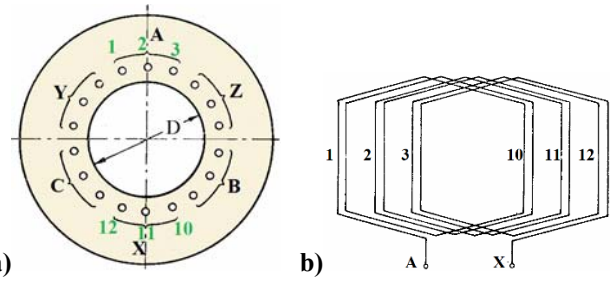
$$Z = 2pmq. \tag{10.12}$$

Asetades selle valemisse (10.10), saame

$$\tau = mq. \tag{10.13}$$

Joonisel 10.9 kujutatud mähisel $q = 1$. Reaalsetes mootorites valitakse $q = 2...6$, mis põhimõtteliselt ei pruugi olla täisarv. Mähis on kvaliteetsem suurema q korral, sest siis on pöörleva magnetvoo tiheduse jaotus lähedasem kadude vähendamiseks vajalikule siinuselisele jaotusele. Samal ajal muutub aga masin kallimaks, sest uurete ja seega ka poolide arv on suurem.

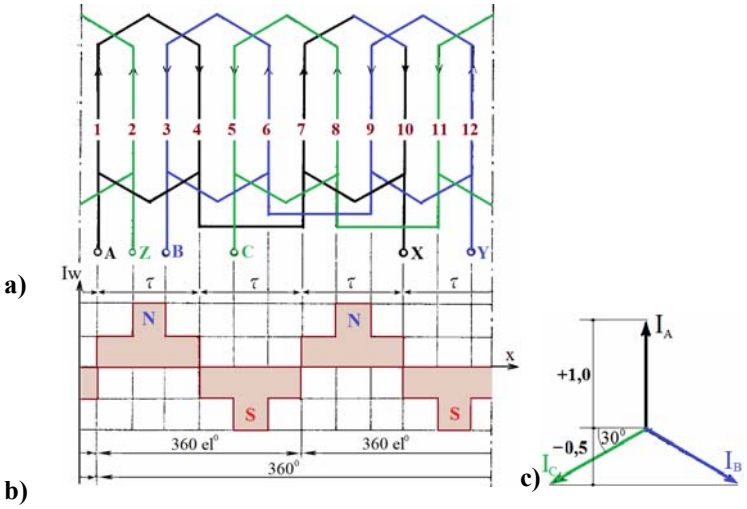
Tegelikes masinates koosneb staatori ühe faasi mähis mitmest sektsioonist (joonis 10.10a) ja sektsioon paljudest keerdudest. Nii saadakse jaotatud mähis (joonis 10.10b).



Joonis 10.10. Staatorimähise sektsioonid (a) ja jaotatud mähis lõikes (b)

Siinusjaotuse saavutamiseks kasutatakse staatorimähistes ka lühendatud sammu, kus $y < \tau$. Selleks et valmistada staatorimähis ühesugustest alusvormidel (šabloonidel) tehtud sektsioonidest (poolidest), võeti kasutusele kahekihilised mähised, kus ühes uurdes on kahe erineva pooli küljed. Kõik need võtted aitavad tõsta mootori kasutegurit ja täiustada tehnoloogiat.

Vaatleme kolmefaasilist (m = 3) staatorimähist, mille abil saame neljapooluselise pöörleva magnetvoo ($2p$ = 4). Lihtsuse mõttes valime q = 1, mis annab vajalikuks uurete arvuks seose (10.12) järgi Z = 12 uuret. Siis valemi (10.13) alusel poolusejaotus $\tau = 3$ ja, valides läbimõõtmähise, saame mähisesammu $y = \tau = 3$ uuret. Olgu ühe sektsiooni keerdude arv $w_s = 10$. Alustades mähise faasiga *A* uurdest *1* (joonis 10.11a), tuleb y = 3 puhul pooli teine külg uurdesse *4*, kusjuures poolis on w_s = 10 keerdu. Edasi ühendatakse uurdest *4* poolil lõpp järgmise algusega, mis on veelgi nihutatud paremale y uurde võrra, seega uurdeis *7* ja *10*. Faasi *A* lõpp *X* väljubki uurdest *10*. Faas *B* peab olema faasist *A* ruumis nihutatud 120 **elektrilist kraadi** või 2/3 τ ja faas *C* faasist *B* veel 120 elektrilist kraadi. Kui ühe pooluspaariga mähise korral langesid ruumiline ja elektriline (ajaline) nurk arvuliselt kokku, siis $p > 1$ korral $\alpha_e = p\alpha_r$. Siit saame faasi *B* vajalikuks ruuminihkeks 60°, sest p = 2. Muus osas ei erine faasid *B* ja *C* faasist *A*.



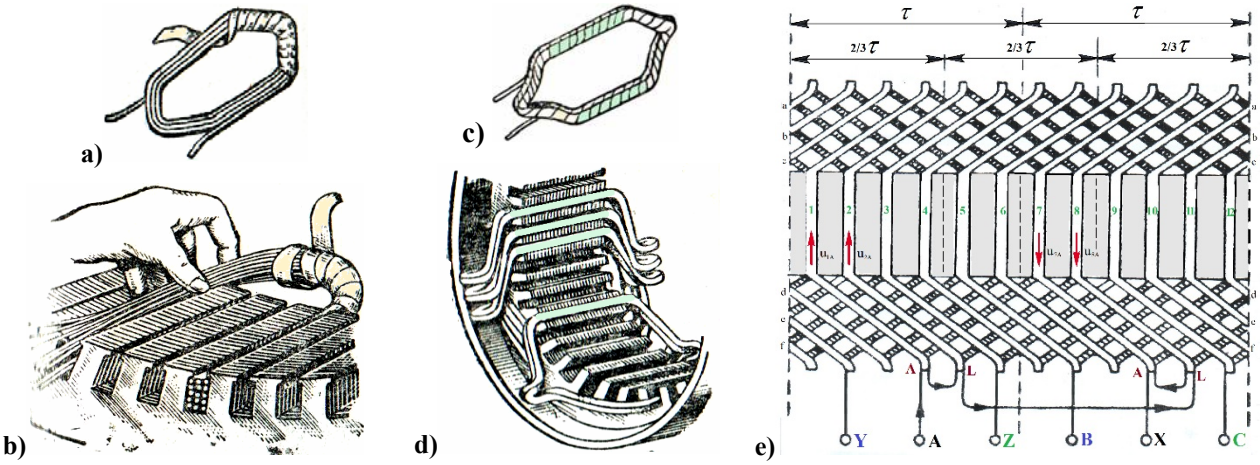
Joonis 10.11. Neljapooluselise asünkroonmootori lihtsaim staatorimähis (a), mis mainitud hetkel tekitab magneetimisergutuse *Iw* (b). Faasivoolu vektorid hetkel, mil faasis *A* on vool maksimaalne (c)

Lihtne on näidata, et selline staatorimähis tõepoolest tekitab neljapooluselise magnetvälja. Selleks vaatleme mõtteliselt kolmefaasilise pingesüsteemiga ühendatud mähist mis tahes vabalt valitud hetkel, näiteks hetkel, mil vool faasis *A* on maksimaalne (joonis 10.11b). Sel hetkel on faasides *B* ja *C* voolu väärtus pool faasi *A* voolust. Suundi arvestades on need voolud märgitud skeemile (joonis 10.11a), mille alusel saadakse magneetimisergutuse jaotuse astmeline kõver (joonis 10.11b) staatori sisepinnal: $Iw = f(x)$, kus x on pikkuse koordinaat sirgestatud staatori puhul. Sellelt kõveralt selgub, et tõepoolest tekkib $2p = 4$ poolust. Kui joonestada magneetimisergutuse selline kõver välja mingite teiste hetkede jaoks, siis pooluste arv ei muutu, poolused aga nihkuvad paremale ja ühe vahelduvvoolu perioodi jooksul jõuab üks põhjapoolus teise kohale. Täisnihke saavutab konkreetne poolus kahe perioodi jooksul.

Kui valida $q > 1$ ja konstrueerida lühendatud sammuga jaotatud staatorimähis, siis võib saada magneetimisergutuse jaotuse astmelise kõvera, mis erineb vähe siinuskõverast. Kahekihilise lühendatud sammuga mähise teostamise ideed selgitab joonis 10.12. Väikestel masinatel on mähise poolid peenemast, pehmest traadist, seetõttu mähise sektsioonid pole jäigad ja neid saab paigutada poolavatud uurdesse, nagu näidatud joonisel 10.12b. Võimsamate masinate sektsioonid (c) on lapiktraadist, sektsioonid on jäigad ning paigutatakse avatud uuretesse (d). Kahekihilise mähisesektsiooni üks pool paikneb uurde alumises, teine ülemises kihis.

Vaatame kahe pooluspaariga kahekihilise mähisega kolmefaasilist staatorit. Seega, $2p = 2$, $q = 2$, $m = 3$. Valemi 10.12 järgi on uurete arv 12. Igas uurdes on kaks sektsiooni külge. Seega sektsioonide arv on 12, faase on kolm, sektsioone faasile neli. Mähist kujutatakse lahtirullituna ehk laotatuna (joonis 10.12e). Iga poolusejaotuse ulatuses võtab faasimähis enda alla kaks uuret, seega $q = 2$. Nii on lihtne tähistada eri faaside uurdeid. Kui võtta uurded *1* ja *2* faasile *A* kuuluvaiks, siis järgmised kaks selle faasi uuret saavad asuda vaid teise poolusejaotuse piirkonnas, seega nihutatud 180 elektrilise kraadi võrra. Nendeks on uurded *7* ja *8*. Uurdeid tähistatakse sektsioonide aktiivkülgede (rohelised) ülemise kihi järgi. Sektsioonide *1* ja *2* ning *7* ja

8 allikasisepinged peavad liituma, seepärast on nad ühendatud paarikaupa jadamisi. Kuna sektsioonide paarid paiknevad erinevate pooluste all, siis nende allikasisepinged on vastasfaasis. Selleks, et liita kõigi nelja sektsiooni pinged, tuleb *1 – 2* paari lõpp ühendada *7 – 8* paari lõpuga, nagu see on joonisel 10.12e. Kui loeme faasi *A* alguseks juhet, mis väljub uurdest *1*, siis faasi lõpuks *X* on juhe, mis väljub uurdest *7*.



Joonis 10.12. Mähise sektsioonide paigaldamine staatori uuretesse väikese võimsusega (a ja b) ning võimsa masina (c ja d) korral

Faasi *B* algus on uurdes *5*, mis on faasi *A* alguse suhtes $2/3\,\tau$ ehk 120 elektrilise kraadi võrra nihutatud. Faasile *B* kuuluvad uurded *5, 6* ja *11, 12*. Faasi *C* algus on uurdes *9*, nihutatud veel 120 elektrilise kraadi võrra. Faasile *C* kuuluvad uurded *9, 10* ja *3, 4*. Staatorimähiste võrku lülitamiseks ühendatakse faasimähised kas tähte või kolmnurka.

10.5. Staatori elektrilise tasakaalu võrrand

Staatori kolmefaasilise voolu tekitatud pöördmagnetväli indutseerib staatorimähise igas keerus allikasisepinge

$$u_A = \frac{d\Psi}{dt}, \tag{10.14}$$

kus siinuselise jaotusega pöördvälja aheldusvoog (joonis 10.10b)

$$\Psi = \Phi_p \sin\omega t.$$

Keeru allikapinge (10.14) efektiivväärtus transformatoorse allikasisepinge võrrandi põhjal

$$U_A = 4{,}44 f_1 \Phi_p,$$

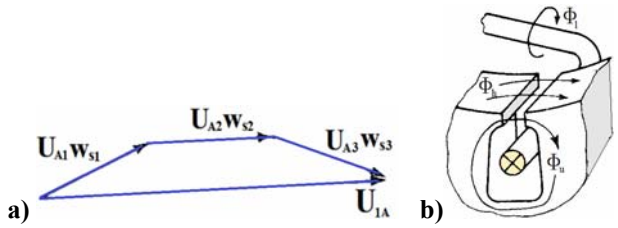
kus Φ_p ei ole mitte voo amplituud, vaid pöördmagnetvoo konstantne väärtus.

Jaotatud mähise korral on ühes faasis indutseeritud allikasisepinge U_{1A} jadamisi ühendatud keerdudes ja sektsioonides indutseeritud allikasisepingete vektorsumma. Sektsioonide ruumilise nihke tõttu (joonis 10.13a)

$$U_{1A} < U_A w_1,$$

kus $w_1 = w_s n$ on staatorimähise ühe faasi jadamisi ühendatud keerdude arv (w_s – ühe sektsiooni jadamisi ühendatud keerdude arv ja n on sektsioonide arv).

Kui mähis on lühendatud sammuga $y < \tau$, siis ei ole ühegi keeruga aheldatud pooluse kogu magnetvoog. Nimetatud asjaolu tõttu väheneb allikasisepinge veelgi.



Joonis 10.13. Staatorimähise jaotusteguri (a) ja puistemagnetvoo (b) selgitamiseks

Allikasisepinge vähenemine, mis on tingitud faasinihkest erinevates sektsioonides indutseeritud allikapingete vahel ja mähisesammu lühendamisest, võetakse arvesse mähiseteguriga. Mähisetegur, mis sisaldab jaotustegurit k_{1j} ja kõõlutegurit k_{1y},

$$k_{1w} = k_{1j} k_{1y} < 1,$$

kusjuures läbimõõtmähise (lühendamata mähisesamm) puhul $k_{1y} = 1$ ning jaotamata mähise puhul $k_{1j} = 1$.

Arvestades staatori allikasisepingete vähenemist, saame mähiseteguri kaudu ühe faasi allikasisepinge

$$U_{1A} = U_A w_1 k_{1w} = 4{,}44 f_1 w_1 k_{1w} \Phi_p, \tag{10.15}$$

kusjuures reaalsete staatorimähiste mähisetegur on piirides 0,92…0,96.

Sarnaselt olukorrale trafos on staatorimähis aheldatud ka puistevooga $\Phi_{1\sigma}$. Puistevoog on tegelikult osa pöörlevast magnetvoost, mis ei ole aheldatud rootorimähisega ja on jagatav arvutuse hõlbustamiseks osavoogudeks (joonis 10.13b):

$$\Phi_\sigma = \Phi_u + \Phi_h + \Phi_l,$$

kus Φ_u on uurde puistevoog, Φ_h – hammaste puistevoog ja Φ_l – laupühenduste puistevoog. Suurem osa puistevoost on mitteferromagnetilises keskkonnas, mistõttu puistevoog on võrdeline ja faasis staatorivooluga. Puistevoog indutseerib staatori igas faasis puisteallikasisepinge. Potentsiaalilang puisteinduktiivtakistil

$$\dot{U}_{1\sigma} = \dot{I}_1 j\omega L_1 = \dot{I}_1 j x_1, \tag{10.16}$$

kus L_1 on staatorimähise puisteinduktiivsus ja x_1 – staatori puisteinduktiivtakistus.

Staatori faasivool Kirchhoffi teise seaduse põhjal

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{1\sigma}}{r_1},$$

kus U_1 on toiteallika väljundpinge ja r_1 – staatorimähise ühe faasi aktiivtakistus. Sellest võrrandist, arvestades seost (10.16), saame staatori elektrilise tasakaalu võrrandi:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\sigma} + \dot{I}_1 (r_1 + j x_1) \tag{10.17}$$

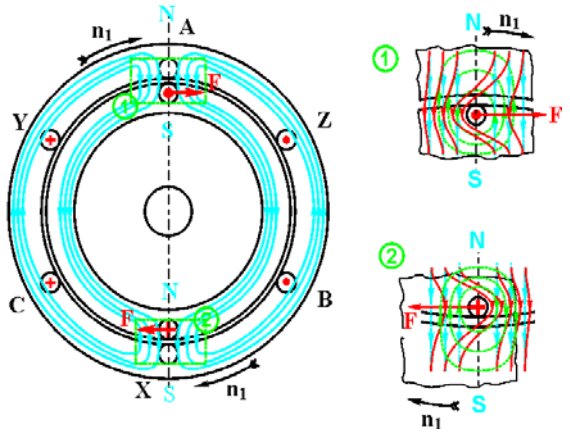
ehk $\dot{U}_1 = \dot{U}_{1\sigma} + \dot{I}_1 Z_1,$

mis ei erine põhimõtteliselt trafo primaarmähise toiteallikaväljundpinge tasakaaluvõrrandist (9.9). Toimub ju ka asünkroonmootoris energia muundamine magnetvälja vahendusel. Erinevus on vaid selles, et sisemine pingelang $I_1 Z_1$ on suurem, sest siin on puistevoog õhupilu tõttu märksa suurem kui trafol.

10.6. Rootori allikapinge ja -vool

Joonisel 10.14 on asünkroonmasin, millel staatori kolm faasimähist tekitavad sarnaselt joonisega 10.5 pöördmagnetvälja, mis aheldub rootorimähisega. Joonisel 10.14 on rootorimähis kujutatud rootori uuretes

paikneva kahe vardana, mis on omavahel lühistatud. Pöördmagnetväli, aheldudes lühisvarrastega, indutseerib neis allikasisepinge U_{2A}, mis põhjustab lühiskontuuris rootorivoolu I_2 tekke. Kui rootor ei pöörle ($n_2 = 0$), siis transformatoorse allikasisepinge võrrandi põhjal rootorimähise A faasis indutseeritud allikasisepinge $U_{2A} = 4{,}44 f_2 w_2 k_{2w} \Phi_p = 4{,}44 f_1 w_2 k_{2w} \Phi_p$, kus w_2 on ühe faasi keerdude arv ja k_{2w} mähisetegur.



Joonis 10.14. Allikasisepinge indutseerimine rootorimähise lühisvarrastes ahelduva pöördvälja poolt ja lühisvoolu tekitamine. Ülemise (1) ning alumise (2) varda voolu magnetvälja liitumine pöördväljaga ja jõupaari *F-F* (pöördemomendi) teke

Seisva rootori puhul rootorimähises indutseeritud allikasisepinge sagedus $f_2 = f_1$, nagu trafoski. Lühisrootori puhul loetakse faaside arv võrdseks varraste (uurete) arvuga: $m_2 = Z_2$. Siis $w_2 = 1/2$ ning $k_{2w} = 1$, sest ei ole mõeldav lühismähise jaotamine ja sammu lühendamine.
Kui asünkroonmootori rootor pöörleb, siis sagedus $f_2 < f_1$ ja valemi (10.6) alusel

$$f_2 = p n_s, \tag{10.18}$$

kus pöörleva magnetvoo ja rootori suhteline kiirus $n_s = n_1 - n_2$. Asetades selle seosesse (10.18), saame:

$$f_2 = p(n_1 - n_2) \cdot \frac{n_1}{n_1} = p n_1 \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s$$

ja pöörleva rootori ühes faasis indutseeritud allikasisepinge

$$U_{2A} = 4{,}44 f_1 s w_2 k_{2w} \Phi_p = U_{2An} s. \tag{10.19}$$

Rootorimähise faasi näivtakistus $z_2 = \sqrt{r_2^2 + (2\pi f_2 L_2)^2}$,

kus r_2 on ühe faasi aktiivtakistus ja L_2 – induktiivsus. Et $2\pi f_2 = 2\pi f_1 s = \omega s$, siis rootori faasivool

$$I_2 = \frac{U_{2An}}{\sqrt{r_2^2 + (s\omega L_2)^2}} \tag{10.20}$$

või, asendades U_{2A} seosest (10.19),

$$I_2 = \frac{U_{2An} s}{\sqrt{r_2^2 + (s\omega L_2)^2}} = \frac{U_{2An}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Siit selgub, et rootorivool oleneb libistusest ja suureneb pöörlemiskiiruse vähenemisel.

Rootori mitmefaasiline vool tekitab samuti pöördmagnetvälja, mille kiirus rootori suhtes

$$n_s = \frac{60 f_2}{p},\ \text{min}^{-1} \text{ või } n_s = \frac{f_2}{p},\ s^{-1},$$

kusjuures rootor pöörleb samas suunas kiirusega n_2. Rootori magnetvälja kiirus staatori suhtes on leitav n_s ja n_2 summana, mille alusel saame pärast teisendamist, et

$$n_s + n_2 = \frac{60sf_1}{p} + n_2 = n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} + n_2 = n_1 \tag{10.21}$$

Seega pöörleb asünkroonmootori rootori magnetväli sünkroonselt staatori magnetväljaga, kusjuures rootor pöörleb kiirusega $n_2 < n_1$. Staatori ja rootori magnetvälja sünkroonne pöörlemine mis tahes libistusel on iseloomulikuks tingimuseks võimsuse ülekandmisel asünkroonmootoris pöördmagnetvälja vahendusel.

10.7. Asünkroonmootori aseskeem ja vektordiagramm

Seosest (10.21) ilmneb, et nii seisva kui ka pöörleva rootori puhul kehtib magnetiline tasakaal, kusjuures sarnaselt olukorraga trafos on rootorivool lahtimagneetiv.

Magneetimisergutuste kaudu, arvestades faaside arvu ja mähise konstruktsiooni, väljendatakse **õpikutes magnetilist tasakaalu trafode eeskujul tavaliselt järgneva seosega**:

$$m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_1 + m_2 w_2 k_{2w} \dot{I}_2 = m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_{10}, \text{ siit } m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_1 = m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_{10} - m_2 w_2 k_{2w} \dot{I}_2,$$

kus I_{10} on magneetimis- ehk staatorivool ideaalsel tühijooksul, st juhul, kui $n_2 = n_1$. Sellest seosest oleks staatorivool koormatud mootori korral

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{2w}}{m_1 w_1 k_{1w}} + \dot{I}_{10} = \dot{I}'_2 + \dot{I}_{10}, \tag{10.22}$$

kus staatorimähisele taandatud rootorivoolu korral ebakõla likvideeritakse plussmärgi abil

$$\dot{I}'_2 = -\dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{2w}}{m_1 w_1 k_{1w}}.$$

Taandatud rootorivoolu vaadeldakse staatorivoolu osana, mis kompenseerib rootorivoolu demagneetiva mõju. Tähistades asünkroonmasina voolu ülekandeteguri

$$k_i = \frac{m_1 w_1 k_{1w}}{m_2 w_2 k_{2w}}, \tag{10.23}$$

saadakse taandatud rootorivoolu avaldiseks $\dot{I}'_2 = -\frac{\dot{I}_2}{k_i}$.

Taandatud rootorivool on samas suurusjärgus staatorivooluga.

Asünkroonmasinal ja trafol on sarnane tööpõhimõte. Asünkroonmasina eelvaadeldud magnetilise tasakaalu võrrand ei ühti trafo tööpõhimõtet avavatel joonistel 9.3 ja 9.4b kujutatuga. Jooniselt 9.3 näeme, et tühijooksul tekkib tasakaal välise toiteallika väljundpinge ja primaarmähise allikasisepinge vahel siis, kui trafol

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1, \text{ asünkroonmasinal vastavalt } m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_1 = m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_{10}.$$

Koormatud trafo joonisel 9.4b kirjeldab tasakaalu tekkemehhanismi välise toiteallika väljundpinge ja primaarmähise allikasisepinge vahel, mis asünkroonmasina ja trafo korral on sarnased. Seega peab staatori- (primaarmähise) vool kasvama rootori- (sekundaarmähise) voolu võrra, et katta rootorivoolu lahtimagneetivat toimet.

Seega on õige kirjaviis $m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_1 = m_1 w_1 k_{1w} \dot{I}_{10} + m_2 w_2 k_{2w} \dot{I}_2$.

Seda kinnitab ka asjaolu, et energiat võetakse toiteallikalt ja energiamuundamise intensiivsust iseloomustab voolu suurus toiteallikalt, mis tühijooksul on minimaalne ja kasvab koormuse korral lisaenergia muundamise tõttu. Seega, koormatud mootori korral staatorivool

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{2w}}{m_1 w_1 k_{1w}} = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2. \tag{10.24}$$

Siit staatorimähisele taandatud rootorivool

$$\dot{I}'_2 = \dot{I}_2 \frac{m_2 w_2 k_{2w}}{m_1 w_1 k_{1w}} = \frac{\dot{I}_2}{k_i}.$$

Taandatud rootorivool on staatorivoolu osa, mis iseloomustab läbi mootori õhupilu kanduvat laengute energiavälja energiat, mis muundatakse rootoris teisteks energialiikideks – mehaaniliseks ja kao soojusenergiaks.

Et staatori- ja rootorisuuruste vektoreid saaks kujutada ühisel vektordiagrammil, mis rajaneb asünkroonmootori aseskeemil, tuleb staatorimähisele taandada ka rootori parameetrid ning allikapinge, sest üldjuhul ei võrdu rootorimähise faaside arv m_2, mähisetegur k_{2w} ja keerdude arv w_2 vastavate staatorisuurustega m_1, k_{1w} ja w_1. Tavaliselt üksnes faasirootoriga asünkroonmootoritel $m_2 = m_1$.

Taandamine peab sarnaselt olukorraga trafode juures toimuma nii, et ei muutuks võimsused ega faasinihkenurgad. Arvestades energeetilise olukorra muutumatust, on pingete ülekandetegur paigalseisva rootori jaoks

$$k_u = \frac{U_{1A}}{U_{2A}} = \frac{k_{1w} w_1}{k_{2w} w_2}, \tag{10.25}$$

millest rootori taandatud allikapinge $U'_{2A} = U_{2A} k_u$.

Kui $m_2 = m_1$, siis $k_u = k_i$.

Rootoriahela takistuste taandamisel, arvestades energeetilisi tingimusi, saame takistuste taandamisteguri $k = k_u k_i$, mis seoste (10.23) ja (10.25) alusel avaldub $k = \frac{m_1 w_1^2 k_{1w}^2}{m_2 w_2^2 k_{2w}^2}$

ja seega, $r'_2 = r_2 k$ ning $x'_2 = x_2 k = \omega L_2 k$.

Võrranditest (10.17), (10.20) ja (10.24) saame asünkroonmootorit elektrilisest küljest kirjeldava võrrandisüsteemi. Vektordiagrammi joonestamiseks asendame rootori suurused nende taandatud väärtustega, lahutades seejuures suuruse r'_2 / s kaheks osaks

$$\frac{r'_2}{s} = \frac{r'_2}{s} - \frac{r'_2 s}{s} + r'_2 = r'_2 + r'_2 \frac{1-s}{s},$$

mille ekvivalentsel teisendamisel saame aseskeemile ja vektordiagrammile (joonis 10.15) võrrandisüsteemi

$$\left.\begin{aligned} &\dot{U}_1 = -\dot{U}_{1A} + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1), \\ &\dot{U}_{2A} = \dot{I}'_2 r'_2 + \dot{I}'_2 jx'_2 + \dot{I}'_2 \frac{r_2(1-s)}{s} = \dot{I}'_2 (r'_2 + jx'_2 + \frac{r_2(1-s)}{s}), \\ &\dot{I}_1 = \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2. \end{aligned}\right\} \tag{10.26}$$

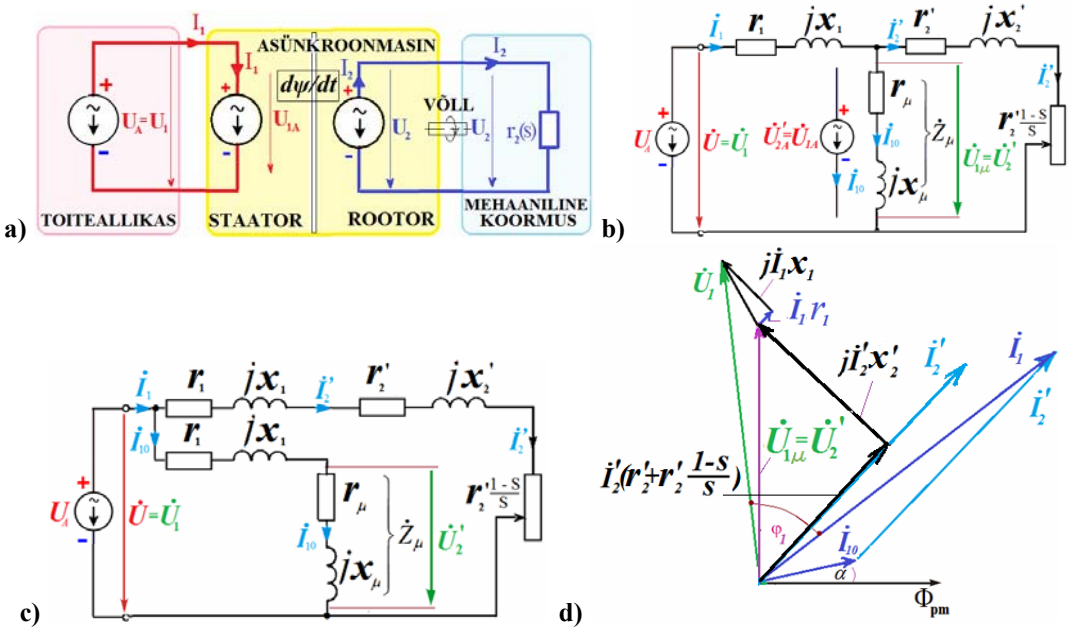
Nihkenurk rootori allikasisepinge U_{2A} ja rootorivoolu I_2 vahel on leitav parameetrite kaudu seosest

$$\psi_2 = \operatorname{arctg} \frac{x'_2 s}{r'_2}.$$

Nurk φ_1 tekkib staatori toiteallika väljundpinge U_1 ja staatorivoolu I_1 vahel ning on arvutatav võimsusteguri alusel: $\varphi_1 = \arccos \frac{P_1}{S_1}$,

kus P_1 on asünkroonmootori poolt tarbitav aktiivvõimsus ja S_1 kogu näivvõimsus.

Vektordiagrammi koostamine toimub sarnaselt koormatud trafo vektordiagrammiga. Erinevus on siin vaid selles, et rootorimähis on lühistatud ja seetõttu puudub pinge U_{2T}. Peale selle on aktiivpingelang joonisel 10.15 jaotatud kahte ossa valemi (10.25) alusel, kusjuures $(I'_2)^2 r'_2$ on seotud rootori vaseskaoga (soojusekadu rootorimähises), $I'^2_2 r'_2 \dfrac{1-s}{s}$ aga elektrienergia muundumisega mehaaniliseks energiaks.



Joonis 10.15. Asünkroonmootor. Energiamuundamise illustratsioon (a). T-kujuline (b) ja Γ-kujuline (c) aseskeem. Asünkroonmootori vektordiagramm (d)

Esiteks asendame T-kujulise aseskeemi saamiseks süsteemi (10.26) esimeses võrrandis staatori allikasisepinge ideaalsele tühijooksule vastava aseskeemi parameetritel tekkiva potentsiaalilanguga

$$\dot{U}_{1\mu} = \dot{I}_{10}(r_\mu + jx_\mu),$$

kus r_μ on aseskeemi takistus, milles tühijooksuvool I_{10} tekitab teraseskaoga võrdse võimsuskao ja induktiivtakistus x_μ on pöördmagnetvoost Φ_p tingitud magneetimisharu induktiivtakistus. Teiseks, teades, et $U'_{2A} = U_{1A}$, asetame U'_{2A} väärtuse esimesse võrrandisse. Nii saame joonisel 10.15a esitatud aseskeemile vastava võrrandisüsteemi:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) + \dot{I}_{10}(r_\mu + jx_\mu), \\ \dot{U}_1 &= \dot{I}_1(r_1 + jx_1) + \dot{I}'_2(r'_2 + jx'_2) + \dot{I}'_2 r'_2 \frac{1-s}{s}, \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_{10} + \dot{I}'_2. \end{aligned}\right\} \qquad (10.27)$$

Libistusest olenevat takistust $r'_2 \dfrac{1-s}{s}$ võib vaadelda aktiivkoormusena. Kui näiteks rootor on paigal,

$n_2 = 0$ ja $s = 1$, siis $\qquad r'_2 \dfrac{1-s}{s} = 0,$

mis vastab asünkroonmootori lühisele.

Kui aga $s = 0$ ($n_2 = n_1$), siis $\qquad r'_2 \dfrac{1-s}{s} = \infty,$

mis vastab mootori ideaalsele tühijooksule – rootoriahel on aseskeemis katkestatud ehk $I_2' = 0$.

Selleks et avaldada rootorivoolu staatorimähise faasipotentsiaalilangu U_1 ja mootori parameetrite kaudu, on otstarbekohane teisendada T-kujuline aseskeem (joonis 10.15a) Γ-kujuliseks (joonis 10.15b), viies magneetimisharu potentsiaalilangule $U_{1\mu} = U'_2$. Et magneetimisvool $\dot{I}_{10}$ ei muutuks, on jadamisi takistitega r_μ ja x_μ ühendatud takistid r_1 ja x_1. Kuna staatori- ja rootoriharud on aseskeemil nüüd samuti jadamisi, siis võib avaldada rootorivoolu. Arvestades (10.25), saame:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \tag{10.28}$$

10.8. Asünkroonmootori võimsuste bilanss ja kasutegur

Koormusel tarbib asünkroonmootor toitevõrgust aktiivvõimsust (väljendatuna faasisuuruste kaudu)

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi, \tag{10.29}$$

millest osa kulub staatorimähises vaseskaona:

$$p_{Cu1} = m_1 I_1^2 r_1. \tag{10.30}$$

Ülejäänud võimsus muundub pöördmagnetvälja võimsuseks, millest osa kulub staatori teraseskaona p_{Fe1} (pöörisvoolu- ja hüstereesikaoks).

Läbi õhupilu antakse pöördmagnetvälja abil rootorisse elektromagnetiline ehk õhupiluvõimsus:

$$P_{em} = P_1 - p_{Cu1} - p_{Fe1}, \tag{10.31}$$

mis on asünkroonmootori parameetrite kaudu avaldatav kujul

$$P_{em} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{r'_2}{s}. \tag{10.32}$$

Osa elektromagnetilisest võimsusest kulub rootorimähises vaseskaona:

$$p_{Cu2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r'_2, \tag{10.33}$$

sellest ülejäänud osa muundub aga mootori mehaaniliseks võimsuseks:

$$P_{meh} = P_{em} - p_{Cu2}, \tag{10.34}$$

mis on kooskõlas teisendusega (10.25) või eelmiste seoste abil avaldatav järgmiselt:

$$P_{meh} = m_1 I_2'^2 \frac{r'_2}{s} - m_1 I_2'^2 r'_2 = m_1 I_2'^2 r'_2 \frac{1-s}{s}. \tag{10.35}$$

Siinjuures ei ole väiksuse tõttu arvestatud teraseskadu rootoris, sest koormusolukorras on rootorivoolu sagedus väike, $f_2 \approx 0{,}5\ldots3$ Hz, samal ajal kui staatorivoolu sagedus on 50 Hz.

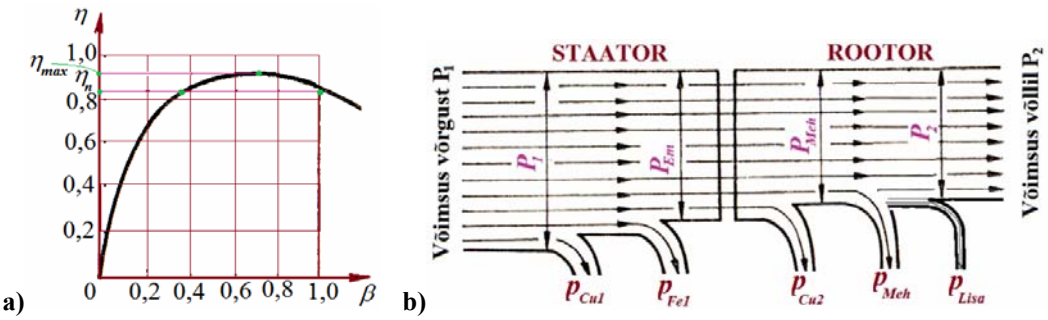
Kui arvesse võtta ka mehaaniline kadu p_{meh}, mille põhiliselt moodustavad kadu masina laagrites (hõõrdekadu) ja kadu ventilatsiooniks (ventilatsioonikadu) ning mitmesugused lisakaod p_l, mis kaetakse mehaanilisest võimsusest, saame kasuliku mehaanilise võimsuse asünkroonmootori võllil:

$$P_2 = P_{meh} - p_{meh} - p_l.$$

Mootoritel moodustab lisakadu umbes 0,5% tarbitavast võimsusest P_1.

Seosed (10.29) kuni (10.35) on hästi illustreeritavad joonisel 10.16b esitatud **võimsuste diagrammina**, mis vastab võrrandisüsteemile

$$\left.\begin{aligned} P_{em} &= P_1 - p_{Cu1} - P_{Fe1}, \\ P_{em} &= P_2 + p_{meh} + p_{Cu2} + p_l. \end{aligned}\right\}$$



Joonis 10.16. Asünkroonmootori kasuteguri (a) ja võimsuste (b) diagramm

Alla 100 kW mootori kaoliikide ligikaudne protsentuaalne jaotus on järgmine: teraseskadu 25%, staatorimähise kadu 104%, rootorimähise kadu 21%, mehaaniline kadu 15%, lisakadu 0,5% ja kaoliikide kõrvalekalded kuni 4,5%.

Asünkroonmootori kasutegur $\eta = \dfrac{P_2}{P_1}$

ehk kogukao $\sum p = p_{Cu1} + p_{Fe1} + p_{Cu2} + p_{meh} + p_l$

kaudu, teades, et $\sum p = P_1 - P_2$ ning $P_1 = \sqrt{3}UI\cos\varphi$ ja $P_2 = M_2\Omega_2$ (siin Ω_2 – rootori pöörlemise nurkkiirus), siis $\eta = \dfrac{P_2}{P_2 + \sum p}$.

Asünkroonmootori kasutegur leitakse suvalise koormuse korral kaudsel meetodil, kasutades arendatava P ja nimivõimsuse P_n suhet e koormustegurit $\beta = \dfrac{P}{P_n}$, siis $\eta = \dfrac{\beta P_n}{\beta P_n + P_0 + \beta^2 P_k}$. Siin on P_0 tühijooksu võimsus ehk püsikadu ning P_k on koormusest sõltuv muutuv kadu.

Mootorid projekteeritakse nii, et nende maksimaalne kasutegur oleks 75%-se nimikoormuse juures. Põhjus on selles, et mootorid töötavad sageli nimikoormusest väiksemal koormusel (joonis 10.11a). Mootori kasuteguri maksimaalne väärtus leitakse sarnaselt trafoga: võetakse kasuteguri tuletis β-st ja võrdsustakse nulliga, seega $d\eta/d\beta = 0$. Siit saadakse, et $\eta = \eta_{\max}$ siis, kui püsikadu võrdub muutuva kaoga, seega kui $P_0 = \beta^2 P_k$. Asünkroonmootori kasutegur on nimikoormusel 70…95%, kusjuures võimsate mootorite kasutegur on suurem. Asünkroonmootori nimivõimsuseks P_{2n}, mis on märgitud ka masina sildile, loetakse kasulikku võimsust võllil nimipöörlemiskiirusel n_{2n}. Kui staatorimähis on lülitatud nimitoitepingele U_{1n}, siis tekkib staatorimähises ka nimivool I_{1n}. Lisaks neile suurustele on asünkroonmootori sildile märgitud veel nimivõimsustegur $\cos\varphi_n$, nimikasutegur η_n ja staatorimähise ühendamisviis.

NÄIDE 10.1

Antud: kolmefaasiline asünkroonmootor $P_n = 14\,kW$, $U_n = 230/400\,V$, $I_n = 25{,}8\,A$, $f_1 = 50\,Hz$, $2p = 4$, $s_n = 0{,}028$, $n_n = 1460\,p/\min$, $\cos\varphi_n = 0{,}877$. Mootori nimitalitluses $P_2 = P_n = 14000\,W$, $p_{Cu1} = 750\,W$, $p_{Fe1} = 300\,W$, $p_{Cu2} = 405\,W$, $p_{Meh} = 205\,W$, $p_{Lisa} = 76\,W$.

Leida: mootori kasutegur nimitalitluses.

Lahendus

Kadude summa $\sum p_n = 750+300+405+205+76 = 1736W$. Toitevõrgust võetav võimsus $P_{1n} = P_n + \Sigma p_n = 14000 + 1736 = 15736\,W$.

Nimikasutegur $\eta_n = \dfrac{P_{2n}}{P_{2n}+\sum p_n}$ ehk $\eta_n = \dfrac{P_{2n}}{P_{1n}} = \dfrac{14000}{15736} = 0{,}89$. Seega, $\eta_n = 89\%$.

10.9. Rootori elektriliste suuruste sõltuvus libistusest

Rootori mähise juhtmeid lõikab pöördmagnetvoog libistuskiirusega $n = n_1 - n_2$. Seetõttu rootori mähistes indutseeritav allikasisepinge U_{2A} sagedus

$$f_2 = f_1 s \tag{10.36}$$

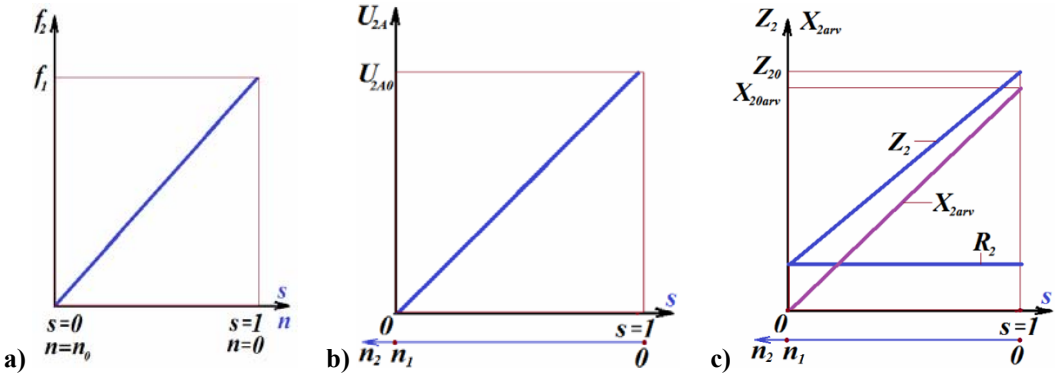
on võrdeline libistusega *s*.

Mootor käivitatakse libistusel $s=1$ ($n = 0$) ja $f_2 = f_1 = 50$ Hz. Tühijooksul $s < 0{,}01$, seega $n_2 \approx n_1$ ja $f_2 < 0{,}5$ Hz. Tavamootoritel nimikoormusel $s_n = 2...6\%$ ja $f_2 = 1...3$ Hz.

Teisendame võrrandi (10.36):

$$f_2 = f_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 - \frac{pn}{60}. \tag{10.37}$$

Näeme, et rootori allikapinge sagedus kiiruse n_2 kasvades väheneb (joonis 10.17a). Järelikult, toites staatorimähist sagedusel f_1 ja ajades rootorit ringi erineva kiirusega, võib faasirootori rõngastelt saada erineva sagedusega allikapinget: kui rootor pöörleb pöördväljaga samas suunas $f_2 < f_1$ ja vastupidises suunas $f_2 > f_1$. Seega $s>1$. Rootori allikapinge $U_{2A} = 4{,}44 f_2 w_2 k_{2w} \Phi$. Kuna $f_2 = f_1 s$, siis $U_{2A} = 4{,}44 f_1 s w_2 k_{2w} \Phi$. Käivitushetkel kui $s = 1$ ja rootor on liikumatu $U_{2A} = U_{2A0} = 4{,}44 f_1 w_2 k_{2w} \Phi$.



Joonis 10.17. Asünkroonmootori rootori libistusest olenevad tunnusjooned

Seega, $U_{2A} = U_{2A0} s$. (10.38)

Primaar- ja sekundaarmähise allikasisepingete suhet seisva rootori korral nimetatakse asünkroonmootori **ülekandeteguriks.**

$$K = \frac{U_{1A}}{U_{2A0}} = \frac{w_1 k_{1w}}{w_2 k_{2w}}. \tag{10.39}$$

Rootorimähise näivtakistus

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}\,. \tag{10.40}$$

r_2 on suhteliselt väike ja praktiliselt muutumatu. Tähistame mähise puisteinduktiivtakistuse seisva x_2 ja pöörleva rootori korral x_{2s}. Siis muutub $x_{2s} = L_2\omega_2$ (10.41)

pöörlemissageduse muutudes, sest

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi f_1 s \text{ ja } x_{2s} = L_2 \cdot 2\pi f_1 s = s x_2 .$$

Käivitamisel $s = 1$, sest $n = 0$ ja $x_{2s} = L_2 \cdot 2\pi f_1 = x_2$ (10.42)

Seega on rootorimähise puisteinduktiivtakistus võrdeline libistusega, olles käivitusmomendil suurim x_2, nimikoormusel kümneid kordi väiksem. Järelikult rootorimähise näivtakistuse (joonis 10.17b) väärtus käivitusel $x_2 > r_2$ ja $z_2 \approx x_2$.

Faasirootoriga asünkroonmootori rootori vool

$$I_2 = \frac{U_{2A}}{z_2} = \frac{U_{2A}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} .$$

Lähtudes seostest (10.38) ja (10.42), pöörleva rootori vool

$$I_2 = \frac{U_{2A} s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} .$$

Seega on asünkroonmootori rootori vool võrdeline libistusega ja on suurim käivitushetkel, kui libistus s = 1 ja mähise allikapinge on suurim $U_{2A} = U_{2A0}$. Kuna $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$, siis ka staatorivool on võrdeline libistusega ning on suurim käivitushetkel. Tavakonstruktsiooniga lühisrootoriga mootoritel on staatori vool käivitusel 4…7 korda suurem nimivoolust. Seetõttu ei või käivitus kaua kesta.

Mootori rootoriahela võimsustegur rootoritakistuste kolmnurgast

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} .$$

Seega on asünkroonmootori võimsustegur pöördvõrdelises seoses libistusega ja käivitusel on väärtus minimaalne.

NÄIDE 10.2

Antud: faasirootoriga asünkroonmootor lülitatakse vahelduvtoitevõrku faasipingega $U_1 = 230\,V$, $f_1 = 50$ Hz ja käivitushetkel lühistamata kontaktrõngastel on allikasisepinge $U_{2A0} = 45$ V. Faasimähistes on jadamisi $w_1 = 128$ keerdu ja $w_2 = 24$; mähisetegur $k_{1w} = 0{,}93$, $k_{2w} = 0{,}96$.

Määrata: staatorimähise allikapinge U_{1A}, ülekandetegur, rootori allikapinge U_{A2} ja sagedus f_2, kui mootori libistus on 5%.

Lahendus

Allikasisefaasipinge lühistamata kontaktrõngastel (kui $s = 1$, siis $f_2 = f_1 = 50$ Hz)

$$U_{2A0} = 4{,}44 f_1 w_2 k_{2w} \Phi_p .$$

Leiame pooluse magnetvoo $\Phi = \frac{U_{2A0}}{4{,}44 f_1 w_2 k_{2w}} = \frac{45}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 24 \cdot 0{,}96} = 0{,}0088$ Wb.

Allikapinge $U_{1A} = 4{,}44 \cdot 0{,}0088 \cdot 50 \cdot 128 \cdot 0{,}93 = 232{,}6$ V.

Järelikult ülekandetegur $K = \frac{U_{1A}}{U_{2A0}} = \frac{232{,}6}{45} = 5{,}17$.

Tööolukorras rootori allikasisepinge $U_{2A} = U_{2A0} s = 45 \cdot 0{,}05 = 2{,}25$ V.

Allikasisepinge sagedus $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}05 = 2{,}5$ Hz.

NÄIDE 10.3

Määrata: lühisrootoriga asünkroonmootori staatori- ja rootorimähises indutseeritud allikasisepinged, mis lülitatakse 230 V faasipingega toitevõrku sagedusel $f_1 = 50$ Hz liikumatu rootori ja töö olukorras, kui libistus $s = 4{,}3\%$. Staatori faasimähises on $w_1 = 192$ ja rootoril $w_2 = 0{,}5$ keerdu ning mähisetegurid $k_{1w} = 0{,}91$, $k_{2m} = 1{,}0$ ning mootori pooluse magnetvoog $\Phi_p = 0{,}0059$ Wb.

Lahendus

Staatorimähise allikasisepinge

$$U_{1A} = 4{,}44 f_1 w_1 k_{1w} \Phi_p = 4{,}44 \cdot 0{,}0059 \cdot 50 \cdot 192 \cdot 0{,}91 = 229 \text{ V}.$$

Mootori allikapingete ülekandetegur (transformatsioonitegur)

$$K = \frac{U_{1A}}{U_{2A0}} = \frac{w_1 k_{1w}}{w_2 k_{2w}} = \frac{192 \cdot 0{,}91}{0{,}5 \cdot 1} = 350 \cdot$$

Paigalseisva rootori allikasisepinge $U_{2A0} = \frac{U_{1A}}{K} = \frac{229}{350} = 0{,}65$ V.

Allikasisepinge ja sagedus rootori tööolukorras, kui libistus $s = 4{,}3\%$

$$U_{2A} = U_{2A0} s = 0{,}65 \cdot 0{,}043 = 0{,}0267 \text{ V}$$

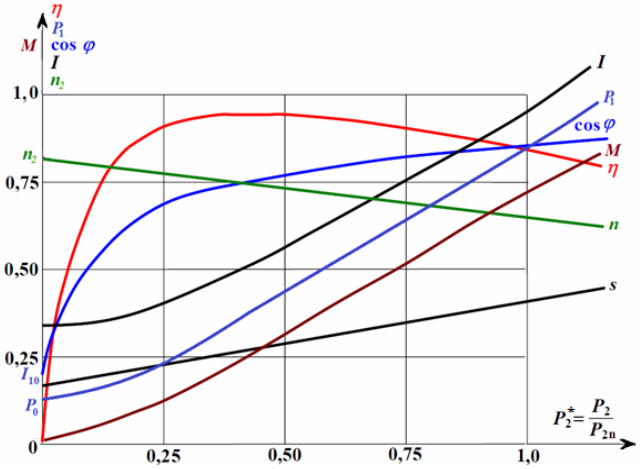
ja $$f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}043 = 2{,}15 \text{ Hz}.$$

Märkus: kuna $U_{2A0} >> U_{2n}$, siis paigalseisva rootoriga töö on **avariitalitlus**. Paigalseisva rootoriga ka suhteliselt lühiajaline töö võib põhjustada staatori mähise riknemise isolatsiooni ülekuumenemise tõttu.

10.10. Asünkroonmasina töötunnusjooned

Asünkroonmootorit kasutusvõimalused elektriajamite põhisõlmena määratakse ta mehaanilise tunnusjoonega $n(M)$ või $M = f(s)$. Elektriahelas mootorit iseloomustavad töötunnusjooned, mis kujutavad endast $\cos\varphi$, η, n, s, M, P_1 ja I sõltuvuste graafilist kujutist kasulikust võimsusest P_2 mootori võllil, kui $U = U_{1n}$ ja $f_1 = f_{1n}$ = const (joonis 10.18).

Võlli pöörlemissageduse tunnusjoonelt $n(P_2{*})$ näeme, et koormuse kasvamisel nimikoormuseni võlli pöörlemissagedus oluliselt ($s_n = 1...6\%$) ei vähene. **Sellist tunnusjoont nimetatakse jäigaks**. Kuna elektriline ja mehaaniline võimsus erinevad vähe $P \approx P_{meh}$, siis sõltuvus $n(P)$ erineb vähe mehaanilisest ja on samuti tööpiirkonnas jäik.



Joonis 10.18. Asünkroonmootori tunnusjooned olenevalt kasulikust võimsusest P_2 mootori võllil

Kasuliku pöördemomendi olenevus kasulikust võimsusest $M(P_2/P_{2n})$ leitakse avaldisest $M = P_2/\omega_2$, $N \cdot m$ ja $\omega_2 = 2\pi n_2$, siin n_2, s^{-1}. Ideaalsel tühijooksul $n_2 = n_1$, moment $M = 0$. Tunnusjoon on painutatud üles, kuna koormuse kasvades n väheneb. Samuti on kõverjooned $P_1(P)$ ja $I_1(P)$ paindega üles, sest koormuse suurenemisega suureneb kadu mootori mähistes. Sõltuvusel $s(P)$ on võrreldes $n(P)$ tunnusjoonega pöördiseloom, kuna nad on seotud sõltuvusega $n_2 = (1-s)n_1$, kus $n_1 = \text{const}$.

Asünkroonmootori mehaaniline tunnusjoon. Selle leiame mootori momendi avaldisest, lähtudes joonise 10.15 aseskeemist. Rootorivälja ja staatori pöördmagnetvälja vastastikmõjul tekkib (joonis 10.1) elektromagnetiline moment, mis on võrdeline elektromagnetilise võimsusega ja pöördvõrdeline pöördvälja nurkkiirusega:

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1}. \tag{10.43}$$

Siin on momendi ühikuks N·m, kui võimsus on vattides ja nurkkiirus radiaani sekundis.

Nurkkiirus magnetvoo pöörlemiskiiruse $n_1\,(s^{-1})$ kaudu $\omega_1 = 2\pi n_1$. Magnetvoo pöörlemiskiirus aga

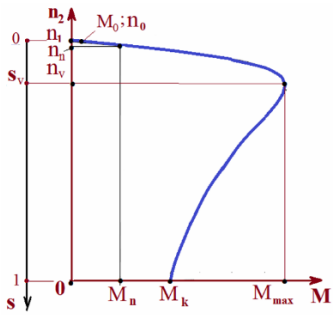
$$n_1 = \frac{f}{p}.$$

Siit $\omega_1 = 2\pi \frac{f_1}{p}$.

Aseskeemi parameetreid arvestades saame elektromagnetilise momendi

$$M(s) = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{r'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + c_1 x'_2)^2\right]} = f(s). \tag{10.44}$$

Tavaliselt masina ehitusest (pooluspaaride ja faaside arvust ning sagedusest) olenev tegur $c_1 = 1{,}02 \ldots 1{,}06$. Momendi avaldisest selgub, et mootori elektromagnetiline moment on võrdeline pinge ruuduga. Momendi sõltuvust libistusest (10.44) või rootori pöörlemiskiirusest n_2 nimetatakse asünkroonmootori **mehaaniliseks karakteristikuks**. Joonisel 10.19 on see sõltuvus esitatud kujul $s = f(M)$ ja $n = f(M)$. Mootori tunnusjoonel on märgitud rida iseloomulikke punkte.



Joonis 10.19. Asünkroonmootori mehaaniline karakteristik

Asünkroonmootori käivitamise alghetkel rootor ei pöörle, $n_2 = 0$ ja valemi (10.37) põhjal $s = 1$, arendatav **käivitusmoment** M_k on leitav seosest (10.44)

$$M_k = \frac{m_1 p U_1^2 r'_2}{2\pi f_1 \left[(r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]}. \tag{10.45}$$

Käivitusmomendi mõjul hakkab rootor pöörlema, kusjuures pöörlemiskiirus suureneb ja libistus väheneb. Libistusel s_v, mida nimetatakse **vääratuslibistuseks**, saavutab moment maksimaalse väärtuse M_{max}. Vääratuslibistusele vastab pöörlemiskiirus n_v. Vääratuslibistus on leitav funktsiooni (10.44) esimesest

tuletisest libistuse järgi selle võrdsustamisel nulliga. Selgub, et vääratuslibistus oleneb vaid mootori-parameetritest:

$$s_v = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \tag{10.46}$$

Asetades selle avaldise seosesse (10.44), saame maksimaalse elektromagnetilise momendi

$$M_{\max} = \pm \frac{m_1 p U^2{}_1}{4\pi f_1 \left[r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2\right]} = \pm \frac{m_1 p U^2{}_1}{4\pi f_1 (r_1^2 + x_k{}^2)}. \tag{10.47}$$

Maksimaalse momendi ehk **vääratusmomendi** (*pullout torque* või *breakdown torque*) väärtus ei olene rootoriahela takistusest. Pöörlemiskiiruse edasisel suurenemisel, mil libistus väheneb veelgi, moment väheneb. Nii jõuame karakteristikul (joonis 10.19) **nimimomendi** punkti M_n, mis vastab mootori nimivõimsusele P_n, siis on rootoril **nimipöörlemiskiirus** n_n ehk **nimilibistus** s_n. Mootori koormuse vähenemisel nullini (*no load*) suureneb pöörlemiskiirus **tühijooksu pöörlemiskiiruseni** $n_2 = n_1$, millele vastab libistus $s = 0$. Siis arendab mootor vaid **tühijooksumomenti** M_0, mis on seotud tühijooksukaoga. Selleks et mootori poolt arendatav moment oleks null (siis on null ka libistus ja rootori pöörlemiskiirus $n_2 = n_1$), tuleb tühijooksumomendi ületamiseks rakendada abiajamit, mille energia arvel kaetakse tühijooksukadu.

Mootori tavatöö piirkond on mehaanilisel karakteristikul vahemikus $M_0 < M < M_n$. Kui aga $M > M_n$, siis on mootor üle koormatud. Takistusmomendi suurenedes üle maksimaalse momendi $M_{\max}$ muutub rootori pöörlemiskiirus kiiresti nulliks. Mootori **ülekoormatavuseks** λ_M nimetatakse vääratusmomendi ja nimimomendi suhet $\lambda_M = \frac{M_{\max}}{M_n}$,

mis levinuimatel mootoritel on nimipingel piirides 1,7…3,0.

NÄIDE 3.4

Antud: kolmefaasiline asünkroonmootor $P_n = 37$ kW nimipöörlemiskiirusega $n_{2n} = 1470$ p/min.

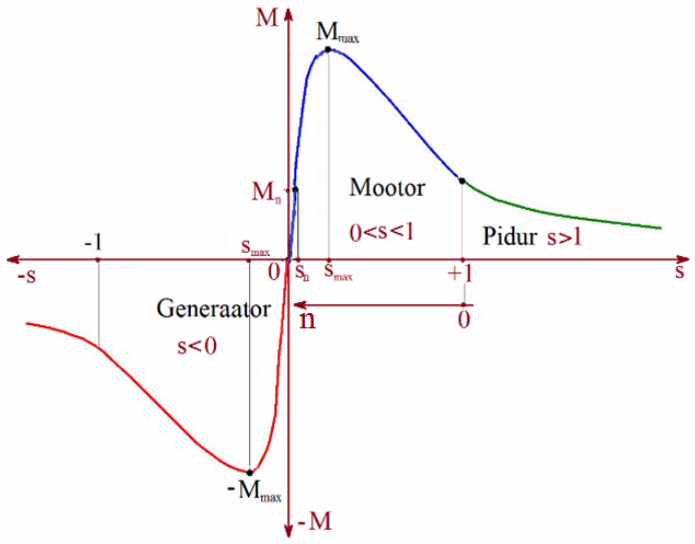
Leida: mootori võllile mõjuv pöördemoment.

Lahendus

Lähtudes momendi $M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}$ ja mootori võlli nurkkiiruse $\omega_2 = 2\pi n_2$ avaldisest

$$M_2 = \frac{P_2}{2\pi n_2} = \frac{37{,}0}{2\pi \cdot 1470}, \frac{kW}{p/\min} \approx 240 \text{ Nm}.$$

Asünkroonmasina momendi – libistuse tunnusjoon laiendatud tööpiirkonna korral. Pöörlemiskiiruse ja libistuse vahel on ühene seos $n_2 = (1 - s) n_1$. Kuidas on seotud pöördemoment erinevate libistuste korral? Pöördemomenti saab kõikide talitluste korral määrata seosest (10.44). Siit järeldub, et $M = 0$, kui $s = 0$. Kui libistus s muutub vahemikus $s = \pm\infty$, siis ka momendi väärtuse märk on sama $(\pm)$ mis libistusel. Nii on kõveral $M = f(s)$ **vahemikus** $0 < s < +\infty$ **maksimum** $M_{\max}$ ning $-\infty < s < 0$ **piirkonnas** $-M_{\max}$. Tähtis on märkida, et selle libistuse puhul on moment võrdeline pinge ruuduga. Joonisel 10.20 on esitatud momendi kõver $M = f(s)$, kui $U_1 = const$ ja $f_1 = const$ generaatori, mootori ja piduri talitlusele.



Joonis 10.20. Asünkroonmasina pöördemomendi olenevus libistusest koos generaatori ja piduri tööpiirkondadega

Kui asünkroonmasina rootor panna mingi ajami abil pöörlema sünkroonkiirusest kiiremini, siis muudab moment märki ning masin toimib generaatorina, muundades mehaanilist energiat elektrienergiaks. Kui aga mootor pöörleb ja ta lülitada tööle vastassuunas, siis toimub mootori kiire pidurdamine. Kahe faasi ümberlülitamist mootori kiireks peatamiseks nimetatakse **vastulülituspidurduseks** (*plugging*).

Tavalühisrootoriga asünkroonmootoritel on suhteliselt väike käivitusmoment, mis nimimomenti palju ei ületa, $M_k \approx (1{,}2...1{,}4)M_n$, parimatel aga $M_k \approx (1{,}7...2{,}9)M_n$. Kui käivitusmoment on suurem masina pöörlemist takistavast staatilisest momendist M_{st}, siis masin hakkab pöörlema ja suurendab pidevalt kiirust. Pöördemoment aga kasvab suhteliselt aeglaselt koos kiiruse kasvuga kuni maksimaalse väärtuseni $M_{\max}$ ehk vääratusmomendini, mille puhul libistus võrdub vääratuslibistusega s_v. Nimipingel oleva vääratusmomendi suhet nimipöördemomenti nimetatakse **ülekoormatavuseks** ja see suurus on tavaliselt $M_{\max}/M_n = 2{,}0...3{,}5$.

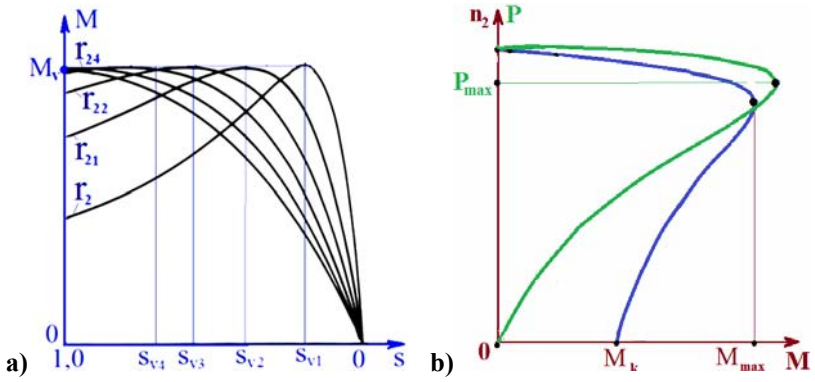
Analüüsides vääratusmomendi avaldist (10.47), võib märkida, et tavalistel asünkroonmasinatel (joonis 10.15) aseskeemis oomiline takistus r_1 moodustab 10...12% lühise induktiivtakistustest $(x_1 + x'_2)$ ja seda võib mitte arvestada. Siis (10.46) lihtsustub

$$s_v \approx \pm r'_2/(x_1 + x'_2). \qquad (10.48)$$

Valemites (10.46), (10.47) ja (10.48) vastab plussmärk mootori- ja piduritalitlusele; miinusmärk – generaatori talitlusele. Valemitest (10.46) ja (10.47) selgub, et vääratusmomendi väärtus ei sõltu rootori ahela oomilisest takistusest ning esineb seda suurema libistuse juures, mida suurem on rootoriahela aktiivtakistus r'_2 ja mida väiksemad on puistetakistused x_1 ja x'_2. Vääratusmomendi väärtus on võrdeline staatori pinge ruuduga ja on seda väiksem, mida suuremad on puistetakistused x_1 ja x'_2.Vääratusmomendi väärtus generaatoritalitluses on suurem kui mootoritalitluses. Tavaliselt asünkroonmasinate vääratuslibistus $s_v = 0{,}08...0{,}2$. Suuremad väärtused vastavad väiksema võimsusega masinatele.

Valemist (10.48) selgub, et faasirootoriga masinate korral lisatakistusega nende rootori välisvooluahelas on võimalik suurendada vääratuslibistuse suurust. Selle kasutamisvõimalusi iseloomustavad joonisel 10.21a esitatud kõverad. Kõveral r_2 lisatakistus puudub, see vastab masina loomulikule tunnusjoonele. Kõver r_{21} on lisatakistiga, samuti r_{22}, r_{23} ja r_{24}. Seejuures r_{24} korral on rootoriahela aktiivtakistus suurendatud võrdseks lühise induktiivtakistusega, $r'_2 \approx x_1 + x'_2$. Rootoriahela aktiivtakistuse suurendamine vähendab ka käivitusvoolu, seega ka suuri voolutõukeid käivitusel.

Joonisel 10.21b on momendi ja võimsuse sõltuvus mootori kiirusest. Asünkroonmootoris muundatud elektromagnetiline võimsus $P_{em} = M\omega_1$.



Joonis 10.21. Asünkroonmasina pöördemomendi olenevus libistusest mitmesuguste lisatakisti väärtuste puhul rootoriahelas (a) ning momendi ja mehaanilise võimsuse olenevus mootori kiirusest (b)

Jooniselt näeme, et asünkroonmootori poolt arendatav tippvõimsus ei ole samal kiirusel kui maksimummoment ning rootori nullkiirusel ei toimu elektrienergia muundamist mehaaniliseks energiaks ($P_2 = 0$).

Asünkroonmootorite kujundussuunad. Kuni 1970. aastani optimeeriti neid materjalikulu põhjal, sest elektrienergia oli odav. Naftahinna tõusu tõttu 1973. aastal muutusid tähtsaks masinate tööea talitluskulutused (*lifetime operating cost*) ja vähenes paigalduskulutuste osatähtsus. Selle tulemusel hakati pöörama suuremat tähelepanu mootorite kasutegurile.

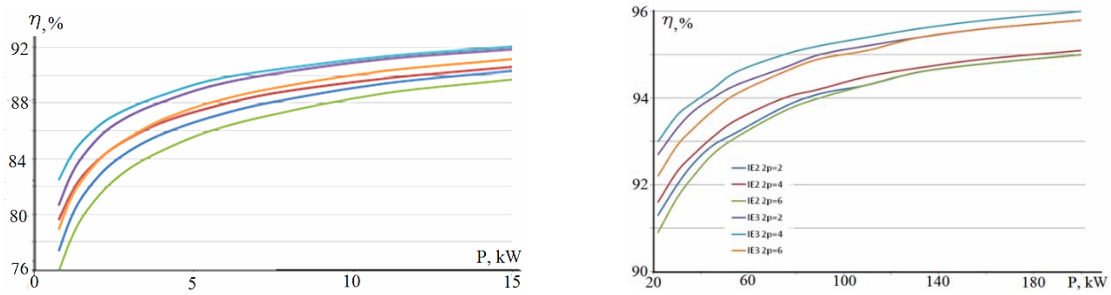
Mootorite kasuteguri tõstmiseks rakendatakse järgmisi võtteid:

- Staatorimähises kasutatakse rohkem vaske, et vähendada kadu mähistes.
- Suurendatakse staatori ja rootori südamiku pikkust, et vähendada masina õhupilus magnetvoo tihedust. Sellega väheneb masina küllastus ning teraseskadu.
- Masina staatoris kasutatakse rohkem terast, paraneb soojusülekanne ja väheneb talitlustemperatuur. Mehaaniliste kadude vähendamiseks saab muuta ventilaatori konstruktsiooni.
- Kasutatakse kvaliteetsemat väiksema hüstereesikaoga terast.
- Pöörisvoolukao vähendamiseks kasutatakse õhemat, suurema sisetakistusega elektrotehnilist terast.
- Rootorit töödeldakse täpsemalt, et saada ühtlane õhupilu ning vähendada lisakadusid.

Euroopa Komisjon väljastas juhised ökoloogilise kujundusdirektiivi rakendamiseks elektrimootoritele. Nende energiatõhususe parendamisvõimalusi hinnatakse 20...100% (*Commission Regulation (EC) No 640/2009 of 22 July 2009*). Euronorm EN 600104-100 määrab kasuteguri klassid (joonis 10.17) kolmefaasilistele 2-, 4- või 6-pooluselistele 50/60 Hz madalpinge (<1000 V) asünkroonmootoritele võimsusega 0,75...375 kW:

- IE4 = määramata kasuteguri klass tulevikutehnikale, nagu püsimagnettehnika,
- IE10 = suure kasuteguri klass (*high efficiency*),
- IE2 = standardne kasuteguri klass, mis ühildub EFF1 nõuetega (*standard efficiency*),
- IE1 = kasuteguri madal klass, mis ühildub EFF2 nõuetega (*low efficiency*).

Ameerika Ühendriikide rahvuslik elektriseadmete tootjate liit NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*) USAs ja Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon IEC (*International Electrotechnical Commission*) Euroopas on liigitanud erinevate mehaaniliste karakteristikutega standardkujundused (*standard designs*). Neid standardkujundusi nimetatakse kujundusklassideks (*design class*), neid tähistatakse tähtedega A, B, jne X, kusjuures erikujundusega mootorid kuuluvad kujundusklassi X.



Joonis 10.22. Asünkroonmasinakasuteguri klassid kolmefaasilistele 2-, 4- või 6-pooluselistele 50/60 Hz madalpinge asünkroonmootoritele

Ameerika Ühendriikide rahvuslikus NEMA standardis võeti kasutusele uus määrang (*rating*), **nimi-kasutegur** (*NEMA nominal efficiency*), mis on kõnealuse mudeli suure hulga mootorite keskmine kasutegur, mis garanteerib seda tüüpi mootorite miinimumkasuteguri (nt nimikasutegur 91,0%, garanteeritud miinimumkasutegur 89,5%).

10.11. Asünkroonmootori käivitamine

Asünkroonmootori **käivitamiseks** nimetatakse tema talitlust ajavahemikul alates võrku lülitamise hetkest kuni nimikiiruse saavutamiseni. Paljudel juhtudel saab asünkroonmootorit käivitada otse võrku lülitamise teel. Kuid kui käivitusvool võib põhjustada lubamatult suure pingelohu toitesüsteemis, siis **otsekäivitus** (*across-the-line starting*) ei ole lubatav. Elektrimootorite käivitust iseloomustavate suurustena kasutatakse käivitusvoolu, käivitusmomenti, käivitusaega, käivituse tõhusust ja ökonoomsust. Lühisrootoriga asünkroonmootorite staatorimähistes käivitusvool I_{1k} on käivitamise alghetkel (kui libistus $s = 1$) nimivoolust I_{1n} 4…7 korda suurem olenevalt mootori nimivõimsusest ja nimipöörlemiskiirusest. Kui vaadata sarnasust trafoga, siis käivitus on trafo lühisele vastav talitlus. Trafol on mähiste elektromagnetiline sidestus tõhusam ja seetõttu lühisvoolu suhe nimivoolu suurem. Suhet $\lambda_I = I_{1k} / I_{1n}$ nimetatakse **käivitusvoolu kordsuseks**. Paigalseisva rootori algkäivitusmomendi M_k ja nimimomendi M_n suhet nimetatakse **käivitusmomendi kordsuseks** $\lambda_k = M_k / M_n$, mis lühisrootoriga asünkroonmootoritel ei tohi standardite kohaselt olla alla 0,7…1,8.

Käivitusviisi valikul on järgmised põhinõuded:

- mootor peab käivitusel arendama küllaldast töömasina takistusmomendist suuremat momenti selleks, et rootor saaks hakata pöörlema ja pöörlemiskiirus saaks suureneda nimipöörlemiskiiruseni;
- käivitusvool peab olema piiratud suuruseni, mis ei põhjusta mootori ohtlikku liigkuumenemist ja ei tekita toitevõrgus lubamatult suuri pingelohkusid;
- käivituslülitus (-elektriskeem) peab olema võimalikult lihtne, töökindel ja odav.

Faasirootoriga mootorite käivitusvoolu saab reguleerida. Selle vähendamiseks lisatakse käivituse ajaks rootori ahelasse lisakäivitustakistus. See takistus vähendab käivitusvoolu ja suurendab käivitusmomenti. Lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitusvool oleneb mootori nimivõimsusest (*rating power*) ja rootoriahela takistusest. Ameerika Ühendriikides kantakse andmesildile vastavalt rahvuslikule *NEMA* standardile mootorite **käivituskoodi täht** (*starting codeletter*), mis määratleb käivitamise näivvõimsuse kilovoltamprid aktiivvõimsuse ühehobujõu või kilovati kohta.

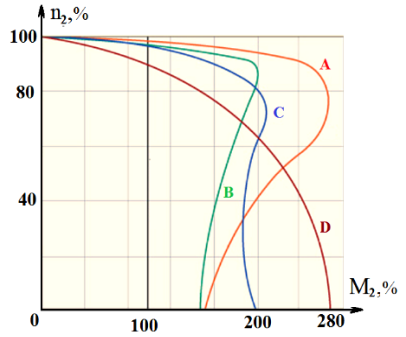
Paigalseisva, pidurdatud rootoriga asünkroonmootori käivitamise näivvõimsuse S_k, kVA ja aktiivvõimsuse (hobujõud) standardi järgi katseliselt määratud suhe S_k / P_n erinevate käivituskoodi tähtedega mootoritele on tabelis 10.1. Võimsuste suhe on mõõdetud nimi toitepinge ja sageduse juures.

Tabel 10.1

Erinevatele käivituskoodi tähtedele vastav võimsuste suhe S_k / P_n

Käivituskoodi täht	S_k / P_n	Käivituskoodi täht	S_k / P_n	Käivituskoodi täht	S_k / P_n
A	0,0…3,15	**G**	5,6…6,3	**N**	11,2…12,5
B	3,15…10,55	**H**	6,3…7,1	**P**	12,5…14,0
C	3,55…4,0	**J**	7,1…8,0	**R**	14,0…16,0
D	4,0…4,5	**K**	8,0…9,0	**S**	16,0…18,0
E	4,5…5,0	**L**	9,0…10,0	**T**	18,0…20,0
F	5,0…5,6	**M**	10,0…11,2	**U**	20,0…22,4
				V	22,4… ja üle

Enamik tavakasutuses olevatest mootoritest vastavad või ületavad B-kujundusega mootoritele ettenähtud S_k/P_n suhte väärtusi. A-kujundusega mootoreid kasutatakse seal, kus on vajalik suur vääratusmoment, nagu survevalu masinatel. C-kujundusega mootoreid kasutatakse seal, kus on vajalik suur käivitusmoment, nagu kaldkonveieri masinatel. D-kujundusega mootoreid, neid nimetatakse ka „kõrglibistusega mootoriks“, kasutatakse tsüklilise koormusega ja tõsteseadmete masinatel, nagu aeglasekäigulised lehtstantsimispressi mootorid ja nafta puuraugu pumba mootorid. Joonisel 10.23 on nelja käivituskoodi tähega (A-; B-; C-; D-kujundusega) asünkroonmootorite mehaaniline karakteristik.



Joonis 10.23. Mootori kiiruse sõltuvus pöördemomendist erinevate käivituskoodi tähtedega asünkroonmootoritel

Väiksema võimsusega asünkroonmootorid vajavad võimsamatest masinatest suuremat käivitamise näivvõimsust. Standardsetel kolmefaasilistel mootoritel on sageli järgmised käivitamise näivvõimsuse (kVA) ja aktiivvõimsuse (hobujõud) suhe (USAs võrdub 1 hobujõud = 0,7457 kW-ga, Euroopas enamasti aga 1 hj = 0,7355 kW-ga):

- Vähem kui 0,74 kW mootoril on käivituskoodi täht L ja S_k/P_n suhte väärtus 9,0...9,99.
- 1,11...1,5 kW mootoril on käivituskoodi täht L või M ja S_k/P_n suhte väärtus 9,0...11,19.
- 2,2 kW mootoril on käivituskoodi täht K ja S_k/P_n suhte väärtus 8,0...8,99.
- 3,7 kW mootoril on käivituskoodi täht J ja S_k/P_n suhte väärtus 7,1...7,99.
- 3,7...7,4 kW mootoril on käivituskoodi täht H ja S_k/P_n suhte väärtus 6,3...7,09.
- Üle 11,1 kW mootoril on käivituskoodi täht G ja S_k/P_n suhte väärtus 5,6...6,29.

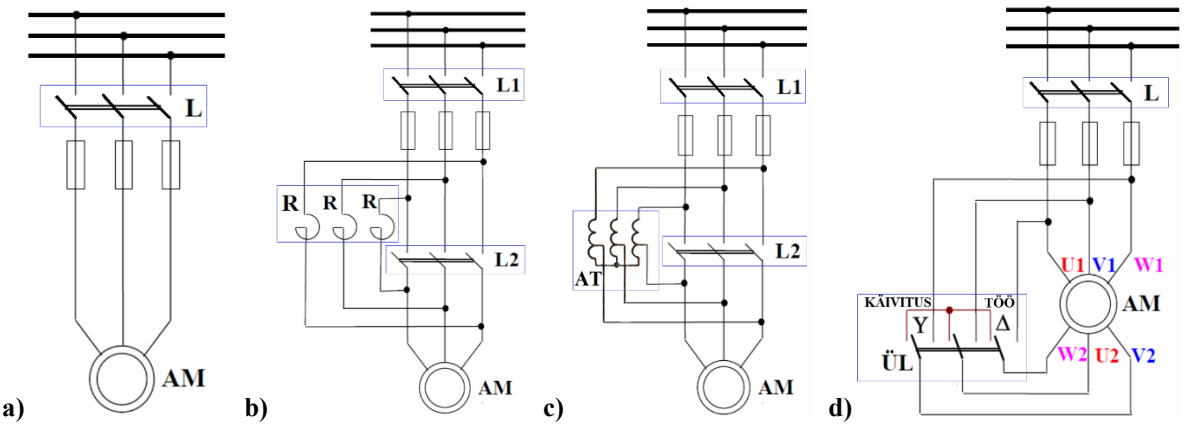
Lühisrootoriga asünkroonmootorid on odavamad ja töökindlamad, aga faasirootoriga asünkroonmootoritest ka lihtsamad teenindada. Seetõttu eelistatakse lühisrootoriga asünkroonmootoreid kõikjal, kus võimalik.

Faasirootoriga asünkroonmootoreid tuleb kasutada neil juhtudel, kui

- töömasina takistusmoment käivitusel on suurem mootori käivitusmomendist, kuid väheneb pöörlemiskiiruse suurenemisel;
- tuleb piirata käivitusvoolu toitevõrgus ja lühisrootoriga asünkroonmootori kasutamine käivitamisega madaldatud pingel ei ole rakendatav käivitusmomendi vähenemise tõttu;
- töömasina pöörlemapandavad hoomassid ja siis ka käivitusaeg on nii suured, et mähisekaost tingitud temperatuuri tõus võib ohustada mähiste isolatsiooni.

Vaatame lühisrootoriga asünkroonmootorite põhilisi käivitusviise. **Käivitamine lülitamisega otse võrku** (*across-the-line starter*) on levinuim meetod selle lihtsuse tõttu. Kogu lülitus (joonis 10.24a) koosneb ühest kolmepooluselisest lülitist (kontaktor või kaitselüliti) ja kaitseseadmetest (kaitselülitid, sulavkaitsmed jt). Käivitusaeg oleneb põhiliselt pöörlemapandavatest hoomassidest. Et käivitusvool I_{1k} on nimivoolust 4…7 korda suurem ja vaseskadu suureneb võrdeliselt voolu ruuduga, siis on maksimaalne käivitusaeg piiratud mähise isolatsiooni lubatud temperatuuriga. Ilmselt ei saa vaadeldavat käivitusmeetodit kasutada väga suurte hoomassidega töömasinate korral. Teisest küljest tekitab voolutõuge käivitusel potentsiaalilangu toitevõrgus. Lühiajaline pingelohk tekitab häiringuid teistele tarbijatele. Tundlikud tarbijad on mõned elektroonika-seadmed ja valgustus, mida toidetakse samast elektrivõrgust. Pinge lubatud kõikumine on 10…15% nimipingest, mis on ka piirav tingimus lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamisel lülitamisega otse võrku. Tööstusettevõtetes on alajaamade ja jaotusvõrkude võimsus harilikult küllalt suur ja peaaegu alati

saab lühisrootoriga asünkroonmootoreid käivitada lülitamisega otse võrku. Väga võimsate jaotusseadmete korral on nii võimalik käivitada isegi ühe- kuni kahemegavatise nimivõimsusega asünkroonmootoreid.



Joonis 10.24. Lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamine: a – lülitamisega otse võrku, b – käivitamine käivitusreaktoriga, c – käivitamine autotrafoga, d – faasirootoriga asünkroonmootori käivitamine staatorimähise $Y \rightarrow \Delta$ ümberlülitamisega

Tavaliselt tagab käivitusahel järgmised kaitsed: lühisekaitse (*short-circuit protection*) sulavkaitsete abil; liigkoormuskaitse (*overload protection*) ja alapingekaitse (*undervoltage protection*), mille tagab kaitselüliti.

Käivitusprobleemi leevendab parendatud käivitusomadustega lühisrootoriga asünkroonmootorite tootmine. Nendel on väiksem käivitusvoolu kordsus $\lambda_I = 3{,}0\ldots5{,}0$ ja käivitusmomendi kordsus $\lambda_k = 1{,}0\ldots3{,}0$. Suurem käivitusmoment ja sellega kaasnev käivitusvoolu vähenemine on saavutatavad rootori lühismähise eritakistuse suurendamisega, mille tagajärjel suureneb ka mootori nimilibistus – mehaaniline karakteristik on pehmem. Selle eesmärgi saavutamiseks valmistatakse erilahendusega, näiteks sügav- ja kaksikuuretega (joonis 10.7) rootoriga asünkroonmootoreid. Sarnaste meetmetega saavutatakse käivituseks sobivamad mehaanilised karakteristikud (joonis 10.21 ja 10.22), mis võimaldavad tavaoludes kasutada käivitamist lülitamisega otse võrku.

Kui käivitusel on toitevõrgus tekkiv pingelohk lubatust suurem, siis ei saa lühisrootoriga asünkroonmootorit otse võrku lülitada. Sel juhul kasutatakse teisi käivitusmeetodeid, mis rajanevad käivitusel madalamal mootori toitepingel. Kasutatakse käivitust käivitusreaktori (joonis 10.24b) ja autotrafo (joonis 10.24c) kaudu. Reaktoriga lülituse korral (joonis 10.24b) tuleb kõigepealt sisse lülitada lüliti *L1*, lülitit *L2* esialgu sisse ei lülitata. Mootorile rakendatakse võrgu toitepingest reaktori potentsiaalilangu võrra väiksem pinge ja mootor käivitub, käivitusvool hakkab vähenema. Seejärel lülitatakse sisse reaktoreid sildav lüliti *L2*, staatorimähisele rakendub võrgutäispinge. Käivitus jätkub kuni nimikiiruse saavutamiseni.

Sarnaselt toimub ka lühisrootoriga asünkroonmootori käivitus läbi autotrafo (joonis 10.24c).

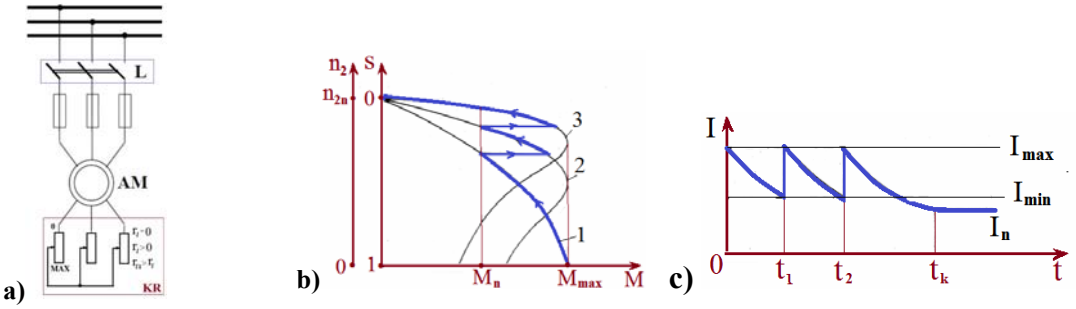
Kuna mootori moment on võrdeline staatorimähise pinge ruuduga, siis väheneb ka käivitusmoment. See asjaolu on nimetatud käivitusmooduse põhipuuduseks. Järelikult saab käivitust madaldatud pingel rakendada vaid mootori tühijooksul või vähendatud koormuse puhul.

Joonise 10.21 mehaanilistest karakteristikutest näeme, et need olenevad rootori takistusest. Kui rootori takistus on suur, siis on mootori käivitusmoment ka suur, kuid tavatalitlusel on siis suur libistus. Suur libistus tähendab mehaaniliseks energiaks muundatava osa vähenemist ja soojusenergia osa suurenemist (rootorikadu $p_2 = sP_{12}$) ning madalamat kasutegurit. Väikese takistuse korral on olukord vastupidine. Masina kujundaja peab leidma kompromissi käivitusmomendi ja kasuteguri vahel.

Üheks probleemi lahenduseks on faasirootori kasutamine ning käivitamisel lisatakistuse viimine rootori ahelasse. Pärast käivitamist tuleb lisatakistus ahelast välja lülitada, et tavatalitluse kasutegur oleks suur. Kahjuks on faasirootoriga mootorid palju kallimad ning võrreldes lühisrootoriga mootoritega vajavad hooldust ja palju keerukamat automaatjuhtimist.

Teiseks on lühisrootoriga mootoritel vaja suurt rootori takistust käivitusel ja väikest takistust tavatalitlusel. See on võimalik, kui kasutada muutuva puisteinduktiivtakistusega asünkroonmootori rootori kujundust, nagu see oli joonisel 10.7.

Faasirootoriga asünkroonmootorite käivitus toimub käivitusreostaadiga *KR* joonisel 10.25a esitatud skeemi kohaselt.



Joonis 10.25. Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamine: 1 ja 2 – reostaat-, 3 – loomulik karakteristik. a – käivitusskeem, b – käivituskarakteristikud, c – staatorivoolu muutumine käivitusel

Käivitusreostaat on rootoriahelasse lülitatud kolmefaasiline takisti, mis on mõeldud vaid lühiajaliseks tööks. Käivituse alghetkeks ($n_2 = 0$) võime käivitusreostaadi talitluse r_l valida nii, et rootoriahela ühe faasi taandatud takistus $r'_2 = r'_2 + r'_{l1}$ viib vääratuslibistuse kooskõlas valemiga (10.46) väärtuseni $s_v = 1$ (kõver 1 joonisel 10.25b), mis vastab käivitusmomendile $M_k = M_{max}$. Samaaegselt väheneb vool rootoriahelas (joonis 10.25c) ja ka toitevõrgust võetav vool. Rootori pöörlemiskiiruse suurenedes vähendatakse astmeliselt käivitusreostaadi takistust – toimub üleminek **reostaatkarakteristikult** 1 uuele reostaatkarakteristikule 2 kuni väärtuseni $r_l = 0$, mil rootoriahel on lühistatud. Siis $R'_2 = r'_2$ ja seega oleme üle läinud **loomulikule** mehaanilisele karakteristikule 3. Vool on käivitusaja t_k lõpuks saavutanud nimiväärtuse I_n (joonis 10.25c). Käivitusreostaadi astmete arv ja nende takistuse suurus valitakse momendi või voolu järgi. Kui piiravaks tingimuseks on näiteks vool toitevõrgus, siis antakse ette maksimaalne lubatav vool I_{max} (joonis 10.19c) ja optimaalse käivitusaja järgi $I_{min} > I_n$, mille alusel arvutatakse vajalikud astme takistused r_l.

10.12. Asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse reguleerimine (*speed control*)

Asünkroonmootori rootori pöörlemiskiiruse reguleerimisvõimalused tulenevad seosest

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p}(1 - s),$$

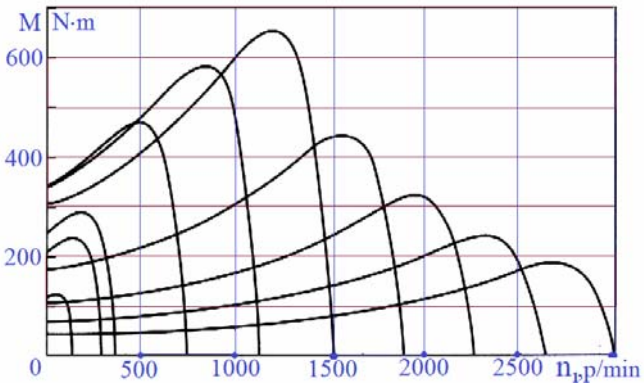
seega saab reguleerida toitepinge sageduse, poolusepaaride arvu või libistuse muutmise teel.

Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine rootori takistuse muutmise teel. Asünkroonmootorite kiirus muutub töö ajal vähe. Tavatalitlusel on libistus alla 5%. Selleks et libistust suurendada, lülitatakse lisatakistus rootoriahelasse. Siis väheneb mootori kasutegur tunduvalt, kuna rootori vaseskaod on võrdelised libistusega. Nii on võimalik muuta ainult faasirootoriga asünkroonmootorite kiirust. Seejuures väheneb pöörlemiskiirus lisatakistuse suurendamisel üksnes koormatud mootori korral. Mehaanilised karakteristikud on sarnased joonistel 10.16a ja 10.19b esitatud käivituse reostaatkarakteristikutega. Sellisel kiiruse muutumisel peavad aga lisatakistused olema arvutatud pidevaks tööks. Seega ei sobi käivitusreostaati selleks otstarbeks kasutada. Energeetilisest seisukohast lähtudes on selline pöörlemiskiiruse muutumine ebamajanduslik. Väikesel pöörlemiskiirusel halvenevad mootori jahutustingimused, kuid siiski on võimalik pöörlemiskiirust muuta sujuvalt nimikiirusest allapoole piirides $n_n \ldots 0{,}7\, n_1$. Kasuteguri vähenemise tõttu kasutatakse seda viisi vaid kiiruse lühiajaliseks muutmiseks.

Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine toitepingesageduse muutmise teel. Muutes toitepinge sagedust, muutub pöördmagnetvälja sünkroonkiirus. Selleks et hoida magneetimisvool konstantsena, tuleb reguleerida

staatorimähise toitepinget võrdeliselt sagedusega, vastasel juhul võib mootori magnetahel küllastuda. Sageduse ja pinge muutmiseks kasutatakse tänapäeval erinevaid **pooljuhtsagedusmuundureid** (*solid-state frequency converters*).

Lühisrootoriga asünkroonmootori pöörlemiskiiruse muutmine staatoripinge sageduse f_1 ja samaaegselt ka pinge muutmise teel võimaldab sujuvalt muuta pöörlemiskiirust suhteliselt suurtes piirides. Joonisel 10.26 on esitatud asünkroonmootori mehaanilised karakteristikud mootori nimikiirusel (1500 p/min) alla ja üle selle. Töö korral alla nimisagedust eeldatakse, et toitepinget vähendatakse võrdeliselt sagedusega, tööl üle nimisageduse hoitakse toitepinge konstantne.

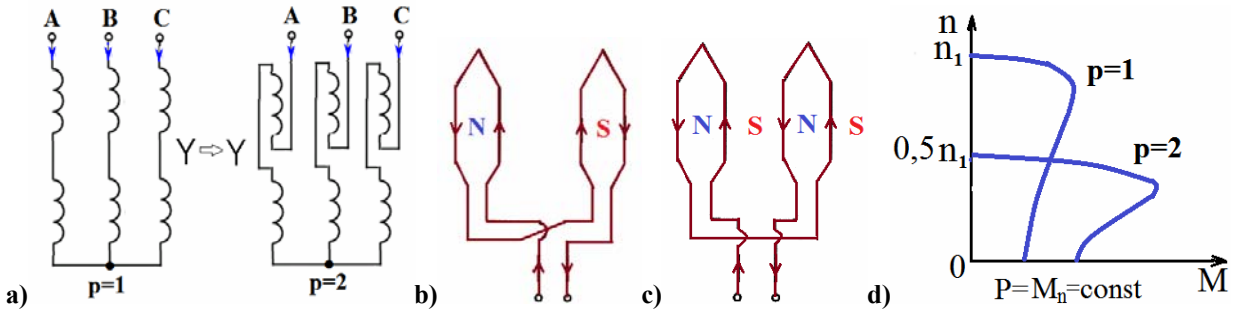


Joonis 10.26. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine sagedusmuunduriga. Mehaanilised karakteristikud kiirustel alla, üle ja mootori nimikiirusel (1500 p/min)

Sageduse sujuv reguleerimine sagedusmuunduriga on viimase kalli hinna tõttu piiratud kasutusega. See on reguleerimisviis majanduslikult õigustatud siis, kui üheaegselt on vaja muuta terve rühma mootorite pöörlemiskiirust.

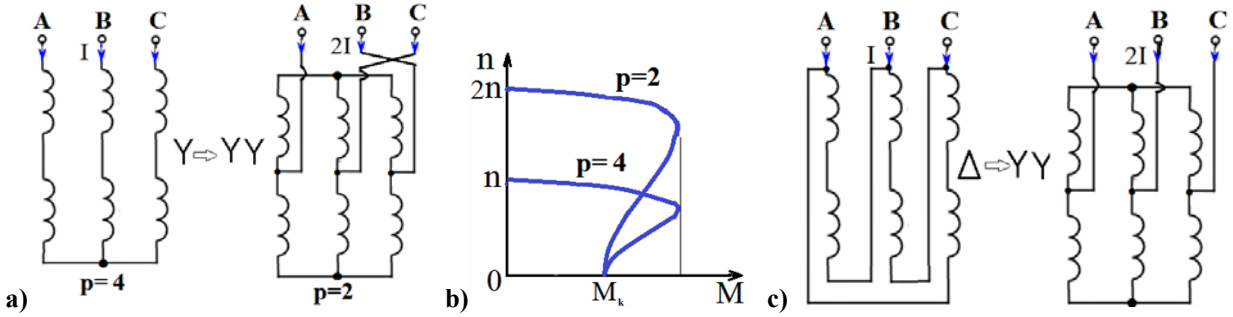
Asünkroonmootorite kiiruse reguleerimine pooluste ümberlülitamise teel. Lühisrootoriga asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse astmeline muutmine on võimalik poolusepaaride arvu muutmise teel, mis osutub võimalikuks staatorimähise sektsioonide vastava ümberlülitamisega. Mitmekiiruselistest mootoritest on kõige enam levinud kahekiiruselised mootorid, kusjuures üleminek teisele sünkroonkiirusele võib toimuda konstantsel võimsusel või konstantsel momendil.

Poolirühmade ümberlülitamisel tähtlülitusest tähtlülitusse saab joonise 10.27a skeemi järgi poolusepaaride arvu kaks korda suurendada. Selleks muudetakse igas faasis ühe poolirühma lülitust, nagu seda on kujutatud joonisel 10.27b ja c. Joonisel c suundub mõlema poolirühma magnetvoog põhjapooluselt läbi õhupilu, rootori, õhupilu poolirühmade vahel moodustuvale lõunapoolusele staatoril. Lõunapooluseid nimetatakse **kaaspoolusteks** (*consequent poles*), ja nii muutub algne kahepooluseline mähis neljapooluseliseks. Selle tulemusena väheneb rootori pöörlemiskiirus kaks korda. Kuna vool sellise ümberlülituse tulemusena ei muutu, jääb ka võimsus samaks ja järelikult suureneb moment kaks korda. Poolusepaaride arvule vastavad mehaanilised karakteristikud on joonisel 10.27d.



Joonis 10.27. Asünkroonmootori kiiruse muutmine konstantsel võimsusel. Poolirühmade ümberlülitamine tähtlülitusest tähtlülitusse (a). Ühe faasi mähise pooluste arvu kahekordistamise idee (b ja c). Mootori mehaanilised karakteristikud konstantsel võimsusel (d)

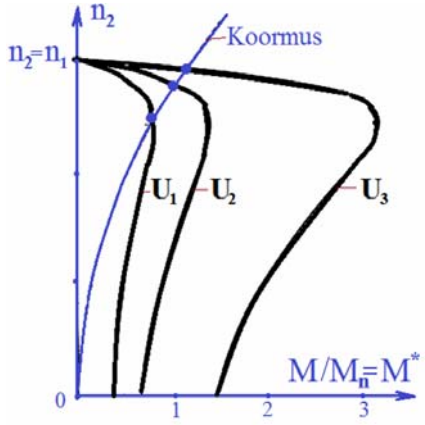
Poolirühmade ümberlülitamisel tähtlülitusest kahekordsesse tähtlülitusse (joonis 10.28a) väheneb poolusepaaride arv kaks korda, mille tulemusena pöörlemiskiirus suureneb kaks korda. Toitevool, seega ka võimsus, suurenevad samuti kaks korda. Järelikult mootori moment ei muutu. Poolusepaaride arvule vastavad mehaanilised karakteristikud on joonisel 10.28b.



Joonis 10.28. Asünkroonmootori kiiruse muutmine konstantsel momendil. Poolirühmade ümberlülitamine tähtlülitusest kahekordsesse tähtlülitusse ja pooluste arvu kahekordne vähendamine (a). Mootori mehaanilised karakteristikud konstantsel momendil (b). Ümberlülitamine kolmnurklülitusest kahekordsesse tähtlülitusse (c)

Laialdast kasutamist leiab ka asünkroonmootori kiiruse muutmine poolirühmade ümberlülitamisega kolmnurklülitusest kahekordsesse tähtlülitusse (joonis 10.28c). Praktikas on rohkem levinud ümberlülitused ühekordsest tähest kahekordsesse tähte ja kolmnurklülitusest kahekordsesse tähtlülitusse. Viimase ümberlülituse korral muutuvad võimsus ja moment 15%. Toodetakse kahe-, kolme- ja neljakiiruselisi mootoreid. Näiteks on neljakiiruselisel kaks sõltumatut mähist. Erinevate kiiruste tarbeks lülitatakse ringi kuut ja nelja poolirühma igas faasis, saades sünkroonkiirusteks 500/750/1000/1500 pööret minutis. Poolirühmade ümberlülitamist juhib regulaator (kontroller).

Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine staatorimähise toitepinge muutmise teel. Mootori moment on võrdeline toitepinge ruuduga. Sellisele reguleerimisega kaasneb järsk vääratus- ja käivitusmomendi vähenemine, sest $M \equiv U^2$ (joonis 10.29). Siin $U_1 < U_2 < U_3$ ja $M^* = \dfrac{M}{M_n}$ on mootori suhteline moment.



Joonis 10.29. Asünkroonmootori kiiruse reguleerimine toitepinge muutmisega

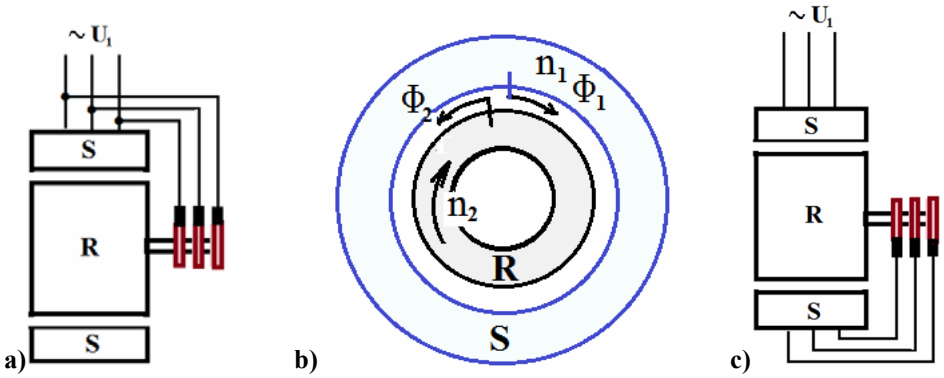
Seda kasutatakse põhiliselt väikeste ajamite korral ventilaatorite kiiruse reguleerimiseks kitsastes piirides sünkroonkiirusest allapoole. Muutumatu koormusmomendi korral kasutatakse staatori toitepinge vähendamiseks reguleeritavat induktiivpooli, oomtakistit, võimsate mootorite puhul autotrafot.

10.13. Kahepoolse toitega asünkroongeneraator

Kui panna asünkroonmootor pöörlema faasirootoriga (*wound rotor*) mingi ajami abil sünkroonkiirusest suurema kiirusega, siis muutub momendi märk ja masin toimib generaatorina. Generaatori poolt antav võimsus oleneb võllile rakendatud momendist. Ka generaatoril on momendi maksimumväärtus, mida nimetatakse generaatori **vääratusmomendiks** (*pushover torque*). Kui primaarajami moment ületab selle väärtuse, siis tekkib generaatori **liigkiirus** (*overspeed*). Asünkroonmasina mehaaniline karakteristik on

esitatud joonisel 10.20, millel on näidatud generaatori tööpiirkond. Generaatori vääratusmoment on suurem mootori vääratusmomendist (*pullout torque*).

Tööpõhimõtte selgitamiseks vaatleme kahepoolse toitega asünkroonmasina staatori S ja rootori R lihtsustatud kujutist joonisel 10.30. Eeldame, et kolmefaasiline staatorimähis loob pöördmagnetvälja Φ_1, mille sünkroonkiirus on n_1 ja väli pöörleb päripäeva (joonis 10.30b). Kontaktrõngaste abil ühendame rootorimähise toiteallikaga nii, et rootori pöördväli Φ_2 pöörleb mähiste suhtes vastupäeva.



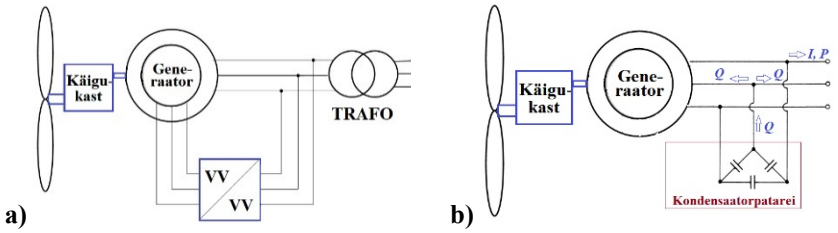
Joonis 10.30. Kahepoolse toitega asünkroonmasin: a – staatori ja rootorimähiste rööptalitlus, b – nende pöördväljade ja rootori pöörlemissuunad, c – staatori ja rootorimähiste jadalülitus

Sellisel masinal on kaks võimaliku talitlusviisi. Esimese puhul rootor seisab ja $n_2 = 0$. Siin pöörlevad väljad Φ_1 ja Φ_2 teineteise suhtes vastassuunas ja masin pöördemomenti ei arenda. Masin kujutab endast reguleeritavat induktiivtakistust, mille suurust saab muuta rootori asendi muutmisega. Teise talitlusviisi korral pannakse rootor pöörlema mingi abiajamiga Φ_2-le vastupidises suunas kiirusega n_2, mis on võrdne staatori pöördvälja kahekordse pöörlemissagedusega. Seega, $n_2 = 2n_1$. Siis, arvestades rootori pöörlemist ja suunda, pöörleb magnetväli Φ_2 staatoriväljaga Φ_1 päripäeva samas suunas sama kiirusega.

Kui rootorit ajab nendel tingimustel ringi mingi ajam, siis staatorimähistes indutseeritakse allikasisepinged, mis on veidi suuremad toiteallika vastavatest pingetest ja masin hakkab tööle generaatorina. Kui rootorit pidurdatakse mingi koormusmomendiga, siis masin hakkab tööle mootorina. Seejuures pöörleb masina rootor koormusest sõltumata muutumatu kiirusega. Niisiis käitub kahepoolse toitega asünkroonmasin nagu sünkroonmasin.

Joonisel 10.30a vaadeldud rööptalitluse asemel võib kasutada ka joonisel 10.24c kujutatud jadalülitust. Kui masinat koormata üle vääratusmomendi, siis masin kukub „sünkronismist“ välja ja seiskub. See on masina suur puudus. Teiseks puuduseks on rootori kalduvus „võnkumistele“. Seepärast neid masinaid praktikas ei kasutata. Kahepoolse toitega asünkroonmasin ei suuda iseseisvalt kahekordse sünkroonkiiruseni käivituda ja vajab selleks abiseadet. Käitamiseks on ka teine viis. Käivitamiseks võib rootori ühendada sagedusmuunduri kaudu, mis muudab toitepingesagedust sujuvalt nullist kahekordse võrgupinge sageduseni. Siis arendab rootor järjepidevalt kiirust kuni kahekordse sünkroonkiiruseni. Seejärel võib kontaktrõngad ühendada otse toitevõrguga. Kui masinat koormata, siis rootori magnetvälja telg jääb staatori ja rootori liitmagnetvälja teljest teatud nurga võrra maha, generaatori talitluses aga edestab seda.

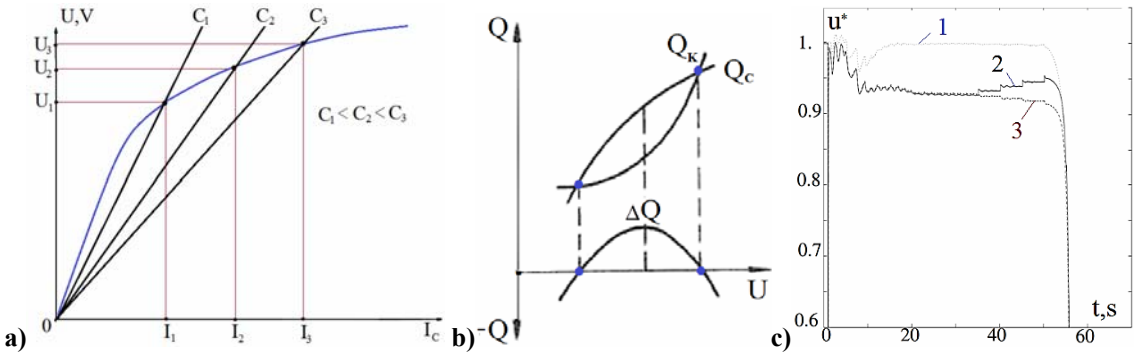
Tänapäeval kasutatakse kahepoolse toitega asünkroongeneraatoreid põhiliselt **tuulegeneraatoritena**. Et saavutada väljundis 50 Hz sagedust, toidetakse tuulegeneraatoris generaatori rootorit läbi sagedusmuunduri (joonis 10.31a) sellise sagedusega, mis on võrdne võrgu sageduse ja võlli pöörlemissageduse vahega. Sel juhul on vaheldi (sagedusmuunduri) võimsus väiksem generaatori väljundvõimsusest. Tänapäeval on muundur IGBT transistoridel, varem türistortehnikal. Seega on kahepoolse toitega asünkroontuule-generaatoril staatori- ja rootorimähisel eraldi toide. Seejuures on toitepingete sageduste summa või vahe generaatori võlli pöörlemissageduskordne. Näiteks kui staatori mähis on ühenduses 50 Hz võrguga, kuid rootori mähisel on 10 Hz toide, siis kahepooluselise masina rootori pöörlemissagedus on olenevalt rootori faaside järjestusest kas 40 või 60 pööret sekundis. Need masinad võivad töötada nii generaatorina kui ka mootorina.



Joonis 10.31. Kahepoolse toitega (a) ja eraldiseisva (b) asünkroongeneraatori lülitus

Asünkroonmasinal ei ole ergutusahelat ja asünkroongeneraator ei saa genereerida reaktiivvõimsust. Vajaliku magnetvälja tekitamiseks tarbib ta reaktiivvõimsust: selleks tuleb temaga ühendada väline reaktiivvõimsuse allikas. See väline reaktiivvõimsuse allikas reguleerib ka generaatori väljundpinget. Generaatori väljundpinge peab olema kooskõlas võrgu pingega. Tänu rootoriahela toitepinge sageduse reguleerimisele ei pea tema kiirus olema konstantne. Niipea kui masina kiirus tõuseb üle sünkroonkiiruse väärtuse, ühendatakse ta võrguga ning toimib generaatorina. Ta ei vaja keerukat regulaatorit. Võimsusteguri korrektsiooniks kasutatakse kondensaatoreid.

Eraldi (autonoomselt) töötav asünkroongeneraator. Joonisel 10.31b on eraldi töötav asünkroon-generaator, millel on reaktiivvõimsuse allikaks kondensaatorpatarei. Generaatori endaergutus toimub jääkmagnetismi (*residual magnetism*) mõjul. Tema pinge oleneb koormusest, eriti reaktiivkoormusest. Induktiivse koormuse korral (joonis 10.32a) tuleb kondensaatorpatareist katta ka koormusele vajalik reaktiivvõimsus. Koormusvoolude I_1, I_2 ja I_3 kompenseerimiseks vajalik kondensaatorite võimsus kasvab $C_1 < C_2 < C_3$. Mittepiisava kondensaatorite võimsuse korral (joonis 10.32b) võib tekkida pingekollaps = **pinge äkklangus (kokkuvarisemine** ingl k *voltage collapse*). See tähendab, et koormuse ja generaatori poolt tarbitava reaktiivvõimsuse väärtus saavutab kriitilise väärtuse Q_K ning muutub suuremaks kondensaatori Q_C omast. Pinge kokkuvarisemisega (joonis 10.32c) kaasneb ka koormuse järsk ärakukkumine.



Joonis 10.32. Reaktiivkoormuse kriitilise kasvuga (b) kaasnev pinge äkklangus (kokkuvarisemine ehk kollaps); (c) 1 – generaatoripinge, 2 – trafo koormusepoolne pinge, 3 – trafo võrgupoolne pinge

Joonis 10.32a sobib ka eralditöötava asünkroongeneraatori tühijooksu väljundpinge määramiseks. Kandes generaatori ja kondensaatori voltamperkõverad ühele ja samale teljestikule, saame, et nende kahe kõvera lõikepunkt on punkt, milles generaatori ergutusvälja loomiseks vajatav reaktiivvõimsus on võrdne kondensaatori poolt antavaga, ja see punkt vastab generaatori tühijooksu väljundpingele. Suurema mahtuvuse C_3 puhul on tühijooksupinge kõrgem.

Kahepoolse toitega asünkroonmasin ühildab asünkroon- ja sünkroonmasina **eelised:**

- Muutuva pöörlemissagedusega talitlus. Masin on ainulaadne, sest võimalik on 50 Hz toite korral rootori töö kahekordsel pöörlemissagedusel 6000 p/min. Selle tulemusel saadakse samade gabariitide, magnetvoo ja pöördemomendi väärtuste korral kahekordset võimsust. Seega on iga kW hind väiksem, kasutegur ja võimsustihedus aga suurem.
- Aktiiv- ja reaktiivvõimsuse sõltumatu reguleerimine.
- Kasutada saab poole nimivõimsusega muundurit, millel on täisvõimsusega muundurist väiksemad kaod.

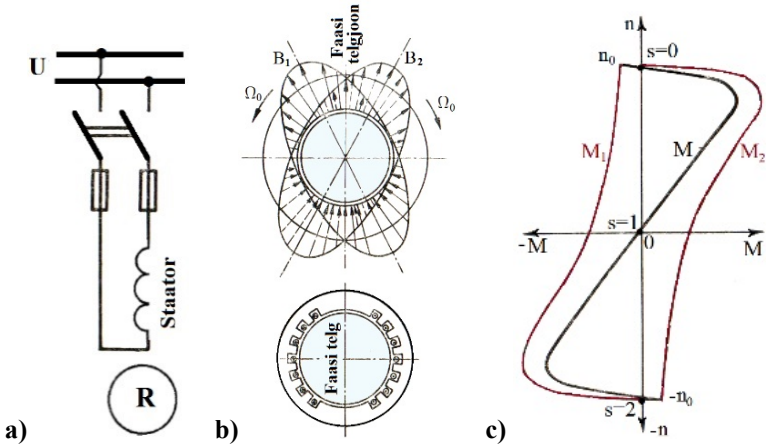
- Generaatori staatori ja rootori mähiste lülitamisel jadalülitusse saab kahekordistada generaatori pinget.

Puudused:

- Nad on tundlikud võrguhäiringute suhtes. Sarnaselt sünkroonmasinatega esineb neil rootori võnkumist, mis võib põhjustada sünkronismist väljalangemist.
- Kontaktrõngaste olemasolu. Võrreldes sünkroonmasinatega on nende rootoriahelasse antav võimsus kuni pool nimivõimsusest, sünkroonmasinatel aga 1...5%. Vajalik võimsus on ligikaudu võrdeline rootori toitepinge sagedusega. Viimast puudust õnnestub vähendada kontaktivabades kahepoolse toitega masinates.

10.14. Ühefaasiline asünkroonmootor

Ühefaasilisi asünkroonmootoreid kasutatakse seal, kus puudub kolmefaasiline toitesüsteem ja vajadus nende kiiruse reguleerimiseks. Need on erinevad olmeriistad: külmikud, õmblus- ja pesumasinad, ventilaatorid, pumbad. Tavaliselt valmistatakse neid võimsuseni 600…1500 W, pingele 230 V. Nende põhipuudus on suhteliselt väike kasu- ja võimsustegur ($\eta = 22...70\%$, $\cos\varphi = 0{,}6...0{,}77$). Ühefaasiline asünkroonmootor erineb kolmefaasilisest eelkõige selle poolest, et tal puudub loomulik käivitusmoment. Ühefaasilise mootori staatori ühefaasiline vool I tekitab pulseeriva välja, mida võib vaadelda kui kaht ühesuguse amplituudiga välja (joonis 10.33b), mis pöörlevad teineteise suhtes vastassuunas kiirusega $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$. Sünkroonkiirus on $n_1 = \frac{f_1}{p}$. See sarnaneb ühise rootori ja kahe staatoriga kolmefaasilisele asünkroonmootoriga, mille mähised saavad toidet samast võrgust erineva faaside järjestusega. Liites kahe staatori mehaanilised karakteristikud (joonis 10,33c), näeme, et paigalseisul võrdub momentide summa nulliga. Kui rootorit pöörata mingis suunas, siis hakkab ta arendama samasuunalist momenti ja saavutab lõpuks püsikiiruse.

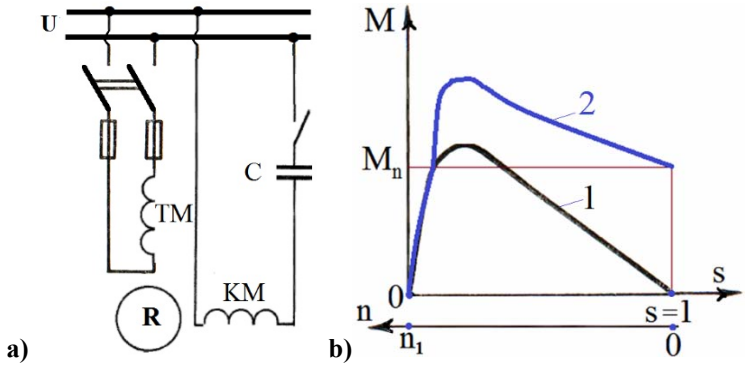


Joonis 10.33. Käivitusmähiseta ühefaasiline asünkroonmootor (a), pulseeruv väli, mida saab vaadelda kahe teineteisele vastassuunas pöörleva pöördväljana (b)

Iseseisvaks käivitumiseks on vaja staatoril tekitada kas või lühiajaliselt pöördmagnetväli. Siis mootor hakkab arendama momenti. Pöördmagnetvälja tekitamiseks on mitu võimalust.

Käivitusmähisega ühefaasiline asünkroonmootor. Käivitusmähisega asünkroonmootoris (joonis 10.34) on lisaks staatori töömähisele TM veel käivitusmähis KM, mille telg on töömähise telje suhtes nihutatud 90 elektrilise kraadi võrra. Selle mähisega on jadamisi magnetvoo faasis nihutamiseks ühendatud kondensaator C. Mõlemad mähised tekitavad pulseeriva magnetvälja. Nende vastasfaasis olevad tagasisuuna väljad kompenseeruvad vastastikku, aga pärisuuna väljad liituvad (joonis 10.34b). Nii tekkib pöördmagnetväli. Joonisel b on käivitustunnusjoon mootorile käivitusmähiseta (1) ja käivitusmähisega (2) mootorile. Faasinihutuselemendina saab kondensaatori asemel kasutada ka induktiiv- või oomtakistit. Kui töö- ja käivitusmähiste voolud on nihutatud vähem kui 90 elektrilise kraadi võrra, siis nende liitväli sisaldab nii pulseerivat kui ka pöördmagnetvälja. Kuna väli pöörleb ja pulseerib, siis mootori pöördemoment

väheneb. Parima tulemuse annab kondensaatori kasutamine. Siis käivitusmoment (joonis 10.34b) on 1,6...2 korda nimimomendist suurem.

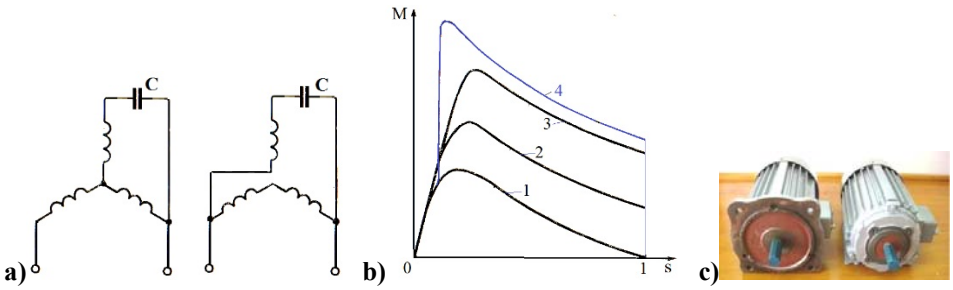


Joonis 10.34. Käivitusmähisega ühefaasiline asünkroonmootor (a) ja tema käivituskarakteristik (b). 1 – käivitusmähiseta ja 2 – käivitusmähisega mootori käivituskarakteristik

Mootori pöörlemissuuna muutmiseks tuleb kas töö- või käivitusmähises muuta voolu suunda. Ehituslikult hõivab käivitusmähis 1/3 ja töömähis 2/3 staatori uurdeid. Pärast käivitamist lülitatakse käivitusmähis välja automaatselt või käsitsi.

Kondensaator suurendab mootori massi ja mõõtmeid ning võib tekitada toitepinge moonutusi, mis võib halvendada tundlike elektroonikalülituste tööd.

Kui kasutada kolmefaasilist asünkroonmasinat tööks ühefaasilises võrgus, siis kaks faasimähist ühendatakse järjestikku ja nad moodustavad töömähise. Kolmandaga ühendatakse jadamisi suhteliselt võimas kondensaator ja see moodustab käivitusmähise. Kolmefaasilisega võrreldes väheneb mootori võimsus ligikaudu 30%. Toodetakse ka universaalseid lühisrootoriga asünkroonmootoreid, mida ühefaasiliste toitevõrkude korral kasutatakse kondensaatormootorina. Joonisel 10.35a on näidatud kondensaatori lülitusviisid ja joonisel 10.35b iseloomulikud mehaanilised karakteristikud.

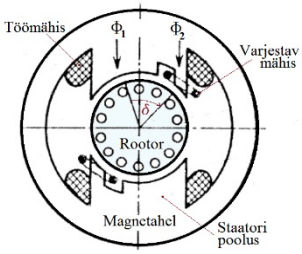


Joonis 10.35. Kolme- ja ühefaasiline universaalne asünkroonmootor. Kondensaatori lülitusviisid (a) ja mehaanilised karakteristikud (b): 1 – ühefaasiline mootor ilma faasinihke elemendita, 2 – ühefaasiline mootor kondensaatoriga, 3 – kolmefaasiline lülitus, 4 – käivituskondensaatoriga ühefaasiline talitlus

Kondensaatormootor. Mootor erineb eespool vaadeldust selle poolest, et pärast käivitamist kondensaatorit välja ei lülitata. Kondensaator arvestatakse pikaajalise töö tarbeks. Sel juhul on töö ja käivitusmähised võrdsed ja paiknevad võrdses arvus staatori uuretes. Mootor töötab pöördväljaga ja läheneb oma omadustelt kolmefaasilisele asünkroonmasinale. Käivitusmomendi suurendamiseks lülitatakse töökondensaatorile rööbiti täiendav võimas käivituskondensaator.

Lõhestatud väljepoolustega mootor. Mootor koosneb väljepoolustega staatorist ja lühisrootorist. Niisuguses mootoris saavutatakse magnetvoogude faasinihe lühistatud abimähisega, mis on paigutatud staatori lõhestatud pooluseotsale. Varjestatud ja varjestamata poolusteosades aheldusvoo ajalise erinevuse tõttu on magnetvood Φ_1 ja Φ_2 teineteise suhtes faasis nihutatud nihkenurga δ võrra (joonis 10.36). See nurk on väiksem kui 90°. Nurga väärtus oleneb Φ_1 ja Φ_2 suhtest. Tekib elliptiline pöördmagnetväli, mis loob pöördemomendi koos rootori lühismähises indutseeritud allikapinge poolt põhjustatud voolu magnetvooga.

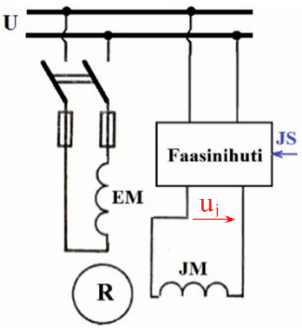
Niisugune mootor on kondensaatormootorist lihtsam ja töökindlam. Ta teeb vähem müra, sest staatoril pole uurdeid. Puudustena tuleb nimetada väikest kasutegurit (kadude tõttu varjestavas lühismähises) tavaliselt $\eta = 25...40\%$ ja väikest võimsustegurit $\cos\varphi = 0{,}4...0{,}6$. Käivitusmoment pole samuti eriti suur.



Joonis 10.36. Lõhestatud väljepoolustega ühefaasiline asünkroonmootor

10.15. Kahefaasiline asünkroonmootor

Automaatjuhtimissüsteemides on täiturmootorina (servomootorina) kasutusel põhiliselt väikesed kahefaasilised asünkroonmootorid, mis muundavad juhtsignaali võrdeliseks mehaaniliseks liikumiseks. Mootorid on lihtsad ja töökindlad, seetõttu automaatikas laialdaselt kasutusel. Staatorimähiseid on kaks (joonis 10.37): ergutus EM ja juhtimismähis JM. Mähised on ruumis nihutatud 90°. Mähistel on erinev keerdude arv, nimipinged ja -voolud, kuid nimivõimsused on samad. Rootor on lühisrootor. Pöördmagnetväli tekkib nagu ühefaasilises käivitusmähisega masinas tänu ergutus- ja juhtmähise (tüürmähise) voolu faasinihkele.



Joonis 10.37. Kahefaasiline asünkroonmootor. EM – ergutusmähis, JM – juhtmähis

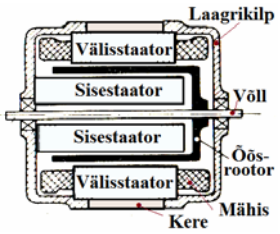
Üks mähis – ergutusmähis EM – töötab konstantsel võrgupingel U, teine – juhtmähis JM – töötab pingel U_j, mille suurust või faasi juhtsignaaliga JS muudetakse.

Täiturmootorile esitatakse järgmisi nõudeid:

- vabakäigu puudumine, st toitepinge kadumisel peab mootor ise pidurduma ja seiskuma;
- stabiilne töö mis tahes kiirusel;
- pöörlemiskiiruse muutumine tüürpinge suuruse või faasi muutudes;
- suur käivitusmoment;
- väike tüürvõimsus;
- suur toimekiirus;
- töökindlus;
- väike mass ja mõõtmed.

Õõsrootoriga mootor. Mittemagnetilise õõsrootoriga mootoril (joonis 10.38) on õhukeseseinaline (0,2…1 mm) alumiiniumrootor. Rootoril on väike inerts ja suur elektriline takistus. Erinevalt teistest mootoritest pöörleb õõsrootor kahe staatori vahel. Need on välisstaator ja sisestaator. Sisestaator on uureteta, mähis on välisstaatoril. Tööpõhimõtte ja välisstaatori ehitus on sama mis kahefaasilisel lühisrootoriga asünkroonmootoril.

Õõsrootori väikese massi tõttu on väike ka rootori inertsimoment. Lihtsa ehituse, sujuva ja müratu pöörlemise ning raadiohäiringute puudumise tõttu on õõsrootoriga mootorid laialt levinud väikese võimsusega seadmetes.



Joonis 10.38. Õõsrootoriga mootor

10.16. Kordamisküsimused

1. Pöördmagnetvälja tekitamise viisid.
2. Asünkroonmootori otstarve, ehitus ja tööpõhimõte.
3. Staatori- ja rootorimähised.
4. Asünkroonmootori võimsuste bilanss ja kasutegur.
5. Asünkroonmootori käivitamine ja pöörlemiskiiruse reguleerimine.
6. Ühefaasiline ja kahefaasiline asünkroonmootorid.

11. ALALISVOOLUMASINAD

11.1. Alalisvoolumasinate otstarve, ehitus ja tööpõhimõte
11.2. Ankrureaktsioon ja kommutatsioon
11.3. Alalisvoolumootorite mehaanilised tunnusjooned
11.4. Alalisvoolumootorite pöörlemiskiiruse muutmine
11.5. Püsimagnetitega alalisvoolumootor
11.6. Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasin
11.7. Universaalsed kommutaatormootorid
11.8. Kordamisküsimused

11.1. Alalisvoolumasinate otstarve, ehitus ja tööpõhimõte

Elektrotehnika arengu algaastail tunti ainult alalisvoolu, mida saadi galvaanilistest elementidest. Seepärast algab elektrimasinate areng küllalt keeruka ehitusega alalisvoolumasinatest ja alles palju hiljem võeti kasutusele ja arendati välja lihtsamad vahelduvvoolumasinad.

Alates 1890. aastatest osutusid vahelduvvoolusüsteemid alalisvoolu omadest tõhusamateks. Vaatamata sellele, tänu alalisvoolumasinate headele reguleerimis- ja käivitusomadustele, kasutatakse klassikalisi alalisvoolumootoreid ka tänapäeval, kuid järjest vähenevas ulatuses. Neid kasutatakse põhiliselt autodes, lennukites ja muudes transpordivahendites.

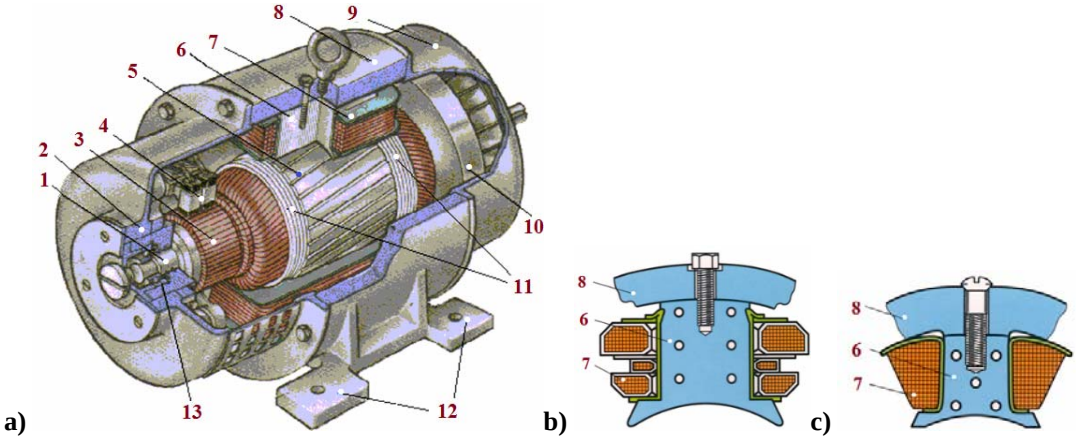
Alalisvoolumasinad olid varem laialdaselt kasutusel reguleeritava kiirusega ajamitena. Kuigi neil on hea kasutegur, mis on tavaliselt üle 90%, kasutatakse neid tänapäeval ikkagi järjest harvemini, kuna mikroprotsessortehnika ja jõuelektroonika areng võimaldab palju tõhusamalt juhtida vahelduvvoolumootoreid, mis lisaks heale juhitavusele vajavad vähem hooldust ning on odavamad. Lisaks sellele pole alalisvoolumootorid kasutatavad keemiliselt agressiivses ja plahvatusohtlikus keskkonnas, mõnedes kohtades on nende kasutamine keelatud. Kui kasutatakse harjadega mehaanilist kommutaatorit, on sädelemine täiskoormusel vältimatu.

Praktiliselt võivad kõik elektrimasinad töötada nii elektriallikana ehk generaatorina kui ka mootorina ehk energia tarbijana (elektriallikana tarbija talitluses). Vaadeldes alalisvoolu-(AV)-masinat, veendume, et kogu nende töö tugineb kahele põhiseosele: ajas muutuv aheldusvoog indutseerib elektrit juhtivas keskkonnas allikasisepinge. Selle suuruse määrab aheldusvoo muutumise kiirus. Kahe liikuva laengute energiavälja (magnetvälja) liitumisel tekkib jõupaar, mis mõjutab mõlemat magnetvoo allikat: püsimagnetit ja vooluga juhet või kahte vooluga juhet. Elektrimasinates on tavaliselt üks magnetvoo allikas jäigalt kinnitatud masina kere ja aluse külge, teine pöörlevale osale. Masinaosa, mis koosneb **magnetpoolustest** ja neid kinnitavatest osadest, on paigalseisev pooluste magnetvälja tekitav **induktor (staator).** Poolused on kas püsimagnetitest või tekitatakse elektrivooluga ergutusmähistes. Poolused on kinnitatud silindrilise terasikke külge. Viimane on masina **kereks** ja magnetahela osaks. Masinaosa, mis koosneb elektrotehnilise terase plekist valmistatud ankru (rootori) uuretes paiknevatest välisallikalt toidet saavatest vooluga juhtmetest ja voolu suunda muutvast **kommutaatorist (***commutator***)**, nimetatakse alalisvoolumasina **ankruks** (*armature*) e **rootoriks**. Mähist nimetatakse **ankrumähiseks**.

Seega panevad AV-masinate kahe põhiosa magnetväljade liitumisel tekkiva liitmagnetvälja jõupaarid pöörlemisvõimelise ankru pöörlema. Induktori jäiga kinnituse tõttu induktor samaaegselt pöörlema ei hakka. Generaatori talitluses pannakse välise mehaanilise jõu abil ankur pooluste magnetväljas pöörlema. Siis muutub ankrumähiste aheldusvoog ajas ning mähistes indutseeritakse allikasisepinge (elektromotoorjõud).

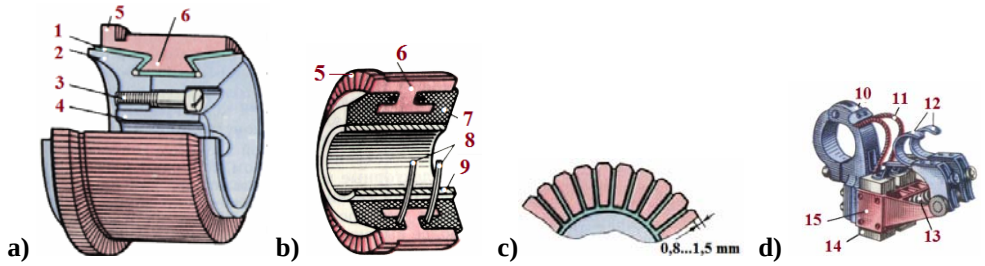
AV-masina ehitust selgitab joonis 11.1. Masina kere – 8, laagrikilpide – 2 ja 9 ja kinnituskäppade 12 abil moodustatakse paigalseisev tugiraamistik, mille külge kinnitatakse poolused 6 ja ankru 5 võlli 1 laagrid 13. Laagrite tõttu ankur 5 pöörleb. Alalisvoolumasina pooluste magnetvälja allikaks on elektrivooluga ergutusmähis või püsimagnetid. Poolused 6 on kinnitatud masina terasest kere 8 külge (joonis 11.1b ja c), mis on omakorda ka masina magnetahela osaks. Pooluste südamik valmistatakse trafoplekist, millele paigutatakse ergutusmähis 7. Trafopleki kasutamine massiivse südamiku asemel vähendab pöörisvoolukadu. Pooluse alumist, laiemat osa nimetatakse **pooluskingaks**. Kere küljes on ka klemmkarp, kuhu tuuakse välja

mähiste algused ja lõpud. Mootori talitluses liiguvad pooluste magnetväljas vooluga juhtmed. Et saavutada masina pidevat pöörlemist, tuleb iga poolpöörde (180 elektrilise kraadi) järgi muuta juhtmes või mähise poolis voolu suunda. Seda tehakse neutraaljoonel, kus juhtme külgedele mõjuvad jõud on võrdsed ja vastassuunalised ning ei pööra ankrut, sest pöördemoment on null. Klassikalistes alalisvoolumasinates kasutatakse voolu suuna muutmiseks mehaanilist, uutes elektrimasinates aga ka pooljuhtkommutaatorit.



Joonis 11.1. Alalisvoolumasina ehitus (a). Poolialustega (b) ja poolialusteta (c) magnetpoolused: 1 – võll, 2 – laagri kilp, 3 – kollektor, 4 – harjad, 5 – ankur, 6 – poolus, 7 – ergutusmähis, 8 – kere, 9 – laagri kilp, 10 – ventilaator, 11 – kinnitusvöö, 12 – kinnituskäpad, 13 – laager

Mehaaniline kommutaator koosneb (joonis 11.2) kollektorist (a), harjadest ja harjahoidjast (d). Kollektori põhiosa moodustavad vasest lestad (lamellid), mille külge on ühendatud ankrumähise pooliotsad.



Joonis 11.2. Alalisvoolumasina mehaanilise kommutaatori ehitus: a – metallsüdamikuga kollektor, b – plast-mass-südamikuga kollektor, c – kollektori fragment , d – harjahoidja

Lestad on kokku pandud nii, et nende välispind omandab silindrilise kuju, millel libisevad harjad. Harjad ja kollektorilestad moodustavad elektrilise kontaktsõlme, mille kaudu juhitakse elektrivool ankrumähisesse. Harjad on söest, grafiidist, metallgrafiidist või vasest ning paiknevad harjahoidjas (joonis 11.2d). Kollektorilestade 6 allosa on pääsusabakujuline. Kollektori koostamise lõppedes on lestad kinnitamiseks surutud kahe terasseibi 1 ja 3 vahele (a) või vasklestade ja isolatsiooniplaatide kogu hoiab koos plastmass 7, mis on surutud lestade komplekti ja terashülsi 9 vahele. Selleks et tõsta plastmassi vastupidavust, on armatuuriks (b) kasutatud terasrõngaid 8. Ankru mähis koosneb ümar- või lapikvaskjuhtmest sektsioonidest (poolidest), mis on paigaldatud ankru uuretesse. Seejärel fikseeritakse poolid isoleermaterjalist kiilude abil. Sektsioonide lõpud joodetakse kollektori lestade külge. Sektsioonide laupühendused (joonis 11.1a) kinnitatakse terastraadist, terasplekiribadest või klaasplastlindist kinnitusvöö 11 abil. Harjahoidja (joonis 11.2d) koosneb kerest (15), kuhu on paigutatud harjad (14), harju kollektorile suruvast vedrust (13) ja vedruvinnast (12), mis kujutab endast tagasipööratavat detaili. Masina elektriahelasse ühendamiseks on harjal painduv köisjuhe (11). Harjahoidja kinnitatakse harjahoidja sõrmele klamber 10 abil. Harjakomplektide arv vastab pooluste arvule.

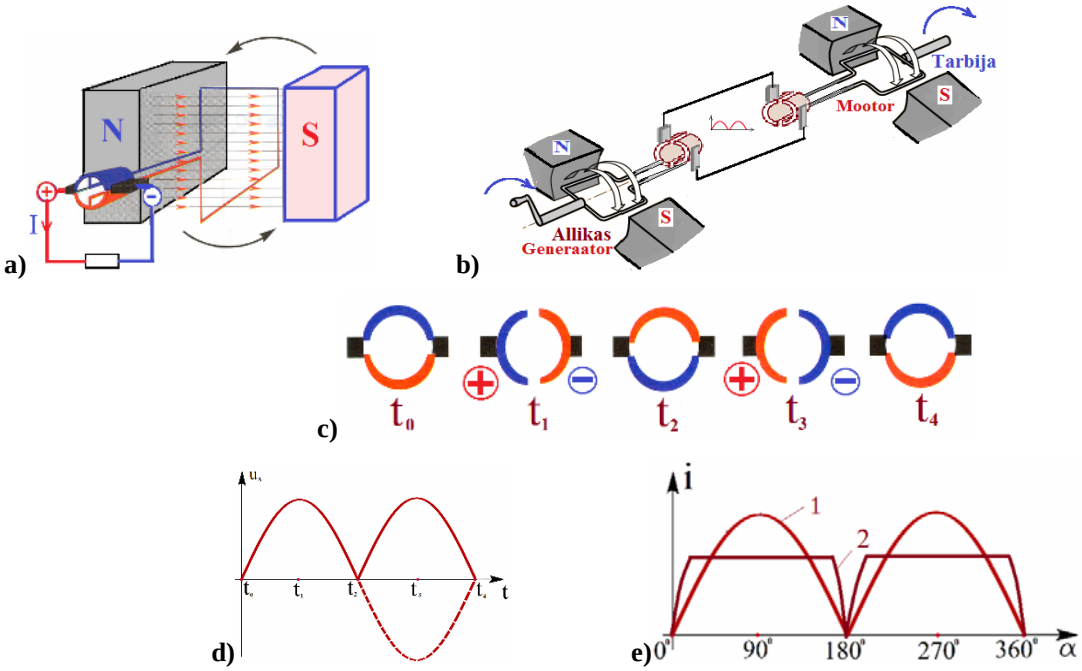
Tavaliselt on alalisvoolumasina induktor paigalseisev osa ehk staator ja ankur on pöörlev osa ehk rootor. On olemas ka pööratud ehitusega masinad, mille magnetvälja tekitav induktor pöörleb ning voolu kommuteeritakse staatoris. Niisugust ehitusviisi kasutatakse püsimagnetergutusega alalisvoolumootorite ja vahelduvvoolu sünkroonmootorite puhul. Rootor (ankur) pöörleb laagritele toetuval võllil. Võlli veotapp

(nimetatakse ka võlli A tapiks) ulatub mootori kerest välja ning selle külge ühendatakse käitatav koormusmasin. Masina jahutamiseks kasutatakse sageli võlliga veetavat ja masinasse sisseehitatud ventilaatorit.

Iga elektrimasina kere välisküljele on kinnitatud masina nimiandmetega silt. Olulisemad sildile kantavad andmed on järgmised: tootja nimi, tüübi tähis, sarjanumber, nimivõimsus P_n, nimipinge U_n, nimivool I_n, nimikiirus n_n, nimiergutusvool I_{en}, väljalaskeaasta, kere kaitseaste *IP*, mähiste isolatsiooni temperatuuriklass, talitlusviis jms. Täiendavaid andmeid alalisvoolumasina kohta esitatakse tootekataloogides.

AV-masinate tööpõhimõte Joonisel 11.3a on esitatud alalisvoolugeneraatori ja joonisel 11.3b kahe omavahel ühendatud alalisvoolumasina mudelid. Tegeliku masina pealt on tööpõhimõtte jälgimine raskem.

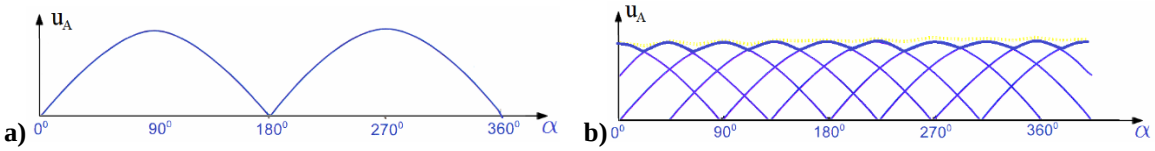
Lihtsaima AV-generaatori ankur koosneb ühest pöörlevast juhtmekeerust, mis pöörleb ümber oma mõttelise telgjoone magnetpooluste vahel. Kui mingi jõu abil panna juhtmekeerd pöörlema joonisel 11.3a näidatud suunas, siis indutseeritakse juhtmekeeru aktiivosades allikasisepinged, nii nagu seda on vaadeldud kursuse algosas joonistel 1.10 ja 1.12 ning joonisel 11.4. Juhtmekeerus indutseeritud allikapinge (joonis 11.3d) on vahelduvpinge, mis kollektorist ja harjadest koosneva kommutaatori abil muundatakse alalispingeks (joonis 11.3d). Joonised 11.3a, b ja c iseloomustavad kommuteerimisprotsessi, mida teeb kahest harjast ja lõhestatud kontaktrõngast moodustatud kommutaator. Mähiste otste ümberlülitamine harjade all toimub ajahetkedel t_0 , t_2 ja t_4. Ajahetkedel t_1 ja t_3 on vasakul harjal positiivne ja paremal negatiivne potentsiaal. Kui generaatori klemmid on ühendatud tarbijaga, siis tarbijas voolab pulseeriv alalisvool (joonis 11.3e). Alaldi roll on siin kommutaatoril ja seepärast AV-masinaid nimetatakse **kommutaatormasinateks** (*commutating machines*).



Joonis 11.3. Alalisvoolugeneraatori mudel (a) ja generaatori ja mootori koostöö (b). Kommutaatori asendid eri ajahetkedel (c). Ankrumähises indutseeritud allikasisepinge ning väljundpinge graafik (d). Tarbija voolu muutumine juhtmekeeru pöörlemisel (e): 1 – formaalne, 2 – reaalne voolukõver

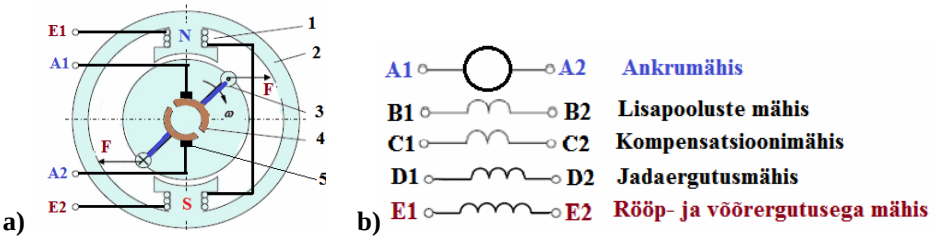
Joonisel 11.3b vaadeldakse AV-generaatori ja mootori koostööd. Pannes vasakpoolse masina juhtmekeeru vända abil pöörlema, toimuvad eespool vaadeldud protsessid ja generaatori väljundis on generaatori pulseeriv väljundpinge. Siin on tarbijaks lülitatud AV-mootor. Mootori juhtmekeerus tekkib vool ja selle magnetväli liitub masina induktori magnetväljaga. Väljade liitumisel tekkivad jõupaarid, mis püüavad juhtmekeerdu ja induktorit pöörlema panna. Jõupaaride tekkemehhanismi selgitus kursuse magnetahelate osas on esitatud joonisel 3.16. Kuna mootori poolused on kinnitatud, siis juhtmekeerd hakkab pöörlema, muundades I masina elektrienergia pöörleva raami mehaaniliseks energiaks.

Kui meil on üks juhtmekeerd, siis alaldatud pinge väreleb nulli ja maksimumväärtuse vahel kaks korda suurema sagedusega kui raami pöörlemissagedus. Kui suurendada võllil pöörlevate mähisepoolide arvu, saame oluliselt vähendada väljundpinge värelust.



Joonis 11.4. Alalisvoolumasina väljundpinge värelus ühe (a) ja mitme (b) pöörleva mähisepooli korral

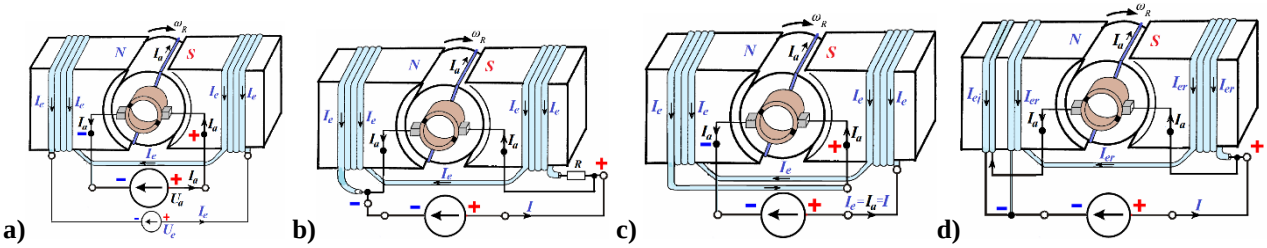
Alalisvoolumasina tööpõhimõtet ja koosteosasid iseloomustab joonis 11.5. Masina magnetvälja tekitavad ergutusmähis koos pooluste, ikke ja ankru magnetsüdamikega. Ergutusmähise klemmid on E1 ja E2, ankrumähisel A1 ja A2. Toiteallikalt juhitakse vool ankrumähisesse harjadega, mis ankrumähise pöörlemisel libisevad kollektori lestadel (lamellidel). Ankru pöörlemisel liiguvad harjad ühelt lestalt teisele, muutes sellega masina neutraalteljel voolu suunda ankrumähises. Ankrumähise aktiivosadele mõjuv jõud tekitab ankru pöördemomendi, mis on maksimaalne juhul, kui mähis paikneb pooluste teljel ja võrdne nulliga, kui mähis on masina neutraaljoonel (mainitud juhul masina poolustega risti oleval teljel).

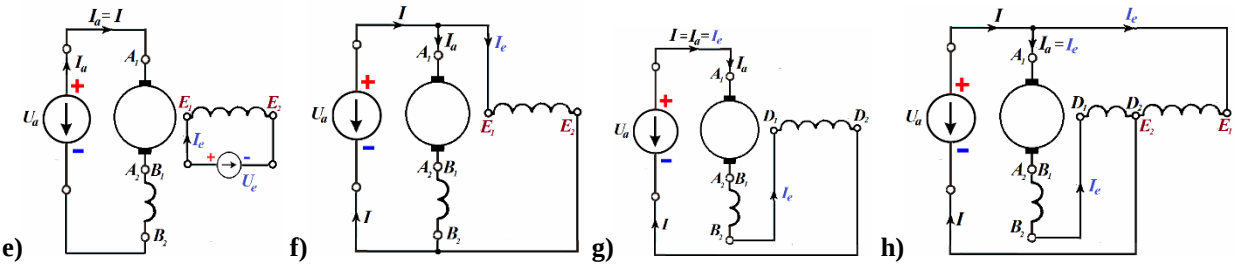


Joonis 11.5. Alalisvoolumasina mudel (a) ja mähiste tähistus (b): 1 – ergutusmähis, 2 – ike, 3 – ankrumähis, 4 – kollektorilest, 5 – hari

Ergutusmähise magneetimisergutus (magnetvälja tugevus) on määratud mähise voolu ja keerdude arvu korrutisega ja masina magnetahela võimendusvõimega. Ühe ja sama magneetimisergutuse saab tekitada suure voolu ja väikese keerdude arvuga või suure keerdude arvu ja väikese vooluga mähisega. Ankrumähisega rööbiti lülitatud või eraldi allikast toidetava ergutusmähise puhul on mähise vool väike ja keerdude arv suur. Ankrumähisega jadamisi lülitatud ergutusmähise vool võrdub ankrumähise vooluga ja on suur. Seetõttu on keerdude arv väike. Olenevalt ankru- ja ergutusmähise omavahelisest ühendusviisist kujunevad masinate omadused erinevaks. Lisaks peapoolustele on kasutusel ankrureaktsiooni kompenseerimiseks lisapoolused, mille mähis ühendatakse jadamisi ankrumähisega ja klemmid tähistame B1 ning B2.

Kasutatakse nelja erinevat ankru- ja ergutusmähise ühendusviisi (joonis 11.6): **võõrergutusega** e sõltumatu ergutusega (a, e) mootor (*the separately excited motor*); **rööpergutusega** mootor (b, f) e rööpmootor (*the shunt motor*) e **haruvoolumootor** (saksa k *Nebenschlussmotor*); **jadaergutusmootor** (c, g) e jadamootor (*the series dc motor*) e **peavoolumootor** (saksa k *Hauptschlussmotor, Reihenschlussmotor, Serienmotor*); **liitergutus-** ehk **kompaundmootor** (*the compounded DC motor*). Viimasel (d, h) on ühistel poolustel kaks ergutusmähist. Üks on jadamisi ankrumähisega, teine rööbiti.



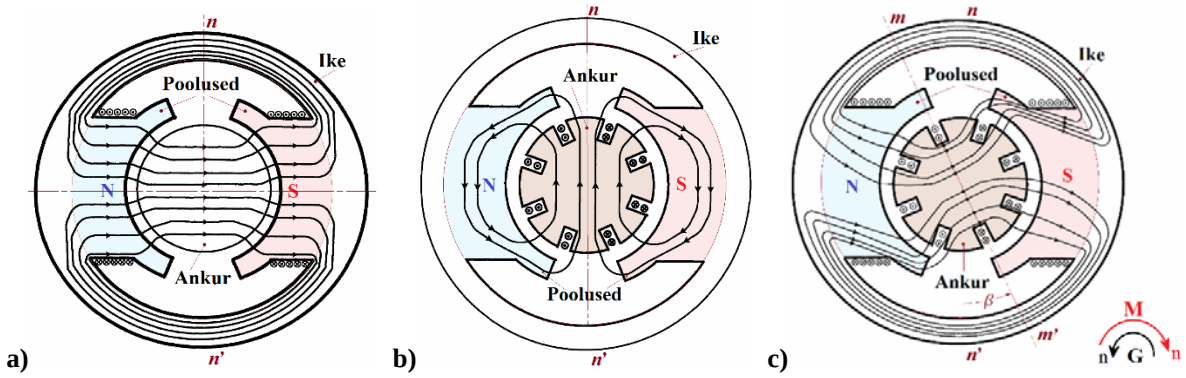


Joonis 11.6. Alalisvoolumasinate liigitus ankru- ja ergutusmähise ühendusviiside alusel: a, e – võõrergutusega, b, f – rööpergutusega, c, g – jadaergutusega, d, h – liitergutusega masin

Viiendaks mootoriliigiks on **püsimagnetitega** AV-mootor (*the permanent magnet DC motor*).

11.2. Ankrureaktsioon ja kommutatsioon

Eespool käsitletud mähisesektsioonide ümberlülitamine (kommutatsioon) ei ole nii lihtne. Seda mõjutavad tugevalt ankrureaktsioon ja indutseeritavad allikapinged kommuteeritavas sektsioonis. Vaatleme neid lähemalt. Kui AV-masina ergutusmähised ühendada toiteallikaga ja ankrumähises vool puudub, siis pooluste magnetväli on sümmeetriline **geomeetrilise neutraaljoone** *nn´* ehk sümmeetriatelje suhtes (joonis 11.7a). Kui ankrumähises on vool ja ergutusmähises puudub, siis on magnetväli sümmeetriline pooluste sümmeetriatelje suhtes (joonis 11.7b). Tegelikult on vool nii ergutus- kui ka ankrumähistes. Seetõttu tekkib geomeetrilise neutraaljoone *nn* suhtes mittesümmeetriline, moonutatud liitmagnetväli (joonis 11.7c). Sellist välja moonutamist AV-masinas koormuse suurenemisel nimetatakse **ankrureaktsiooniks** ehk **ankruvastumõjuks** (*armature reaction*). Selle tulemusel on magnetvälja füüsikaline neutraaljoon *mm´* pööratud geomeetrilise neutraaljoone suhtes olenevalt ankruvoolu suurusest nurga β võrra. Seega kutsub ankruvoolu magnetväli esile neutraaljoone nihkumise (*neutral plane shift*) ning ankrureaktsioon halvendab AV-masinas kommutatsiooni – sektsioonide ümberlülitamist, tekkib sädelemine. Lühistatud sektsioonide vahel tekkib vool. Ahela katkestamisel tekivad harjadel sädelahendused, tekkida võib kaar või sädelemine.



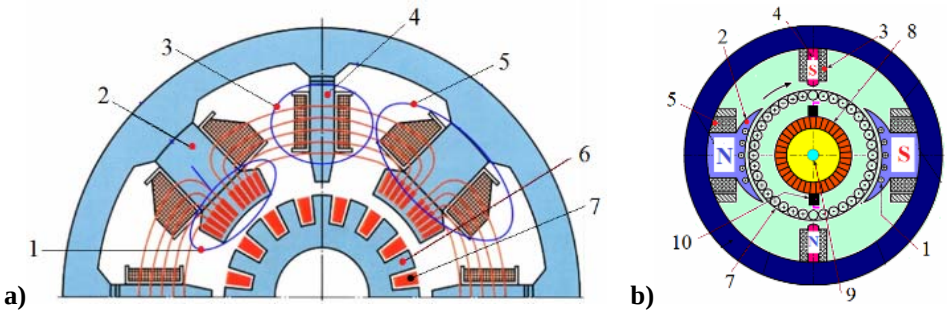
Joonis 11.7. Alalisvoolumasina ankrureaktsioon: a – pooluste, b – ankruvoolu, c – liitmagnetväli generaatori (G) talitluses. Mootori talitluses (M) füüsikaline neutraaljoon *mm´* pöördub päripäeva

Sädelemist ei esine, kui kommuteeritakse neid sektsioone, mis asuvad füüsikalisel neutraaljoonel. Siis ei lõika sektsiooni aktiivosad magnetjõujooni, vaid liiguvad paralleelselt magnetvoo jõujoontega ning sektsioonidesse allikapinget ei indutseerita. Selleks pööratakse harjad geomeetriliselt neutraaljoonelt füüsikalisele. Koormuse muutumisel tuleks aga harju kogu aeg pöörata, sest neutraaljoonte vaheline nurk $\beta = f(Ia)$ ankruvooluga muutub. Kontaktidel rikub kaare teke ja sädelemine (*arcing and sparking at the brushes*) lestade kontaktpindu ja on lubamatu.

Neutraaljoonte vaheline nurk β sõltub AV-masina talitlusest. Joonisel 11.7c on näidatud, et mootori talitluses (M) pöördub füüsikaline neutraaljoon *mm´* päripäeva, generaatoritalitluses vastupäeva.

Ankrureaktsiooni kompenseerimiseks kasutatakse lisapooluseid 4 (joonis 11.8). Need paiknevad peapooluste 2 vahel ja nende mähis 3 on ankrumähisega 7 jadalülituses. Lisapoolustes tekitatakse magnetvoog, mis on

vastassuunaline ankrureaktsiooni magnetvooga. See muutub koormuse muutumisel ja kompenseerib ankrureaktsiooni automaatselt. Generaatori ja mootori neutraaljoone nihkumine toimub vastassuundades.



Joonis 11.8. Alalisvoolumasina ankrureaktsiooni kompenseerimine: 1 – kompensatsioonimähis, 2 – peapoolus, 3 – lisapooluse mähis, 4 – lisapoolus, 5 – ergutusmähis, 6 – ankruhammas, 7 – uuretes paiknev ankrumähis, 8 – kollektor, 9 – võll, 10 – harjad

Kommutatsiooniprotsess vältab väga lühikest aega – 0,001…0,0001 sekundit. Voolu väga kiire muutus põhjustab sama kiire aheldusvoo muutuse, mis indutseerib mähise sektsioonides allikapinge, mis aeglustab omakorda voolu kasvukiirust.

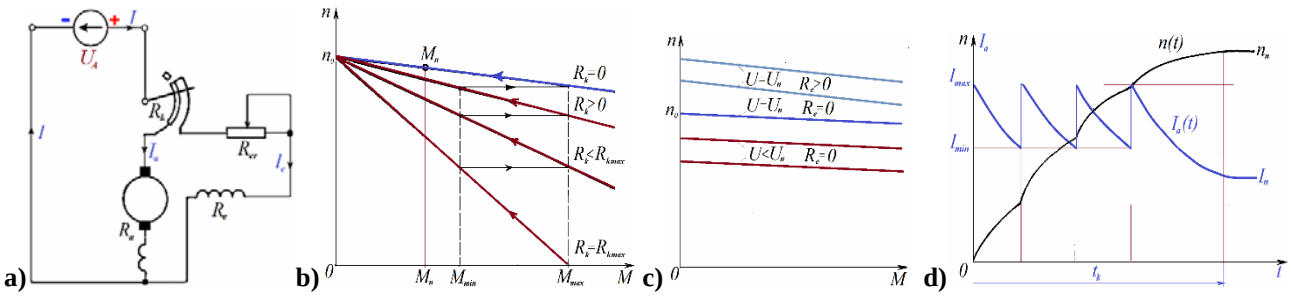
Peale lisapoolusmähiste kasutatakse peapooluste kingas ankrureaktsiooni neutraliseerimiseks ja välja täiendavaks ühtlustamiseks kompensatsioonimähist 1. Tänu keerukatele kompensatsioonimeetmetele saavutatakse alalisvoolumootoris ankrureaktsiooni peaaegu täielik kompenseerimine ning masina tunnusjooned on sirged ning kirjeldatavad lineaarsete võrranditega. Rakendatud meetmed muudavad aga alalisvoolumasina konstruktsiooni kalliks. Lisaks vähendavad ankruahelasse jadamisi lülitatud kompensatsiooni- ja lisapooluste mähised oma kao tõttu ka masina kasutegurit.

AV-masinate mähiste kujundamisel saab rakendada meetmeid, et vähendada voolu pulsatsiooni. Selleks koostatakse masinate ankrumähis paljudest poolidest jadamisi ühendatud keerdudega. Võimsamad masinad valmistatakse 4, 6 või 8 poolusega. Siis on kommutaatoril vastavalt 4, 6 või 8 harja. Pooli küljed paigutatakse ankru uuretesse, mille arv on Z. Kasutatakse ühe- ja kahekihilist mähist. Kuna mehaanilise kommutatsiooniga AV-masinate kasutamine minetab praktikas oma tähtsuse, siis mähiste kujundamist siin lähemalt ei käsitleta.

11.3. Alalisvoolumootorite mehaanilised tunnusjooned

Alalisvoolumootori mehaanilisteks karakteristikuteks nimetatakse pöörlemiskiiruse sõltuvust jõumomendist (*torque versus speed*) $n = f(M)$, kui $U = const$ ja $I_e = const$. Eristatakse **loomulikku mehaanilist karakteristikut** ja **tehis- (reostaat-) karakteristikuid**. Loomulik karakteristik saadakse siis, kui mootor on lülitatud nimipingele ning ei ankru- ega ergutusahelas ole reostaati (lisatakistusi).

Rööpergutusega mootor. Joonisel 11.9a on kujutatud rööpergutusega alalisvoolumootori lülitusskeem.



Joonis 11.9. Rööpergutusega alalisvoolumootori lülitusskeem (a), tehiskarakteristikud (b, c) ja voolu muutus käivitusel (d)

Kuidas reageerib rööpergutusega mootor koormuse kasvule võllil? Sel juhul koormusmoment ületab masina poolt arendatavat momenti ning mootori kiirus hakkab vähenema. Mootori kiiruse vähenemisel väheneb tema allikasisepinge U_A. Seetõttu suureneb mootori ankruvool $I_A = (U - U_A)/R_A$. Seoses ankruvoolu suurenemisega suureneb ankrumähise magnetvoog, mis liitudes ergutusmähise magnetvooga põhjustab mootori momendi kasvu seni, kuni saab võrdseks koormusmomendiga väiksemal pöörlemiskiirusel

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_k)}{c_E \Phi} = f(I_a). \qquad (11.1)$$

Siin on c_E alalisvoolumasina elektriline konstant, mis on määratud ankrumähise teostusega. Kui pöörlemiskiirust n mõõdetakse pööret minutis, siis

$$c_E = \frac{N}{a}\frac{p}{60}, \text{ kui } n, s^{-1}, \text{ siis } c_E = \frac{Np}{a},$$

kus N on ankrumähise a haru jadamisi ühendatud juhtmete arv.

Momendi avaldis $M = c_M I_a \Phi = f(I_a)$. Siin $c_M = \frac{c_E}{2\pi}$. (11.2)

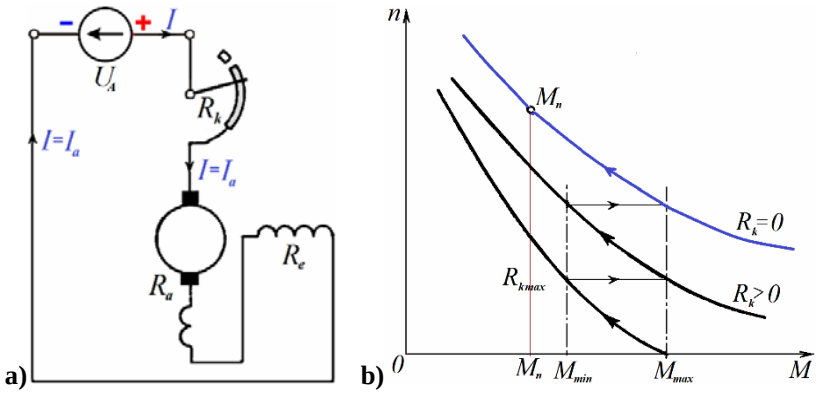
Seega kujutab loomulik mehaaniline karakteristik endast negatiivse kaldega sirgjoont (joonis 11.9b). Siin oleneb kiirus momendist lineaarselt vaid tingimusel, kui koormuse muutumisel $U = const$ ja $I_e = const$.

Jadaergutusmootor ehk peavoolumootor. Eelmise sajandi viimase veerandini olid elektertranspordis peaaegu eranditult kasutusel klassikaline harjadega alalisvoolumootor, millel oli järjestikergutus või kompaundergutus; raudteel vahelduvvoolu kollektormootor.

Transpordivahendi suure massi tõttu on tema käivitamine ja täiskiirusele viimine palju aeglasem kui näiteks ventilaatori või pumba käivitamine. Raske käivituse tõttu nõutakse veomootorilt suurt käivitusmomenti. Käivitusmoment peab olema mitmekordselt suurem, kui moment nimikoormusel. Samuti on vajalik mootori kiiruse reguleerimine suurtes piirides. Nende nõuetele vastasid nimetatud veoajami tüübid. Sel ajal ei olnud veel võimsaid pooljuhtmuundureid ja reguleerimine käis mootori ankruahelasse (ja ka ergutusahelasse) viidava reostaadi takistuse muutmisega. Seda tehti nn kontrollerite (regulaatorite) abil. Mootorite nõrkuseks on nende väikese töökindlusega kommutaator. Kollektorit ja harju tuleb perioodiliselt hooldada ja remontida.

Tänapäeval asendavad neid harjadeta ja erimuunduriga alalisvoolumootor ehk vahelduvvoolu servomootor ehk sünkroonmootor (need on ühe ja sama mootori erinevad nimed) koos vaheldiga, mida juhib mootori rootori asendiandur; sagedusmuunduriga asünkroonmootor; **magnetergutusmootor** (reluktantsmootor) koos oma erimuunduriga.

Jadaergutusmootori lülitusskeem on joonisel 11.10.



Joonis 11.10. Jadaergutusmootori lülitusskeem (a) ja mehaanilised karakteristikud (b)

Käivitamiseks on vajalik käivitusreostaat, reguleeritava takistusega R_k. Käivituse lõpul reostaat sillatakse, takistus viiakse nulliks. Siin tekitab magnetvoo ergutusmähises muutuv ankruvool. Mootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_k)}{c_E \Phi} \approx \frac{U - I_a(R_a + R_k)}{I_a} \tag{11.3}$$

$$M = c_M I_a \Phi \approx I_a^2 . \tag{11.4}$$

Siin on c_M alalisvoolumasina mehaaniline konstant, mis on määratud masina kujundamisega

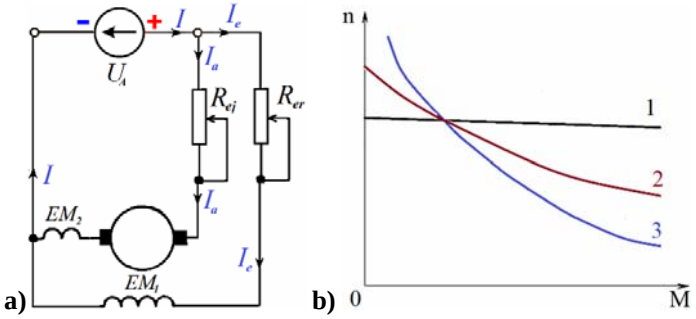
$$c_M = \frac{c_E}{2\pi}.$$

Kui mootor on nimipingel ja $R_k = 0$, siis mootor töötab loomulikul karakteristikul, käivitusel reostaatkarakteristikul.

On oluline teada, et jadaergutusmootorit ei tohi käivitada koormuseta, sest $M \approx 0$ korral kasvab pöörlemiskiirus ohtlikult suureks.

Kui mootor lülitada vahelduvpingele, siis nimetatakse teda **vahelduvvoolu kommutaatormootoriks**. Mootor pöörleb sarnaselt AV-mootoriga, sest voolusuund muutub samaaegselt nii ankru- kui ka ergutusmähises.

Liitergutusmootor ehk kompaundmootor. Liitergutusmootori lülitusskeem on joonisel 11.11a ja loomulik mehaaniline karakteristik joonisel 11.11b, kõver 2. Mootoril on kaks ergutusmähist: rööpergutusmähis EM_1 ja jadaergutusmähis EM_2. Selleks et mootor töötaks stabiilselt, peab jadaergutusmähis EM_2 olema pärikompaundlülituses. Siis on mehaaniline karakteristik langev, mis tagab stabiilse töö.



Joonis 11.11. Liitergutusmootori lülitusskeem (a) ja mehaanilised karakteristikud (b). EM_1 – rööp- ja EM_2 – jadaergutusmähis. 1 – EM_1-mähisega, 2 – EM_2-mähisega, 3 – liit-(EM_1 + EM_2)-mähisega mootori tunnusjoon (karakteristik)

Joonisel 11.11b on esitatud kolme eespool vaadeldud mootoriliigi loomulikud mehaanilised karakteristikud. Näeme, et jäik karakteristik 1 on rööpergutusmootoril, kõige pehmem 3 on jadaergutusmootoril. Liitergutusmootori mehaaniline karakteristik 2 on samuti langev, jäigem kui jadaergutusmootoril ja pehmem kui rööpergutusmootoril. Liitergutusmootori käivitus toimub samuti käivitusreostaadiga. Käivituse ajal rööpergutusmähise ahelas $R_{er} = 0$.

11.4. Alalisvoolumootorite pöörlemiskiiruse muutmine

Pöörlemiskiiruse avaldisest näeme, et sujuvaks reguleerimiseks on mitu võimalust. Eelistada tasub energeetiliselt kõige säästlikumaid viise. Muuta ei saa vaid mootori elektrilist tegurit c_E.

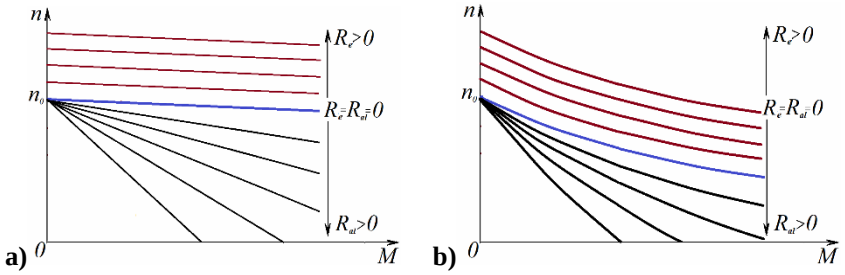
$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_E \Phi}$$

On võimalik muuta:

- toitepinget U,
- ankruvoolu I_a ankru sildamise teel takistiga,
- ankruahela takistust ankruga jadamisi ühendatud takisti abil, milleks ei või olla käivitusreostaat, sest see on mõeldud vaid lühiajaliseks tööks,

- magnetvoogu Φ ergutusahelasse lülitatud takisti abil või ergutusmähise sildamise teel takistiga,
- üheaegselt mitut eespool esitatud suurust.

Siit järeldub, et mootori pöörlemiskiirust saab tõsta pinge suurendamisega või magnetvoo vähendamisega (ergutusmähise toitepinge vähendamisega). Pöördemomenti saab suurendada kas ankruvoolu või magnetvoo suurendamisega. Näeme, et magnetvoo tugevuse reguleerimine mõjutab korraga kiirust ja momenti pöördvõrdeliselt. Alalisvoolumootorite käivitamine toimub käivitusvoolu piiramiseks ankruga jadamisi ühendatud reostaadi abil. Mootori kiiruse suurendamiseks tuleb käivitustakisti väärtust vähendada.



Joonis 11.12. Rööpergutusega mootori (a) ja kompaundmootori (b) mehaanilised (kiirus-) karakteristikud

Ergutusahelatakistuse ohtlik suurenemine. Jooniselt 11.10 ja 11.12 näeme, et ergutusahela takistuse suurenemisel suureneb mootori pöörlemiskiirus. Mis toimub mootoriga, kui takistus oluliselt suureneb või kui ergutusahel katkeb mootori töö ajal? Ergutusvoolu vähenemisel väheneb ka pooluste magnetvoog. Sellega kaasneb allikasisepinge vähenemine ergutus- ja ankrumähises. Ankruahelas toiteallika ja mähise sisepinged pole enam võrdsed. Tasakaalu tekitamiseks peab ankruvoolu ja pöörlemiskiiruse kasv tagama mähise aheldusvoo sellise muutumiskiiruse, et toiteallika ja mähise sisepinged oleksid ankruahelas igal ajahetkel võrdsed. Nii kompenseeritakse ergutusvoo vähenemine ja mootori poolt arendatav moment on võrdne mootori koormusmomendiga.

Mis aga juhtub siis, kui ergutusahela takistus kasvab jätkuvalt kuni ahela katkemiseni? Nagu mainitud, peab mähise aheldusvoo muutumiskiirus olema selline, et ankruahelas oleksid toiteallika väljundpinge ja mähise sisepinge igal ajahetkel võrdsed. Piltlikult öeldes, kui magnetjõujooni jääb hõredamaks, siis nende lõikamiskiirus peab suurenema, et tagada muutumatuna ajaühikus lõigatavate jõujoonte arv. Seega jätkab lõikamiskiirus ehk ankru pöörlemiskiirus suurenemist. Ergutusahela katkemisel võib mootori kiirus kasvada väga lühikese ajavahemiku kestel **ohtlikult suureks**. Selle ohu vältimiseks kasutatakse **väljakaoreleed** (*field loss rele*), mis lahutab mootori toite, kui ergutusmähises vool kaob.

Sama oht võib tekkida rööpergutusega mootorite korral, mis töötavad väikeste väljadega suure ankrureaktsiooni korral. Siin võib koormuse suurenemine nõrgendada peapooluste magnetvoogu niivõrd, et kiirus hakkab kasvama. Enamiku väliskarakteristikute kõverate põhjal kiiruse kasvamisel pöördemoment suureneb, seega suurenenud mootori kiirus suurendab tema koormust, mis suurendab veelgi tema ankrureaktsiooni ning nõrgendab peapooluste magnetvoogu. Nõrgem väli suurendab kiirust ja koormust veelgi jne, kuni kiirus suureneb ohtlikult suureks. Seda olukorda nimetatakse lõhki jooksmiseks (*runaway*).

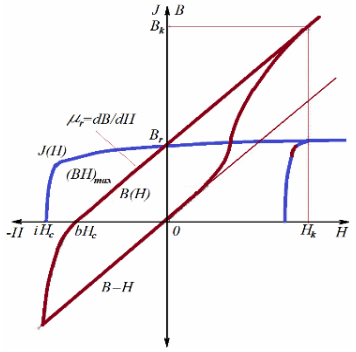
Väga rasketel tingimustel ja rasketel käidutsüklitel (*duty cycle*) töötavate mootorite korral saab välja nõrgenemise probleemi lahendamiseks varustada mootoripoolused kompensatsioonimähistega. Kahjuks on kompensatsioonimähised liiga kallid. Lõhki jooksmise probleemi lihtsamaks lahenduseks on mõne täiendava pärikompaundeerimise keeru kasutamine mootori poolustel. Kui koormus suureneb, siis kasvab ka nende jadalülituses olevate keerdude magnetomotoorjõud, mis on vastassuunaline ankrureaktsiooni demagneetiva magnetomotoorjõu suhtes. Rööpergutusega mootorit, millel on vaid mõni selline jadakeerd, nimetatakse **stabiliseeritud rööpergutusega mootoriks** (*stabilized shunt motor*).

11.5. Püsimagnetitega alalisvoolumootor

Püsimagnetitega AV-mootor (*a permanent magnet DC motor, PMDC motor*) on mootor, mille ergutus-magnetvälja tekitavad poolused, mis on kujundatud püsimagnetitest. Neil puudub ergutusmähis. Pooluste magnetvälja moodustab püsisuunaga domeenide liitenergiaväli. Püsimagnetitega AV-mootorid on võrreldes teiste AV-mootoritega kompaktsemad, kuid sageli väiksema võimsusega. Viimase kümne aastaga on olukord muutumas. Muldmetallidest püsimagnetite hind on vähenenud *ca* 5 korda, samal ajal eri- magneetimisjõud on kasvanud 3 korda. Seega on kulutuse ja tulemuste suhe paranenud 15 korda, mis omakorda loob häid eeldusi arenguks.

Püsimagnetitega AV-mootorite üheks puuduseks on, et püsimagnet ei suuda alati tekitada nii suurt magnetvootihedust, nagu välise toitega ergutusmähis. Nende poolt arendatav moment on sageli väiksem ankruvoolu ühe ampri kohta ühesuguse võimsuse ja kujunduse korral. Lisaks sellele on püsimagnetitega mootoritel lahtimagneetimise risk ankrumähise voolu (ankrureaktsiooni) mõjul.

Püsimagnetmaterjalide omadused. Püsimagnetmaterjale ehk magnetiliselt kõvasid materjale kirjeldab peamiselt hüstereesisilmuse teine veerand, mida nimetatakse magneti **lahtimagneetimiskõveraks**. Iseloomulik püsimagneti hüstereesisilmus on joonisel 11.13. Püsimagneti puhul eristatakse kahte kõverat: üks on *B*-välja ja *H*-välja omavaheline sõltuvus ehk *BH*-kõver ning teine *J*-välja (magneetuvus) sõltuvus *H*-väljast. Magnetvootiheduse vektori saab leida magneetuvuse ja magnetväljatugevuse vektorite kaudu. Kõik kolm vektorit on samasuunalised $\dot{B} = \dot{J} + \dot{H}$.



Joonis 11.13. Püsimagneti demagneetimiskõver (teine kvadrant) koos esimese kvadrandi ja osaliselt kolmanda kvadrandiga. Esimene kvadrant paikneb joonisel koordinaattelgedest üleval paremas osas

Lahtimagneetimiskõvera (joonis 11.13) järgi on võimalik määrata püsimagneti põhilised parameetrid. Nendeks on jääkvootihedus B_r, magneetuvuse koertsitiivjõud iH_c, vootiheduse koertsitiivjõud bH_c, magneti maksimaalne energiatihedus $(BH)_{\max}$ ning magneti suhteline magnetiline läbitavus μ_r.

Jääkvootihedus B_r on magnetvootiheduse väärtus, mis püsib magnetil, kui puudub väline magnetväli. Mida suurem jääkvootihedus, seda suurem magnetvootihedus saab olla magnetahela õhupilus.

Vootiheduse koertsitiivjõud ehk bH_c on väärtus, mis näitab, kui suurt välist väljatugevust tuleb rakendada, et magneetitud magneti vootihedus viia nulli. Mida kõrgem on koertsitiivjõud, seda õhemat magnetit saab kasutada demagneetiva toime vastu.

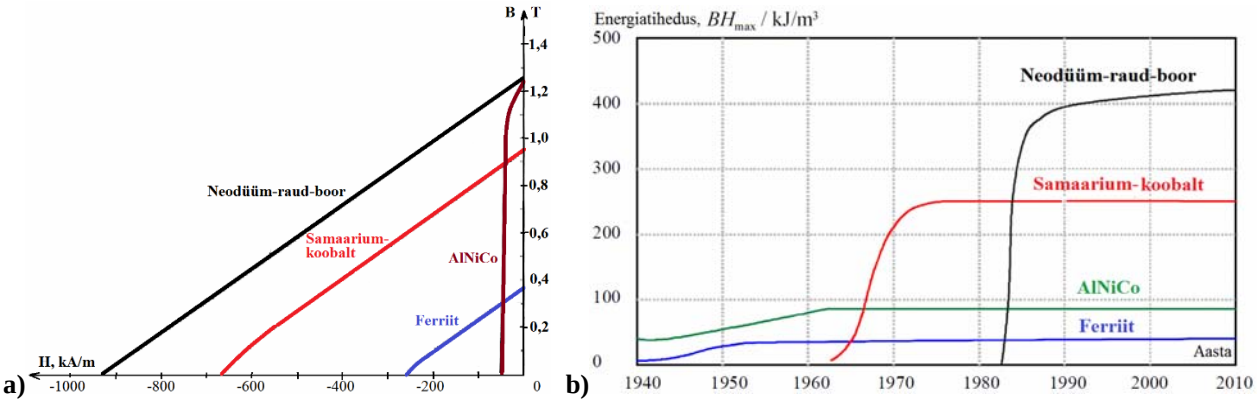
Magneetuvuse koertsitiivjõud ehk iH_c on väärtus, mis näitab, kui suurt välist väljatugevust on vaja rakendada, et magnet lahti magneetida. Mida suurem on iH_c väärtus, seda suuremat välja tuleb rakendada, et magnet täielikult magneetida. See tähendab, et magneti magneetimiseks on vaja suuremat väljatugevust kui H_k, mis on magneti küllastuspunkti magnetvälja tugevuse väärtus. Seega on H_k punkt, kus kõik magneti doomenite magnetmomendid on orienteeritud välise magnetvälja suunas. Magnetvälja tugevuse ja koertsitiivjõu mõõteühikuks on A/m. Koertsitiivjõu mõõtmiseks kasutatakse ka mõõtühikut örsted (Oe), kus 1 Oe on võrdne 1000/4π, A/m.

Joonisel 11.13 on tänapäevase magnetkõva ferromagnetilise materjali magneetimiskõver. See on magnetvoo ja magnetomotoorjõu vahelise seosega ekvivalentne magnetvootiheduse *B* sõltuvus magnetväljatugevusest *H*. Magneetimisel rakendatakse materjalile tugev väline väli, mis seejärel viiakse nulli. Siis jääb materjalile

algses väljasuunas domeenide jääkmagnetvoog. Jääkmagnetvoo tihedus B_r küünib parimatel materjalidel 1,26 T. Selle materjali lahtimagneetimiseks (jääkvoo viimiseks nullile) tuleb rakendada esialgse magnetvälja magnetväljatugevusega vastassuunalist välist magnetvälja. Seega peab heal püsimagnetmaterjalil olema võimalikult suur jääkvootihedus ning suur koertsitiivjõud magneetimisintensiivsus H_c. Suur jääkmagnetvoog tagab masinas tugeva magnetvälja, suure magnetvälja energia ning suur koertsitiivjõud tagab selle, et pooluste lahtimagneetimiseks peab vool olema väga suur.

Alates 1960. aastast on välja töötatud mitmed uued püsimagnetmaterjalid. Joonisel 11.14 on mõnede iseloomulike keraamiliste ja haruldaste muldmetallidest magnetite magneetimiskõverad teises kvadrandis. Võrdluseks on võetud Alnico-5 magneetimiskõver. On näha, et haruldaste muldmetallide magnetitel on suur jääkmagnetvoog ja ka suur lahtimagneetimiskindlus. Lahtimagneetivat mõju võib avaldada näiteks ankrureaktsioon.

Maksimaalne magneti energiatihedus $(BH)_{\max}$ vastab punktile demagneetimiskõveral, kus BxH tootlikkus on maksimaalne (joonis 11.14b). Energiatiheduse mõõtühikuks on džauli kuupmeetris, J/m3. Kasutatakse ka ühikut gauss-örsted (Ørsted), GOe.



Joonis 11.14. Püsimagnetmaterjalide jääkvootiheduse võrdlus (a) ja energiatiheduste kasv (b) ajas

Haruldastel muldmetallidel põhinevate magnetmaterjalide väljatöötamine algas 1960. a samaariumkoobalti (SmCo) sulamist. Neid magnetmaterjale saab väga hästi kasutada elektrimootorites ja generaatorites, kuid nad on väga kallid haruldase toormaterjali koobalti pärast. Uusim ja tähtsaim avastus püsimagnetmaterjalide alal tuli 1983. aastal, kui tutvustati suure energiatihedusega magnetmaterjali **neodüüm-raud-boori (NdFeB).** Võrreldes SmCo-püsimagnetitega, on NdFeB-püsimagneti magnetparameetrid küllaltki sarnaste omadustega, kuid odavamad.

Suurema tootlikkusega NdFeB-püsimagnetmaterjalid tõid kaasa püsimagnetitega elektrimasinate laialdasema kasutamise. Algas laiaulatuslik tööstuslik kohaldamine ja püsimagnetmasinate suurema kasuteguriga konstruktsioonide väljatöötamine.

Püsimagnetergutusega AV-mootor on sama masin nagu AV-rööpergutusega mootor. Põhierinevus on, et tema voog on kindla, püsimagnetite poolt määratud väärtusega. Niisiis ei saa selle mootori kiirust reguleerida ergutusvoolu või ergutusvoo muutmise teel. Püsimagnetitega AV-mootoril on kiiruse reguleerimise ainsaks viisiks ankru toitepinge muutmine ja ankruahela takistuse reguleerimine.

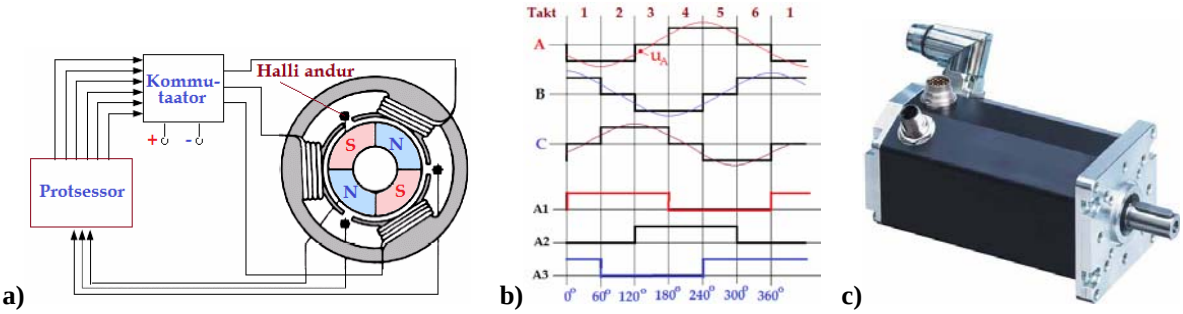
Neodüümmagnetid. NdFeB-magnetid on sarnaste omadustega nagu SmCo-magnetid, välja arvatud see, et neil ei ole nii head korrosioonikindlust ning temperatuuritaluvust. Samas on neil suurim energiatihedus, ulatudes kuni 52 MGOe (413,8 kJ/m^3), ning nad on mehaaniliselt tugevamad. Erikaalu järgi on NdFeB-magnetid kallimad kui ferriit- või AlNiCo-magnetid, kuid kui vaadata hinda magneti energiatiheduse järgi, siis on nad odavaimad magnetid. Tänu nende suurele energiatihedusele on nad leidnud kasutamist mitmetes kohtades, kus on oluline kompaktne lahendus. NdFeB-magnetid on aldid korrodeeruma ning vajavad seetõttu pinnakatet. NdFeB-magnetite puhul kasutatakse erinevaid pinnakatteid, mis võivad olla nii vask, hõbe, kuld, nikkel, tsink, tina või epoksiid.

NdFeB-magneti puhul võib kasulike omadustena välja tuua nende suurt magnetilist energiatihedust, suurt koertsitiivjõudu ning keskmist temperatuuritaluvust. Miinuseks on vähene mehaaniline tugevus ning korrosioonikindlus, kui magnet ei ole korralikult kaitsekihiga kaetud.

Samaariumkoobaltmagnetid. SmCo-magnetid kuuluvad haruldaste muldmetallmagnetite rühma, mis on hea korrosioonitaluvusega ning millel on suurem energiatihedus kui ferriit- ja AlNiCo-magnetitel ning parem temperatuuritaluvus kui NdFeB-magnetitel. SmCo-magnetid jagatakse kahte põhirühma: SmCo5 ja Sm2Co17 (seeriad 1-5 ja 2-17). Energiatihedus on 1-5 seerial 15 kuni 22 MGOe (119,4 kuni 175,1 kJ/m^3) ning 2-17 seerial 22 kuni 32 MGOe (175,1 kuni 246,7 kJ/m^3). Seda tüüpi magnetid taluvad väga hästi temperatuuri kuni 3500 °C. Paagutatud SmCo-magnetid on haprad ning võivad kergesti heita laaste või praguneda ning järskude temperatuurimuutuste puhul puruneda. Samaariumi kõrge hinna tõttu kasutatakse mainitud magnetmaterjale ainult juhul, kui on vaja kõrget töötemperatuuri ning on korrosioonioht. SmCo-magneti puhul võib kasulike omadustena välja tuua hea korrosioonitaluvuse, suure magnetilise energiatiheduse ning kõrge temperatuuritaluvuse. Miinuseks on nende kõrge hind ning väike mehaaniline tugevus.

11.6. Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinad

Kollektorita ehk harjadeta (*brushless, BLDC*) alalisvoolumootor on loodud klassikaliste kollektoriga mootorite omaduste parandamiseks. Automaatikasüsteemide täiturmehhanismidele esitatavad ranged nõuded kiiruse, positsioneerimistäpsuse suhtes on soodustanud selliste kontaktivabade kolmefaasiliste alalisvoolumootorite arengut. Oma ehituselt sarnanevad nad vahelduvvoolu sünkroonmootoritega, mille magnetpoolustega rootor pöörleb kolmefaasilise mähisega varustatud staatoris. Venekeelses kirjanduses nimetatakse neid ventiilmootoriteks. Harjadeta alalisvooluelektrimasina töö tugineb sünkroonsele tööpõhimõttele, sünkroonsele allikapinge ja kiiruse muutusele. Tema **rootoril** paiknevad püsimagnetpoolused (joonis 11.15) ja elektrotehnilistest terasplekkidest moodustatud staatoril kolmefaasiline mähis, mis on ühendatud kas täht- või kolmnurklülitusse. **Staator** sarnaneb asünkroonmootori staatoriga ja koosneb kerest, elektrotehnilisest terasest magnetahelast ning staatori uuretesse paigutatud mähistest. Mähiste arv määrab mootori faaside arvu. Isekäivitumiseks ja rootori pöörlemiseks piisab kahest faasist – siinus- ja koosinusfaasist. Tavaliselt on kasutusel kolm, harva neli faasi. Olenevalt paigutusviisist mähiste uuretesse eristatakse trapets- ja siinussisepingega mootoreid. Toiteviisi järgi on trapets- või siinusvool samuti faasivoolud.



Joonis 11.15. Pooljuhtkommutaatoriga (harjadeta) alalisvooluelektrimasina (a) tööpõhimõtte selgituseks (b). Ühe mootori kujundusnäide (c)

Rootoril on põhja- ja lõunapooluste vaheldumisega püsimagnetpooluspaaride arv kaks kuni kaheksa. Varem kasutati soodsa hinnaga ferriitpüsimagneteid. Nüüd levivad neodüüm- ja samaarium-koobaltmagnetid, mis suurema magnetvootiheduse tõttu võimaldavad valmistada kompaktsemaid mootoreid.

Mootori tööks on vaja staatorimähisega tekitada pöördmagnetväli, mis liitub rootoril paiknevate püsimagnetpooluste magnetväljaga. Liitmagnetväljas tekkivad energia kõrg- ja madalkontsentratsiooni alad. Sellega kaasneb väljakontsentratsiooni ühtlustusjõudude teke, mis rakenduvad rootori ja staatori magnetvooallikatele (staatori juhtmetele ja rootori püsimagnetitele). Tekkivad magnetvooallikatele mõjuvad jõupaarid. Jäigalt paigale kinnitatud staatorimähistel, milles on vool ja millele mõjub samuti pöördemoment, pöörlemisvõimalus puudub. Seetõttu paneb vastassuunaline jõupaar pöörlema püsimagnetid koos rootoriga.

Nad hakkavad pöörlema koos mähiste vooludest (välistoiteallika laengute energiaväljadest – magnet-väljadest) tekitatud pöördmagnetväljaga. Jõupaari teket iseloomustab joonis 4.4.

Joonisel 11.15b on vaadeldud kolmele staatorimähisele rakendatavat astmeliselt muutuvat toiteallika alalispinget. See formeeritakse toiteallika, kolme asendianduri, protsessori ja pooljuhtkommutaatori abil. Selles perioodiliselt muutuvast astmelisest pingest saab eraldada põhiharmoonilise. Joonisel faasile A on see tähistatud u_A. Faaside A, B ja C pingete põhiharmoonilised on teineteise suhtes nihutatud 120 elektrilise kraadi võrra. Seega toitepinged ja faasivoolud on sarnased asünkroonmootori staatori omadega, mille puhul vaadeldi pöördvälja teket põhjalikult asünkroonmasinate alapunkti 10.2 joonisel 10.5.

Rootori pöörlemiskiirus oleneb koormusest ja staatori toitepingest. Rootori pöörlemiskiirust muudetakse staatorimähiste ümberlülitamisega olenevalt rootori asendist. Asend määratakse **asendianduritega** või ilma nendeta. Asendianduritena võib kasutada fotoelektrilisi, induktiiv-, Halli jt andureid. Kõige enam kasutatakse fotoelektrilisi ja Halli andureid. Nad on praktiliselt inertsivabad ja nii ei teki rootori asendi määramisel hilistust. Asendiandureid on reeglina kolm. Anduri kahendkood fikseerib rootori kuus erinevat asendit. Juhtseade (joonisel 11.15a protsessor) muundab andurite signaalid juhtsignaalide kombinatsiooniks, mis juhivad kommutaatori ümberlüliteid (võtmeid) jõuahelas nii, et igal kuuest 60° pöördenurka haarava takti ajal on sisse lülitatud selline võtmete kombinatsioon, et kolmele ankru-(staatori-)mähisele rakendub joonisel 11.15b kujutatud toitepingete süsteem. Ankrumähised A, B ja C paiknevad staatoril 120° nurga nihkega ning nende algused ja lõpud on ühendatud nii, et võtmete ümberlülitamisega tekitatakse pöörd-magnetväli. Kui asendiandureid ei kasutata, siis nende ülesannet täidavad staatorimähised. Magnetpooluste pöörlemisel muutub mähiste aheldusvoo kiirus, mis indutseerib nendes allikasisepinge ja tekitab voolu. Kui mähist lülitatakse, siis mõõdetakse tekkivat signaali ja töödeldakse seda. Töötlemiseks on signaalitöötlusprotsessor. Harjadeta mootori pidurdamiseks ja pöörlemissuuna muutmiseks pole vaja toitepinge polaarsuse muutust. Piisab staatorimähise ümberlülituse juhtimpulsside järjekorra muutmisest.

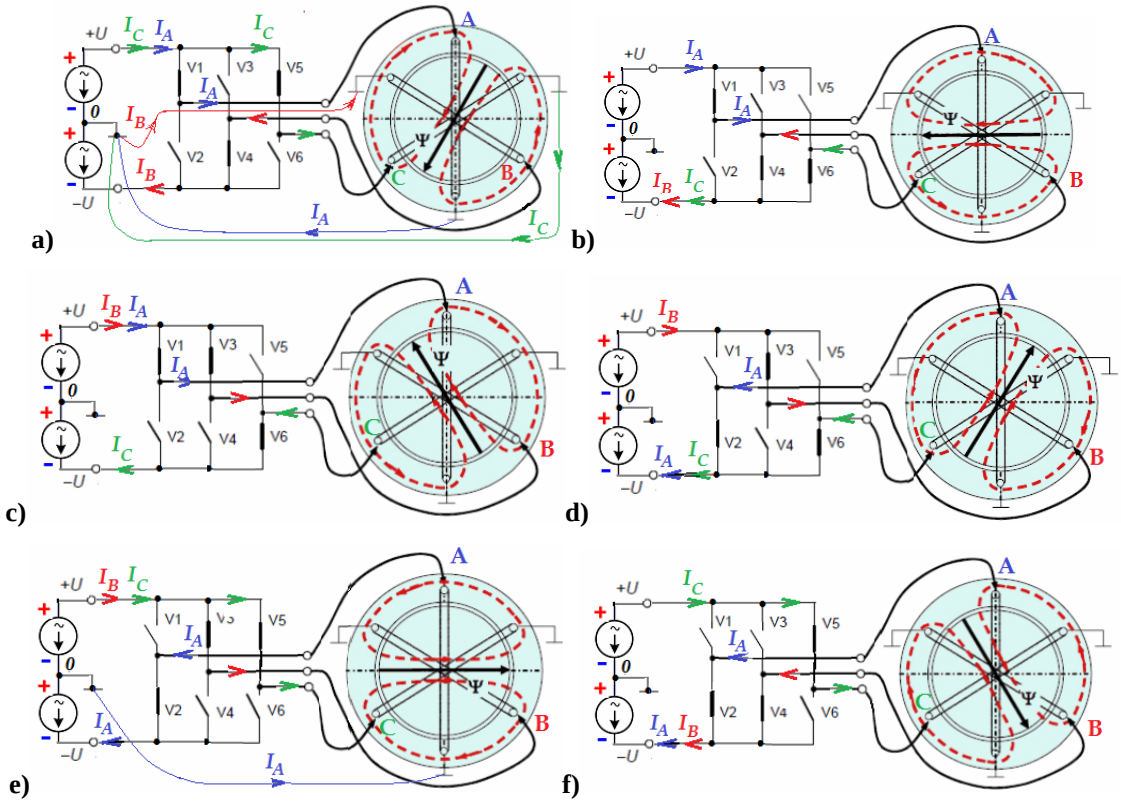
Juhtsüsteem sisaldab jõuvõtmeid. Nendeks on türistorid või jõutransistorid, millest moodustakse kas voolu- või pingevaheldi. Selleks et teha reaalajas mootori juhtimiseks vajalikku suurt arvutusmahtu, kasutatakse võtmete juhtimiseks mikroprotsessorjuhtimist.

Mootori töö tugineb sellele, et juhtsüsteem lülitab mähiseid ümber nii, et staatori ja rootori magnetvoo vektorid oleksid 90° nihkenurgaga. Impulss-laius-modulatsiooniga juhitakse staatori mähiste voolu ja seega ka magnetvoo vektorit. Selle tulemusel muutub ka rootorile mõjuv pöördemoment. Vektoritevahelise nurga märk määrab rootorile mõjuva momendi suuna.

Ümberlülitused tehakse nii, et rootori tekitatud ergutus- ja ankruvoo suhe jääks muutumatuks. Nende kahe voo liitumise tulemusel tekkib pöördemoment *M*, mis püüab pöörata rootorit nii, et staatori ja rootori magnetvood langeksid kokku, väheneksid liitmagnetvälja moonutused. Kuid rootori pöördumise tõttu toimub asendianduri signaali toimel järjekordne mähiste ümberlülitamine ja ankru magnetvoog lülitub ümber järgmisele taktile. Siin on jällegi vektorite vahel nihkenurk, mis põhjustab pöördemomendi tekke jne.

Mootori talitluses edestab staatori magnetomotoorjõu vektor rootori oma 90° võrra. Seda nihkenurka hoitakse asendianduri signaalide alusel. Piduritalitluses edestab rootori magnetomotoorjõu vektor staatori oma 90° võrra. Ka seda nihkenurka hoitakse asendianduri signaalide alusel. Mootori juhtsüsteem reguleerib rootorile mõjuvat momenti, muutes näiteks impulss-laius-modulatsiooniga ankru toitepinget. Erinevalt harjadega AV-mootorist toimub siin ankrumähiste ümberlülitamine elektroonika vahendusel.

Joonis 11.16 illustreerib lihtsustatult pöördmagnetvälja tekitamise ideed staatori mähiste abil. See toimub mootori toitemuunduri ventiilide ümberlülitamisega. Muunduri lülititel on kokku 8 erinevat lülitusolekut. Neist kahel juhul võrdub väljundpinge nulliga, siis kui kõigi faaside lülitid on ühendatud alalispingeallika sama klemmiga. Ülejäänud kuuel juhul antakse mootori mähistele potentsiaalide vahe, mis omakorda tekitab voolu ja magnetvoo. Järgnevatel joonistel on näidatud pooljuhtmuunduri ventiilide ümberlülitamise järjekord, voolu suunad eri etappidel ning sellest tulenev pöördmagnetvälja tekkimine mootoris. Märkigem, et summaarne magnetvoog haarab juhte, mille voolu suund on sama. Joonisel 11.16a on näidatud voolukontuuride teekond ja nende suunad. Selles näites on sama voolu suund mähiste *A* ja *C* alguses ning *B* lõpus.



Joonis 11.16. Pooljuhtkommutaatoriga elektrimasinas pöördmagnetvälja tekitamise idee illustratsioon

Joonisel 11.16 saab jälgida muunduri ventiilide ümberlülitamisega pöördmagnetvälja teket mootoris.

1. etapp. Pooljuhtmuunduri ventiilid V1, V4 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16a). Voolud tekitavad liitmagnetvälja, mille vektori suund on näidatud tugeva joonega.

2. etapp. Muunduri ventiilid V1, V4 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16b). Võrreldes esimese etapiga, on magnetvälja vektor pöördunud päripäeva 60° võrra.

3. etapp. Muunduri ventiilid V1, V3 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16c). Võrreldes teise etapiga on magnetvälja vektor pöördunud päripäeva veel 60° võrra.

4. etapp. Muunduri ventiilid V2, V3 ja V6 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16d). Võrreldes kolmanda etapiga on magnetvälja vektor pöördunud päripäeva 60° võrra.

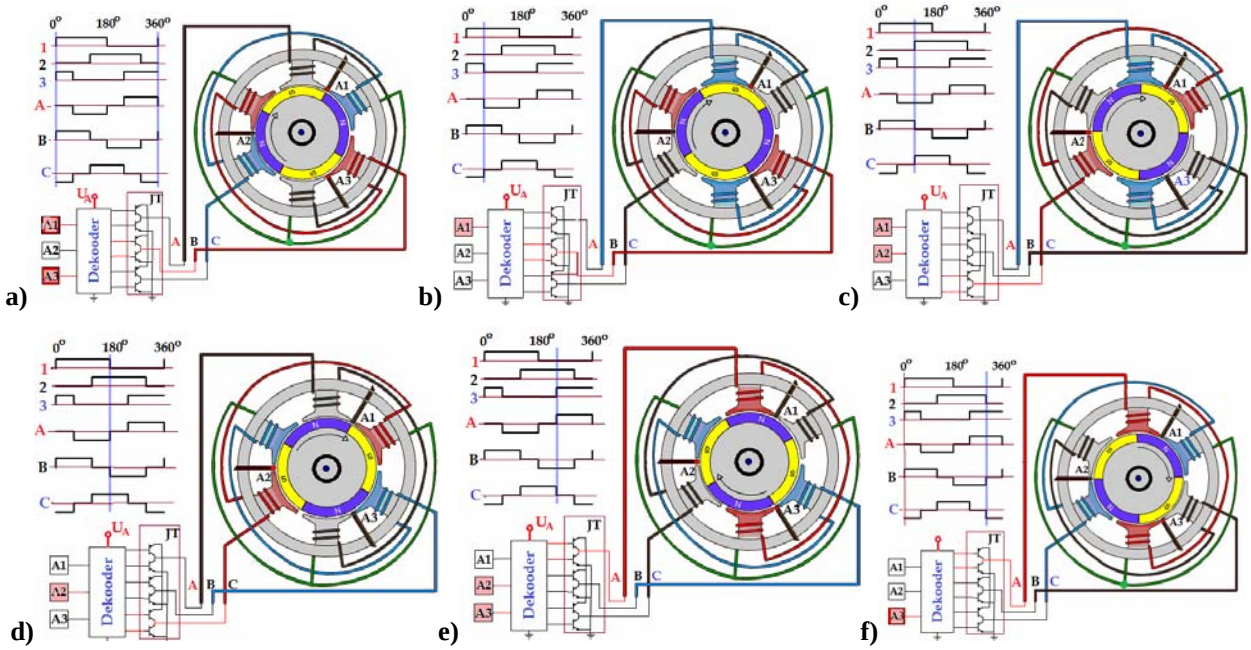
5. etapp. Muunduri ventiilid V2, V3 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16e). Võrreldes neljanda etapiga on magnetvälja vektor pöördunud päripäeva 60° võrra.

6. etapp. Muunduri ventiilid V2, V4 ja V5 juhivad voolu staatorimähisesse (joonis 11.16f). Võrreldes viienda etapiga on magnetvälja vektor pöördunud päripäeva 60° võrra. Sellega lõppes üks tsükkel, edasi korduvad teise tsükli etapid 1...6 ja nii edasi. Lõpptulemusena saame ventiilmootori staatori mähiste pöördmagnetvälja.

Joonis 11.17 iseloomustab neljapooluselise pooljuhtkommutaatoriga AV-masina toimimist. Siin vaadeldakse kuut töötakti, mida käivitavad asendiandurite A1, A2 ja A3 signaalid, mille ajadiagrammid on tähistatud vastavalt 1, 2 ja 3. Andurite väljundsignaalid on juhtploki rollis oleva dekoodri sisendsignaalideks. Viimase väljundsignaalid juhivad jõutransistoride tööd, millelt saavad toite masina faasimähised *A, B* ja *C*.

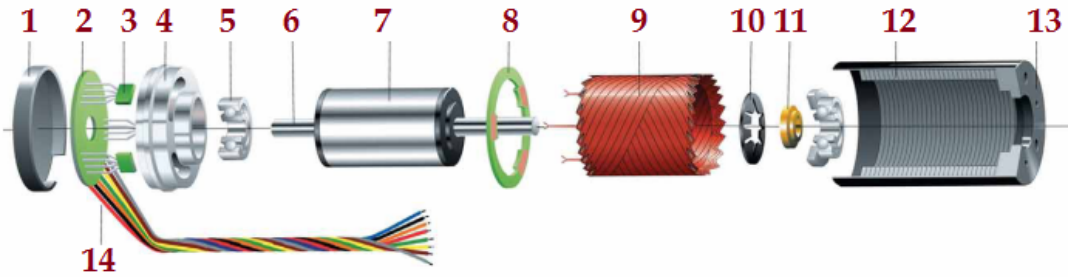
Selles näites koosnevad staatori faasimähised kahest 180° kraadi nihutatud sektsioonist. Faasimähised *A, B* ja *C* on ühendatud tähtlülitusse. Kuus töötakti moodustavad täistsükli, mille vältel rootor teeb ühe täispöörde. Sellise mudeli tööd on võimalik jälgida kodulehel:
http://www.ryerson.ca/~fsharifi/Courses/MEC830/AC-DC/Servo%20Magnetics%20Inc_%204-Pole%20Brushless%20DC%20Motor%20-%20GIF%20Animation_files/4-pole-bldc-motor021804.gif.

Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinad leiavad järjest laiemat kasutust nii tööstuses, olmes kui ka elektertranspordis. Elektrooniliste juhtsüsteemidega harjadeta AV-masinad ühendavad endas parimad kontaktivabade mootorite ja AV-mootorite omadused.



Joonis 11.17. Pöördmagnetvälja tekitamine neljapooluselises pooljuhtkommutaatoriga elektrimasinas

Joonisel 11.15c oli näitena esitatud pooljuhtkommutaatoriga AV-masina välisvaade. Joonisel 11.18 ühe pooljuhtkommutaatoriga AV-masina koosteosad, mis oluliselt erinevad eespool vaadeldud skemaatilistest mootoritest. Seega on elektrimasinate vallas veel palju arenguruumi.



Joonis 11.18. Pooljuhtkommutaatoriga AV-masina vaade seestpoolt: 1 – otsakilp, 2 – asendiandurite trükkplaat, 3 – Halli andur, 4 – laagri hülss, 5 – laager, 6 – võll, 7 – rootori magnetpoolused, 8 – isoleeriv seib, 9 – mähis, 10 – taldrikvedru, 11 – vahehülss, 12 – isolatsioon, 13 – masina kere, 14 – ühendusjuhtmed

Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinate eelised. Kui võrrelda pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinaid teiste elektrimasinatega, siis võib näha, et nende kasutegur ületab asünkroon- ja sünkroonmasinate oma 1...2% nimitalitluses ja 10...15% osalisel koormusel. Tõhusus tagatakse sellega, et kõikide kiiruste puhul ei vajata masina ergutusvälja loomiseks voolu. Fikseeritud kasuteguri rekord 99,3% kuulub väikese kiirusega laevajõuseadme mootorile. Mootori jahutus on lihtsam, sest rootorilt pärinev soojushulk on väike, vajalik on välise staatori jahutus, kus on mugav kasutada vesijahutust. Lihtne jahutussüsteem võimaldab paindlikku kujundust, saab kasutada lühikest suure ja pikka väikese läbimõõduga aga ka radiaal- ning aksiaalvoo masinat.

Mass ja mõõtmed on pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinatel 33...50% väiksemad kui klassikalistel mootoritel. Rootorimähise puudumine teeb nad lihtsaks ja väga töökindlaks. Asünkroonmasinatel on mähised staatoril ja rootoril, sünkroonmasinatel lisanduvad veel kaks ergutimähist.

Suur energiatihedus tagatakse suurema arvu pooluspaaridega. Nendel võib olla kuni 3 korda rohkem pooluseid kui sama läbimõõduga tavamootoritel. See võimaldab ehitada kergemaid, kompaktsemaid ja

paindliku kujundusega masinaid ka kõrgematele sagedustele, näiteks 400 Hz. Rekordenergiatiheduse näitajad võimsuste vahemikus 380...750 kW ületavad 1,65 kW/kg. Pooljuhtkommutaatoriga püsimagnet-ergutusega alalisvooluelektrimasinad on võimelised töötama ka generaatorina.

Täiendavad eelised: lai kiiruse reguleerimisdiapasoon, mis ületab vahelduvvoolumootorite omi. Minimaalne hõõrdumine rootori ja staatori vahel põhjustab täiendavad eelised:

- Head energeetilised näitajad. Kasutegur küünib 95%.
- Töökindlus ja pikk tööiga. Masin on kollektori- ja kontaktivaba, millel puuduvad hooldust vajavad sõlmed. Tööiga piirab vaid laagrite ja püsimagnetite eluiga.
- Suur liigkoormusmomendi talumisvõime.
- On võimalik kasutada plahvatusohtlikus keskkonnas ja vajavad vähem tööpinda.
- Töökarakteristikud on lineaarsed.
- Minimaalne müratase.
- Minimaalne soojuse eraldumine.
- Puuduvad tehnilise hoolduse kulud.

Puudused: keeruline juhtimissüsteem ja kõrge hind.

Real juhtudel on otstarbekam sagedusjuhtimisega asünkroonmootori kasutamine .

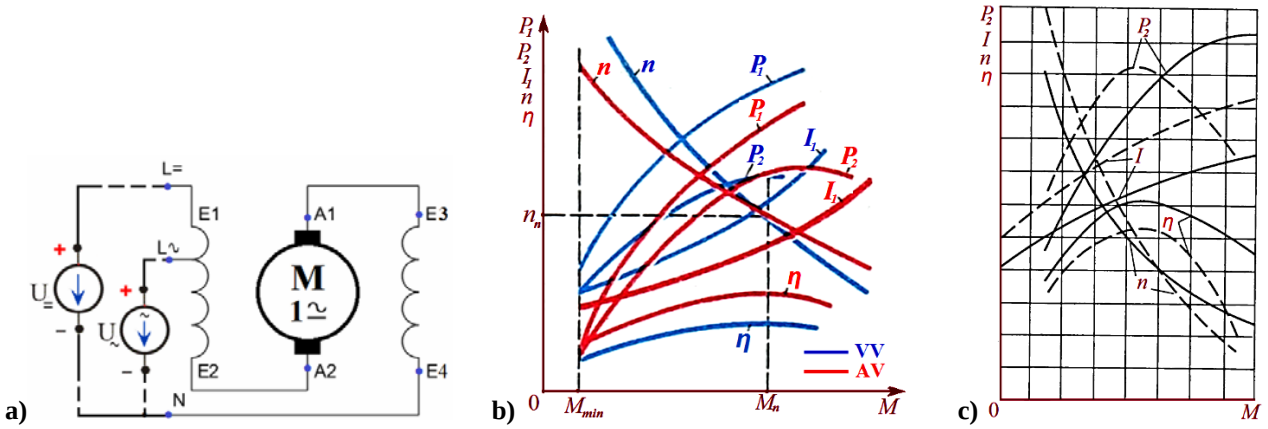
Kombineerides maksimaalse kasuteguri, saab ülilihtsa ja töökindla juhtploki (võtmete kommutaatoriga ilma impulss-laius-modulatsioonita) kasutamisel, vaatamata võimalusele muuta pöörlemiskiirust laias vahemikus, tagada rahuldavat kasuteguri väärtust vaid küllalt kitsas kiiruste vahemikus. Seda põhjustab mähiste induktiivsus. Kui kiirus on soodsaimast väiksem, jätkub voolu andmine mähistesse ka pärast magnetvoo piirväärtuse saavutamist, mis neid kuumutab. Soodsaimast suurema kiiruse korral ei jõua vool suureneda ja magnetvoog ei saavuta maksimumväärtust. Need asjaolud põhjustavad olukorra, et toodetakse erineva induktiivsusega (keerdude arvuga) mähiseid. Kiirekäiguliste mootorite korral on keerdude arvud väiksemad.

Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinaid toodetakse standardtoodanguna võimsustel kuni 300 kW. Võimsamate mootorite valmistamiseks pole tehnilisi probleeme. Nad on tõhusamad, kompaktsemad, neil on suur võimsustihedus ja paremad reguleerimisomadused. Mootorite laiemat levi piirab kallim hind. Head väljavaated on seal, kus on vaja suurt käivitusmomenti. Nende mootoritega otsetoime (ilma käigukastita) ajamid ei vaja nii põhjalikku hooldust ja tööiga on pikem. Rekordilised näitajad on võimsa laeva ajami mootoril: 36,5 MW, 127 p/min, väändemoment üle 2 700 000 Nm ja kiirekäigulisel 11,4 MW võimsusega mootoril 6225 p/min.

11.7. Universaalsed kommutaatormootorid

Igapäevaelus levivad järjest enam ühefaasilised vahelduvvoolu kommutaatormootorid (joonis 11.18). Neid kasutatakse olmeseadmetes, erinevate ajamitena ja automaatikavahenditena. Ühefaasiline kommutaatormootor sarnaneb ehituselt jadaergutusega alalisvoolumootoriga (peavoolumootoriga). Sarnane on ka nende tööpõhimõte.

Mootori ankru- ja ergutusmähises muutub vahelduvvoolu suund korraga. Selle tulemusel pöördemomendi ja ankru pöörlemissuund ei muutu. Kuna masina moment, (11.4) põhjal $M = c_M I_a \Phi$, on võrdeline põhimagnetvoo Φ ja ankruvoolu I_a korrutisega, siis nende üheaegne märgimuutus momendi märki ei muuda. Siinuseliselt muutuva voolu ja magnetvoo korral moment muutub ajas samuti siinuseliselt kuid kaks korda suurema sagedusega. Momendi muutus on sama sagedusega, mis on tarbitaval aktiivvõimsusel. Nende tunnusjooned ühtivad ja erinevad vaid mõõtkava poolest. Tulemus vastab energiamuundamise olemusele, sest aktiivvõimsus iseloomustab igal ajahetkel elektrienergia muundumise intensiivsust mehaaniliseks energiaks, momendiks – töötegemisvõimeks.



Joonis 11.18. Universaalne kommutaatormootor. Alalis- ja vahelduvvooluallikaga lülitusskeem (a) ja töötunnusjooned (b ja c)

Vahelduvvoolu kommutaatormootor on sisuliselt sünkroonmasin, milles rootori asendi anduriks ja mähiste voolu ümberlülitiks on üks ja sama seade harjadest ja kollektorist koosnev kommutaatorisõlm.

Kommutaatormootoreid (joonis 11.18a) võib toita alalisvoolu- või vahelduvvooluvõrgust. Seetõttu nimetatakse neid **universaalseteks kommutaatormootoriteks**. Laialdaselt on levinud ühefaasilisest võrgust toidetavad jadaergutusega kommutaatormootorid.

Alalisvoolukommutaatormootoris pole kindlaks määratud, millise klemmiga ühendatakse mootori klemmikarbis (joonis 11.18a) toiteallika pluss- ja miinusklemmid . Vahelduvvoolutoite korral kasutatakse ainult osa ergutusmähisest. See võimaldab vähendada mähise induktiivsust ja parandada mootori töötunnusjooni. Alalisvoolutoite korral läbib kogu ergutusmähist mootori töövool.

Ehituse poolest erinevad universaalsed kommutaatormootorid alalisvoolukommutaatormootoritest selle poolest, et nende magnetahel (pooluskingad ja kere) valmistatakse elektrotehnilisest lehtterasest. See võimaldab vähendada pöörisvoolu- ja hüstereesikadu. Ankrusüdamik valmistatakse ka alalisvoolumasinates elektrotehnilisest lehtterasest.

Universaalsel kommutaatormootoril reguleeritakse pöörlemiskiirust ja muudetakse pöörlemissuunda sarnaselt alalisvoolu jadaergutusega mootoriga. Joonisel 11.18b on näidatud universaalse kommutaatormootori töötunnusjooned punase värviga, kui toide on alalisvoolutoiteallikalt, ja sinisega, kui toide on vahelduvvoolu toiteallikalt. Tunnusjoonte võrdlusest selgub, et universaalse kommutaatormootori kasutegur alalisvoolutoiteallika korral on suurem kui vahelduvvoolu toiteallika korral.

Universaalse kommutaatormootori võimsus on tavaliselt kuni 300 W. Mootori võrku lülitamisel ei pea mootorit eelnevalt koormama, kuna hõõrde kadu laagrites ja harjasõlmes on küllaltki suur. Seetõttu mootori pöörlemiskiirus ei saavuta mootori jaoks ohtlikku kriitilist väärtust.

Mänguasjades kasutatakse kõige väiksemaid mõnevatise võimsusega alalisvoolukommutaatormootoreid, mille keres on kolme pooluskingaga laagritel paiknev rootor; kommutaatorisõlm, mis sisaldab kahte harja ja vasklestasid ning püsimagnetitega kahepooluseline staator. Toitepinge 3…9 V.

Mootoritel, mille võimsus võib küündida mõnekümne vatini, on laagritel paiknev mitmepooluseline rootor; nelja grafiitharja ja vasklestasid sisaldav kommutaatorisõlm; püsimagnetitega neljapooluseline staator. Toitepinge 12 V. Kasutatakse tänapäevastes autodes: kliimaseadmete ventilaatorite ajamid, klaasipesurite pumbad, kojamehed mänguasjades.

Mootoritel, mille võimsus on mõnisada vatti, on elektromagnetitega neljapooluseline staator.

Kokkuvõtvalt kommutaatormootorite eelised: valmistamise, käidu ja remondi lihtsus ning küllalt suur tööiga. Puudused: suure kasuteguri ja väikese massiga tõhusatel mootoritel on väike pöördemoment ja suur pöörlemiskiirus (tuhanded pöörded minutis), mistõttu tavaliselt on vajalikud reduktorid, välja arvatud ventilaatorid ja pumbad, mis seda ei vaja. Väikese kiiruse korral on mootori kasutegur väike ja tekkivad jahutusprobleemid.

Universaalseid kommutaatormootoreid kasutatakse oma kompaktsuse, kerguse, lihtsa pöörlemiskiiruse reguleerimise ja suhteliselt väikse maksumuse tõttu käsielektritööriistades ja olmetehnikas. Euroopa ja USA raudteedel kasutatakse neid veomootoritena.

Toites mootorit vahelduvvoolul sama suure pingega kui alalisvoolu korral, avaldub üks mootori eripära ja ka eelis. See ilmneb tööl väikese kiirusega (käivitus ja liigkoormus), kus staatorimähise induktiivtakistus piirab tarbitavat võimsust ja vastavalt mootori maksimaalset momenti orienteeruvalt 3..5 M_n-ni. Samal ajal on see alalisvoolu korral 5..10 M_n. Selleks et mootorite mehaanilised tunnusjooned AV- ja VV-toite korral palju ei erineks, kasutatakse staatorimähise sektsioneerimist (joonis 11.18a) ja eraldi väljavõtet. Vahelduvvoolu korral on staatorimähise keerdude arv väiksem, mistõttu vool suureneb.

Võimsatel AV-kommutaatormootoritel on lisaprobleem. Kommutatsiooni hetkel, kui sektsioon läbib neutraali, muudab ankru (rootori) sektsiooniga ahelduv magnetvoog oma suunda vastupidiseks, mis indutseerib sektsioonis nn reaktiivse allikasisepinge.

Kuna ankru (rootori) sektsiooniga aheldub ka staatori pulseeriv magnetväli, siis sektsioonide ümberlülitamise käigus indutseeritakse sektsiooni ka nn transformatoorne allikapinge. Viimase amplituud on suurim käivitusel, mis väheneb rootori kiirenemisel sünkroonkiiruseni, olles sünkroonkiirusel võrdne nulliga. Edasisel kiiruse kasvamisel suureneb amplituud jällegi võrdeliselt ankru (rootori) kiirusega. Probleemi lahendamiseks tuleb vähendada aheldusvoo suurust. Selleks püütakse kasutada ühekeerulist sektsiooni ja suurendada sektsiooni aktiivtakistust. Üheks võtteks on lisada kollektori lestade juurde takistid, kus on lihtne tagada nende jahutust. Samuti saab kasutada suurema eritakistusega harju. Lisapooluste kasutamist pole muutuva kiiruse korral kerge teostada.

Universaalsed kommutaatormootorid sobivad hästi madalama toiteallika sageduse puhul. Neid on kasutatud sagedustel 16 ja 25Hz.

Mootorite pöörlemissuuna muutmiseks muudetakse kas staatori või rootorimähise polaarsust.

Universaalsete kommutaatormootorite omadused. Võrdlus on tehtud 230 V, 50 Hz mootori ja sama võimsusega AV-mootori vahel. Mehaaniliste tunnusjoonte erinevus jäikuse ja suurima momendi osas võib olenevalt ajamile esitatavatest nõuetest olla nii eelis kui ka puudus.

Eelised AV-kollektormootori ees:

- Otse võrku lülitamine ilma lisaseadmeteta. AV-kollektormootor vajab vähemalt alaldit.
- Väiksem käivitus- ja liigkoormusvool ning käivitusmoment. See on eelis olmeseadmete korral.
- Lihtne juhtahel (kui see on vajalik), mis koosneb türistorist (sümistorist) või transistorist ja reostaadist. Kui juhtahela mõni koosteosa rikneb, siis mootor jääb töökorda, kuid lülitub tööle täisvõimsusega.

Puudused AV-kollektormootori suhtes:

- Väiksem kasutegur staatori ümbermagneetimise kao ja potentsiaalilangu tõttu mähise induktiivtakistusel.
- Väiksem mootori poolt arendatav suurim pöördemoment.

Eelised asünkroonmootori ees:

- Kiirema käiguga ja kiirus pole seotud toiteallika sagedusega.
- Kompaktsus ka reduktori kasutamise korral.
- Suur käivitusmoment.
- Koormuse kasvu korral, kui toitepinge on muutumatu, vähenevad automaatselt ja võrdeliselt pöörded praktiliselt kuni nullini ja suureneb moment. Mootoril on pehme mehaaniline tunnusjoon. Moment on võrdeline ja pöörded on pöördvõrdelised võlli koormusega (tarbitava võimsusega). Sõltuvus on praktiliselt lineaarne tühijooksust kuni täieliku pidurduseni.
- Muutes toitepinget on võimalik sujuvalt, väga laias vahemikus – nullist nimiväärtuseni, reguleerida momenti ja pöörete arvu ajaühikus.

Puudused asünkroonmootoriga võrreldes:

- Koormuse muutudes muutub pöörlemissagedus. Seal on see puuduseks, kus on vajalik püsikiirus.
- Harjade ja kollektori olemasolust tingitud suhteliselt väike tööiga, vajadus kasutada kõvast materjalist harju, mis kulutavad kollektorit.
- Tugev sädelemine kommuteerimisel, mis põhjustab elektromagnetiliste häiringute teket.
- Suur müratase.
- Suhteliselt suur kollektori, seega ka mootori koosteosade arv.

Harjade ja kollektorisõlme tööiga määrab tavaliselt universaalsete kommutaatormootorite tööea, mis tänapäevaste olmemasinate korral on võrreldav nende mehaaniliste ülekannete ja talitlussõlmede tööeaga. Mootori nimimoment projekteeritakse 3…5 korda väiksemaks suurimast arendatavast momendist. Tühijooksu pöörlemiskiirust piirab vaid kadu mootoris. Seetõttu võib võimsa mootori käivitamine ilma koormuseta põhjustada ta purunemise – „lõhki jooksmise“.

Asünkroonmootor säilitab nn ventilaatori tunnusjoone tõttu nimikiiruse lähedase kiiruse ka siis, kui koormusmoment suureneb järsku ka kümneid protsente. Seejuures väheneb võlli pöörlemiskiirus vähe, vaid mõni protsent. Võlli kiiruse märgataval vähenemisel kuni kriitilise momendini mootori moment ei kasva, vaid langeb nullini ja mootor seiskub. Tühijooksul on pöörlemiskiirus muutumatu ja on veidi suurem nimikiirusest.

Ühefaasilisel asünkroonmootoril seonduvad käivitamisega lisaprobleemid, kuna tavaoludes mootor momenti ei arenda. Et pulseeriva välja korral tekitada pöördemomenti, kasutatakse uurde lõhestamist; kunstliku lisafaasi tekitamist kondensaatori või oomtakisti abil. Vastasfaasis vähendab pöördväli teoreetiliselt ühefaasilise asünkroonmasina kasuteguri 50…60%-ni. Mootorit võib vaadelda koosnevana ühel võllil paiknevast kahest masinast, millest üks on mootori talitluses, teine vastulülitustalitluses.

Kokkuvõttes on universaalsed kommutaatormootorid ühefaasilise toiteallika korral väljaspool konkurentsi. Mehaanilised tunnusjooned määravad põhiliselt nende mootorite kasutusvaldkonnad.

Sama võimsusega ühefaasilisel asünkroonmootoril on pöörlemiskiirus piiratud toiteallika sagedusega. Seetõttu on kiiremad universaalsed kommutaatormootorid asünkroonmootorist oluliselt kergemad, kompaktsemad. Juhul kui asünkroonmootorit toidetakse kõrgsagedusega sagedusmuundurist, siis masinate kaalu- ja gabariidinäitajad muutuvad ühismõõdulisteks. Seejuures säilib mehaanilise tunnusjoone jäikus. Lisandub kadu sagedusmuunduris, toitepinge sageduse suurenemisega kaasneb teraseskao kasv ja kasuteguri vähenemine.

Mehaanilise tunnusjoone alusel universaalse kommutaatormootori lähianaloogiks on pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasinad (p. 11.6). Nad sisaldavad alaldit, rootori nurgaandurit ja vaheldit. Sama gabariidiga püsimagnetitega rootoriga ja pooljuhtkommutaatoriga mootori maksimaalne moment on väiksem kui universaalsel kommutaatormootoril.

11.8. Kordamisküsimused

1. Alalisvoolumasinate otstarve, ehitus ja töötamispõhimõte.
2. Ankrureaktsioon ja kommutatsioon.
3. Alalisvoolumootorite mehaanilised tunnusjooned ja pöörlemiskiiruse muutmine.
4. Püsimagnetitega alalisvoolumootori eripära.
5. Pooljuhtkommutaatoriga alalisvooluelektrimasina teostamisidee.
6. Universaalse kommutaatormootori tööpõhimõte.

12. SÜNKROONMASINAD

12.1. Ehitus ja tööpõhimõte
12.2. Sünkroonmasina ankru vastumõju (-reaktsioon), aseskeem ja mehaaniline tunnusjoon
12.3. Sünkroonmootori elektromehaanilised ja elektrilised omadused
12.4. Püsimagnetitega sünkroonmasinad. Kujundus ja liigitus
12.5. Asünkroniseeritud sünkroonmasin
12.6. Ferromagnetergutusega (lühidalt: ferroergutusega) sünkroonmasinad
12.7. Samm-mootorid
12.8. Kordamisküsimused

12.1. Ehitus ja tööpõhimõte

Sünkroonmasinaid kasutatakse generaatori ja mootorina. Nende põhitunnuseks on **rootori pöörlemine sünkroonselt koos staatori pöördmagnetväljaga.** Sünkroongeneraatoreid (*synchronous generators* või *alternators*) kasutatakse mehaanilise energia muundamiseks elektrienergiaks. Nad on põhilised elektriallikad ja nendega genereeritakse valdav osa tarbitavast elektrienergiast. **Sünkroongeneraatoris tekitatakse pöördmagnetväli mehaaniliselt**, pannes mehaanilise energiaallikaga, **peaajamiga** (*prime mover*), generaatori rootoril olevad magnetpoolused koos rootoriga pöörlema. Magnetpooluste energiaväli (ergutus-magnetvoog) tekitatakse alalisvooluga rootoril paiknevas ergutusmähises või püsimagnetite domeenide elementaarvoolu abil. See rootori ajas muutuv pöördmagnetväli, aheldudes paigalseisva staatori mähistega, indutseerib neis allikasisepinged, muutes mähised elektriallikateks (alaptk 10.2, joonis 10.5). Need kolm allikat ühendatakse omavahel ja tarbijate elektrivõrguga, moodustades kolmefaasilise toitesüsteemi.

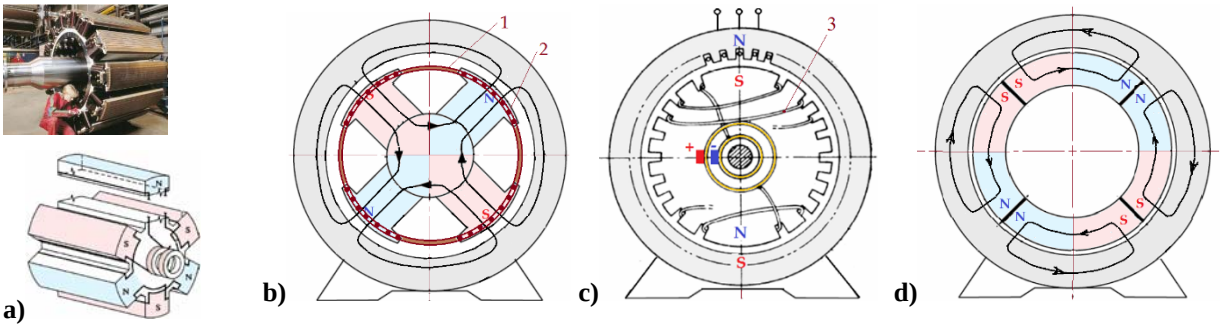
Sünkroonmasina **staator** (ankur) sarnaneb asünkroonmasina staatoriga. Staatori sisepind on üleni kaetud uuretega, kuhu paigutatakse mähised. Kahe uurde vahele jäävat magnetahela osa nimetatakse hambaks. Hammaste kaudu läheb staatori magnetvoog läbi õhupilu rootorisse, mida sünkroonmasinal nimetatakse ka **induktoriks**. Õhupilu laius sünkroonmasinatel on märksa suurem kui asünkroonmasinatel. Ergutusväli tekitatakse alalisvooluga eraldi toiteallikast või püsimagnetite elementaarvooludega, mitte reaktiivse vooluga vahelduvvoolu toitevõrgust. Siin ei ole õhupilu väärtus nii kriitiline kui asünkroonmasinate korral. Lähtudes ehituslikest kaalutlustest ning masina töökarakteristikute nõutava taseme tagamisest, valitakse võimsates masinates õhupilu laiuseks 5...50 mm. Ergutusmähist toidetakse tavaliselt rootoril olevast alaldiga vahelduvvoolu- või alalisvoolugeneraatorist.

Väikeste võimsuste korral kasutatakse sünkroonmasinaid, kus ergutusmähis paikneb paigalseisval staatoril (nii nagu alalisvoolumasinal) ja vahelduvvoolumähis pöörleval rootoril. Viimase mähise väljaviigud tuuakse kontaktrõngastele harjade kaudu masina väljundklemmidele. Järgnevalt käsitleme vaid klassikalise ehitusega sünkroonmasinaid.

Sünkroonmootoril ühendatakse staatorimähis elektrivõrguga ja vool mähises tekitab pöördmagnetvälja, nagu ka asünkroonmootori staatorimähis (alaptk 10.2, joonis 10.5). Erinevalt asünkroonmootorist tekitatakse sünkroonmootori rootori magnetpoolustes elektromagnet- või püsimagnetergutusega veel teine magnetvoog, nn **ergutusvoog**, mis liitub staatorimähise pöördmagnetvooga. Liitumise tulemusena tekkivad nii staatori-mähistele kui ka rootori magnetpoolustele mõjuvad jõupaarid, mis ei suuda liigutada kohtkindlat staatorit, kuid püüavad pöörata rootorit nii, et **staatori ja rootori magnetvoo vektorite suunad langeksid kokku**. See protsess on pidev, sest sünkroonkiirusega pöörlev staatori magnetväli on pidevas ringlemises ja väljade liitumisega kaasnev pidev jõumoment pöörab rootorit pöördväljaga pidevalt kaasa ning rootor hakkab pöörlema staatorivälja poolt määratud **sünkroonkiirusel.** Mida suurem on nurk staatori ja rootori magnetvoo vektorite vahel (teatud piirini), seda suurem moment mõjub masina rootorile.

Sünkroonmasina rootor ehk **induktor** on sisuliselt võimas elektromagnet – üht või mitut magnet-pooluspaari, mille ergutusmähist toidetakse generaatori korral alalisvooluga tavaliselt vahelduvvoolu-generaatorist läbi alaldi – **ergutist**. Erguti asub ühisel võllil generaatoriga. Erguti võimsus on 1…2% sünkroongeneraatori nimivõimsusest.

Rootorit saab iseloomustada magnetpooluste kuju järgi. Need võivad olla **väljepoolused** (*salient poles*) või **peitpoolused** (*nosalient poles*). Väljepooluste korral (joonis 12.1a ja b) on rootori poolused selgesti eristatavad, nad ulatuvad rootori pinnalt välja ning õhupilu on minimaalne pooluse telgjoone kohal. Väljepoolustega sünkroonmasinaid kasutatakse otsetoime tuule-, diisel- ja hüdrogeneraatorites. Viimastes on pooluste arv suhteliselt väikese pöörlemiskiiruse tõttu suur (kuni 100). Hüdroturbiinide pöörete arv on tavaliselt 50…750 p/min, mis nõuab 50 Hz sageduse korral vastavalt 60…4 pooluspaari olemasolu sünkroongeneraatoril. Väljepoolustega masin töötab ka ilma ergutusväljata, seega ilma ergutuseks kasutatavate püsi- või elektromagnetiteta. Siis töötab see **ferromagnetergutusega** (ferroergutusega), mis seisneb selles, et pöördmagnetväli magneedib rootori ferromagnetmaterjalist magnetahelat ilma tavapäraselt ergutuseks kasutatavate püsi- või elektromagnetiteta. Sellega kaasneb üheaegselt rootori ergutusvälja loomine ja pöördvälja võimendamine. Tulemus oleneb õhupilu suurusest. Väikseima õhupilu korral on võimendus maksimaalne, suurima korral minimaalne. Kuna väljepooluste korral muutub õhupilu suurus suurtes piirides, siis ka võimendus ja rootori ergutusväli muutuvad suurtes piirides. See tagab sünkroonmasina töö nii generaatorina kui ka mootorina.



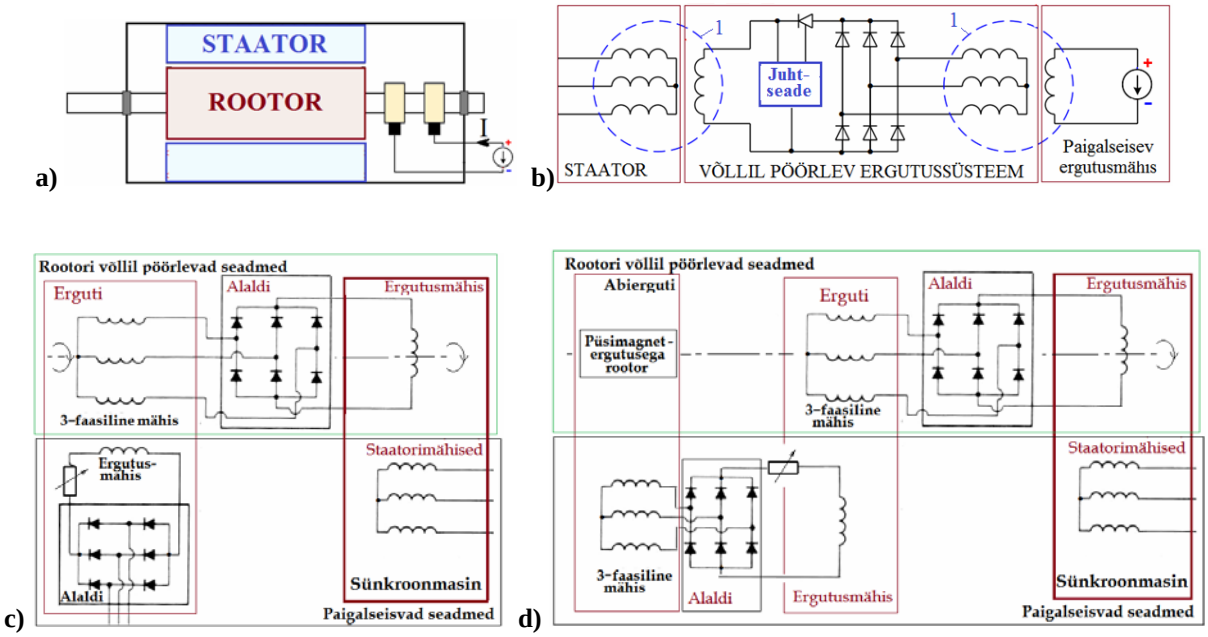
Joonis 12.1. Sünkroonmasina ehitus: a – väljepoolustega rootor, b – väljepoolustega käivitusmähisega masin. Peitpoolustega ühe (c) ja kahe pooluspaariga (d) mootor: 1 – lühisrõngas, 2 – lühisvarras, 3 – ergutusmähis

Kirjanduses nimetatakse sellise tööpõhimõttega mootorit **reaktiivseks sünkroonmootoriks** ehk **reluktants-mootoriks** (*reluctance motor*), mille tööd selgitatakse õhupilu magnetilise takistuse muutumisega rootori asendi muutumisel. Selline selgitus on kahjuks formaalne ja ei ava masina toimimismehhanisme. Seega on soovitatav kasutada nimetust: **ferromagnetergutusega (ferroergutusega) sünkroonmasin.**

Peitpooluste korral (joonis 12.1c ja d) on rootori pind sile ning õhupilu ühtlane kogu ringi ulatuses. Peitpoolustega rootori ergutusmähis asub silindrilise rootori pinnal olevates uuretes (joonis 12.1c). Peitpoolustega rootorit kasutatakse auru- või gaasiturbiinajamiga generaatorites, nn **turbogeneraatorites**.

Neil on suur pöörlemiskiirus ja seetõttu on rootoril vaja üks paar pooluseid, harva kaks paari. Peitpoolustega rootor valmistatakse massiivsest terassepisest, kuhu freesitakse uurded (joonis 12.1c). Uuretes paikneb alalisvoolu ergutusmähis 3. See kinnitatakse rootori uuret katva mittemagnetilise kiiluga. Massiivne terassepis tagab suurte kiirekäiguliste rootorite jaoks vajaliku mehaanilise tugevuse. Generaatori maksimaalset võimsust piiravaks teguriks on uuretesse paigutatud ergutusmähiste laupühenduste tugisidemete ja kinnituskonstruktsioonide vastupidavus suurtele tsentrifugaaljõududele ja ka rootori mehaaniline tugevus.

Rootori elektromagnetpooluste korral juhitakse alalisvoolu toiteallikalt saadav ergutusvool (joonis 12.2a) liikumatute harjade kaudu pöörlevasse rootorisse läbi rootori võllil asuvate ja koos võlliga pöörlevate **kontaktrõngaste**. Kontaktrõngaid ja harju kasutatakse kõikides väikese võimsusega sünkroonmasinates, sest nad on odavad ja piisavalt tõhusad. Võimsates generaatorites ja mootorites kasutatakse ka vähem hooldust vajavat harjadeta (*exciters*) ergutusmähise toidet (joonis 12.2b, c, d), kus ergutusvool saadakse rootori võllil asuva väikese vahelduvvoolugeneraatori voolu alaldamise teel. Reguleerides ergutigeneraatori paigalseisva ergutusmähise (c ja d) voolu, saab muuta peamasina ergutusvoolu ilma kontaktrõngaste ja harjade abita. Kontaktivaba lahenduse tõttu vajab harjadeta erguti vähem hooldust. Joonise 12.2b vasakpoolses osas on kujutatud võimsa sünkroongeneraatori staatorimähist ja selle kõrval koos võlliga pöörlevat rootorimähist. Joonisel 12.2c ja d on võimsa sünkroongeneraatori mähised eraldatud raamiga ning tähistatud sõnaga „Sünkroonmasin“.



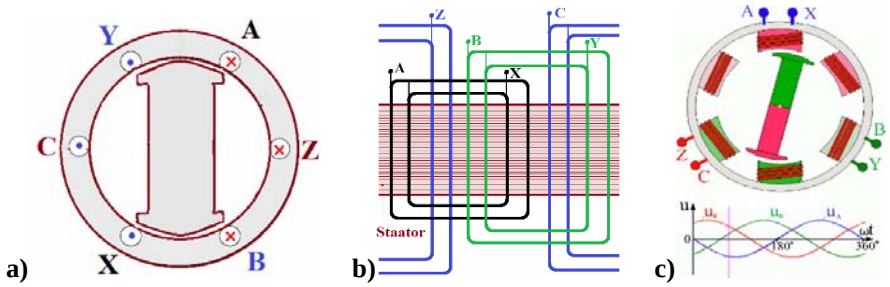
Joonis 12.2. Sünkroonmasina ergutid. Väikesevõimsuselise masina harjadega (a) ja harjadeta (b) erguti. Võimsa masina vahelduvvoolugeneraatoriga (c) ja abiergutiga (d) ergutussüsteem: 1 – magnetiline sidestus pöörleva ja paigalseisva masinaosade vahel

Selleks et generaatori ergutus ei sõltuks välistest toiteallikatest, kasutatakse ergutussüsteemis täiendavat väikest **abiergutit** (*pilot exciter*). Abierguti (joonis 12.2d) on samuti väike vahelduvvoolugeneraator, mille püsimagnetergutusega rootor paikneb peamasina rootori võllil ja paigalseisev on kolmefaasilise mähisega staator. Abierguti toidab alaldi kaudu põhierguti ergutusmähist. Põhierguti generaatori vool alaldatakse ja sellega tekitatakse sünkroonmasina rootori magnetpoolused. Kui abierguti paikneb generaatori võllil, siis ei vajata sünkroongeneraatori tööks välist toiteallikat.

Võimsad sünkroongeneraatorid, millel on harjadeta ergutid, on töökindluse tõstmiseks varustatud ka kontaktrõngaste ja harjadega. See võimaldab hädaolukordades (*in emergencies*) kasutada sünkroonmasina ergutusmähise toiteks **alalisvoolu abiallikat** (*auxiliary source*).

Põhigeneraatori staatoril paiknev kolmefaasiline mähis sarnaneb asünkroonmootori staatorimähisega.

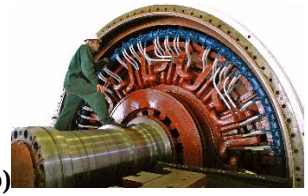
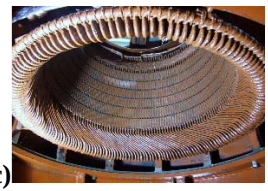
Joonisel 12.3a on skemaatiliselt kujutatud kõige lihtsamat kolmest mähispoolist koosnevat kolmefaasilist mähist, mis paikneb kuues uurdes. Joonisel 12.3b on näidatud 12 uurdes paiknev kuuest mähispoolist koosnev kolmefaasiline mähis, mille igas faasis on kaks jadamisi ühendatud mähispooli. Reaalsete sünkroonmasinate staatorimähised on kujundatud nii, et tagada mähistel siinuseline allikasisepinge teke. Levinud on kahekihilise lühendatud sammuga staatorimähise kasutamine.



Joonis 12.3. Lihtsaima kolmefaasilise staatorimähise kujundusidee selgituseks. Kolmest (a) ja kuuest (b) poolist koosneva mähise paigutus uuretes. Sünkroonmasina töö animatsiooni hetkvaade (c)

Joonisel 12.3c on esitatud sünkroonmasina tööd kujutava animatsiooni (http://www.homofaciens.de) hetkvaade, mis kirjeldab kolmes staatorimähises indutseeritava allikasisepinge muutumist ajas. Roosa vertikaaljoon liigub teljel sünkroonselt rootori pöördenurga muutusega.

Joonisel 12.4 on esitatud sünkroonmasinate fotod: *a* ja *c* on paljupooluseliste hüdrogeneraatori staatori ja *b* – rootori vaated; *d* – turbogeneraatori foto.

a) b)  c)  d)

Joonis 12.4. Sünkroonmasina vaated

Aeglasekäiguliste hüdrogeneraatorite staatori pikkuse ja läbimõõdu suhe on väike, saledatel (turbogeneraatoritel) suur.

Sünkroonmasina animatsiooni saab vaadata: http://www.homofaciens.de/*Three-phase AC synchronous motor.*

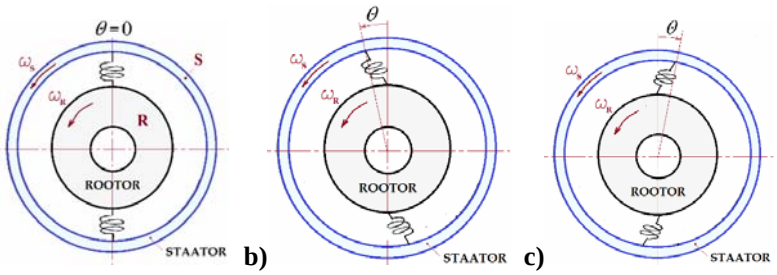
12.2. Sünkroonmasina ankru vastumõju (-reaktsioon), aseskeem ja mehaaniline tunnusjoon

Sünkroonmasinad saab kasutada ka mootorina. Sünkroonmootoritel on väljepoolustega rootor. Nende nimivõimsus on 40…1000 kW ning pöörlemiskiirus 125…1000 p/min. Mootor arendab pöördemomenti ainult sünkroontalitluses. Seepärast on probleemiks sünkroonmootori käivitamine otsevõrku lülituse puhul. Probleemi lahendamiseks kasutatakse **asünkroonkäivitusmähist** (joonis 12.1b), mis koosneb lühisrõngastest 1 ja magnetpoolustesse paigutatud lühisvarrastest 2. Masin käivitub sarnaselt asünkroonmootorile. Sünkroonmasina kiiruse reguleerimine toimub samuti nagu asünkroonmasina puhul toitepinge sageduse reguleerimisega. Sünkroonmasina kiirus on võrdeline toitepinge sagedusega ja pöördvõrdeline pooluspaaride arvuga

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p}, p/\min \quad \text{ja} \quad \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}, s^{-1} .$$

Seega võrdub rootori pöörlemiskiirus staatori pöördmagnetvälja pöörlemiskiirusega. Kuna elektrienergiat genereeritakse sagedusel 50 Hz (või 60 Hz), siis mootor saab pöörelda toitevõrgu sageduse poolt fikseeritud kiirusega. Faktiline kiirus oleneb masina pooluspaaride arvust. Näiteks on 50 Hz toite ja ühe pooluspaariga mootoris rootori pöörlemiskiirus 3000 p/min; kahe pooluspaariga mootoris on rootori pöörlemiskiirus 1500 p/min jne.

Joonisel 12.5a on sünkroonmasina mehaaniline mudel. Siin pöörlevad staatorit kujutav rõngas *S* ja rootorit kujutav silinder *R* samas suunas konstantse nurkkiirusega $\omega_S = \omega_R$.



a) b) c)

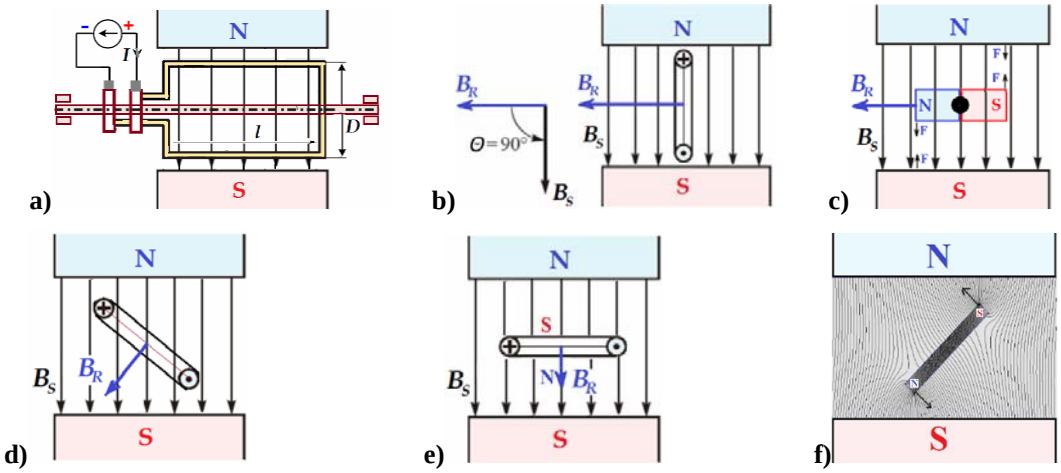
Joonis 12.5. Sünkroonmasina tööpõhimõtte selgituseks: a – masina tühijooks, b – töö mootorina, c – töö generaatorina

Staatoril ja rootoril on omavahel kahe vedru abil elastne side, nii nagu kahel magnetväljal. Väljade liitumisel tekkivat vastastikmõju on modelleeritud kahe vedru abil. Joonisel 12.5a, kus sümmeetriateljed ühtivad, on telgedevaheline nihkenurk $\theta = 0$. Siis ei toimu vedru vahendusel energiaülekannet staatorilt rootorile ega ka vastupidi. See on iseloomulik sünkroonmasina tühijooksule. Joonisel 12.5b on rõngas S nurga θ võrra

rootorist ees, kuid $\omega_S = \omega_R$. Energiaülekanne on kahe vedru vahendusel staatorilt S rootorile R. See vastab sünkroonmootori töö olukorrale, kus energia kandub staatorilt rootorile pöördmagnetvälja vahendusel. Joonisel 12.5c on rootor staatorist S nurga θ võrra ees ja $\omega_S = \omega_R$. See vastab sünkroongeneraatorile, kus energia kandub rootorilt staatorile pöördmagnetvälja vahendusel.

Seega pöörlevad sünkroonmasinas staatori ja rootori magnetväljad koos ja püsitalitluses teineteise suhtes liikumatult. Üheskoos moodustavad nad liitmagnetvälja, mis pöörleb staatori suhtes, kuid rootori suhtes püsib paigal. Koormuse muutumisel nihkuvad staatori ja rootori magnetväljad teineteise suhtes koormusnurga Θ (joonis 12.5) võrra. Koormusnurk Θ on allika sise- ja väljundpinge vektorite vaheline nihkenurk.

Esimeses lähenduses saame koormusnurka vaadelda ka staatori ja rootori magnetvootiheduse vektorite vahelise nihkenurgana (joonis 12.6b). Tühijooksul pöörlemisel on staatori põhjapooluse vastas teisel pool õhupilu rootori lõunapoolus ja nende pooluste telgede vaheline nurk on nullilähedane (joonis 12.6e). Siis on liitmagnetväli ja ruumi salvestatud magnetvälja energia jagunemine sümmeetriline. Seega ei teki magnetvälja allikatele mõjuvat jõupaari ja staatorile ning rootorile mõjuv moment M = 0. Joonisel 12.6a on sünkroonmasina mudel. Siin toidetakse ergutusmähist alalisvooluallikast ja staatori pöördmagnetvälja on kujutatud sünkroonkiirusel pöörleva püsimagnetpooluspaarina. Mootor arendab maksimaalset pöördemomenti (b ja c), kui staatori B_S ja rootori B_R magnetväljade vektorid ja nendevaheline nurk $\Theta = 90°$.



Joonis 12.6. Sünkroonmasina mudel (a): staatori B_S ja rootori magnetvälja B_R vastastikune asend maksimaalse (b, c), keskmise (d, f) ning minimaalse (e) elektromagnetilise pöördemomendi korral

Minimaalse pöördemomendi (e) korral $\Theta = 0°$, vahepealse korral $0° < \Theta < 90°$. Mootori pöördemoment

$$M = kB_R B_S \sin\Theta.$$

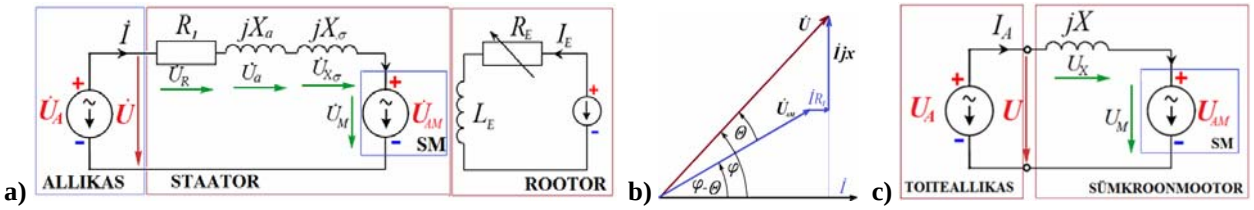
Siin k – tegur, mis arvestab masina konstruktsiooni. Seega mootori moment oleneb põhiliselt neljast näitajast:

- rootori magnetvootihedusest;
- staatori magnetvootihedusest;
- staatori ja rootori magnetvoo suundade vahelise nurga siinusest;
- masina konstruktsiooniga seotud tegurist.

Sünkroonmootori lihtsustatud **aseskeem** on esitatud joonisel 12.7. Töötavas sünkroonmootoris indutseerib staatori ja rootori liitpöördmagnetväli staatorimähistes allikasisepinge $\dot{U}_{AM}$. Mootor on sisuliselt generaator, mis töötab tarbijatalitluses. Siin võib leida sarnasust kahe akumulaatoriga, mis ühendatakse rööptalitlusse, kui üks aku on täislaetud ja teine on pooltühi. Siis töötab täislaetud aku allikana, aga pooltühi aku allikana tarbija talitluses. Seejuures on pooltühja aku voolusuund vastupidine voolusuunaga, kui see aku töötaks allikana allika talitluses. Nii on ka mootoriga ehk generaatoriga tarbija talitluses. Ka siin on voolusuund vastupidine mootoris (generaatoris tarbija talitluses) indutseeritud allikasisepinge poolt tekkida saavale voolusuunale. Toiteallika väljundpinge $\dot{U}$ tasakaalustavad potentsiaalilangud staatorimähise aktiivtakistusel

(joonis 12.7a) $\dot{U}_R$, ankrureaktsiooni induktiivtakistusel $\dot{U}_a$ ja puisteinduktiivtakistusel $\dot{U}_{X\sigma}$ ning mootoril $\dot{U}_M$. Seega,

$$\dot{U} = \dot{U}_M + \dot{I}(r_1 + jx_a + jx_\sigma)$$



Joonis 12.7. Sünkroonmasina lihtsustatud aseskeemid (a ja c) ja vektordiagramm (b)

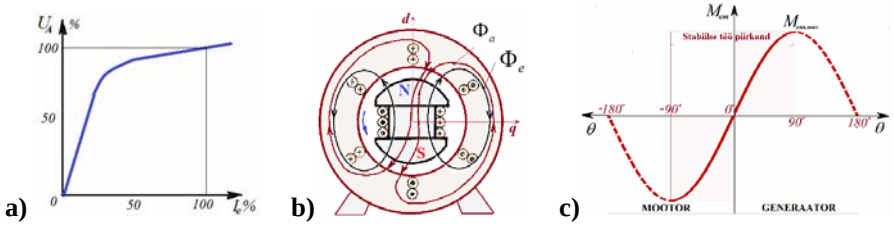
Joonis 12.7a aseskeemi põhjal on joonisel 12.7b näidatud sünkroonmootori vektordiagramm. Siin tasakaalustavad toiteallika väljundpinge (võrgu toitepinge) U potentsiaalilangud $\dot{U}_R$, $\dot{U}_X$ ja mootoril $\dot{U}_M = \dot{U}_{AM}$. Potentsiaalilang $\dot{U}_X$ arvestab nii ankrureaktsiooni- kui ka puisteinduktiivtakistust $x = x_a + x_\sigma$.

Joonisel 12.7b oleval vektordiagrammil on näidatud võrgutoitepinge $\dot{U}$ ja staatorimähise allikasisepinge $\dot{U}_{AM}$ vektorite vaheline nihkenurk θ, mis on ühtlasi masina koormusnurk, millest oleneb masina poolt tekitatav moment M (joonis 12.8) ning nurkkarakteristik (momendi nurgatunnusjoon). Mootori elektromagnetilise võimsuse avaldis on $P_{em} = 3U_A U \dfrac{\sin\theta}{x}$.

Elektromagnetiline moment $M_{em} = \dfrac{P_{em}}{\Omega}$.

Siin rootori pöörlemise nurkkiirus $\omega_1 = \dfrac{2\pi f_1}{p}$.

Asendades momendi avaldisse võimsuse, saame $M_{em} = \dfrac{3p}{\omega}\dfrac{U_{AM}U}{x}\sin\theta$. (12.1)



Joonis 12.8. Sünkroongeneraatori tühijooksukarakteristik (a) ja nurkkarakteristik (c). Väljepoolustega sünkroongeneraatori ankrureaktsioon. Ergutus- ja ankruvälja liitumine ning rootori sümmeetriatelje *d* – 0 suunaline nn piki- ja sümmeetriateljega risti oleva 0 – *q* telje ristvälja tähistus (b)

Sõltuvust $M_{em} = f(\theta)$ nimetatakse **sünkroonmasina nurkkarakteristikuks** (joonis 12.8c). Siin vastab nurgale $+\theta$ generaatoritalitus ja nurgale $-\theta$ mootoritalitus. Vahemikus $-90° < \theta < 90°$ on sünkroonmasina töö stabiilne. Stabiilsuse piiril on elektromagnetiline moment maksimaalne, kui $\sin\theta = 1$

$$M_{em.\max} = \pm\frac{3p}{\omega}\frac{U_{AM}U}{x}\sin\theta \quad . \qquad (12.2)$$

Seega on koormusnurk $\pm 90°$ sünkroonmasina stabiilsuspiiriks. Suurel koormusel ei suuda masin enam tasakaalustada koormusmomenti ning langeb sünkronismist välja. Selleks et tavatalitluses oleks masinal teatav momendivaru, valitakse tavaliste sünkroonmootorite puhul suhteliselt väike nimitalitlusele vastav koormusnurk. Tavaliselt nimikoormusnurk $\theta_N = 20...30°$.

Vaatame ka sünkroongeneraatori eripära. Kui generaatoril puudub koormus, siis ei ole staatorimähises ankruvoolu ja mähistes indutseeritud allikasisepinge U_A on võrdne väljundpingega U (joonis 12.7a). Siin on generaator energiaallikaks, ta sisepinget tähistame U_A ilma täpsustava lisaindeksita.
Indutseeritud allikasisepinge

$$U_A = 4{,}44 f w k_w \Phi.$$

Siin on *w* mähise keerdude arv,

k_w – mähise tegur,

Φ – pooluste magnetvoog, mille tekitab ergutusmähise vool I_e.

Avaldist $U_A = f(I_e)$, kui staatori vool *I* = 0, nimetatakse sünkroongeneraatori **tühijooksu karakteristikuks**. See on samaaegselt ka generaatori magneetimiskõver, sest $U_A \equiv \Phi$.

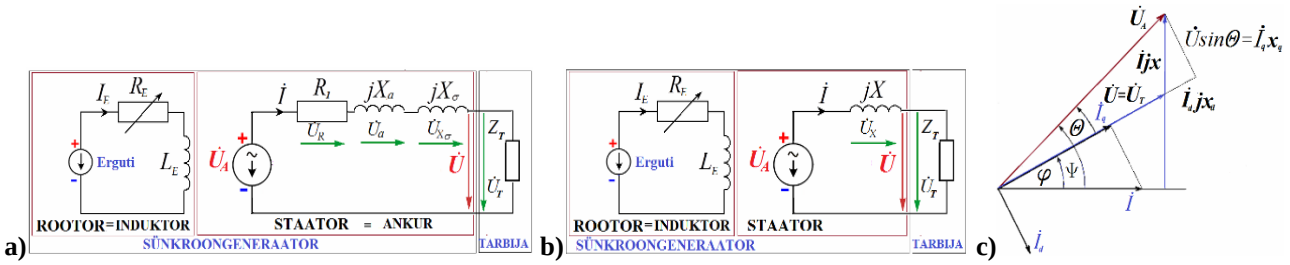
Sünkroonmasina ankrumähise (staatorimähise) ühendamisel tarbijaga tekib tarbija koormusvool *I*. See läbib staatori mähiseid, tekitab rootori magnetväljaga sünkroonselt pöörleva magnetvälja. Seda välja nimetatakse **ankrureaktsiooni** väljaks ning tal on märkimisväärne mõju liitväljale. Seega liituvad (joonis 12.8b) induktori (rootori) magnetvoog Φ_e ja ankrumähise (staatorimähise) magnetvoog Φ_a. Tekkinud liitväli erineb tühijooksu magnetväljast. Nimelt tekkib küllalt suur pooluse sümmeetriatelje *d* – *d* suunaline (joonis 12.8b) ankru pikireaktsioon, mis tugevdab või nõrgendab pooluste magnetvoogu. Ristväljast põhjustatud risttelje *q* – *q* suunaline põikireaktsioon indutseerib igas staatori faasimähises täiendava, küllalt suure **ankrureaktsiooni allikasisepinge** $\dot{U}_{aA} = jx_a\dot{I}$. Ankrureaktsiooni induktiivtakistusel tekkiv potentsiaalilang $U_a = jx_a I$ on ankruvoolu vektorist $90°$ võrra ees. Üldjuhul vaadeldakse väljepoolustega masinat ja potentsiaalilangu *d* ja *q* telgede komponente $\dot{U}_{aq} = jx_{aq}\dot{I}_q$ ja $\dot{U}_{ad} = jx_{ad}\dot{I}_d$. Neid käsitleme edaspidi põhjalikumalt.

Sarnaselt asünkroonmasinale esineb ka sünkroonmasinas staatorimähiste puistevoog Φ_σ, mis indutseerib staatorimähises puiste **allikasisepinge** $\dot{U}_{\sigma A} = jx_\sigma\dot{I}$. Siin on x_σ staatorimähise puisteinduktiivtakistus. Ka x_σ – l tekkiv potentsiaalilang $\dot{U}_\sigma = jx_\sigma\dot{I}$ on ankruvoolu vektorist $90°$ võrra ees.

Staatorivool tekitab staatorimähise oomtakistusel r_1 potentsiaalilangu $\dot{U}_R = \dot{I}r_1$.

Tarbijaid toitva staatori ühes faasis indutseeritud allikasisepinge U_A tasakaalustavad staatori ja tarbija takistite potentsiaalilangud. Tarbija potentsiaalilang on ühtlasi ka tarbija sisend- ehk toitepinge U_T, mis on samal ajal ka generaatori väljundpinge U. Seetõttu $\dot{U} = \dot{U}_T$. Joonise 12.9a alusel saame sünkroongeneraatori allikasisepinge ja potentsiaalilangude elektriliseks tasakaaluvõrrandiks:

$$\dot{U}_A = \dot{U} + \dot{I}(r_1 + jx_a + jx_\sigma).$$



Joonis 12.9. Sünkroongeneraatori tava- (a) ja lihtsustatud (b) aseskeem ning vektordiagramm (c)

Siit sünkroongeneraatori ühe faasi väljundpinge

$$\dot{U} = \dot{U}_A - \dot{I}(r + jx_s) .$$

Viimases pingete-potentsiaalilangude tasakaaluvõrrandis nimetatakse suurust $x_s = x_a + x_\sigma$ **sünkroonseks induktiivtakistuseks** (*synchronous reactance*).

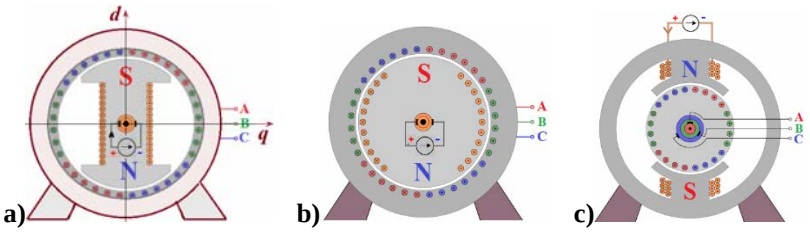
Joonisel 12.9c on esitatud peitpoolustega sünkroongeneraatori vektordiagramm induktiivkoormusele, kui aktiivkadu ei arvesta ($r = 0$). Näeme, et ankrumähist läbiv tarbija vool I on tavaliselt induktori pooluste magnetvoo Φ_e poolt indutseeritud allikasisepinge U_A suhtes nihutatud mingi faasinurga Ψ võrra. See nihe oleneb tarbija koormuse liigist, tarbija näivtakistusest z_T ja generaatori parameetritest. Faasinihe staatori allikasisepinge ja koormusvoolu vahel on leitav seosest

$$\Psi = arctg\frac{x_s \pm x_T}{r_1 + r_T} .$$

Siin on r_T ja x_T tarbija takistused. Joonise 12.9c vektordiagrammi koostamisel on võrreldes koormustakistusega oma väiksuse tõttu võetud $r_1 = 0$.

Tavaliselt on generaatoriga ühendatud aktiiv-induktiivtarbijad, generaatori väljundpingest (tarbija potentsiaalilangust) mahajääva koormusvooluga (*to a lagging load*) I (joonis 12.9c).

Ankrureaktsiooni toime on peit- ja väljepoolustega masinatel erinev (joonis 12.10). Esimeste õhupilu on ühtlane, teisel mitte. Väljepoolusega masinas on pooluse teljel õhupilu minimaalne, suureneb pooluste servade suunas ja järsult poolustevahelises ruumis. Seega ei olene ankru voog ainult ankru magnetomotoorjõust, vaid ka selle jagunemisest rootori pooluse suhtes. Üks ja sama magnetomotoorjõud loob erineva liitmagnetvoo olenevalt õhupilu suurusest, koos sellega ka muutuvast magnetmaterjali voo võimendusest.



Joonis 12.10. Välje- (a), peitpoolustega (b) ja pööratud (c) kujundusega (ankrumähis paikneb rootoril) sünkroonmasin

Väljepoolustega masina induktor (rootor) on magnetiliselt mittesümmeetriline. Siin on suure poolustevahelise ruumi tõttu magnetiline takistus risttelje q, seega poolustevahelise telje suuna voo osale oluliselt suurem kui pikitelje d suuna voole. Seega tekitab ankru ühesuguse suurusega magneetimisergutus pikiteljel magnetmaterjali suurema võimenduse tõttu suurema magnetvoo kui ristteljel. Rootorid on elektriliselt mittesümmeetrilised. Nende ergutusmähised paiknevad vaid pikiteljel d ning tekitavad d-teljel mõjuva voo ja ahelduvad ainult samal teljel mõjuva ankruvooga. See rootorite elektriline ebasümmeetria mõjutab masinate tööd ebasümmeetrilise ja siirdetalitluse korral. Seepärast vaadeldakse ankrureaktsiooni mõju eraldi piki- ja ristteljel. Masina allikapingega faasis olev vool I_q põhjustab ankru **ristreaktsiooni**, aga 90° võrra nihutatud vool I **piki reaktsiooni**. Üldjuhul võib voolu lahutada kaheks: **piki-** I_d ja **ristvooluks** I_q. Voolu avaldised on:

$$I_d = I \sin \Psi ,$$

$$I_q = I \cos \Psi .$$

Nurk Ψ loetakse positiivseks, kui I jääb generaatori allikasisepingest U_A faasis maha.

Sarnaselt määratakse ka sünkroonmasina ankrureaktsiooni piki- ja ristiinduktiivtakistused x_{ad} ja x_{aq}. Peitpoolustega masinal on ühtlane õhupilu ja seetõttu on $x_{ad} \approx x_{aq}$ ning kasutatakse ainult x_{ad}-d.

Ankrureaktsiooni piiramiseks on soovitatav, et x_{ad} ja x_{aq} suurused ei ületaks lubatud väärtusi. Seepärast valitakse sünkroonmasinate õhupilu δ suurem kui magnetahelate kujundamisel on tavaks. Suurem õhupilu ei lase tõhusalt kasutada ferromagnetmaterjali võimendusvõimet, mistõttu ergutusmähise vool kasvab. Sellega kaasneb mähisematerjali kulu ja suureneb masina kadu.

12.3. Sünkroonmootori elektromehaanilised ja elektrilised omadused

Sünkroonmootorite mehaaniline karakteristik on absoluutselt jäik (joonis 12.11a) ja kujutab endast horisontaalset sirgjoont. Seetõttu kasutatakse neid rohkem seal, kus kiiruse reguleerimine pole vajalik. Sünkroonmasina pöörlemiskiirus on määratud pöördvälja sünkroonkiirusega

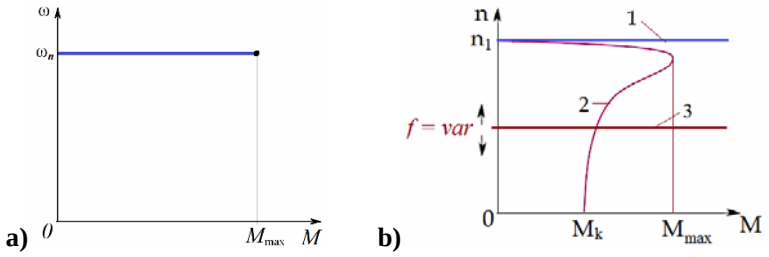
$$n_1 = \frac{f_1}{p}, s^{-1}.$$

SI süsteemieelse ühikuna on käibel ka ajalooline ühik pööret minutis $n_1 = \frac{60 f_1}{p}, \min^{-1}$.

Peitpoolustega mootori elektromehaaniline moment

$$P_{em} = 3U_A U \frac{\sin\theta}{x_s}.$$

Kuna sünkroonmootor töötab nimitalitluses koormusnurgaga θ_n = 20...30°, siis kujuneb tema ülekoormatuseks $M_{\max}/M_n = 2...3$. See vastab maksimaalsele koormusnurgale $\theta_{\max} \approx 70°$. Kui koormus võllil on suurem kui $M_{\max}$, siis langeb mootor sünkronismist välja ja jääb käivitusmähise abil tööle asünkroonmootorina või seiskub. Mootoril on võimalik ergutusvoolu suurendamisega suurendada staatori allikasisepinget, mis põhjustab momendi suurenemise. Seda saab kasutada lühiajaliselt, sest erguti kuumeneb üle ja staatorimähist koormatakse hetkel mittevajaliku mahtuvusliku reaktiivvooluga. Alakoormatud sünkroonmootoreid saab kasutada sellises talitluses tarbijate reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks (võrgu võimsusteguri parendamiseks).



Joonis 12.11. Sünkroonmootori mehaaniline karakteristik (a) koos käivitustunnusjoontega (b): mootori mehaaniline karakteristik võrgusagedusel (1) ja madalamal sagedusel (3); 2 – käivitusmähise tunnusjoon

Sünkroonmootori asünkroonkäivituseks on poolusekingades lühismähis (joonis 12.1b). Käivitamiseks lülitatakse kolmefaasilisele staatorimähisele toitepinge. Ergutusmähis ühendatakse takistiga, mille väärtus on $r = (8...12)r_e$. Takisti eesmärk on välistada ohtliku liigpinge teket ergutusmähisel. Käivituse alghetkel rootor seisab, suure keerdude arvuga ergutusmähise aheldusvoo muutumise kiirus on maksimaalne (libistus s = 1), see võib põhjustada ohtliku allikasisepinge indutseerimist mähises ja selle läbilööki.

Staatori pöördmagnetväli indutseerib allikasisepinge ka käivitusmähises, mis tekitab käivituslühismähises voolu ja magnetvoo. Viimase liitumisel pöördväljaga tekkib sarnaselt asünkroonmasinaga vastastikmõju tulemusel pöördemoment (joonis 12.11b), mis käivitab mootori. Rootori pöörlemiskiirus suureneb mehaanilise karakteristiku järgi. Kui kiirus suureneb sünkroonkiiruse lähedaseks, lülitatakse käivitustakistus ümberlülitiga välja ja ergutusvool sisse ning tekkib kahe pöördvälja liitumise tulemusel moment, mida iseloomustab joonisel 12.11b kõver 2, ja mootor läheb sünkronismi. Seejärel pöörleb rootor koos

ergutusväljaga sünkroonselt staatori magnetväljaga. Nüüd on käivitusmähise aheldusvoo muutumise kiirus null, allikasisepinget enam ei indutseerita ja käivitusmähise vool $I = 0$. Käivitusel esinevad ka asünkroonmasinale sarnased käivitusvoolu tõuked. Nende piiramiseks kasutatakse voolu piiravate elementide lülitamist staatoriahelasse. Kui need lülitatakse välja enne sünkroniseerimist, siis nimetatakse käivitust raskeks (suur voolutõuge ja ka sünkroniseeriv moment on suurem); kui pärast sünkroniseerimist, siis kergeks (voolutõuge ja sünkroniseeriv moment on väiksemad). Käivituse raskusaste oleneb ka sellest, millisele kiirusele võrreldes sünkroonkiirusega suudab käivitusmähis rootorit kiirendada. Kui erinevus jääb suureks, on voolutõuge suurem, kui väikseks, siis on ka voolutõuge väiksem.

Sünkroonkiirusel on pidurdusmomendi tekitamiseks võimalik kasutada **rekuperatiivpidurdust**. See tekkib siis, kui töömasin arendab võllil vedavat momenti. Vastulülituspidurdust ei kasutata, sest suure voolutõuke puhul tuleks staatoriahelas kasutada takisteid ja keerukamat juhtimisaparatuuri. Seega on põhiline pidurdusviis **dünaamiline pidurdus**, kus staatorimähis lülitatakse võrgust välja ja ühendatakse pidurdusreostaatidega. Ergutusmähise toide jääb peale. Lülitus sarnaneb asünkroonmasina dünaamilise pidurdusega (vahetatud on vaid mähiste asukohad). Seega on sarnased ka pidurdusprotsessid.

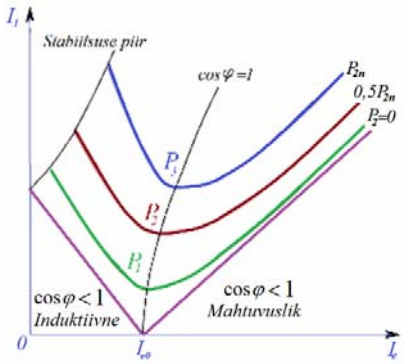
Sünkroonmootori käivitamine on võimalik ka sagedusmuunduri abil. Siis tõuseb sageduse sujuva suurendamisega mehaaniline tunnusjoon (joonis 12.11b) koos sagedusega ülespoole ning koos sellega suureneb kiirus. Sageduse vähendamisel aga langeb tunnusjoon allapoole.

Sünkroonmootori kiiruse reguleerimine toimub samuti nagu asünkroonmootori puhul toitepinge sageduse reguleerimisega, aga seda võimsate mootorite korral tavaliselt ei kasutata, sest reeglina ei ole vaja kiirust muuta. Väikese võimsuse korral kasutatakse toitepinge sageduse reguleerimist järjest enam.

Sünkroonmootor on pinge kõikumiste suhtes vähem tundlik kui asünkroonmootor.

Sünkroonmootori ergutuse forsseerimine ja selle kasutamine reaktiivenergia genereerimiseks. Et ebapiisava momendi korral vältida sünkroonmootori sünkronismist väljalangemist, tuleb mootori momendi suurendamiseks suurendada ergutusmähise voolu, mida tehakse erguti väljundpinge suurendamise (forsseerimise) teel. Seda tuleb teha lühiajaliselt, sest ergutusmähis kuumeneb üle lubatava temperatuuri.

Ergutusvoolu võib reguleerida ka tarbijate reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks.



Joonis 12.12. Sünkroonmootori V-kujulised kõverad

Sünkroonmootori ergutusvoolu muutmisel muutub vool ka staatorimähises. Avaldis $I_1 = f(I_e)$, mis on üles võetud konstantse toitepinge $U = U_n = const$ ja võimsuse $P_2 = const$ korral, muutub joonisel 12.12 esitatud V-kõverate kohaselt. Väiksema kasuliku võimsuse P_2 korral on ka staatorivool väiksem.

Kõveratel on ergutusvoolu väärtusel I_{eo} olemas miinimumpunkt, milles on staatorivool muutumatu võimsuse juures kõige väiksem. Selles punktis tarbib masin ainult aktiivvõimsust. Ergutusvoolu vähendamisel I_{eo}-st ehk alaergutamisel tarbib sünkroonmootor võrgust pinge vektorist maha jäävat ehk induktiivse iseloomuga voolu I_1, üleergutamisel aga pinge vektorit edestavat ehk mahtuvusliku iseloomuga voolu. Seega saab ergutusvoolu reguleerimisega muuta võrgust tarbitavat reaktiivvõimsust. Kui mootor töötab tühijooksul, siis võimsus võllil $P_2 = 0$ ja $I_1 = f(I_e)$ vastab joonise 12.12 alumisele kõverale.

Spetsiaalselt reaktiivenergia kompenseerimiseks toodetud tühijooksul töötavaid sünkroonmootoreid nimetatakse **sünkroonkompensaatoriteks**.

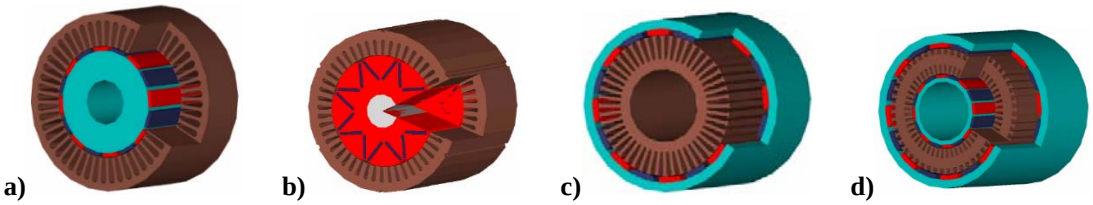
12.4. Püsimagnetitega sünkroonmasinad. Kujundus ja liigitus

Püsimagnetitega sünkroonmasinaid kasutatakse mootorite ja generaatoritena. Neil puudub ergutusmähis ning mootori tööks vajalik üks kahest magnetväljast (ergutusvoog) tekitatakse püsimagnetite abil. Püsimagnetitega (PM) sünkroonmasina rootori ehitus on lihtne. Nad on kompaktsemad ja kergemad. Töökindluse osas on eelised PM-ergutusega sünkroonmasinatel tavaergutusmähisega varustatud masina suhtes, sest puuduvad hooldust või remonti vajavad harjasõlmed ja kontaktrõngad. PM-masina puuduseks on see, et ergutusmagnetvälja tugevust pole võimalik reguleerida. Seetõttu pole PM-generaatori korral võimalik hästi ära kasutada tuuleenergiat madalatel tuulekiirustel. Nimituulekiirusest kõrgemal võib PM-generaatori pinge tõusta ohtlikult kõrgele tasemele. See võib nõuda lisakaitsemeetmeid.

Tänapäeval toodetakse lisaks väikestele ka väga suure võimsusega püsimagnetitega sünkroonmasinaid. Nende võimsus ulatub megavattideni. Sünkroonmasinate põhilised kasutusalad on tuulegeneraatorid, võimsad kompressorid, laeva veo- ja tüürimisajamid, veskid, pumbad, paberimasinad jm.

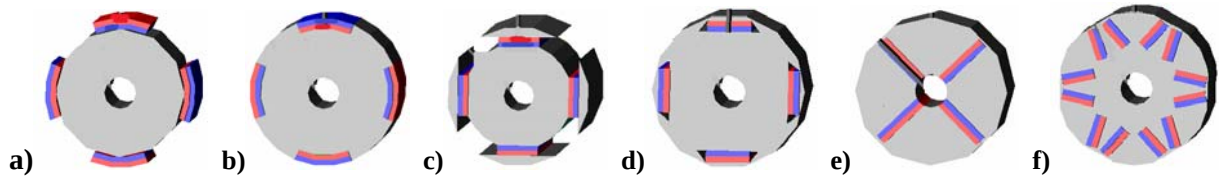
Masinate liigitus. Masinaid jaotatakse lähtudes magnetvoo suunast masina õhupilus induktori (rootori) ja ankru (staatori) vahel .

Radiaalse magnetvooga (radiaalvoo)masinad – magnetvoog läbib õhupilu radiaalsuunas, nagu see on ka tavaliste elektrimasinate korral; enamasti kasutatakse siserootori ja välisstaatoriga konstruktsiooni (joonis 12.13a, b), kuid harvem leiab kasutamist ka välisrootori ja sisestaatoriga lahendus (joonis 12.13c, d).



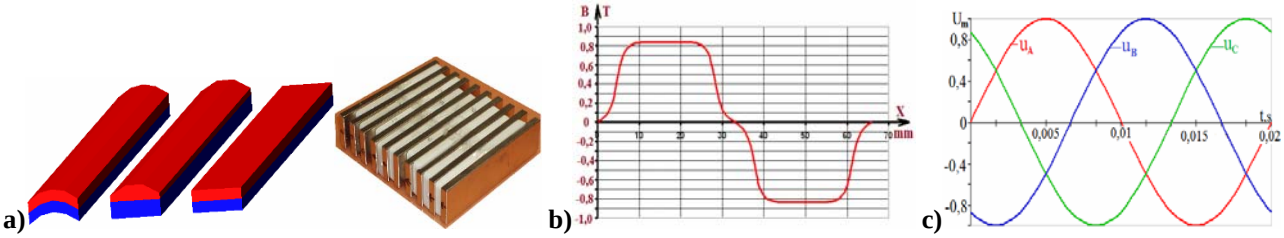
Joonis 12.13. Radiaalvoo-püsimagnetmootorid: *a* ja *b* – püsimagnetid on rootoril, *c* ja *d* – staatoril

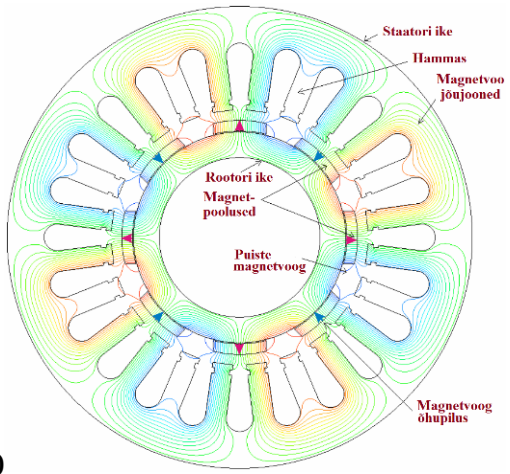
Joonisel 12.14 on radiaalvoomasina pooluste kujundusnäiteid. Siin *a* ja *c* puhul on püsimagnetid kinnitatud rootori pinnale. Ülejäänud näidetes on nad süvistatud.



Joonis 12.14. Radiaalvoo-püsimagnetmasinate pooluste kujundusnäited

Joonisel 12.15a on radiaalvoomasina poolustena kasutatavate püsimagnetite kujundusnäiteid.



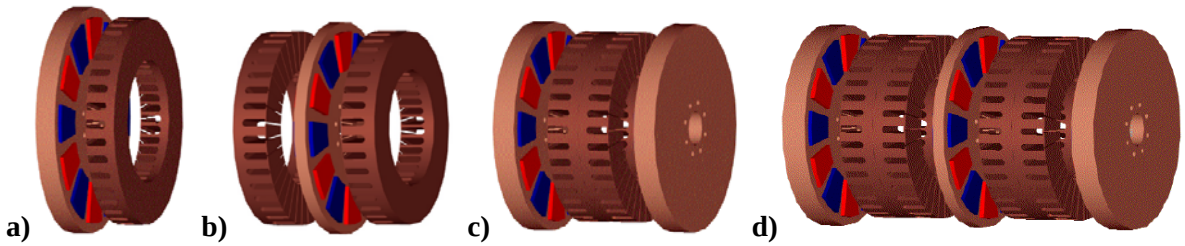


d)

Joonis 12.15. Radiaalvoo-püsimagnetmasina pooluste kujundusnäited ja lapikud püsimagnetid pakendis (a). Magnetvootiheduse jagunemine piki õhupilu (b). Staatorimähises indutseeritud allikapinged tühijooksul (c). Magnetvoo väljajoonte jagunemine magnetahelas ning õhupilus (d)

Samas on lapikud püsimagnetid pakendatult (a). Püsimagnetite ja ferromagnetmaterjalide vaheliste suurte jõudude tõttu on neid koos kasutades ülioluline järgida ohutustehnika põhimõtteid, vastasel juhul on küllalt suur vigastusoht. Joonisel 12.15b on esitatud ühe generaatori magnetvootiheduse jagunemine piki õhupilu (b), sama masina kolme faasi allikasisepinge kuju tühijooksul (c) ning väljajoonte jagunemine magnetahelas ning õhupilus (d).

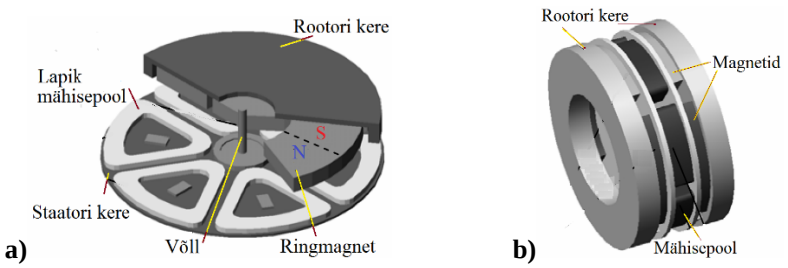
Aksiaalse magnetvooga (aksiaalvoo) masinad – magnetvoog läbib õhupilu aksiaalsuunas, seega masina pöörlemistelje suunas; masina rootor paikneb staatori suhtes aksiaalselt, seega teljesuunaliselt staatori kõrval; enamasti kasutatakse ühepoolset rootorit ja staatorit (joonis 12.16a), vahel kahepoolset rootorit (b), kuid ka kahepoolset staatorit (c) või mitme rootori ja staatoriga lahendusi (d). Kõigi vaadeldud masinate põhiprobleemiks on staatorimähiste laupühenduste teostamine, nende paigutamine masina võlli ja staatori siseläbimõõdu vahelisse ruumi.



a) b) c) d)

Joonis 12.16. Aksiaalvoo-püsimagnetmasinad

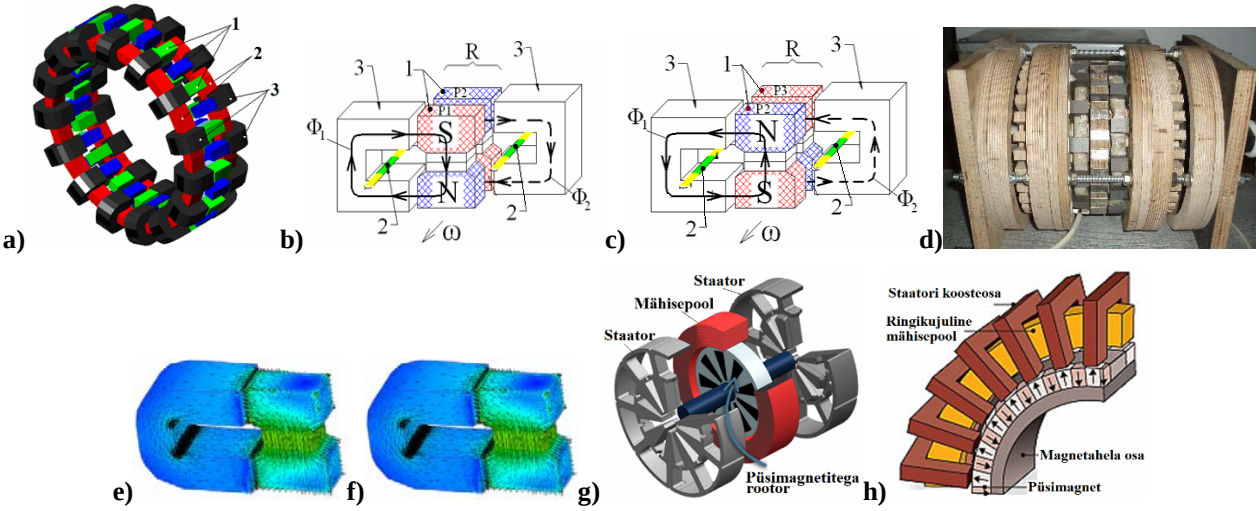
Väikesevõimsuselise aksiaalvoomasina staatorimähisel saab kasutada lapikpoole (joonis 12.17). See lihtsustab oluliselt laupühenduste kujundamist ja võimaldab saavutada kompaktse kujunduse.



Joonis 12.17. Lapikute mähispoolidega aksiaalvoo-püsimagnetmasin. Ühe- (a) ja kahekordse (b) seibrootoriga (ketasrootoriga) masin

Põikivälja e põiki voo (*transversal flux*) **masinad** – neil on ajas muutuv magnetvoog (aheldusvoog) põiki mähispooliga (joonis 12.18). See on suhteliselt uus ja väheuuritud kujundus, mis saavutatakse eripäraselt

kõrvuti paiknevate püsimagnetsõlmede abil. Masina tööpõhimõte selgub Tallinna Tehnikaülikoolis A. Kallaste bakalaureusetöös (a…g) 2002. a. valminud katseseadmelt. Masina põhisõlmed on ferromagnetklotside 1 vahel paiknevad püsimagnetid (a…c), mis on kinnitatud vineerist rootorikere (d) uuretes. *U*-kujulised vasaku ja parema ringi trafosüdamikud 3 haaravad vasakul ja paremal paiknevat ringikujulist staatorimähist 2. Masinakere moodustavad kaks uuretega vineerrõngast, mis on poltide abil kinnitatud otsakilpide külge.



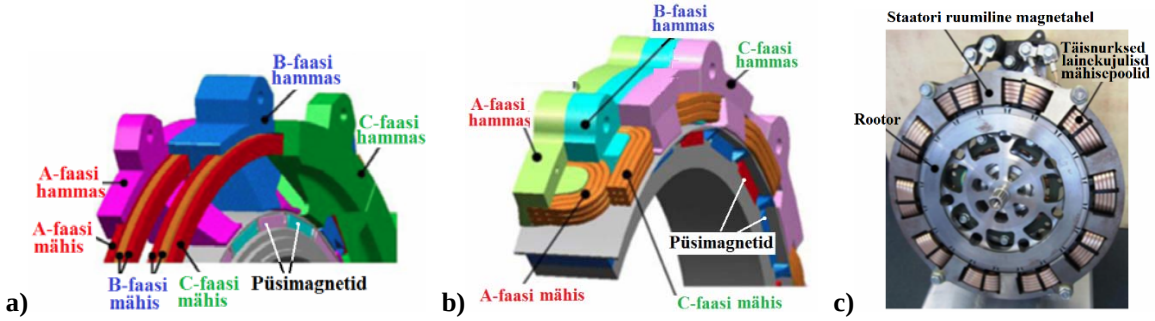
Joonis 12.18. Ringikujulise mähispooliga põikivälja (voo) püsimagnetmasin: a…f – Tallinna Tehnikaülikoolis valmistatud puitkerega ja mujal valminud pulbermetallkerega (g) ühe rootori ja kahe staatoriga laboriseade; h – ühe rootori ja staatoriga masina lahendus

Mähisekeeru ühe lõigu aktiivosa on joonistel *b* ja *c* värvitud rohelisega, laupühendused kollase värviga. Jadalülituses olevate aktiivosade arv on võrdne püsimagnetite 1 arvuga. Iga ajas muutuv püsimagneti magnetvoog aheldub kordamööda vasak- ja parempoolse mähise aktiivosaga, indutseerides seal allikasisepinge. Iga keeru aktiivosade allikasisepinged liituvad, moodustades keeru allikasisepinge. Samuti liituvad kõigi jadalülituses olevate keerdude allikasisepinged, moodustades mähise ühe faasi sisepinge.

Joonisel 12.18e on näidatud magnetvoo jagunemine joonisel (b) kujutatud ajahetkel. Kui rootor *R* liigub edasi järgmise, paremal paikneva trafosüdamikuni, siis magnetvoog sulgub selle kaudu. Nii toimub pidev magnetvoo sulgumisteekonna muutus, millega kaasneb ka aheldusvoo kiiruse pidev muutus.

Joonisel 12.18g kujutab eelnevaga osaliselt sarnast, pulbermetallstaatoriga masina kujundust. Sellise masina eelis on lihtsus, oluline puudus aga magnetvoo ja seega ka väljundpinge tunduv nõrgenemine *PM*-masina koormusvoolu magnetvälja lahtimagneetival toimel. Samuti on laupühenduste osakaal ja keerdude induktiivsus suhteliselt suur.

Tööstusliku prototüübini (joonis 12.19c) on jõudnud firma Honda. Maksimaalne pöördemoment on 140 Nm, keskmine kasutegur 83,7%. On omandatud pulbermetallstaatori ja täisnurksete lainekujuliste mähispoolide originaalne valmistamistehnoloogia.

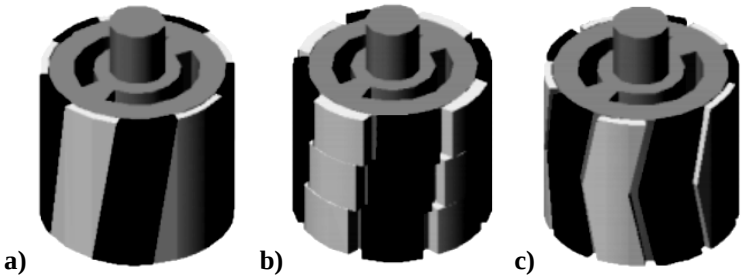


Joonis 12.19. Põikivälja(voo)-püsimagnetmasinad firmalt Honda: a – erikujulise hamba ja ringikujulise mähispooliga masin, b – ruumilise magnetahelaga masin ja selle prototüüp (c)

Kokkuvõte: Kõige laialdasemalt kasutatakse radiaalmagnetvooga PM-masina kujundust. Sellise PM-sünkroonmasina paigalseisva ankru magnetahel koos kolmefaasilise ankrumähisega sarnaneb klassikalise asünkroonmasina staatoriga. Kuid PM-induktori konstruktsioon, kus on eristatavad väljepoolused kas pindmagnetite või poolussüdamike kujul, sarnaneb teatud määral klassikalise hüdrogeneraatori tehnilise lahendusega, millel on suur arv pooluseid.

Selleks, et vältida rootori „kleepumist“, olukorda kus paigalseisva rootori pöörlemapanemiseks on vaja rakendada märkimisväärset pöördemomenti, kasutatakse lahendusena erikujundusega magnetpooluseid (joonis 12.20). Sarnaste meetmete abil on võimalik tagada kleepumist vältiv magnetvoo jaotus masina õhupilus.

Joonisel 12.20 on kaldpoolustega (a), astmeliste magnetpoolustega (b) ja liblikatiivaliste magnetpoolustega radiaalvoo-püsimagnetmootorite rootorid.



Joonis 12.20. Kaldpoolustega (a), astmeliste (b) ja libliktiib-magnetpoolustega rootor

Väikesevõimsuselisi püsimagnetergutusega masinaid kasutatakse tööpinkide ja robotite ajamites, samuti ka olmes, näiteks mikrolaineahjus. Kuna tööpinkides täidavad niisugused mootorid sageli abi- ehk teenindusfunktsiooni, siis on neid hakatud nimetama servomootoriteks ning vastavaid ajameid servoajamiteks. Oma olemuselt on niisugused mootorid sünkroonmootorid, kuid neisse on sisse ehitatud asendiandur, mis võimaldab täpselt määrata rootori asendi staatori suhtes ning vastavalt asendisignaalile juhtida mootori toitepinget. Niisugune juhtimine on võrreldav alalisvoolumootori harikommutaatori talitlusega, mis samuti lülitab ankru toitepinget olenevalt ankru asendist (pöördenurgast). Nad on võrreldes asünkroonmootoritega kallimad ning konstruktsioonilt keerulisemad

12.5. Asünkroniseeritud sünkroonmasin

Tuule ja päikeseenergia osakaalu järsk suurenemine toob kaasa probleeme klassikaliste energiasüsteemide stabiilse töö säilitamisel. Probleeme ei saa lahendada ilma tõhusate salvestiteta või uute tehniliste lahendusteta, mis võimaldaksid tekitada süsteemi alaosade vahele asünkroonseid sidemeid. Stabiilsel tööl peab genereerimine ja tarbimine olema alati tasakaalus. Kiirelt muutuva päikese- ja tuuleenergia korral võib nõue osutuda mingis süsteemi alaosas mittetäidetavaks. Süsteemi lagunemist võiksid tõkestada asünkroonsed sidemed, tänu millele saaksid eriolukordades süsteemi osad jätkata tööd erineval sagedusel. Jõuelektroonika kiire arengu tõttu on selliste sidemete loomiseks häid eeldusi. Elektrimasinate poolelt võib abi olla Peterburi teadlase **Aleksandr Gorevi** leiutatud asünkroniseeritud sünkroonmasinalt.

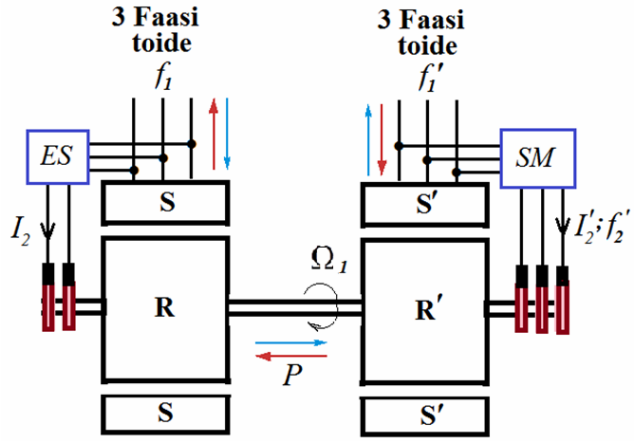
A. Gorevi masin erineb tavalisest sünkroonmasinast selle poolest, et tal on kaks ergutusmähist. Üks paikneb piki-, teine ristteljel. Seega on rootoril kahefaasiline mähis. Tavatalitluses toidetakse mähiseid alalisvooluga, siis ei erine töö millegi poolest klassikalisest talitlusest. Avariioludes, kui rikutakse rootori pöördväljaga sünkroonset pöörlemist, toidetakse ergutusmähiseid faasis 90° nihutatud libistussagedusega sf_1 vahelduvvooluga. Selle tulemusel saadakse rootori suhtes pöörlev ergutusväli. Ergutusvoolude sagedust sf_1 reguleeritakse automaatselt ja pidevalt sel viisil, et ergutus- ning ankruväli pöörlevad sünkroonselt. Seetõttu tekitavad nad konstantse märgiga pöördemomendi. See takistab masina sünkronismist väljalangemist ja tõstab talitluse stabiilsust, mis on ka selle masina põhieelis.

Asünkroniseeritud sünkroonmasina eeliste realiseerimine eeldab, et kasutama peab kiiretoimelist ergutussüsteemi, mis tagab suure pinge forsseerimiskordsuse $k_f = 4...5$. See tähendab näiteks, et kui on

vaja kiirelt tõsta generaatori koormust $0 \rightarrow 0{,}5I_1$, siis ergutusmähisele ei rakendata pinget $0{,}5U_e$, vaid 4..5 korda suurem pinge. Kui vooluväärtus saavutab $0{,}5I_1$, siis viiteta vähendatakse ergutusmähise pinge kuni $0{,}5U_e$.

Asünkroniseeritud sünkroonmasinat saab kasutada nii generaatori kui ka mootori talitluses. Väikeste sageduskõrvalekallete korral talub see masin avariitalitlust asünkroonmasinast oluliselt paremini.

Sellise elastse sidelüli vajadus esineb ka sama nimisagedusega eri riikide energiasüsteemide korral, kus sageduse erinevused on väikesed (kuni 1%) ja ühest süsteemist teise kantav võimsus ei tohi oleneda nende talitlusest. Sarnased tingimused võivad esineda ka suure süsteemi alasüsteemide vahel, näiteks tuuleenergia märgatava osatähtsuse korral. Sellist elastset sidet saab realiseerida joonisel 12.21 esitatud agregaadiga. Viimane koosneb kahest masinast, ühest tavalisest (R - S) ja teisest asünkroniseeritud (R'- S')-sünkroonmasinast. Nende rootorid on sama võlliga omavahel jäigalt seotud. (R - S)-masina staator on ühendatud süsteemiga sagedusel f_1 ja (R' - S')-masina oma sagedusel f_1'.



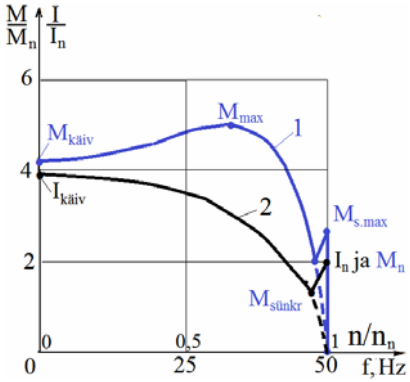
Joonis 12.21. Süsteemide või süsteemiosade vahelist elastset sidet tagav seade

(R - S)-masina rootor saab alalisvoolu toite ergutisüsteemilt *ES*. (R'- S')-masina rootori kahefaasilist mähist toidetakse sagedusmuunduri *SM* kaudu vooluga I_2' sagedusel f_2'. Selleks et tagada kindlasuunalist energiaülekannet ühest süsteemist teise, hoitakse sagedusmuunduriga *SM* ergutusvoolul I_2' täpset sagedust $f_2' = s' f_1'$, kus $s' = (f_1' - f_1)/f_1'$. Ülekantava võimsuse suurust ja suunda reguleeritakse voolu I_2' faasi ja nurga α muutmise teel. Nurk α on (R'- S')-masina sünkroonselt pöörlevate staatori F'_{1m} ja rootori F'_{2m} magnetomotoorjõu vektorite vaheline nihkenurk. Juhul kui F'_{2m} jääb F'_{1m}-st maha, siis (R'- S')-masin on mootori talitluses ja (R - S)-masin töötab generaatorina. Energiat kantakse süsteemilt sagedusega f_1' üle süsteemi sagedusega f_1 (punased nooled joonisel 12.21). Juhul kui F'_{2m} edestab F'_{1m}, siis (R'- S')-masin on generaatori talitluses ja (R - S)-masin töötab mootorina. Energiat kantakse süsteemilt süsteemile vastupidises suunas (sinised nooled joonisel 12.21).

Asünkroniseeritud sünkroonmasina eeliseks on sünkronismi stabiilsus, puuduseks juht- ja reguleerimissüsteemi suur maksumus. Eelised ilmnevad suurte võimsuste korral.

12.6. Ferromagnetergutusega (ferroergutusega) sünkroonmasinad

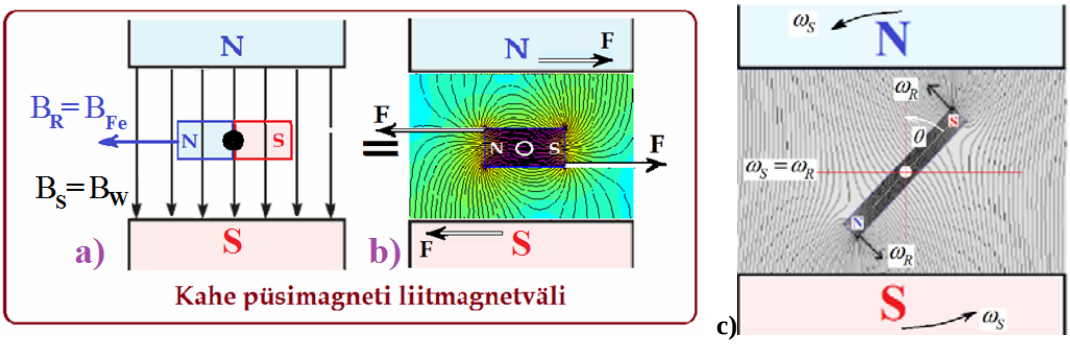
Need masinad on ergutusmähiseta väljepoolustega sünkroonmasinad, mida nimetatakse ka **reluktantsmasinateks** ja **reaktiivseteks sünkroonmasinateks.** Neil on nii asünkroonmootorite kui ka sünkroonmootorite omadusi. Käivitusel ja liigkoormuse puhul toimib ferroergutusega sünkroonmasin nii nagu asünkroonmootor. Pärast käivitust, püsitalitluses ja tavakoormusmomendi $0 < M < 1{,}2\ M_n$ korral, toimib sünkroonmasinana. Siis võrdub mootori libistus nulliga (s = 0). Need kahesed omadused on jälgitavad ka ferroergutusega sünkroonmasina mehaaniliselt karakteristikult (joonis 12.22). Joonisel esitatud kõverat tuleb käsitleda kui ferroergutusega sünkroonmasina iseloomulikku mehaanilist tunnusjoont, mis konkreetse masina puhul võib esitatust oluliselt erineda.



Joonis 12.22. Ferroergutusega sünkroonmasina mehaaniline karakteristik. 1 – *M = f(f)*, 2 – *I = f(f)*

Ferroergutusega sünkroonmasina staator on ehitatud samuti nagu asünkroonmootori staator, kuid rootoril on selgelt väljendatud poolused. Rootori ferromagnetmaterjali radiaalsuunaline **võimendusvõime** muutub suurtes piirides. Küllastamata materjali korral on võimendus pöördvõrdeline õhupilu pikkusega. Magnetväli koondub pooluste piirkonda. Sarnaselt asünkroonmootoriga asuvad mootori uuretes valualumiiniumist lühismähised. Need mähised toimivad ainult asünkroontalitluse puhul. Sünkroontalitluse korral lühismähiste aheldusvoo muutumiskiirus $d\Psi/dt = 0$, allikapinget ei indutseerita, voolu mähistes ei tekki ja lühismähised vooluta magnetvoogu ei tekita. Staatorimähise magnetvoo Φ_w tekitab elektriallikalt saadav induktiivne reaktiivvool. Magnetvoo Φ_w osa, mis sulgub läbi väljepooluse, pöörab pooluse domeene Φ_w suunas, võimendades lähtevoogu, liites sinna ferromagnetmaterjali voo $\Phi_\Sigma = \Phi_w + \Phi_{Fe}$. Lisanduv Φ_{Fe} kujuneb seda suuremaks, mida suurem on magnetväljajoone teekonnal ferromagnetmaterjali osa. Seega, kus rootori õhupilu on suur, seal on võimendus väike ja vastupidi. Pöördemoment masinas tekkib samal viisil nagu kõikides teistes elektrimasinates, kahe magnetvälja liitumise tulemusel (joonised 10.1...10.3). Teistes masinates need kaks välja, staatori Φ_S ja rootori Φ_R, on selgesti eristatavad tänu kahele erinevale magnetvoo allikale. Ferroergutusega sünkroonmasinal on mootori talitluses üheks magnetvoo allikaks vool staatori mähises ja selle voog Φ_w, voog $\Phi_w = \Phi_S$. Teiseks allikaks on rootori ferromagnetmaterjali domeenide elementaarvoolud ja nende magnetväljad. Staatori pöördvälja mõjul formeeritakse domeenide liitmagnetvoog Φ_{Fe}, nagu seda vaadeldi joonistel 3.11...3.14 kursuse magnetahelate peatükis. Voog Φ_{Fe} täidab ergutusmähise või püsimagnetite magnetpooluste magnetvoo rolli ja voog $\Phi_{Fe} = \Phi_R$. Tänu nende kahe, staatori ja rootori magnetvoo vastastikmõjule arendab ferroergutusega sünkroonmasin pöördemomenti. Masina pooluse kuju ja minimaalne õhupilu suurus määrab suures osas tema tõhususe, neist olenevad nii masina võimsus- kui ka kasuteguri väärtused.

Joonis 12.23 iseloomustab staatori ja rootori vastastikmõju liitmagnetvälja vahendusel. Lihtsustamiseks on joonisel *a* jääkmagnetismi tõttu ferromagnetsüdamiku kõige väiksema õhupiluga osa kujutatud püsimagnetina. Magneti magnetvoo tihedus $B_{Fe} = B_R$. Staatoril vaatame kolme mähise poolt tekitatud vastupäeva pöörlevat pöördvälja (magnetvootihedusega $B_w = B_S$) samuti püsimagnetina.



Joonis 12.23. Ferroergutusega sünkroonmasina pöördemomendi teke: a – staatori- ja rootoriväli, b ja c – ebaühtlasest energiatiheduse jagunemisest põhjustatud jõudude teke liitväljas rootori kahe asendi korral

Joonis 12.23b iseloomustab nende kahe välja energiatiheduse jagunemist liitmagnetväljas ja jõupaari teket, kui püsimagnet paikneb staatori välja suhtes 90° nurga all. Joonisel 12.23c jääb püsimagnet pöörlemissagedusega ω_R rootori pöördväljast (pöörlemissagedusega ω_S) maha koormusnurga θ võrra, kuid rootor pöörleb koos staatori pöördväljaga sünkroonselt $\omega_S = \omega_R$. Kujutades magnetväljajooni väljavenitatud kummipaeltena, näeme, et rootorile mõjub jõupaar *F* – *F*, mis paneb ta pöörlema koos masina pöördväljaga vastupäeva. Muutumatu koormuse korral rootori võllil jääb välja B_S ja B_R vaheline koormusnurk θ muutumatuks ning rootor pöörleb koos staatori pöördväljaga sünkroonselt $\omega_S = \omega_R$. Kuna staatorimähised koos staatori kerega on jäigalt paigale kinnitatud, siis ei pane staatorit pöörlema staatorile mõjuv jõupaar *F* – *F* (joonis 12.23b), mis on sama suur, kuid vastassuunaline rootori jõupaariga. Pöörleb vaid rootor.

Ferroergutusega sünkroonmasina **põhieelis** võrreldes sünkroonmasinaga, mille rootoril on ergutusmähis, on lihtsus, kompaktsus, töökindlus ja soodne hind. Nad ei vaja ergutile alalisvooluallikat. Rootori ehitus on lihtne ja seal puudub oomiline kadu. Ei vajata ka püsimagneteid, puudub demagneetimisrisk, võib töötada kõrgematel temperatuuridel. Masin töötab sünkroonkiirusel.

Kuid on ka rida **puudusi** ning kasutuspiiranguid. Esiteks, suur reaktiivenergia tarve, mis oleneb pooluste arvust ja masina võimsusest. Otse võrku lülituses on ferroergutusega sünkroonmootori võimsustegur $\cos\varphi = 0{,}4...0{,}65$. Väike võimsustegur põhjustab suurema reaktiivvoolu tarbimise, staatoril suurenenud kaod ja vähendab kasutegurit. Nii on kasutegur $\eta = 0{,}55...0{,}8$. Järelikult tuleb ferroergutusega sünkroonmootorit toitva sagedusmuunduri võimsus valida vähemalt 60% suurem kui sama väljundvõimsusega asünkroonmootori puhul. Mõnekümnevatise mootori kasutegur on 0,3...0,4. Võimsuse korral alla 10 W on kasutegur alla 0,2. Teiseks, ferroergutusega sünkroonmootori lubatav ülekoormus-moment on ainult $1{,}2M_n$. Kui tegelik koormusmoment on suurem kui vääratusmoment $M_{\max}$ (joonis 5.22), siis langeb mootor sünkroontalitlusest välja asünkroontalitlusse. Mootori viimine tagasi sünkroontalitlusse on võimalik ainult koormusmomendi vähendamisega sünkroniseerimismomendist $M_{sünkr}$ (*pull-in moment*) väiksemaks. Siis siirdub mootor asünkroontalitlusest tagasi sünkroontalitlusse.

Kuna mootori poolt arendatav moment on võrdeline toitepinge ruuduga U^2, siis on mootor tundlik pingekõikumiste suhtes.

Eri tüüpi mootorite energiatõhususe hindamiseks on tabelis 12.1 esitatud võrdlusandmed kolmele 38 kW võimsusega ja 240 Nm pöördemomendiga asünkroon- (AM), ferroergutusega (FeM) ja püsimagnet-ergutusega PM-mootorile. Võrreldud on võimsustegurit ja kadusid. Kõigi võrdlusandmete osas on parim püsimagnetergutusega mootor. Kadude osas on paremuselt teine ferroergutusega mootor, viimane on asünkroonmootor.

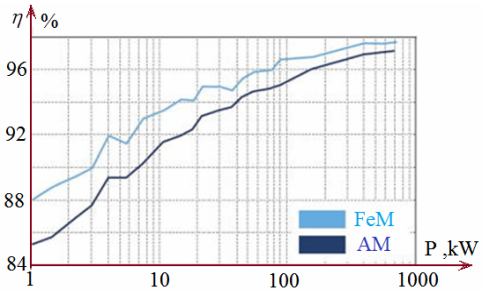
Tabel 12.1

Asünkroon- (AM), ferro- (FeM) ja püsimagnetergutusega (PM) 38 kW võimsusega mootorite võrdlus. Nimimoment on 240 Nm

Parameeter	Ühik	Mootori liik		
		AM	FeM	PM
Võimsustegur	–	0,727	0,672	0,888
Kadu staatori mähises	W	1139	1342	743
Rootori oomiline kadu	W	839	–	134
Kadu rootori südamikus	W	219	175	13
Staatori kogukadu	W	1753	1890	1306
Rootori kogukadu	W	1058	175	147
Elektromagnetiline kogukadu	W	2810	2064	1453

Ferroergutusega mootorite laiemat levi asünkroonmootorite kõrval lubavad nende head energeetilised näitajad (joonis 12.24). Juhtivad firmad loodavad lähiaastatel saavutada ferroergutusega mootoritel kuni 40%

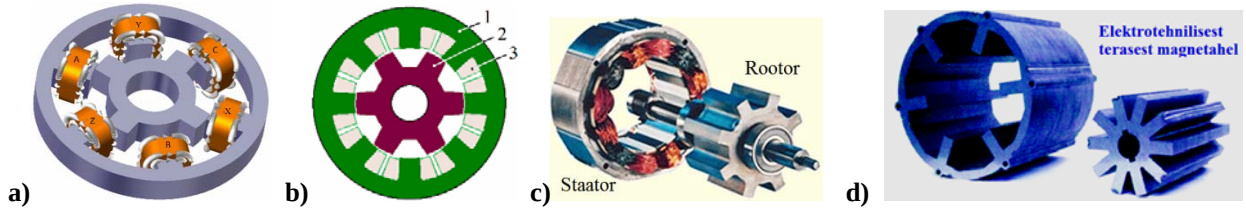
kadude vähenemist. Nii kujuneb 11 kW mootori kavandatud massiks ligikaudu 50 kg, mis on *ca* poole vähem kui sama võimsusega asünkroonmootor.



Joonis 12.24. Ferroergutusega sünkroonmasina ja asünkroonmasina kasutegurite võrdlus

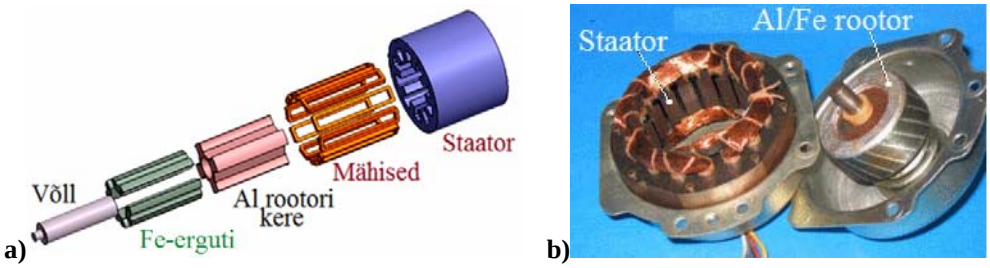
Ferroergutusega mootorite levikule annab lisatõuke **Euronorm EN 60034-30**, mis määrab kasuteguri klassid (joonis 10.22) kolmefaasilistele 2-, 4- või 6-pooluselistele 50/60 Hz madalpinge (<1000 V) mootoritele võimsusega 0,75...375 kW. Selle alusel ei tohi 1. jaanuarist 2015 toodetavate mootorite kasuteguri klass olla alla *IE3*, mis vastab suure kasuteguri klassile *(high efficiency)*.

Joonisel 12.25 on esitatud ferroergutusega sünkroonmasinate kujundusnäiteid, kui masina rootor on üleni ferromagnetmaterjalist. Siin iseloomustab a) lihtsate staatorimähiste kujundust ja paigutust, et tekitada pöördmagnetväli.



Joonis 12.25. Ferroergutusega sünkroonmasina kujundusnäited: 1 – staator; 2 – rootor; 3 – staatorimähis. a ja b – pulbermetall ning c ja d – elektrotehnilisest terasest magnetahelaga masinad

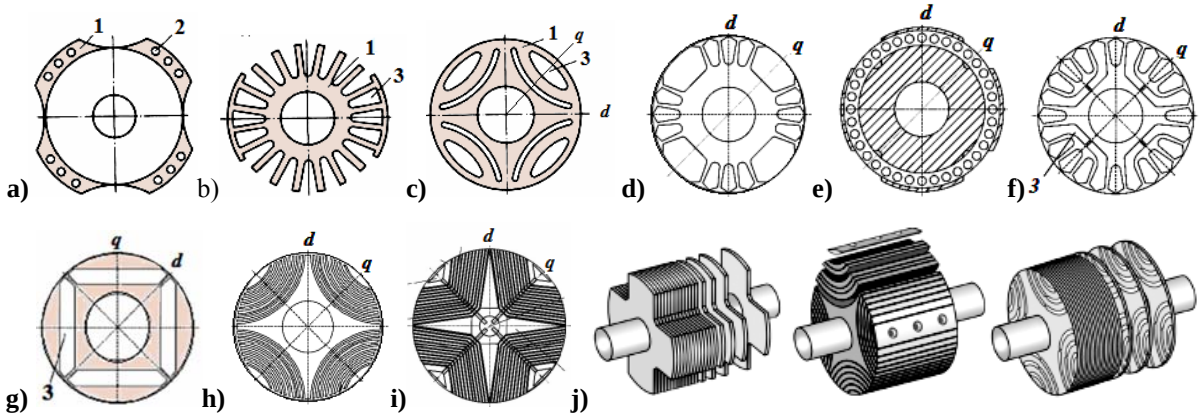
Kerged, kompaktsed ja tehnoloogilised lahendused saadakse, kui rootoril kasutatakse alumiiniumvalust kere (joonis 12.26), mis täidab käivitusel ka lühismähise rolli.



Joonis 12.26. Kombineeritud teras – alumiiniumvalurootoriga ferroergutusega sünkroonmasina kujundusnäited: a – idee selgitus ja b – tehniline lahendus

Joonisel 12.27 vaadeldakse erineva kujundusega rootori pakette ja elektrotehnilisest terasest väljastantsitud lehti, millest nad kokku pannakse. Joonisel 12.27a on kõige lihtsam rootor, mis sarnaselt asünkroonmootoriga koostatakse teraslehtedest. Neil on väljalõiked, mis tagavad erinevad induktiivtakistused piki- ja ristitelgedel *d* ja *q*. Mootori käivituseks on rootoril lühismähis. Sellise rootoriga masina tehnilised näitajad jätavad soovida.

Oluliselt paremate näitajatega on joonisel 12.27b, c, f ja g esitatud rootorid. Neil on rootori paketi lehed väljalõigetega 3, mis täidetakse alumiiniumiga. Tänu arendustööle rahuldavad uudsete rootoritega ferroergutusega sünkroonmasinate tehnilis-majanduslikud näitajad mikromootorite valdkonna vajadusi.



Joonis 12.27. Ferroergutusega sünkroonmasina rootorite kujundusnäited: 1 – rootori pakett, 2 – lühisvarrastega mähis, 3 – alumiiniumvaluga täidetavad väljalõiked

Elektromagnetiline moment ja nurga karakteristikud. Mootori elektromagnetilise momendi saab määrata sünkroonmasina vastava momendi võrrandi (12.1) ja elektromagnetilise võimsuse avaldise alusel eeldusel, et ergutusvool masinal võrdub nulliga. Sel juhul momendi võrrand:

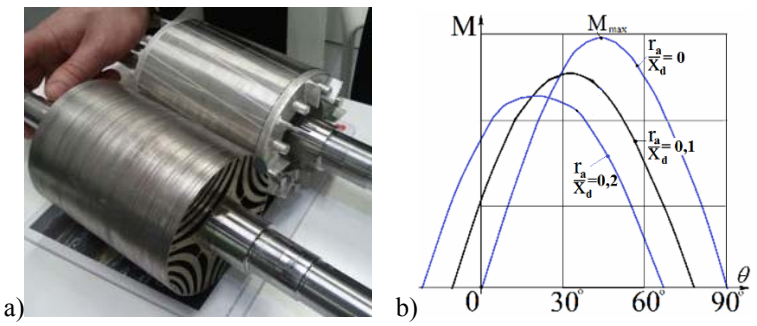
$$M_{em} = \frac{P}{\omega_1} = \frac{mU^2}{2\omega_1}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right)\sin 2\theta, \tag{12.3}$$

kus x_d ja x_q on masina piki- ja risttelje sünkrooninduktiivtakistus.

Momendi avaldises pole arvestatud ankrumähise kadu. Nii on silmas peetud, et masina elektromagnetiline võimsus võrdub elektrilisega, mis mootori korral tuleb mähisesse, generaatori korral võrku antavaga. See lihtsustus ei põhjusta suure ja keskmise võimsusega masinate korral märkimisväärset viga masina teooria põhiseisukohtades. Ankrumähise takistus r_a on palju väiksem kui reaktiivtakistused x_d ja x_q. Väikemasinates, mille nimivõimsus P_n < 0,5 kW, on takistus r_a reaktiivtakistustega samas suurusjärgus. Seetõttu mõjutab võimsuskadu elektromagnetilise momendi väärtust ja järelikult ka nurkkarakteristikut. Viies võrrandisse (12.3) parandused, saame väikesevõimsuseliste ferroergutusega sünkroonmasinatele momendi avaldise

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{mU^2(x_d - x_q)}{2\omega_1(x_d x_q + r_a^2)}\left[(x_d x_q - r_a^2)\sin 2\theta - 2r_a(x_d + x_q)\sin^2\theta + 2r_a x_q\right].$$

Ankrumähise takistuse r_a suurenedes maksimaalne moment $M_{\max}$ väheneb ja nurkkarakteristik (joonis 5.28) nihkub väiksemate nurga θ väärtuste suunas. Ferroergutusega sünkroonmasinate maksimaalne moment $M_{\max}$ vastab, kui θ = 25...45°.



Joonis 12.28. Ferroergutusega sünkroonmasina (a) nurkkarakteristik erinevate R_a / X_d suhete korral (b)

Ferroergutusega sünkroonmootoril, nagu ka ergutusmähisega või püsimagnetitega sünkroonmootoril, võrdub algkäivitusmoment nulliga. Järelikult on asünkroonseks käivituseks vaja käivitusmähist. Selleks on tavaliselt lühismähis, mis täidab ka summutusmähise ülesandeid, soodustades rootori võnkumiste kiiret summutamist.

12.7. Samm-mootorid

Samm-mootori ehitus erineb mõnevõrra sünkroonmootorite omast (palju staatorimähiseid ja on püsimagnet- või ferromagnetrootor). Nende pöördmagnetväli tekitatakse mitte kolmefaasilise siinuspingega, vaid järjestikuliste impulsside jadaga ruumis nihutatud staatori mähistele. Seetõttu võib impulsside väikese sageduse puhul samm-mootori rootori pöörlemine olla katkendlik. Niisiis toimub samm-mootori liikumine kindla pikkusega sammu haaval. See tagab ülisuure täpsuse. Mootor on väga hästi juhitav numbriliste seadmetega. Selliste mootorite juhtimise lihtsustamiseks on välja töötatud ka rida standardseid eri integraallülitusi. Samm-mootorid sobivad kasutamiseks väikese võimsusega täpse positsioonjuhtimisega mehhanismides, mil mootorile antud impulsside arv on võrdeline rootori pöördenurga (ehk asendi) muutusega ning rootori oleku määramiseks pole vaja kasutada täiendavat asendiandurit. Andur on vajalik ainult käivitamisel lähte- (nullpunkti) fikseerimiseks. Pärast lähtepunkti kindlakstegemist määravad edasise asendi üheselt mootorile antud impulsside arv ja suund. 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** PM-mootoriteks, **ferroergutusega** Fe-mootoriteks ning nende mõlema kasutamisega hübriid- ehk **ferropüsimagnet**-Fe-PM-mootoriteks. Viimaste teke on ajendatud soovist ühildada mõlema mootoritüübi head omadused. Nendeks on PM-mootoril hoidemomendi olemasolu ja ruumiühikule vastav suur eri sünkroniseeriv moment ning Fe-mootoril: võimalikud väikesed sammu-nurgaväärtused.

On olemas ka **kulgliikumise samm-mootorid**, kuid need on kallid ning vajavad intensiivset jahutust.

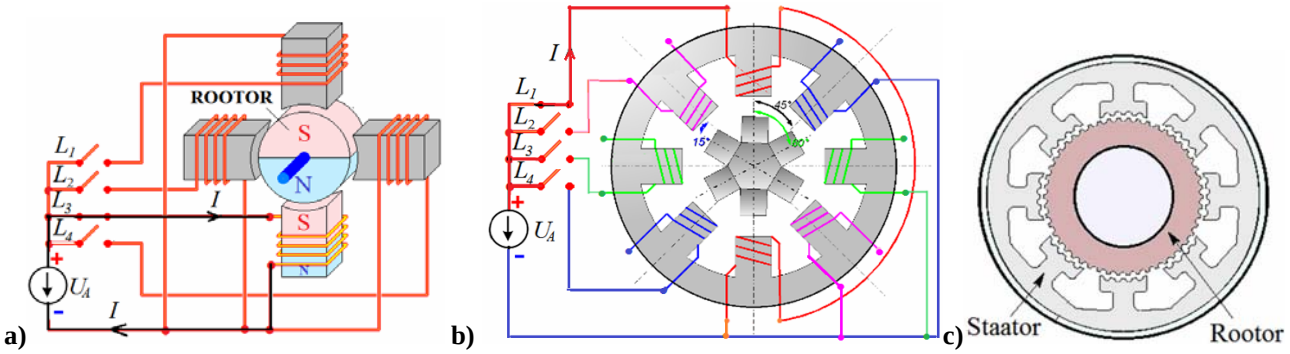
Praegu on palju erikujundusega PM-samm-mootoreid. Nad erinevad faaside arvu, mähiste paigutuse, staatorivoolu puudumisel rootori fikseerimise viisi poolest jne. PM-samm-mootoril on võrreldes Fe-samm-mootoriga sama sammunurga korral suurem sünkroniseeriv moment ning paremad energeetilised ja dünaamilised omadused.

Samm-mootor on mitmepooluseline elektrimasin, mis muudab alalispinge impulsside elektrienergia mootori võlli mehaaniliseks energiaks. Impulsstoite tagamiseks kommuteeritakse staatorimähist pooljuhtkommutaatoriga. Mootor koosneb paigalseisvast staatorist ja pöörlevast rootorist. Rootorile on kinnitatud püsimagnetid. Rootori võll ühendatakse käitatava seadmega (mehhanismiga). Staator koosneb magnetahelast ja mähisest. Staatorivool tekitab mähist läbides staatori magnetvälja, mis liitub rootori pooluste magnetväljaga, tekitades vastastikmõju tulemusel staatori mähistele ja rootori poolustele mõjuvad kaks jõupaari, mis põhjustab rootori pööramist ühe sammu võrra.

Rootoril mähis puudub. Rootoril tekitatakse poolused püsimagnetitega või ferroergutusega. Viimane on teostatav ainult väljepoolustega rootori korral. See tagab õhupilu pikkuse muutumise piki õhupilu ja rootori terase staatorivoo ebaühtlase radiaalsuunalise võimendamise. Püsimagnetitega rootoriga samm-mootor töötab sarnaselt püsimagnetergutusega sünkroonmootoriga. Väljepoolustega ferromagnetrootoriga samm-mootori tööpõhimõte vastab ferroergutusega mootori talitlusele.

Samm-mootori tööd selgitab joonis 12.29a. Siin on staatoril neli mähispooli, mille lõpud on ühendatud alalisvoolu toiteallika miinusklemmiga, algused lülitite L1...L4 abil allika plussklemmiga. Lähteolukorras on lüliti L3 suletud, teised avatud. Selleks et panna rootor pöörlema päripäeva, tuleb avada lüliti L3 ja sulgeda L2 jne. Lüliti L2 sulgumise järel on alghetkel staatori ja rootori liitmagnetvoo jagunemine tugevalt mittesümmeetriline. On kõrg- ja madalenergiatihedusega alad. Need põhjustavad magnetvooallikatele mõjuvate jõupaaride tekke. Viimaste mõjul liikuda saavat rootorit pööratakse 90°. Seejärel staatori Φ_S ja rootori Φ_R voogude teljed langevad kokku, liitväli on sümmeetriline ja sümmetreerivaid jõupaare enam ei tekki. Rootori pöörlemapanekuks vastupäeva tuleb avada lüliti L3 ja sulgeda L4 jne. Iga sellise

ümberlülitamise tulemusel pöördub vaadeldav rootor 90°. Jättes mähised ümber lülitamata, säilitab pingestatud samm-mootor **hoidemomendi**, mis väldib rootori iseeneslikku liikuma hakkamist väliste jõudude toimel.

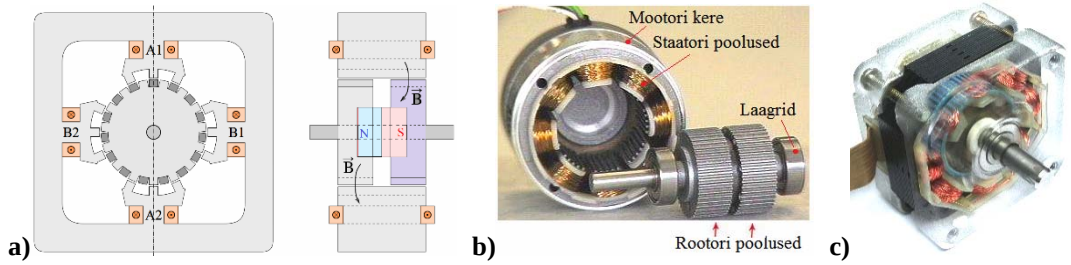


Joonis 12.29. Samm-mootori tööpõhimõtte selgituseks: a – püsimagnetsamm-mootor 90°; B – ferroergutusega 45° ja 1,8° rootori pöördenurga (sammunurgaga) mootor (c)

Sellise samm-mootori kõige lihtsam juhtimisviis on ühefaasiline talitlus. Seda nimetatakse ka **laine-talitluseks** ning iseloomustatakse joonisel 12.31. Sel juhul pingestatakse mootori igat staatorimähist korda-mööda. Puuduseks on saavutatava momendi väiksus võrreldes mootoriga, milles antakse impulss kahele jadalülituses olevale mähispoolile korraga. Siin on rootoril ainult 4 võimalikku asendit 0°, 90°, 180° ja 270°.

Joonisel 12.29b on ferroergutusega mootori staatorimähispoolide arv kaks korda suurem ja seetõttu ühele sammule vastav pöördenurk ühefaasilise talitluse korral on kaks korda väiksem. Siin on rootoril 8 võimaliku asendit 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225° ja 270°. Mõlemal joonisel on *a* ja *b* esitatud mootoril näidatud üks toiteallikas ja neli lülitit. Kui aga kasutada kahe faasimähise samaaegset pingestamist, siis hakkab mootor tööle kahefaasilises täissammtalitluses ja saavutab suurema pöördemomendi. Asendid jäävad täpselt ühefaasilise talitluse positsiooninurkade vahele, olles vastavalt 45°, 135°, 225° ja 315°.
Levinuimates samm-mootorites on enamasti sammunurgaks 1,8°. Sellise sammunurga puhul on täispöörde (360°) sooritamiseks vaja teha 200 sammu (joonis 12.29c), 100 impulsiga pöördub rootor täpselt 180°. Pingestades staatorisagedusega 1 kHz1000 impulssi sekundis, annavad 1,8° sammud mootori kiiruseks täpselt 300 min^{-1} või 5 s^{-1}.

Hübriid- ehk ferropüsimagnet-(Fe-PM)-mootor Fe-PM-mootori kujundust iseloomustab joonis 12.30. Mootori rootoril on teljesuunalised hambad. Rootor on jaotatud kaheks osaks, mille vahel paikneb silindriline püsimagnet (joonis 12.30a ja b). Seega on vasakpoolse rootoriosa hambad põhja- ja parempoolse omad on lõunapoolustega. Lisaks on vasakpoolse rootoriosa hambad parempoolse suhtes nihutatud poole hambasammu võrra. Rootori pooluspaaride arv on võrdne ühe osa hammaste arvuga. Rootori hambulised pooluskingad on pöörisvoolude vähendamiseks koostatud ferromagnetliistakutest.

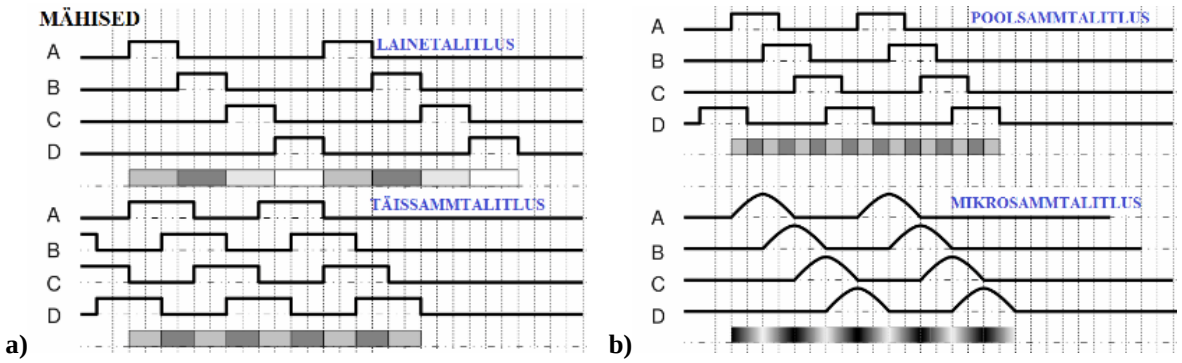


Joonis 12.30. Hübriidmootori (ferropüsimagnetsamm-mootori) kujundusnäited. a – neljapooluseline, b – kaheksa-pooluseline masin lahtivõetuna, c – sarnane masin valmiskujul

Joonisel 12.30b on näidatud neljafaasilise samm-mootori kujundus. Tänu püsi- ja ferromagnetergutuse samaaegsele kasutusele on võimalik suurendada pooluste arvu.

Täis- ja poolsammtalitus. Kasutades mõlema staatorimähise samaaegset pingestamist, hakkab mootor tööle kahefaasilises **täissammtalitluses** (joonis 12.31a) ja saavutab suurema pöördemomendi. Asendid jäävad

täpselt ühefaasilise talitluse positsiooninurkade vahele, olles vastavalt 45°, 135°, 225° ja 315°. Mõlema talitlusviisi kombineerimisel, st ühe või mõlema mähise vahelduval pingestamisel on võimalik saavutada ka 8 asendit. Viimast talitlusviisi nimetakse **poolsammtalitluseks** (joonis 12.31b).

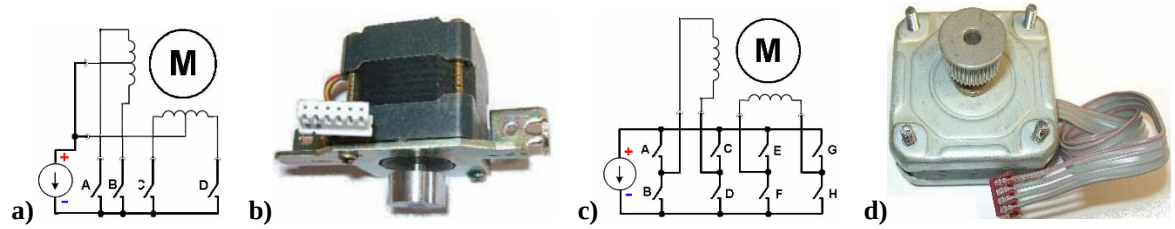


Joonis 12.31. Neljafaasilise staatorimähisega samm-mootori mähiste toide nelja talitlusviisi korral: a – laine- ja täissammtalitlus, b – pool- ja mikrosammtalitlus

Toites samm-mootori mõlemat mähist 90°-se faasinihkega siinus-koosinussignaalidega, on tulemuseks pöördmagnetväli ja seega ka pöördliikumine. Mootori tõhusus kasvab koos sammude arvu kasvuga pöörde kohta: energiatarve ühtlustub, väheneb sammukao oht ning mootor töötab tunduvalt sujuvamalt. Toites samm-mootori mähiseid siinus-koosinus-seaduspärasuse järgi diskreetsete impulssidega, on tulemuseks **mikrosammtalitlus**. Taolise talitlusviisi eeliseks on liikumise suurem sujuvus, kuid puuduseks vähenenud täpsus, mis eeldab tagasisideahelate kasutamist.

Mähiste toitelülituste alusel eristatakse ühe- ja kahepooluselisi mootoreid. **Ühepooluselisel** (unipolaarsel) mootoril ühendatakse mähiste keskväljavõte tavaliselt toite plussklemmiga ja mähiste algust ja lõppu lülitatakse soovitud pöörlemissuuna saavutamiseks vaheldumisi toite miinusklemmiga (joonis 12.32a).

Kahepooluselise (bipolaarse) mootori ehitus sarnaneb ühepooluselise mootori omaga, erinevus seisneb keskväljavõtete puudumises. Seega on mootor lihtsama konstruktsiooniga, kuid toitelülitus vahelduva polaarsuse tõttu keerukam. Jättes mähised ümber lülitamata, säilitab pingestatud püsimagnet- või PM-Fe-rootoriga samm-mootor hoidemomendi, mis väldib rootori iseeneslikku liikuma hakkamist väliste jõudude toimel.



Joonis 12.32. Ühe- ja kahepooluselise püsimagnetsamm-mootori staatorimähiste lülitused: a – ühepooluselise PM SM-lülitus ja b – mootori välisvaade; a – kahepooluselise PM-SM-lülitus ja d – mootori välisvaade

PM-samm-mootori talitlus ja tunnusjooned. Samm-mootori talitlust ja tunnusjooni vaadeldakse pöörleva rootoriga mootori näitel. Kuid kõik põhiseisukohad kehtivad ka kulgliikumisega mootori korral. Mootor töötab stabiilselt, kui staatorimähistele impulsside seeria andmise järel sammnurkade töötlus toimub nii, et kaotsi ei lähe (ei jää töötlemata) ükski samm. See tähendab, et iga sammu töötluse käigus mootori rootor saavutab stabiilse tasakaalu liitmagnetvootiheduse vektori suhtes (välja suunad langevad sammu lõppedes kokku), sammhaaval pöörleva staatori magnetvälja toimel.

Samm-mootori talitlus on põhiliselt määratud juhtimpulsside sagedusega f.

Eristatakse samm-mootori **staatilist talitlust**. See vastab impulsside sagedusele $f = 0$. Siin läbib staatori mähist alalisvool, mis tekitab liikumatu magnetvälja. Põhitunnusjooneks on staatilise sünkroniseeriva

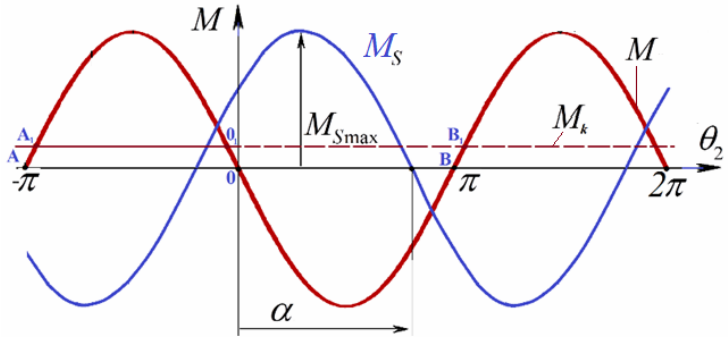
momendi M_S olenevus rootori pikitelje ja staatori magnetomotoorjõudude elektrilisest lahkkõlastusnurgast γ. Rootori pikitelg langeb kokku PM-mootorirootori magnetvooga ja väljepoolustega Fe-mootori pooluse sümmeetriateljega. Eespool käsitletud sünkroonmootorite põhjal on sünkroniseeriv moment M_S perioodiline siinusfunktsioon. Sünkroniseeriva momendi põhiharmooniline

$$M_S = M_{S\max} \sin\gamma = M_{S\max} \sin(\theta_1 - \theta_2),$$

kus $M_{S\max}$ – on maksimaalne sünkroniseeriv moment,

θ_1 ja θ_2 – vastavalt staatori magnetomotoorjõu ja rootori telje elektrilised pöördenurgad.

Joonisel 12.33 on esitatud momendi olenevus rootori pöördenurgast θ_2 (punane joon) fikseeritud staatori välja kui $\theta_1 = 0$ ja lahkkõlastusnurk $\gamma = -\theta_2$.

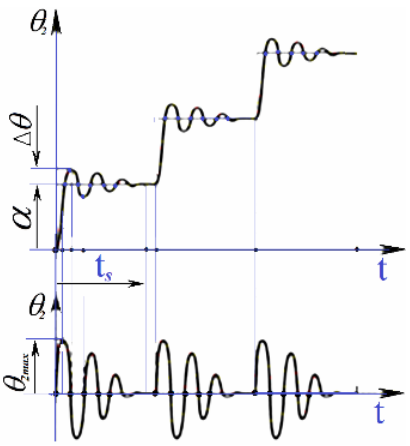


Joonis 12.33. Samm-mootori momendi olenevus rootori pöördenurgast

Staatilise stabiilsuse piirkonnaks θ on nurga karakteristiku stabiilse tasakaalu punkti ümbrus, mille igast punktist pöördub rootor pärast häiringu kõrvaldamist tagasi stabiilsesse lähte tasakaalupunkti.

Kui staatiline koormusmoment $M_k = 0$, siis staatilise stabiilsuse punktiks on 0. Ebastabiilse töö punktideks on A ja B ning staatilise stabiilsuse piirkond $A0B$ on sümmeetriline: $\theta = (-\pi) - (+\pi)$. Kui staatiline koormusmoment $M_k \neq 0$, siis staatilise stabiilsuse piirkond muutub mittesümmeetriliseks, näiteks kui $M_k > 0$.

Üksiksammude töötlus toimub vastavalt staatorimähisele antavate juhtimpulsside sagedusele nii, et enne järgneva impulssi saabumist oleks eelnev töödeldud. Seetõttu võrdub iga järgneva sammu alguses rootori nurkkiirus nulliga (joonis 12.34). Seejuures võib esineda võlli võnkumist sammnurga püsiväärtuse ümber. Võnkumisi põhjustab nurga töötlemise ajal võlli poolt salvestatud kineetiline energia, mistõttu rootor jätkab liikumist väljamomendile vastassuunas. Algab vabavõnkumisprotsess, nagu kõigi sünkroonpisimootorite korral. Võnkeamplituudid on suurimad, kui juhtimpulsside ja rootori resonantssagedus on võrdsed $f = f_0$.



Joonis 12.34. Samm-mootori üksiksammude töötlus

Võnkeprotsessi energia muundatakse elektrilisteks, magnetilisteks ja mehaanilisteks kadudeks. Mida suuremad on loetletud kaod, seda kiiremini lõpeb nurgatöötluse siirdeprotsess. Üksiksammude töötluse põhinäitaja on **ülereguleerimine** $\Delta\theta$. See on rootori uue stabiilse tasakaaluasendi suurim kõrvalekalle ja on siirdeprotsessis sammu vältel rootori kõrvalekalde $\theta_{2\max}$ suurim väärtus.

Juhtimpulsside sageduse kasvades väheneb maksimaalne mootori poolt arendatav moment. Põhjuseks on eespool loetletud kadude tõttu summutusmomendi kasv.

Käivitusel võib rootor maha jääda staatori voost ühe ja rohkem sammu võrra. Seetõttu võib tekkida lahknevus rootori sammude arvu ja staatorile antud impulsside vahel. Käivitusomaduste parandamiseks on kasutusel impulssi amplituudi forsseerimine eriregulaatori abil. Selline regulaator peab töötama mähiste toitesagedusega.

Samm-mootorite puhul on soovitatav vähendada ülereguleerimist $\Delta\theta$ ja sumbumisaega t_s, säilitades vajaliku rootori nurkkiiruse θ_2 hetkväärtuse (joonis 12.34a).

Samm-mootori põhilised tunnussuurused. Nendeks on: samm, mehaaniline piirkarakteristik ja kiirendusvõime. Samm-mootori ühe takti **samm** ehk **sammunurk** α on leitav

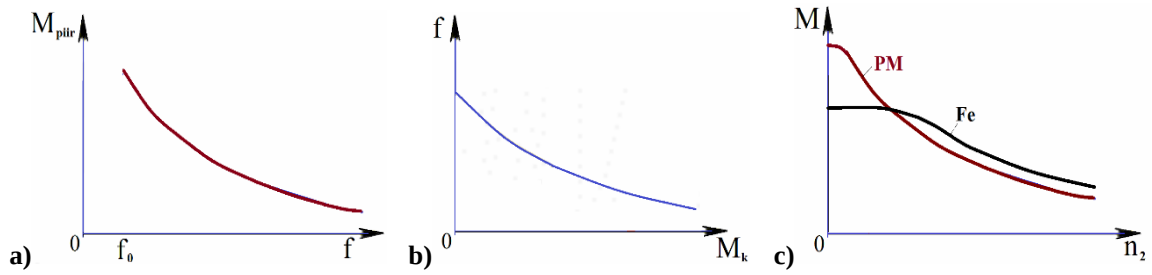
$$\alpha = \frac{360^0}{n_p m Z},$$

kus n_p on pooluste arv faasi kohta, m – faaside arv ning Z – hammaste arv.

Kiirendusvõime. Kiirendusvõime on juhtimpulsside suurim töötlemissagedus, mille juures ei toimu sammu lisandumist ega kadu. Kiirendusvõime kasvab sünkroniseeriva momendi kasvuga ja ka sammu, rootori inertsmomendi ning koormusmomendi vähenemisega.

Samm-mootori piirkarakteristik. Samm-mootori mehaaniliseks piirkarakteristikuks on maksimaalse sünkroniseeriva momendi sõltuvus juhtimpulsside sagedusest (joonis 12.35a).

See tunnusjoon määrab piiri, milleni saab antud juhtimpulsside sageduse korral koormata samm-mootorit, et säiliks sünkroontalitlus. Mehaanilist piirkarakteristikut vaadeldakse tavaliselt sagedustel $f > f_0$. Siin on $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ mootori põhiresonantssagedus ja ω_0 rootori omavõnkesagedus. Mootori poolt arendatav piirmoment oleneb lülitusimpulsside sagedusest f ja järelikult ka pöörlemiskiirusest. Mootorid arendavad nimimomenti ainult väikestel kiirustel (joonis 12.35b, c). Seejuures arendavad püsimagnetergutusega mootorid väikestel kiirustel võrreldes ferroergutusega suuremat momenti, suurematel kiirustel vastupidi.



Joonis 12.35. Samm-mootori piirmomendi tunnusjoon (a), koormusmomendi ja impulsside sageduse sõltuvus (b) ja PM-mootori koormuskarakteristiku võrdlus Fe-samm-mootoriga (c)

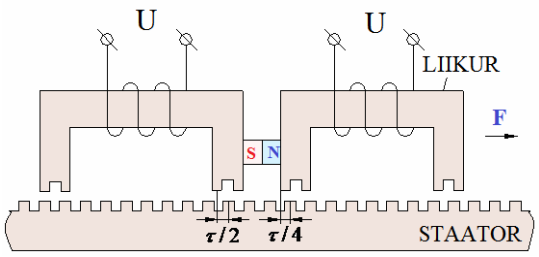
Pöörlemiskiiruse suurenedes väheneb mootori moment. Seda põhjustavad kaks põhitegurit: summutustegur ja staatori mähistes impulsi pingega samas suurusjärgus allikasisepinge teke. Viimane piirab impulssvoolu kasvukiirust nii, et see ei jõua saavutada püsiväärtust. Seetõttu jääb väiksemaks ka liitvälja voog ja rootorile mõjuv moment. Sünkroniseeriva momendi vähenemine on seda järsum, mida suurem on staatorimähise elektromagnetiline ajakonstant. Teatud kriitilise kiiruse puhul võib mootori moment osutuda mittepiisavaks, mis põhjustab sünkronismist väljalangemise ning millega kaasneb ka sammu kadu.

Samm-mootori staatorimähiseid saab ühendada kas rööbiti või jadamisi. Vastavalt sellele kujuneb välja mähise induktiivtakistus ning ka arendatav moment. Mähiste ühendusviiside võrdlus näitab, et jadaühenduse korral arendavad mootorid suuremat momenti väikestel kiirustel, rööpühenduse korral suurematel kiirustel.

Samm-mootoreid kasutatakse põhiliselt võimsuseni kuni 1 kW.

Kulgliikumisega samm-mootor. Tootmise automatiseerimisel on sageli vaja sooritada tasapinnalisi liikumisi. Pöörlev liikumine on vaja muundada kulgliikumiseks. See võimaldab lihtsustada seadmete kinemaatilist lahendust.

Kulgsamm-mootori staator kujutab endast magnetpehmest terasest plaati (joonis 12.36). Liikuri ergutusvoo tekitamiseks kasutatakse püsimagneteid koos ferromagnetergutusega. Mootori staatori ja liikuri hambajaotused on võrdsed. Hambajaotused liikuri ühe magnetahela ulatuses on nihutatud poole hambajaotuse $\tau/2$ võrra. Teise magnetahela hambajaotused on esimese magnetahela hambajaotuste suhtes nihutatud $\tau/4$ võrra. Sellistel tingimustel ei olene mootori magnetahela võimendusvõime (muutumatu staatori ja liikuri õhupilu korral) liikuri asendist.



Joonis 12.36. Kulgsamm-mootori illustratsioon

Kulgsamm-mootori tööpõhimõte ei erine pöörleva rootoriga samm-mootori tööpõhimõttest. Erinevus seisneb selles, et moonutatud liitväljas avaldub vastastikmõju magnetvoo allikatele jõududena F, mis püüavad liikuma panna staatorit ja liikurit. Kuna staator on kohtkindlalt liikumatu, siis liikuma hakkab liikur sel viisil, et vaadeldava magnetahela hambad oleksid vastastikku staatori hammastega. Seega on sammu ulatus veerand hambajaotust $\tau/4$.

Et tagada objekti liikumist kahte koordinaati pidi, kasutatakse kahekoordinaadilist kulgsamm-mootorit.

Hõõrdejõudude vähendamiseks kasutatakse magnetsuruõhu riputust. Magnetväljade jõud tõmbavad liikurit staatorile. Eridüüside abil suunatakse liikuri ja staatori vahele suruõhk, mis tekitab tõukejõu. Nii tekitatakse liikuri ja staatori vahele õhkpadi ning liikur ripub minimaalse õhupiluga eraldatuna staatori kohal. Nii tagatakse liikuri liikumiseks minimaalne takistus ja täpne positsioneerimine.

Samm-mootorite toide, juhtimine ja piirangud. Samm-mootorite toide. Neid toidetakse tavaliselt reguleeritavatest toiteallikatest, mis suudavad tagada muutumatu voolu ja momendi suuremas kiiruste vahemikus. Püsivoolu tagamiseks võib vaja minna samm-mootori toitepinge 2...3 kordset forsseerimist.

Samm-mootorite juhtimine. Samm-mootor on numbriliselt hästi juhitav. Seetõttu sobib see kokku diskreetsete, näiteks mikroprotsessorjuhtimissüsteemidega. Igale impulsile vastab ühene pöördenurk α. Andes n impulssi, on pöördenurk $\gamma = n\alpha$. Siit järeldub, et samm-mootori stabiilse talitluse korral võib kasutada tagasisideta juhtimist. Positsioneerimistäpsuse suurendamiseks kasutatakse suurema pooluste arvuga mootoreid. Juhtides järjestikuste impulssidega, võib aeglase pöörlemiskiiruse korral samm-mootori liikumine olla katkendlik.

Piirangud mootori valikul. Samm-mootori valikul arvestamist vajavad piirangud:

- Hoidemoment, milleni saab seisvat, pingestatud mootorit koormata nii, et tema rootor pöörduks.
- Käivitus-peatumissagedus on suurim sammusagedus, mille juures koormamata samm-mootor käivitub sünkronismist välja langemata.
- Mootori kiirus on piiratud suurima tühijooksusagedusega.
- Mootori kiirendus- ja pidurduspiirkond, kus puudub sünkronismist väljalangemise oht, on piiratud.

12.8. Kordamisküsimused

1. Sünkroonmasina ehitus, tööpõhimõte ja eripära.
2. Sünkroonmootori elektromehaanilised ja elektrilised omadused.
3. Püsimagnetitega sünkroonmasinad.
4. Ferromagnetergutusega (ferroergutusega) sünkroonmasinad.
5. Samm-mootorid.

13. ELEKTRIOHUTUS

13.1. Elektriohtlikkus ja ohutuse tagamine
13.2. Nüüdisaegsed elektriohutuse tagamise põhilahendused
13.3. Maandamine, mass ja potentsiaali ühtlustamine
13.4. Rikkevoolu olemus
13.5. Rikkevoolukaitse põhimõte
13.6. Rikkevoolukaitselülitid
13.7. Rikkevoolureleed
13.8. Kõrgsagedusliku elektromagnetkiirgusvälja mõju inimesele
13.9. Kordamisküsimused

13.1. Elektriohtlikkus ja ohutuse tagamine

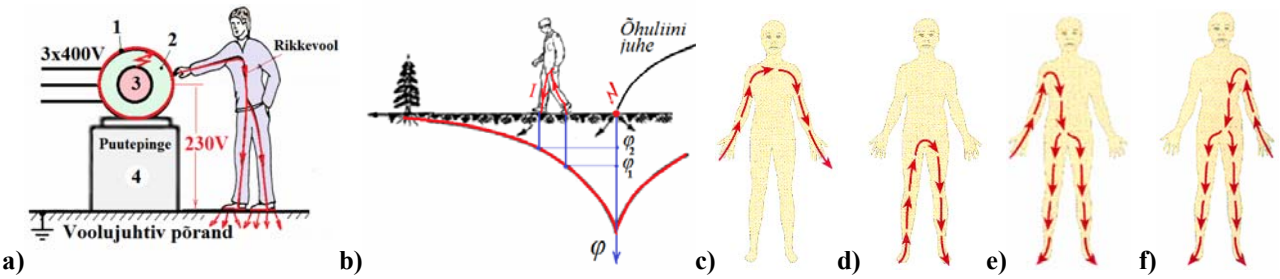
Elektriohutuse tagamine on meie igapäevaelus tähtsal kohal. Seda saavutatakse erimeetmete rakendamisega elektriseadmete kujundamisel ja valmistamisel, nende kasutamisel, samuti projekteerimisel, ehitamisel ja käidul. Elektrivoolu toimet inimesele ja koduloomadele, samuti elektriohutust tagavaid kaitseviise ja -võtteid reguleerivad Rahvusvahelise Elektrotehnikakomisjoni elektriohutuse põhistandardid. Eesti Standardikeskus on alates 1. jaanuarist 2004 Euroopa Standardimiskomitee täisliige. Seega tuleb Eestis kohustuslikus korras üle võtta kõik nende standardiorganisatsioonide standardid. Nendest kõige olulisemad, kaasa arvatud elektriohutusala standardid, tõlgitakse eesti keelde. Järgnevalt vaadeldakse elektriohutuspõhimõtete arengut ning madalpingepaigaldiste elektriohutuse saavutamiseks kasutatavaid kaitseviise ja -võtteid.

Elektripaigaldistes on tegu kahe põhiohuga: liigtemperatuuri ja elektrilöögiga.

Liigtemperatuur võib tekkida tarbija rikkest (lühis, maalühis) või liigkoormusest tingitud voolujuhtivaid osasid läbiva liigvoolu tagajärjel ja põhjustada põletushaavu, tulekahju jne.

Elektrilöök on kahjulik haiguslik toime, mida põhjustab inimese või looma keha läbiv elektrivool. See on põhiline elektriga seotud õnnetuste põhjustaja ja seepärast on oluline teada, kuidas seda ohtu vältida.

Inimese keha sattumine erinevate potentsiaalide alla võib põhjustada tõsiseid elektritraumasid. Vool üle 0,01 A võib inimese keha läbides osutuda surmavaks elektrilöögiks. Elektrilöögi ohtlikkus sõltub inimkeha läbiva voolu tugevusest, keha takistusest ja voolu teekonnast läbi inimkeha. Elektriseadmetega töötamisel tuleb täita ohutusnõudeid, mis on koondatud vastavatesse ohutushoiu eeskirjadesse ja eespool mainitud standarditesse. Nende eeskirjade range täitmise korral on välistatud kokkupuude elektriseadmete pingestatud osadega. Samuti on siis välditud elektrilöök voolu juhtivast materjalist konstruktsiooniosadest (näiteks mõõteriista või mootori kerest), mis normaalolukorras on pingevabad, kuid avariiolukorras võivad isolatsioonirikke tõttu sattuda maa suhtes pinge alla. Sellise juhuslikult tekkiva nn **puutepinge** kaotamiseks kasutatakse kaitsemaandamist kas spetsiaalse kaitsejuhi (PE-juht) või vahetu maandamise teel. Joonis 13.1a selgitab puutepinge U_p tekkimist. Siin on mähise isolatsioonirikke (joonisel punane nool) tõttu kolmefaasilise asünkroonmootori kere sattunud ühendusse liinijuhtmega.



Joonis 13.1. Puutepinge (a), sammupinge (b) ja puute- ning sammupinge ohu (c, d, e, f) selgitamiseks: 1 – puutevõimalik juhtiv (pingealdis) osa, 2 – isolatsioon, 3 – ohtlik pingestatud osa, 4 – puutevõimalik mittejuhtiv osa

Joonisel tähistab 1 puutevõimalikku juhtivat mootoriosa, nn seadme **pingealdist** osa, mis on sattunud pinge alla isolatsioonirikke tõttu. 2 tähistab mootori pingestatud osa (3) ja puutevõimaliku juhtiva osa (1) vahelist isolatsiooni. 4 tähistab puutevõimalikku mittejuhtivat osa (sein, isoleeralus jne). Kui mootor saab toite 3 x 400 V toitevõrgust, siis isolatsioonirikke korral masinakere potentsiaalide vahe – puutepinge (kere ja maa vaheline potentsiaalide erinevus) on võrdne faasipingega $U_p = 230V$. Maa potentsiaal $\varphi_T = 0V$. Potentsiaalide vahe käe ja jalgade vahel tekitab inimkeha läbiva (punase joonega/punktiiriga tähistatud) **rikkevoolu**, mis võib olla eluohtlik.

Joonised 13.1b ja d selgitavad sammupingest U_S tekkiva voolu teekonda. Siin vaadeldakse olukorda, kus õhuliini pingestatud juhe on katkenud ja langenud maapinnale. Juhtme ja maa puutekohas on maa potentsiaal võrdne juhtme potentsiaaliga. Laengute valgumisel maasse omandab maapind elektrilise potentsiaali φ, mis juhtmest kaugenedes (laengute valgumisalal kontsentriliste sama potentsiaaliga ringide raadiuste suunas) väheneb eksponentsiaalselt (joonisel 13.1b punane kõver). Maa-ala, millel potentsiaal langeb nulliks, nimetatakse nullpotentsiaalialaks. Kui inimene sammub laengute maasse valgumise alal, siis olenevalt sellest, milline on ühe ja teise jala puutepunktis maaga potentsiaali väärtus φ_1 ja φ_2, kujuneb vool ja voolu teekond läbi inimese jalgade (b ja d). Joonisel b on inimese vasaku jala potentsiaal φ_1 suurem parema jala potentsiaalist φ_2, nii läheb vool vasaku jala kaudu paremasse jalga ja tagasi maha. Jalgadele rakenduvat potentsiaalivahet nimetatakse **sammupingeks**, mis võib inimesele ohtlikuks saada. On ilmne, et sammupinge oleneb peale juhtme potentsiaali jalgade asendi ja juhtme kauguse veel pinnase ning jalatsite omadustest. Näiteks on niiske pinnase korral potentsiaalilang suhteliselt suur, kuid ohutuse tagamiseks ei tohi läheneda mahalangenud õhuliini juhtmele enne, kui on kindlaks tehtud pinge puudumine sellel.

Joonisel c tekkib inimkeha läbiv vool siis, kui kannatanu puudutab parema käega suurema ja vasakuga väiksema potentsiaaliga seadmeosa. Joonisel 13.1e tekkib inimkeha läbiv vool siis, kui inimene puudutab parema käega rikkis isolatsiooniga seadet.

Nendes näidetes on kõige ohtlikum voolu tee läbi organismi, kui vool läheb läbi südame ja kopsude – seega joonisel 13.1b ja f kujutatud olukorras. Vool 0,1 A võib käest jalgadesse või käest kätte kulgedes põhjustada 3 sekundi möödudes südametegevuse peatumise ja surma.

Elektrilöögi peamised põhjused:

- pingestatud elektriahela isoleerimata osade – paljasjuhtmete, elektrimasinate, lülitite, lambipesade, kaitsmete ja teiste aparaatide ning seadmete kontaktide puudutamine;
- tavaoludes pingestamata, kuid isolatsiooni vigastuste tõttu pinge alla sattunud elektriseadmete osade, näiteks elektrimootori kere puudutamine;
- tarbija elektriahela osadeks mitteolevate, juhuslikult pinge alla sattunud elektrit juhtivate ehitisosade (märja seina, hoone metallkonstruktsiooni jne) puudutamine;
- viibimine mahakukkunud katkenud elektrijuhtme läheduses.

Elektrilöögi välistamiseks:

- kasuta elektritarbijaid vastavalt nende kasutusõpetusele;
- hoidu üheaegsest elektriseadme ja metalleseme kokkupuutest;
- pesuruumides kasuta ainult selleks spetsiaalselt ette nähtud elektriseadmeid;
- märgates elektriseadmes riket, lülita seade viivitamatult toitevõrgust välja ja rikke kõrvaldamiseks kasuta spetsialisti abi;
- tulekahju korral ei tohi voolu all olevad seadmeid veega kustutada;
- ei tohi puutuda tarbijaid, millel on näha lahtiseid juhtmeid ja mis võivad rikkis olla;
- mittepiisavate oskuste korral ära püüa remontida elektriseadmeid, usalda see töö spetsialistidele.

Abi osutamine elektrilöögi korral.

- Esmaülesandeks on vooluahela **katkestamine** või kannatanu **voolu alt vabastamine**. Sellega kõrvaldatakse oht abiandjale ja vabastatakse kannatanu rikkevoolu edasisest toimest.
- Kui lülitiga elektrikilp asub kaugel või selle juurde minek on ohtlik, tuleb kannatanu voolu all olevatest ahelaosadest jõuga **eemaldada**.
- Elektriõnnetuses kannatanut päästes peab päästja ise olema kuival pinnal, vältimaks enese ohtu seadmist. Eemaldamiseks tuleb abistajal jalga panna kummisaapad või kalossid, kätte kummikindad

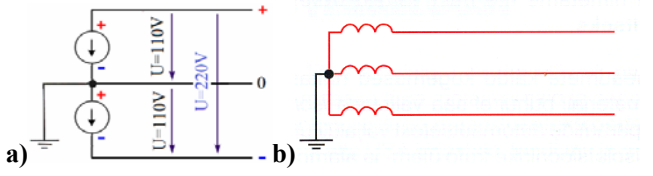
või mähkida käe ümber kuiv riie, haarata kinni kannatanu kuivadest riietest ning rebida voolu alla sattunud inimene pingestatud kohast eemale.

- Eemaldamisel ei tohi abivahenditena kasutada metallesemeid, sest nad juhivad elektrit. Hästi sobivad selleks pikad puidust elektriisolaatorina toimivad esemed. Vesi, niisked riided ja maapind, vihmase ilma korral ka õhk – kõik nad juhivad hästi elektrit ja on ohtlikud.
- Kui ahela faasipinge ei ületada 250 V, siis saab rikkeahelat läbi raiuda või lõigata kas kirve või mõne teise isoleeritud käepidemega tööriista abil, katkestades üksteise järel kõik elektrivõrgu juhtmed.
- Kui kannatanu on redelil, siis tuleb rakendada abinõud, et vältida kukkumisvigastusi.
- Kui kannatanu on rikkeahelast eemaldatud, teata päästeameti telefonil 112 elektriõnnetusest ja kutsuda välja kiirabi.
- Kiiresti tuleb alustada kannatanu elustamist ja osutada kannatanule esmaabi kuni kiirabi saabumiseni.
- Kui kannatanu on teadvuseta, kuid hingab, siis hoida teda pikali. Verevarustuse parandamiseks tõsta ta käed ja jalad kõrgemale ning katta sooja riidega.
- Kui kannatanu ei hinga ja südametöö on peatunud, siis tuleb esmaabi osutamiseks talle teha suust-suhu meetodil kunstlikku hingamist ning kaudset südame massaaži. Elustamist tuleb jätkata kuni päästeameti arsti saabumiseni.
- Kui kannatanu hingamine taastub, siis katta ta soojade riietega. Päästeteenistuse saabudes täida nende juhendeid ja aita toimetada kannatanut meditsiinilise abi punkti. Kannatanu soovitatav transpordiasend on lamamine paremal küljel.

Elektriohutuse tagamislahenduste areng. Alates aastatest, mil elekter täitis põhiliselt meelelahutuslikku ülesannet, tekkis vajadus ka elektriohutuse tagamiseks. Professor **Endel Ristheina raamatus „Maandamine ja potentsiaaliühtlustus“ 2004** on antud ajalooline ülevaade elektriohutuse arengust. 1731 avastas inglane Stephen Grey, et elektrilaenguid saab üle kanda maast isoleeritud metallesemetele ja ka inimestele. Sakslane J. H. Winkler avastas 1744. aastal, et maa ja vesi juhivad elektrit ning võttis kasutusele maanduselektroodi. 1750. aastal pakkus Ameerikas Benjamin Franklin majade kaitseks piksevarda. Järgnevalt võeti kasutusele elektriseadmed, mida alati isoleeriti maast. Alles 1838. aastal hakati sideliini arenduse käigus liini tagasivoolujuhina kasutama maad. Sellest siiski loobuti, kuna nii suurenes sideliini induktiivsus.

Madalpingevõrgu maandamine. Maandamise all tuleb mõista elektriseadmete juhuslikult potentsiaali alla sattuda võivate (elektriseadmete pingealdid osad) metallosade (kerede, tugiraamide, karkasside) ühendamist maandusjuhtme abil pinnasega (maanduskontuuriga).

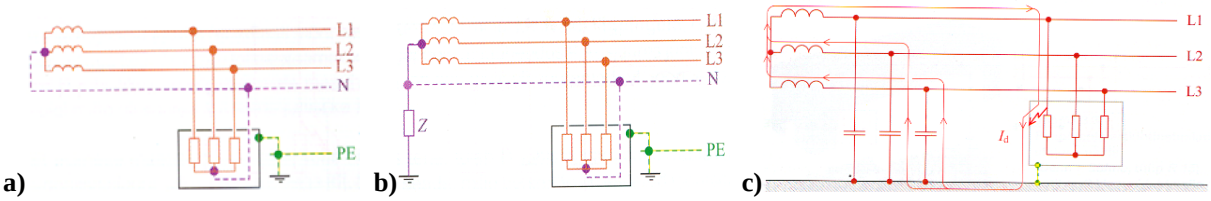
Esimesena võeti kolmejuhiline alalisvooluvõrk kasutusele Inglismaal. John Hopkinson võttis 1883. aastal kasutusele toiteallika keskpunktis talitlusmaanduse (joonis 13.2a). Nii sai ülekande kaugust suurendada juba kasutusel olevate seadmete ja puutepingete taseme säilitamisega. 1887. aastal patenteeris andekas horvaatia teadlane **Nikola Tesla** USAs mitmefaasiliste elektrimasinate ja elektriülekannete põhimõtted. 1888. aastal võttis ta patendi ka elektrimasinate ja trafode tähtlülitusele koos neutraaljuhiga. Neid ideid arendas kiirelt edasi Saksamaal firma **AEG** (Allgemeine Elektricitäts-Gesellschaft) peainsener **M. Dolivo-Dobrovolsky**. 1889. aastal võttis ta patendi lühisrootoriga asünkroonmootorile. Järgneval kahel aastal arendas ta välja elektriülekande täht-kolmnurk- ja kolmnurk-täht-lülituses trafodega ning talitlusmaandusega. Tähtlülituse korral ühendatakse faasimähiste lõpud ühte punkti, mida Saksamaal ja Venemaal (ka Eestis) hakati nimetama **nullpunktiks** (kui maandusjuhis vool puudub, siis punkti potentsiaal maa suhtes on null), inglis- ja prantsusekeelses keskkonnas **neutraalpunktiks**.



Joonis 13.2. Kolmejuhiline alalisvoolusüsteem Inglismaal (a) ja kolmefaasiline maandatud neutraaliga vahelduvvoolusüsteem (b)

Elektriohu vältimiseks isolatsiooni rikke korral, et seadme kere ja maavahelise pinge (puutepinge) olemasolu välistamiseks võttis Saksamaa Elektrotehnikute Liit 1898. a vastu olulise põhimõttelise soovituse. Kõikide

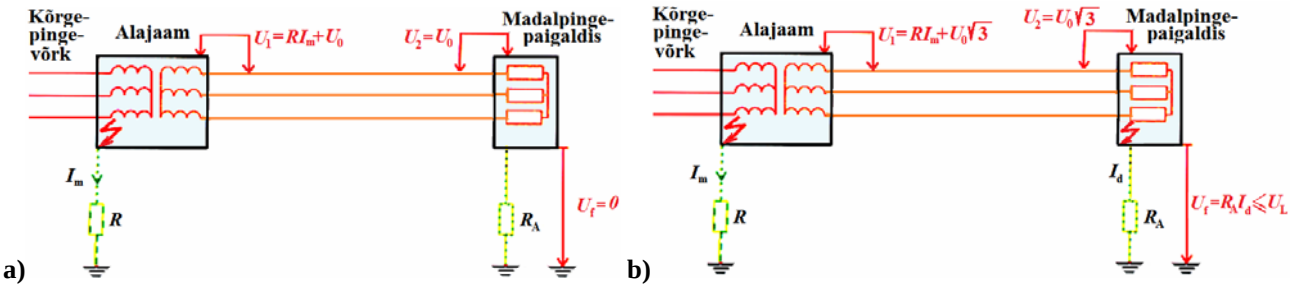
elektriseadmete alused ja kered kas maandada või valmistada isoleermaterjalist. Praegu on maast isoleeritud nn **IT-juhistik** kasutusel, kui tahetakse tagada suurt ohutust (joonis 13.3 ja 13.4). Maast täielikult isoleeritud nn IT-juhistiku korral võib neutraaljuht (N) olemas olla, võib aga ka puududa (a). Kasutatakse ka üle suure takisti (z) maandatud IT-juhistikku, mille puhul võib samuti neutraaljuht olemas olla või ka puududa (b). Joonisel 13.3c on kereühendus neutraalita IT-juhistikus ja rikkevoolu (maaühendusvoolu) I_d sulgumisteekond läbi liinijuhtide ja maa vaheliste mahtuvuste.



Joonis 13.3. Maast täielikult isoleeritud IT-juhistik (a). Üle suure takisti (z) maandatud IT-juhistik (b). Kereühendus neutraalita IT-juhistikus (c)

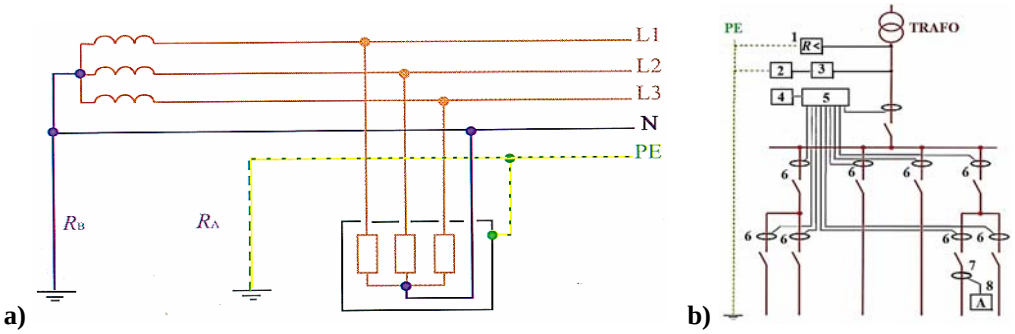
Joonis 13.3c kujutab rikkepingeid (-potentsiaalide vahesid) maandamata IT-juhistikus, kui maaühendus tekkib toitealajaama kõrgepingepoolel korras (a) ja korrast ära madalpingejuhistiku korral.

Skeemi tähistus: I_d on maaühendusvool madalpingepaigaldises, I_m – maaühendusvool toitealajaama kõrgepingeosas, R – alajaama ja R_A – madalpingepaigaldise kaitsemaanduse takistus, U_0 – madalpingejuhistiku faasipinge, U_1 ja U_2 – rikkepinged (ajutised liigpinged madalpingejuhistikus), U_f – rikkepinge (puutepinge) madalpingepaigaldise maaühenduskohas, U_L – suurim lubatav puutepinge (L sõnast *limit*, 'piir'), mis on tavaliselt 50 V. Trafo mähiste ühendusviis võib olla ka teistsugune (10/0,4 kV trafodel nulljärgnevustakistuse vähendamiseks enamasti kolmnurk/täht)



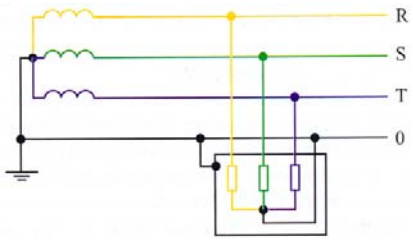
Joonis 13.4. Rikkepinged (-potentsiaalide vahed) maandamata IT-juhistikus toitealajaama kõrgepingepoole maaühenduse korral

IT-juhistiku isolatsiooni korrasoleku kontrolli ja rikkekoha kindlakstegemise lülitusi vaadeldakse joonisel 13.5. IT-juhistiku näide on joonisel 13.5b. Siin on R_A paigaldise kaitsejuhi ja maanduse kogutakistus, R_B – toiteallika neutraali talitlusmaanduse takistus (indeks B saksakeelsest sõnast *Betriebserdung*, 'talitlusmaandus'). Joonisel 13.5a on 1 isolatsioonitakistuse näitur ning signalisaator, 2 – kontrolliseade, 3 – sidestusseade, 4 – juhtimisseade, 5 – rikkevoolunäitur, 6 – rikkevooluandur (faasijuhtide ja neutraaljuhi voolude summat mõõtev voolutrafo), 7 – voolutangid, 8 – ampermeeter.



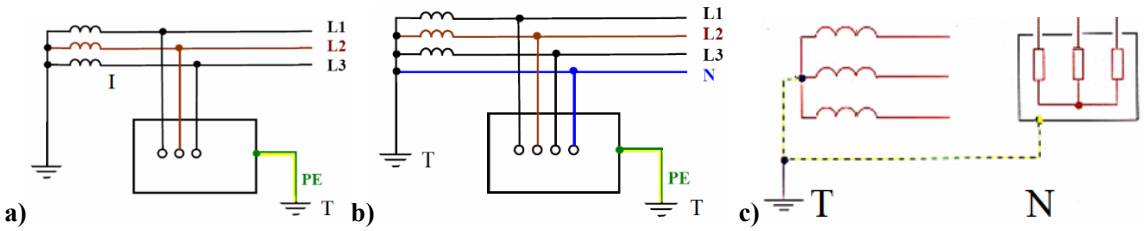
Joonis 13.5. IT-juhistik ja selle isolatsiooni korrasoleku kontroll ning rikkekoha kindlakstegemine

Kui kasutada toiteallika neutraalpunktis talitlusmaandust ja tarbija kere kaitsemaandust, siis ühefaasilise maalühise korral, kui rikkevool pole nii suur, et liigvoolukaitse rakenduks, võib seadme kere omandada ohtliku puutepinge väärtuse. Selle vältimiseks on vaja maandustakistuse lubatud väärtust normida. Eesmärk on tagada selle minimaalne väärtus. Maanduskontuur soovitati koostada varrastest, plaatidest, torudest, sõrestikest, millel oleks piisav mehaaniline tugevus. Need meetmed polnud piisavad, et alati ohutust tagada. Lisameetmetena nähti ette kas lisajuhtme või täiendava maaühendusvoolu tundliku kaitse kasutamist. 1913. aastal nägi Saksa firma AEG ette kolmefaasilistes madalpingevõrkudes seadmete kere maandamise nulljuhi (neutraaljuhi) kaudu. Selline lahendus (joonis 13.6) hakkas ametlikult Saksamaa Elektrotehnikute Liidu poolt vormistatuna kehtima alles 1924. aastal.



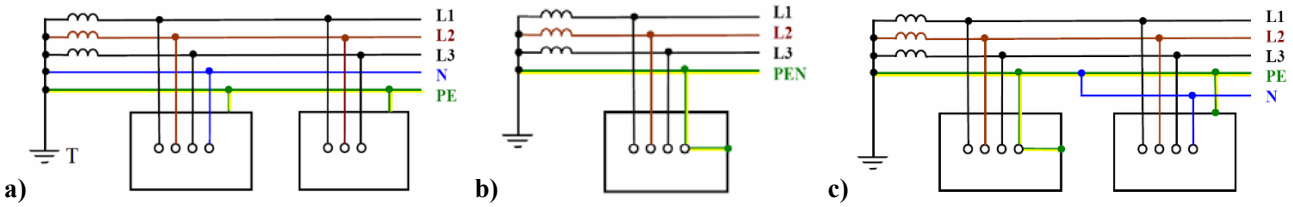
Joonis 13.6. Nullimise põhimõte AEG-lt 1913 a. Faaside tähised ja faasijuhtide värvid (kollane, roheline, violett) vastavad Saksamaa hilisemale (ka Eestis enne NSV Liidu standardite kehtestamist kasutatud) standardile. Tarbija kaitseks on liigvoolukaitse, mis rakendub, kui vool ületab lubatud väärtuse

Lõuna-Euroopas, eeskätt Prantsusmaal, loeti Saksa lahendust nulljuhi katkemisel ohtlikuks. Seal võeti kasutusele nn TT-juhistik (joonis 13.7). Lisaks IT- ja TT-juhistikele kasutatakse ka TN-süsteemi. IT-juhistikul (a) on kõigi elektriseadmete alused ja kered kas maandatud (T) kohapealse kaitsejuhi kaudu või valmistatud isoleermaterjalist. Võrgu tööjuhid on maast isoleeritud (I). Siin kasutatakse pidevat isolatsiooniseisundi mõõtmist ja esimese rikke korral rakendub signaal. TT-juhistiku (b) korral on võrku toitva trafo neutraal jäigalt maandatud ning elektriseadmetel on pingealdid osad maandatud kohapealse kaitsejuhi abil.



Joonis 13.7. IEC juhtistikusüsteemide tähised: a – IT-juhistik, b – TT-juhistik ja c – TN-juhistik

TN-juhistikusüsteemi korral on praktikas kasutusel TN-S-süsteem (joonis 13.8a), TN-C-süsteem (joonis 13.8b) ja TN-C-S-süsteem (joonis 13.8c).**TN-S-süsteemis** on võrgutrafo neutraalpunkt jäigalt maandatud.



Joonis 13.8. IEC-juhtistikusüsteemide tähiste selgituseks. TN-S-(a), TN-C- (b) ja TN-C-S-süsteemi juhistik (c)

Kõik elektriseadmete pingealdid osad on kaitsejuhi abil maandusega ühendatud. Kogu võrgus on neutraaljuht ja kaitsejuht teineteisest eraldatud.

TN-C-süsteemis on võrgutrafo neutraalpunkt jäigalt maandatud. Kõik elektriseadmete pingealdid osad on maandusega ühendatud ühildatud kaitse- ja neutraaljuhi, PEN-juhi abil. **TN-C-S-süsteemis** (joonis 13.8c) on võrgutrafo neutraalpunkt jäigalt maandatud. Kõigi elektriseadmete pingealdid osad toiteallika lähi võrguosas on PEN-juhi, kaugemas võrguosas aga eraldi kaitsejuhi abil maandusega ühendatud.

13.2. Nüüdisaegsed elektriohutuse tagamise põhilahendused

Ohtliku elektrilöögi välistamiseks esitab elektriohutuse põhistandard (EVS-EN 61140:2006. Kaitse elektrilöögi eest. Ühisnõuded paigaldistele ja seadmetele. – 76 lk) kaitsemeetmetele kaks põhinõuet. Esiteks: **ohtlikke elektriahelate pingestatud osi ei tohi saada puudutada**. Teiseks: **puutevõimalikud juhtivad osad ei tohi olla ohtliku** (suurema, kui lubatava puutepinge piirväärtusega) **pinge all.**

Need kaks nõuet peavad olema täidetud nii tavaoludes kui ka pärast võimaliku üksikrikke teket.

Lubatav puutepinge piirväärtus sõltub keskkonnast (niiskes ja märjas keskkonnas on väiksem), puute vältusest ja inimese elektrialasest ettevalmistusest ning võib paiguti erineda. Inimene võib saada elektrilöögi **pingestatud ahelaosade puudutamisel** nn **otsepuutel** (joonis 13.1c, e, f) või **kaudpuutel**. Viimane esineb ahela pingealtide osade puudutamisel, mis tavaoludes ei ole pinge all, kuid on isolatsiooni rikke korral. Puudutamist tõlgendatakse madal- ja kõrgepingeseadmete korral erinevalt. Madalpingel (VV nimipinge kuni 1000V, AV ahelates kuni 1500V) pingestatud ahelaosa puudutamine tähendab vahetut või käeshoitava metalleseme kaudu tekkivat kontakti selle ahelaosaga, mis on **otsepuude**. Kõrgepingeahelates ($U_{nVV} \geq 1000V$ ja $U_{nAV} \geq 1500V$) loetakse sellise kontaktiga võrdväärseks sisenemist kõrgepinge seadmete standardis kindlaksmääratud pingestatud osa ümberolevasse **ohualasse**.

Otsepuutekaitsel on kaks põhilahendust. Esimene – inimkeha läbida võiva **voolutekke takistamine**. Selleks isoleeritakse elektriahelate ja -seadmete pingestatud osad. Ahelatel ja seadmetel on **põhiisolatsioon**, mida saab kõrvaldada vaid purustamise teel ja kõrgemat ohutustaset tagav **lisaisolatsioon**, mida nimetatakse ka **kaitseisolatsiooniks.** Lisaisolatsioonina kasutatakse topelt- või tugevdatud isolatsiooni. Kasutatakse puudutamist välistavaid kaitsekatteid ja -kestasid, lähenemist takistavaid kaitsetõkkeid, mittejuhtivat keskkonda (isoleerpõrandad ja -seinad), elektriseadme paigutamist väljapoole puuteulatust. Kokkuleppeliselt on otsepuutekaitse tagatud, kui pole võimalik pingestatud osasid sõrmedega puudutada. Teine lahendus – piirata inimest läbida võiva **voolu väärtust väiksemaks elektrilööki põhjustavast väärtusest**. Selleks on töödel, mida võivad toitepinget välja lülitamata (pinge all) teha vaid elektriala asjatundjad – isoleertööriistade ja -kaitsevahendite kasutamine. Elektrilöögi välistamiseks kasutatavad isoleermaterjalidest valmistatud kaitsevahendid on kummisaapad, kummikindad, isoleeralus kummimatt ja isoleerkäepidemetega elektripaigaldusriistad.

Elektrilöögikaitse kaudpuute puhul. Kaitse kaudpuute puhul peab võimalikult suures ulatuses välistama elektrilöögiohu, kui elektriseadmete ja -paigaldiste osad on isolatsioonirikke tõttu sattunud pinge alla. Isolatsioonirikke korral võib tekkida ühendus seadme pingestatud osade ja maandatud katte vahel. Tekkiv rikkevool ei pruugi elektriseadme talitlust kuigi oluliselt häirida, kuid võib esile kutsuda elektrilöögi- ja tulekahjuohu.

Kaudpuutekaitse kujundamisideedeks on takistada rikkevoolu teket läbi inimkeha, piirata rikkevoolu väärtust väiksemaks kui elektrilööki põhjustav väärtus ning rikke tekkimisel automaatselt ja kiirelt välja lülitada toitepinge, kindlustamaks tingimusi, et kui inimene puutub kokku ahela pingealdiste juhtivate osadega, ei saaks rike põhjustada elektrilööki. Need kaitseideed toimivad ka loomade elektrilöögi kaitsel. Erinevus on põhiliselt selles, et loomad on tavaliselt elektrilöögile inimesest tundlikumad. Põhilised kaitseviisid kaudpuute korral on järgmised.

Kaitsemaandamine. Tarbijate (elektrimasinate, aparaatide, teiste seadmete ning paigaldiste) kerede maaga ühendamine (vt p 13.3). Kaitsemaandusahelate takistus ei tohi ületada 4 Ω.

Potentsiaaliühtlustus. Kasutatakse suurema ohuastmega ruumides, nagu vannituba, saun ja duširuum. Selleks tekitatakse elektriline ühendus, mis võrdsustab erinevate elektriseadmete ja kõrvaliste juhtivate osade potentsiaalid elektriohtlikus kohas (vt p 13.3.1).

Kaitseväikepinge. Nõrkvooluelektriseadmete toiteks kasutatakse talitlusväikepinget. Selle ülempiir on 50 V vahelduvvoolu ja 120 V alalisvoolu korral.

Isoleerümbriste kasutamine. Tarbijate pingestatud ahelaosade isoleerimine nii, et nad on täielikult kaetud isolatsiooniga, välistades selle mahavõtmise teda rikkumata. Kaitseisolatsiooni takistus peab olema piisavalt suur, et tekkida võiv väike lekkevool oleks ohutu.

Kaitseeraldus. Selleks eraldatakse kaitstava tarbija vooluahel teistest vooluahelatest kaitseisolatsiooni abil, vahelduvvooluahelates kasutatakse selleks eraldustrafot. Seejuures kaitseeraldatud ahelaid ei maandata.

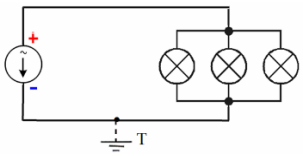
Seadme elektritoite kiire ja automaatne väljalülitamine. Tarbijate kõik pingealtid osad peavad olema kaitse- või PEN-juhi abil töökindlalt maandatud. Siis kujuneb juhuslik ühendus (isolatsioonirike) seadme pingestatud osa ja pingealti osa vahel lühiajaliseks, millega kaasneb suhteliselt suur lühisvool. Kasutades liigvoolu kaitsevahendeid kaudpuutekaitsena, lülitatakse tarbija toide kiiresti välja (vt p 13.5)

13.3. Maandamine, mass ja potentsiaaliühtlustus

Elektriohutuse põhistandardi järgi on maa planeet Maa ja kogu selle füüsikaline koostis. Maandamise all mõeldakse elektriseadme, -paigaldise või võrgu mingi osa elektrilist ühendamist maa pinnasega (kohaliku maaga), kusjuures see ühendamine võib olla tahtlik, tahtmatu või juhuslik, püsiv või ajutine. Maandamiseks on vaja maaga kontaktis olevat juhtivat osa (maanduselektroodi), üht või mitut juhti (maandusjuhti), mis loovad juhtiva ühenduse maandatava objekti ja maanduselektroodi vahel. Kaitsemaanduse idee on selles, et isolatsiooni rikke korral, kui inimene puudutab potentsiaali alla sattunud seadmeosa, on kaitsemaandus lülitatud inimesega paralleelselt ja seetõttu, olles palju väiksema takistusega kui inimene, läbib vool maandust, mitte inimest.

Maa (*earth, ground*) ja **mass** (*signal ground, circuit common*) on elektri kasutamise seisukohast tähtsad mõisted. Mõistet maandamine kasutavad tugevvooluseadmete insenerid harilikult ohutustehnika ja piksekaitse korral, näiteks lubamatult kõrgete puutepingete vältimiseks. Elektroonika alal töötavad insenerid aga seovad selle mõistega rohkem skeemide elektromagnetilist ühilduvust (näiteks maanduskontuuride silmuste pindalade minimeerimine, 50 Hz sageduse mõju minimeerimine, kaablite varjestuse kujundamine jne). Erinevad eesmärgid vajavad erinevaid maandamis-strateegiaid, mistõttu tekkivad tihti vaidlused „õige“ maanduse üle.

Elektriahel ei vaja tegelikult üldse maandamist, kuna allika ühelt väljundklemmilt lähtuv vool läheb läbi suletud kontuuri tagasi allika teisele väljundklemmile (joonis 13.9). Joonisel esitatud aseskeemis puudub voolul *I* võimalus minna maasse, sest vastav tee puudub (maandus on näidatud punktjoonega). Maanduse olemasolul vool ahelas ei muutu, aga joonisel alumine allika ja hõõglampide klemm omandab maa potentsiaali.



Joonis 13.9. Selline kontuur maandamist ei vaja

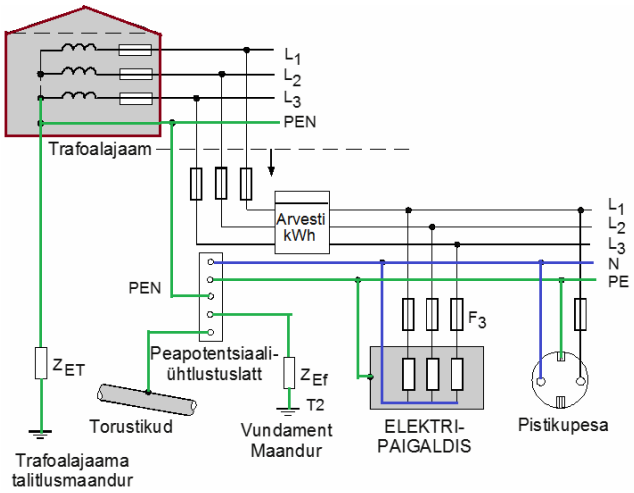
Vaatamata sellele kasutatakse lisamaandusjuhte sageli ilma vajaduseta petliku lootusega muuta ahel ohutumaks ja töökindlamaks ning juhtida võimalikud häiringupinged maasse. Järgnevast selgub, et korralik maandamine on elektriliste süsteemide ohutuse ja turvalise talitluse oluline eeltingimus. Kuid on vaja eristada kahte mõistet – kaitsemaandust (kaitsejuhti), mis on ette nähtud inimeste, loomade jt kaitseks, ja keret (massi), mis on nii tugevvoolu- kui ka nõrkvooluseadmete tugipotentsiaali süsteem. Maa ja kere (mass) on reeglina omavahel ühes kohas galvaaniliselt ühendatud, kuid nad erinevad oluliselt: maandusjuhte läbib vool vaid avariiolukorras, neutraaljuhti – tavatalitlusel. Neutraaljuht kujutab sageli ühist tagasivoolujuhti mitmele allikaga ühendatud kontuurile. Need erinevused on olulised. Kasutusel on mitmed sünonüümmõisted:

- maa – kaitsejuht, maandamine, kaitsemaandus, maanduse nulljuht, maandatud süsteemi juhi tugipotentsiaal, maandatud kere (*earthground, protective earth, faultprotection, groundearth, equipmentground, safetyground*);
- mass – neutraaljuht, skeemi kere, nullpunkt, signaalimass, mõõtemaa, nullpinge (0V) (*signalground, signalreference, controlcommon, circuitcommon, neutral,* 0V-BUS).

Edaspidi rõhutatakse erinevust maa (kaitsemaanduse) ja massi (tugipotentsiaalipinge) vahel.

13.3.1. Kaitsemaandus, maandur ja potentsiaaliühtlustus

Kaitsemaandus PE on ette nähtud inimeste, loomade ja vara kaitseks. Kaitse eesmärk on vältida potentsiaalide vahe teket maa ja elektriseadmete osade vahel, mis isolatsioonirikke korral võivad omandada ohtlikult suurt (kõrget) potentsiaali. Kaitse tagatakse elektriseadme ohtlikule osale maa potentsiaali andmisega, selle maandamisega. Normide järgi peab harilikes madalpingevõrkudes elektriseadmete kered ühendama maandatud punktiga, kasutades kaitsejuhti PE või neutraaljuhti PEN, mis on samaaegselt ka kaitsejuhiks. Kere all mõeldakse siin elektriseadmete juhtivaid osi, mida saab puudutada ja mis ei ole elektrilise talitluskontuuri osad, kuid võivad avarii korral sattuda pinge alla (nt seadme kere) (joonis 13.10). Isolatsiooni riknemisel, näiteks lühisel juhi L3 ja maa vahel, tekkib suur lühisvool, mille tulemusena rakendub lühisvoolukaitse (liigkoormusekaitse). Standardis määratletud normide järgi ehitatud maandusseade tagab kindla kaitse puutepinge eest.



Joonis 13.10. Madalpingevõrgu maandamine

Tavatalitlusel PE-juht voolu ei juhi, kui jätta arvestamata lekkevool vigastamata isolatsiooni kaudu ja nõrgavoolutehnikas vahelduvvool parasiitmahtuvuste kaudu võrgufiltrite puudumisel.

Neutraaljuht N on tagasivoolujuhiks kõikide ühefaasiliste tarbijate jaoks, mis on ühendatud liinijuhtide L1, L2 ja L3 ning neutraaljuhiga N talitlusvooludele. Tagasivoolud tulevad potentsiaaliühtlustuse pealatile ja sealt PEN-juhi kaudu voolu esile kutsunud allikale (trafo mähis).

Kui osa ühefaasilistest talitlusvooludest läheb siiski maandusjuhi ja elektripaigaldise vundamendi näivtakistuse Z_{Ef} kaudu maasse, siis vaid seetõttu, et voolud võivad sulguda maa ja trafoalajaama maanduri näivtakistuse Z_{ET} kaudu. Neutraaljuht N ja kaitsejuht PE on ühendatud potentsiaaliühtlustuse pealati kaudu maaga, kuid latist kaugemal erineb neutraaljuhi potentsiaal nullist talitlusvoolu potentsiaalilangu võrra. Samal ajal kaitsejuhis vool puudub ja tema potentsiaal on kogu pikkuse ulatuses võrdne maa potentsiaaliga.

Lõpuks on maandusel tähtis osa mitte ainult hoonete piksekaitsel, vaid ka raadiomastide, elektri edastusliinide, väljas asuvate jaotusseadmete jm korral. Kõikidel nendel juhtudel peab maandustakistus olema võimalikult väike, siis on välgulöögi laengute voost tekkiv potentsiaali tõus piiratud.

Maandur. Maandamiseks, näiteks elektriseadme kerele nullpotentsiaali andmiseks, on vaja maaga heas kontaktis olevat, üht või mitut elektrijuhti-**maanduselektroodi** ja nendevahelist ühendusjuhet. Maanduselektroode võib olla üks või mitu ning nad ühendatakse omavahel. Eesti keeles kasutatakse ühest ja ka mitmest elektroodist koosneva maandussüsteemi kohta nimetust **maandur**.

Maanduselektroodid paiknevad tavaliselt pinnases, kuid võivad paikneda ka betoonis või muus elektrit juhtivas materjalis, mis puutub pinnasega kokku. Maanduselektroodid võivad olla vertikaalse või horisontaalse paigaldusviisiga. Laialt on levinud vundamendimaandurid, mis paiknevad ehitiste vundamentides. Maanduselektroodid peavad olema korrosioonikindlad. Tavaliselt valmistatakse nad tsingitud terasest, harva vasetatud või roostevabast terasest. Selliseid maandureid nimetatakse **tehismaanduriteks**.

Kasutada saab ka loomulikke maandureid. Nendeks on ehitiste pinnases paiknevad metalltarindid, puurkaevutorud, õhuliinimastide vundamendid ja teised. Soovitatav on ka tehis- ja loomulike maandurite kooskasutamine (joonis 13.10). Veetorustiku kasutamisel tuleb loomuliku maandurina seal olevad isoleervahemikud sillata, vastasel juhul tekkib petlik kujutlus, et seade on maandatud, kuigi sisuliselt 0 potentsiaali ei tagata. Ühest või mitmest maandusjuhist ning maandurist koosnevat süsteemi nimetatakse **maanduspaigaldiseks**. Kasutusotstarbe alusel liigitatakse maandusseadmeid järgmiselt:

Kaitsemaandus – luuakse elektriohutuse tagamiseks elektripaigaldise (seadme) ühe või mitme punkti maandamisega.

Võrgumaandus – luuakse elektriohutuse tagamiseks võrgu, paigaldise või seadme ühe või mitme punkti maandamisega.

Talitlusmaandus – luuakse elektriohutuse ja tavatalitluse tagamiseks, võrgu ühe või mitme punkti maandamisega.

Töömaandus – luuakse töö teostamiseks ilma elektrilöögiohuta tavatalitlusel pinge all olevate, kuid pinge alt vabastatud osade maandamisega.

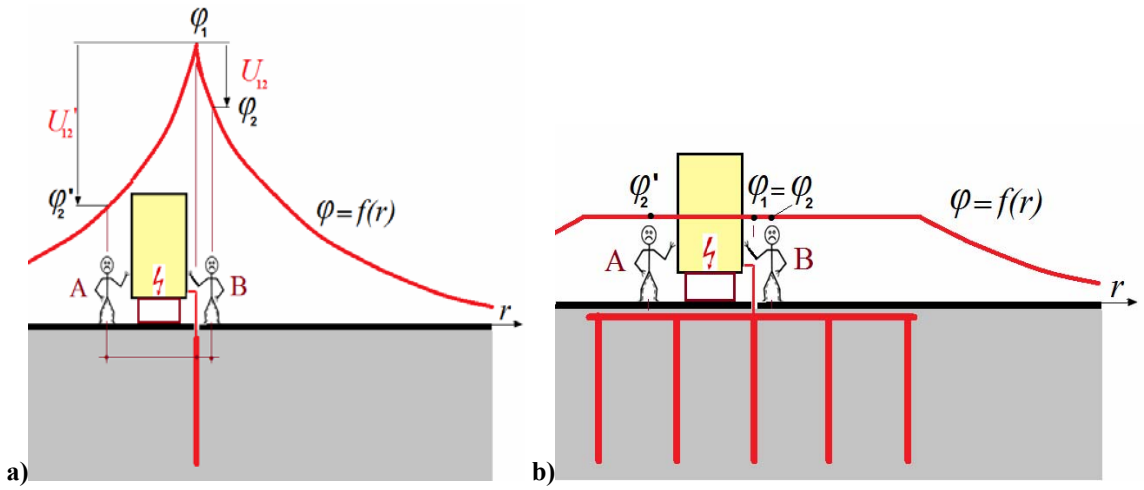
Piksekaitsemaandus – kaitsemaandus välgulaengute (voolu) juhtimiseks maa sisse või vastupidi ja mida vaadeldakse omaette maandusliigina.

Kui elektripaigaldise mingi pingestatud ja maandatud osa vahel toimub isolatsioonirike, tekib rikkekohas maaühendusvool. Voolu suurus on määratud maandusahela näivtakistusega ehk **maandustakistusega.**

Maandustakistuse suuruse määravad maanduri ja maa vaheline takistus ehk valgumistakistus. See oleneb maanduri ehitusviisist, mõõtmest ja pinnase eritakistusest. Pinnase, vee ja betooni eritakistuse väärtused on väga erinevad. Orienteeruvad eritakistuse väärtused: ookeaniveel 0,5 Ωm, veevärgiveel 8…70 Ωm, põhjaveel 10…110 Ωm, savil 10…100 Ωm, mustmullal ja turbal 10…70 Ωm, puhtal jõe- ja järveveel 100…600 Ωm, liival 600…1000 Ωm, paekivil 1000…3000 Ωm, pinnases paikneval betoonil 70…700 Ωm, kruusal 1…15 kΩm, graniidil 10…70 kΩm, kuival betoonil 1…100 kΩm.

Maandusahela näivtakistuse suurust määravad ka maanduspaigaldisega ühenduses olevate ja maanduri osana toimivate kaablite ja kaabelliinide pikimaandurite takistused. Madalpingevõrkudes võib maandusahela näivtakistust lugeda aktiivtakistuseks, seetõttu nimetatakse seda maandusaktiivtakistuseks. Kõrgepingevõrkudes on takistuse reaktiivkomponent samas suurusjärgus aktiivkomponendiga või suurem, seepärast nimetatakse maandusnäivtakistuseks.

Potentsiaali ühtlustus. Potentsiaaliühtlustus koos kaitsemaandamisega moodustavad kaks elektriohutuse tagamise põhivõtet. Vajadus potentsiaaliühtlustuseks selgub, kui vaadata potentsiaali jagunemist rikkepiirkonnas ühe maanduselektroodiga maanduri korral (joonis 13.11a).

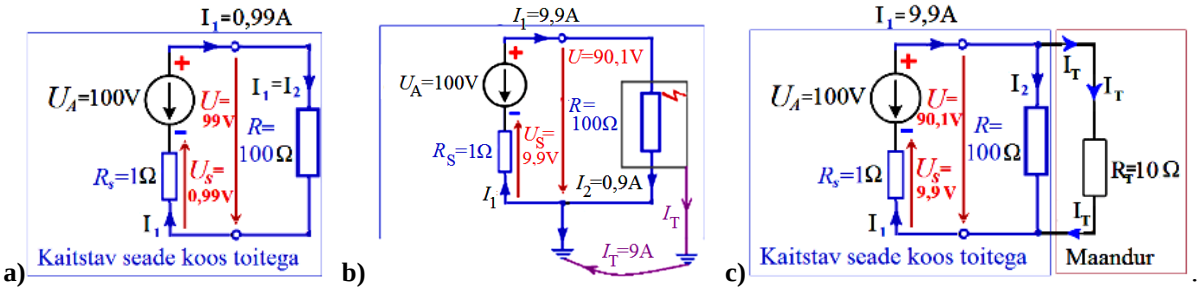


Joonis 13.11. Potentsiaali jagunemine rikkepiirkonnas ühe maanduselektroodiga maanduri (a) ja potentsiaaliühtlustuse (b) korral

Näeme, et kaks inimest A ja B puudutavad samaaegselt samakaugelt rikkega seadet, mis on ühe maanduselektroodiga maandatud. Nad asuvad aga erineval kaugusel maanduselektroodist. Inimesele B rakendub potentsiaalide vahe ehk puutepinge $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ ja inimesele A rakendub $U'_{12} = \varphi_1 - \varphi'_2$. Jooniselt näeme, et $U'_{12} > U_{12}$. Seega puutepinge on seda suurem, mida kaugemal maanduselektroodist toimub jalgade kontakt maaga. Puutepinge väärtus võib olla eluohtlikult suur.

Potensiaaliühtlustuse eesmärk on tagada, et kui üks seadme osadest sattub nt isolatsioonirikke tõttu pinge alla, siis ei tekkiks ohtlikku puutepinget omavahel ühendatud elektrit juhtivate osade vahel. Selle teostamise ideed selgitab joonis 13.11b. Siin koosneb potentsiaali ühtlustussüsteem pinnases paiknevast ringikujulisest metallplaadist, mille alla on ühtlase sammuga ühendatud vertikaalsed maanduselektroodid. Sellise lahenduse potentsiaali jagunemiskõver $\varphi = f(R)$ muudab oma kuju ning ringikujulise plaatmaanduri kohal maapinnal ja kaitstava seadme kerel on $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi'_2$. Seega rakendub inimesele A puutepinge $U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$ ja inimesele B puutepinge $U'_{12} = \varphi_1 - \varphi'_2 = 0$. Näeme, et ringikujulise plaatmaanduri kohal on nii puute- kui ka sammupinge maapinnal võrdne nulliga.

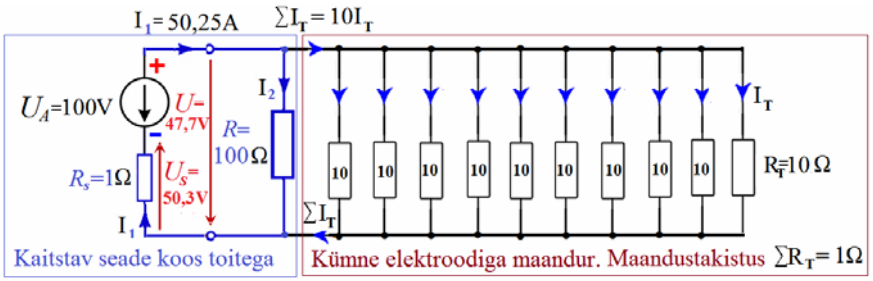
Maksimaalse potentsiaali $\varphi_1 = \varphi_{max}$ väärtuse määramist lihtsa alalisvoolutoitega kaitstava seadme (tarbija) korral selgitavad aseskeemid joonisel 13.12.



Joonis 13.12. Potentsiaali suurima väärtuse määramine rikkepiirkonnas ühe maanduselektroodiga maanduri korral: a – kaitstav seade, b – maaühendusvoolu teekond, c – kaitstava seadme ja maanduri aseskeem

Tavatalitluses (joonis 13.12a), kui allikapinge $U_A = 100\,\text{V}$ ja tarbijatakistus R = 100 Ω ning allika sisetakistus $R_S = 1\Omega$, on ahela vool $I_1 = 0{,}99$ A. Allika väljundpinge (tarbija potentsiaalilang) $U = 99$ V ja allika sisetarbija potentsiaalilang $U_S = 0{,}99\,\text{V}$. Isolatsioonirikke korral tekkib (joonis 13.12b, c) läbi maandustakistusega $R_T = 10\Omega$ kaitstava seadme maanduri ja allika maanduri maavool $I_T = 9\,\text{A}$. Ahela vool I_1 kasvab suuruseni $I_1 = 9{,}9\,\text{A}$. Ka allika sisetakistusel suureneb potentsiaalilang $U_S = 9{,}9\,\text{V}$. Seetõttu väheneb allika väljundpinge ja $U = 90{,}1\,\text{V}$. See suurus on võrdne maksimaalse puutepotentsiaali väärtusega. Seega, $\varphi_1 = \varphi_{max} = 90{,}1\,\text{V}$.

Maksimaalse potentsiaali $\varphi_1 = \varphi_{max}$ väärtuse vähenemist potentsiaaliühtlustuse korral selgitab elektriahela lihtsustatud aseskeem joonisel 13.13.



Joonis 13.13. Suurima potentsiaaliväärtuse määramine rikkepiirkonnas kümne maanduselektroodiga maanduril

Kümne samaväärse maanduselektroodiga maanduri korral väheneb maandustakistus *ca* 10 korda. Ahela vool suureneb samuti $I_1 = 50{,}25A$. Allika väljundpinge (maksimaalne puutepotentsiaal) väheneb, $U = 47{,}7\,\text{V}$ ja allika sisetakistusel potentsiaalilang samapalju kasvab, $U_S = 50{,}3\,\text{V}$. Sarnaselt saab hinnata ka maksimaalse puutepotentsiaali väärtust vahelduvvooluahelate korral.

Kokkuvõttes seisneb potentsiaaliühtlustus puutevõimalike pingealtide, paigaldise normaaltalitlusel pingetute, elektrijuhtivate osade (torustike, hoonete metallosade) omavahelises ühendamises vastavate juhtide e potentsiaaliühtlustusjuhtide (kaitsejuhtide) abil ning nende ühendamises maanduriga. Potentsiaaliühtlustussüsteemi parema töökindluse tagamiseks nähakse ette iga ühendatava osa jaoks eraldi juht, mis ühendatakse teiste juhtidega potentsiaaliühtlustuslatil või -klemmil.

Vastavalt otstarbele eristatakse:

- kaitsepotentsiaaliühtlustussüsteemi, mis oluliselt suurendab paigaldise või selle osa elektriohutust;
- talitluspotentsiaaliühtlustussüsteemi, mida kasutatakse muul eesmärgil kui elektriohutuse tagamiseks (näiteks elektromagnetiliste häiringute vähendamiseks);
- ühtset potentsiaaliühtlustussüsteemi, mis peab tagama nii elektriohutuse kui ka kaitse elektromagnetiliste jt häiringute eest.

Potentsiaaliühtlustussüsteemi tähtsaimaks osaks on peapotentsiaaliühtlustus, mis nähakse ette ehitise elektrisisendi juures ja ühendatakse paigaldusmaandusega.

Põhinõuded

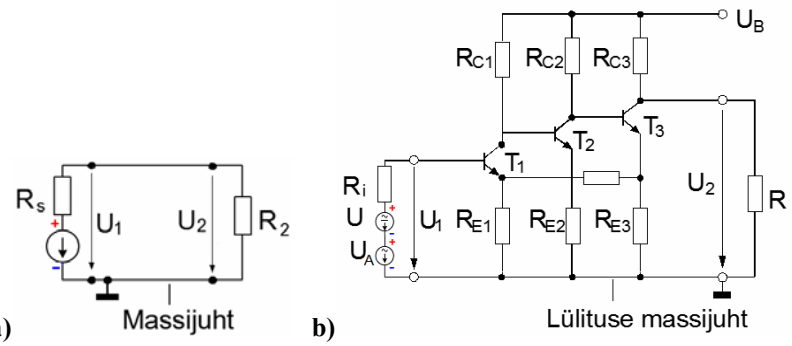
Elektriohutuse standard näeb ette, et igas ehitises peavad peapotentsiaali ühtlustusega olema ühendatud järgmised juhtivad osad:

- peamaandusjuht või peamaandusklemm,
- peakaitsejuht,
- hoone gaasi-, vee- jt torustikud,
- võimalusel keskküttesüsteemid, metalltarindid, terasbetoontarindite sarrus,
- kõigi sidekaablite metallmantlid.

Samuti nõutakse, et ehitisse sisenevad voolujuhtivad osad tuleb ühendada potentsiaaliühtlustussüsteemiga sisenemiskohale nii lähedal kui võimalik. See tagab, et pikemate vahemaade korral peapotentsiaaliühtlustuslati ja selle külge kaitsejuhiga ühendatud pingealtide osade vahel võib rikke korral tekkida kaitsejuhi ja kõrvaliste juhtivate osade vahel lubamatult suur pinge, mis teatud oludes võib osutuda ohtlikuks (joonis 13.10). Ohu vältimiseks võib kasutada lisapotentsiaaliühtlustust, mis võib olla maandatud või maandamata.

13.3.2. Mass (neutraal)

Nõrgavoolu skeemitehnikas mõistetakse **massi** all üldist tugipotentsiaalisüsteemi, mille suhtes mõõdetakse ahela sõlmepingeid (latt, juht, tugipotentsiaal, kere, nullpunkt). Tavalises tugevvooluahelas on see lihtsalt tagasivoolujuht, elektronskeemis aga kõikide elektriliste kontuuride ühine tagasivoolujuht (joonis 13.14a).



Joonis 13.14. Massi mõiste selgitus elektroonikas

Massil võib olla, kuid ei pea olema nullpotentsiaal. Kuid harilikult on mass ühes kohas ühendatud kaitsejuhiga ja seega ka maandatud. Massil on samad funktsioonid mis neutraaljuhil.

Kõigepealt, massi maandamine ei avalda mõju skeemi talitlusele (joonis 13.10, 13.14b). Kui aga küllalt suurt ala hõlmav mass on maandatud mitmes kohas, tekib maanduskontuur. Seoses maanduspunktide erineva potentsiaaliga võib tekkida ühtlustusvool ning massi näivtakistustel tekkib potentsiaalilang, mis liitub ahela kontuurides olevate potentsiaalidega ja kujutab **häiringut**.

Eespool vaadeldud laialt levinud kaitseabinõude kõrval on ohtliku puutepinge vältimiseks välja töötatud märksa tõhusam meetod, mida nimetatakse **rikkevoolukaitseks**.

Rikkevoolukaitselülitid ja rikkevoolureleed on mõeldud inimeste, loomade ja esemete kaitseks ohtliku potentsiaalide vahega otsese või kaudse kokkupuute eest. Nad reageerivad rikkevoolule maa suhtes.

13.4. Rikkevoolu olemus

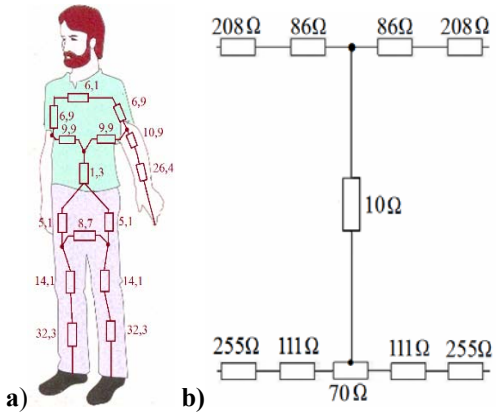
Kui inimene puudutab pingestatud või rikke tõttu pinge alla sattunud osi, tekkib läbi tema keha rikkevool, mis isegi väga väikesel väärtusel võib põhjustada südametalitluse lakkamise. Vool läbi inimese keha on määratud puutepingega ja inimese keha takistusega, mis ei ole püsiv suurus, vaid oleneb puutepingest, vooluliigist ja sagedusest. Inimkeha takistus, sõltudes inimese füüsilisest seisundist, ulatub organismi tavaolekus mõnekümne tuhande oomini. Eriti ebasoodsatel juhtudel (haiglane olek, tugev higistamine jms) on inimkeha takistus kõigest 400...1000 oomi. Elektrilööki võib põhjustada vool alates suurusest 0,1A ehk 10 mA. Seega võib 400 oomi korral ohtlik olla juba pinge 400 x 0,1 = 40 V. Elektrilöögi ohtlikkus oleneb inimkeha läbiva elektrivoolu tugevusest, inimkeha elektritakistusest, elektrivoolu kulgemise teest läbi inimkeha.

Ükski isoleermaterjal pole ideaalne ning seetõttu tekkib normaaltalitluses isegi korras elektriseadmetes ja -võrkudes voolujuhtide pingestamisel vool mitte ainult faasi- ja neutraaljuhtides, vaid ka juhtide ja maa vahelises isolatsioonis. Sellist voolu nimetatakse **lekkevooluks**. Korras isolatsiooni puhul on lekkevool väike. Näiteks faasipinge 230 V ja isolatsioonitakistuse 0,5 MΩ juures on lekkevool *ca* 0,5 mA. Selline vool ei kujuta ohtu elektriseadmete ega ka neid teenindavate inimeste jaoks. Ohtlik on, kui lekkevool suureneb üle ohutu piiri, s.o muutub **rikkevooluks**, viimast võib tekitada:

- isolatsiooni takistuse vähenemine niiskumise tagajärjel,
- kereühendus tavaliselt pingestamata elektriseadmetes, kuid isolatsiooni vigastuste tõttu pinge alla sattunud elektriseadmete osade, näiteks elektrimootori kere puudutamine,
- isolatsiooni kohalik halvenemine,
- elektriseadmete paigalduskeskonna, juhuslikult pinge alla sattunud elektrit juhtivate osade puudutamine,
- maaühendus liinides ja viibimine maas oleva katkenud elektrijuhtme läheduses.
- pingestatud voolujuhtide isoleerimata osade puudutamine inimeste või loomade poolt. Nendeks võivad osutuda lambipesade, lülitite, kaitsmete, tarbijate, elektrimasinate, aparaatide ning seadmete kontaktid ja paljasjuhtmed.

Kui inimene puudutab elektriseadme pinge all olevat osa (otsepuude) või isolatsioonirikke tõttu pinge alla sattunud osa (kaudpuude), läbib tema keha vool, mille suurus on määratud inimkeha, kokkupuutepindade, riiete, esemete jpm takistusega. Kuna inimkeha takistus ebasoodsates oludes on vahemikus 0,5...1 kΩ, võib faasipingel 230 V läbi keha kulgeda 0,23...0,46 A vool, mis on eluohtlik!

Voolu suurus oleneb sellest, missugustele kehaosadele on rakendunud potentsiaalide erinevus ning missuguseid kehaosi läbib vool. Joonisel 13.15 on kehaosade takistus protsentides ja oomides käsi-jalg-ahelaosa korral. Üldjuhul loetakse ohutuks voolu suuruseks 10...20 mA, suurem vool kutsub esile lihaste krampe, hingamishäireid ja lõpuks südamevatsakeste **värelemise** e fibrillatsiooni, mille tagajärjeks võib olla vereringe lakkamine ja surm.



a) **b)**

Joonis 13.15. Käsi-jalg vaheliste kehaosade takistus %-s (a) ja oomides (b)

Voolu ohtlikkus oleneb peale suuruse ka tema mõju kestusest. Rahvusvaheline elektrotehnikakomisjon IEC loeb inimsüdant läbiva voolu ohutuks kestuseks aega, mis on arvutatav valemiga $t < \frac{10}{I - 10}$, kus t – voolu ohutu kestus sekundites ja I – voolu efektiivväärtus milliamprites.
Valem kehtib voolude puhul alates 10 mA. Väiksemaid voole loetakse ohutuiks igasuguse kestuse puhul.

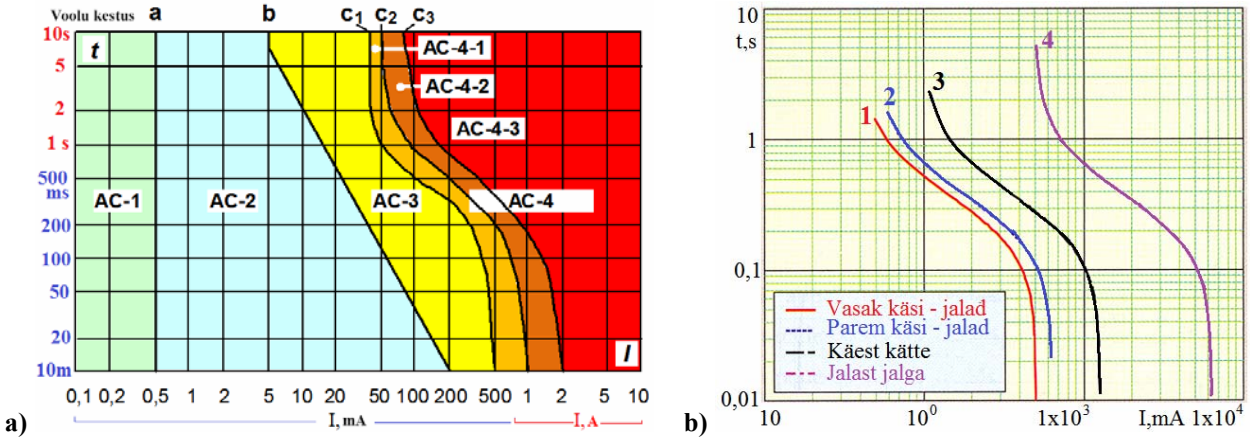
Aastani 2005 jagati rahvusvahelises standardis IEC 479 elektrivoolu toime inimorganismile viieks piirkonnaks:

- piirkonnas 1: ohutu ja voolu mõju pole tavaliselt üldse tuntav,
- piirkonnas 2: harilikult puudub füsioloogiliselt kahjulik mõju,
- piirkonnas 3: vool tavaliselt ei kahjusta organismi. Võivad esineda lihaste krambid, hingamishäired, südamelihaste rütmihäirete oht,
- piirkonnas 4: lihaste krambid, tõsised hingamishäired, südamelihaste väreluse tagajärjel vereringe peatumistõenäosus kuni 50% (eluohtlik, kui ei saada abi),
- piirkonnas 5: vool võib põhjustada südamevatsakeste väreluse tagajärjel vereringe peatumist tõenäosusega üle 50% (eluohtlik, kui ei saada abi).

Uute uuringute tulemusel on täpsem ohuhinnang südamevatsakeste väreluse osas. Rahvusvahelises standardis IEC/TS 60479-1:2005. Voolu toime inimestele ja koduloomadele. Osa 1: Üldalused. – 62 lk. on joonis 13.16a, mis selgitab 15…100 Hz sagedusega vahelduvvoolu toimet olenevalt voolu suurusest (rõhttelg) ja kestusest (püsttelg). Seniste viie piirkonnatähise (1...5) võeti vahelduvvoolu (ingl *alternating current*) korral kasutusele AC-1, AC-2, AC-3 ja AC-4 ning alalisvoolu (ingl *direct current*) korral DC-1, DC-2, DC-3 ja DC-4. Piirkonnad AC-4 ja DC-4 jaotati südamevatsakeste väreluse tekke tõenäosusastme järgi kolmeks alampiirkonnaks tõenäosusega 5%, alla 50% ja üle 50%. Vastav tähistus on:

* vahelduvvoolul AC-4-1, AC-4-2 ja AC-4-3;
* alalisvoolul DC-4-1, DC-4-2 ja DC-4-3.

Joonisel 13.16a on graafiliselt näidatud IEC/TS 60479-1:2005 standardijärgsed vahelduvvoolu toime kõverad inimesele. Joonisel 13.16b olev graafik iseloomustab südamevatsakeste väreluse tõenäosust (eluohtlikkuse risk) *ca* 5%, kui vool läbib erinevaid kehaosi. Punane kõver 1 – vool läheb vasaku käe kaudu jalgadesse, sinine joon 2 – parema käe kaudu jalgadesse, must joon 3 – käsi-käsi ja lilla joon 4 – jalg-jalg voolu korral.



Joonis 13.16. Vahelduvvoolu (15...100 Hz) toime täiskasvanud inimesele IEC/TS 60479-1:2005 järgi (a). Inimkeha läbiva voolu efektiivväärtus, *t* voolu kestus. AC-1, AC-2, AC-3, AC-4-1, AC-4-2 ja AC-4-3 voolu toime piirkonnad. a, b, c_1, c_2 ja c_3 piirkondadevahelised lävikõverad; b – südamevatsakeste väreluse tõenäosuse kõverad

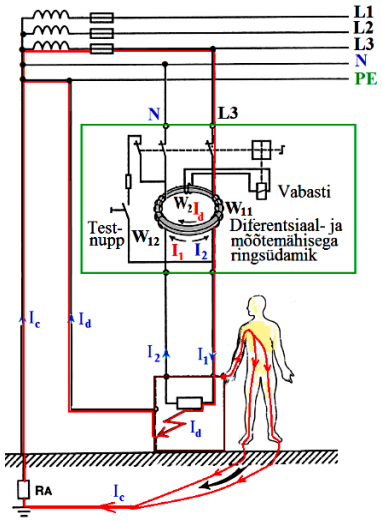
Peaaegu kõik inimeste ja loomadega madalpingel toimunud õnnetused ja suur osa tuleõnnetusi on põhjustanud rikkevool. Neid ohtusid aitab vältida rikkevoolukaitse.

13.5. Rikkevoolukaitse põhimõte

13.5.1. Ühefaasilise tarbija rikkevoolu kaitse

Tänapäeval kõige sagedamini kasutatava ühefaasilise tarbija rikkevoolukaitse põhimõtteskeem viiejuhtmelise toiteliini korral on joonisel 13.17. Rikkevoolukaitse põhiseadmeks on rikkevoolu kaitselüliti või rikkevoolurelee. **Rikkevoolu kaitselüliti** vabastiks on kaitselüliti keresse sisse ehitatud rikkevoolurelee, mistõttu seade on ise võimeline vooluahelat katkestama. **Rikkevoolurelee**, mis koosneb elektronplokist ja mõõtepeast, ei suuda vooluahelat ise lahutada ning seepärast lülitatakse ta mõne kommutatsiooniaparaadi, näiteks kontaktori juhtahelasse.

Rikkevoolu suurust rikkevoolu kaitseseadmes mõõdab mõõtetrafo, mis koosneb rõngassüdamikust ning sellele mähitud primaar- ehk diferentsiaalmähisest ja sekundaar- ehk mõõtemähisest. Primaarmähiseks võib olla rõngassüdamiku ava läbiv faasi- ja neutraaljuhe. Tavatalitluses (joonis 13.17) on faasivool I_1 ja neutraaljuhtme vool I_2 võrdsed, nende tekitatud magnetvood on võrdsed ja vastassuunalised. Magnetvoog rõngassüdamikus võrdub nulliga ja mõõtemähises allikapinget ei tekki.



Joonis 13.17. Ühefaasilise tarbija rikkevoolukaitse tööpõhimõte: rõngassüdamik, w_{11} ja w_{12} – faasivoolu I_1 ja neutraaljuhtme voolu I_2 primaarmähised (diferentsiaalmähis), w_2 – sekundaar- ehk rikkevoolu mõõtemähis

Rikketalitluse korral tasakaaluolukord kaob, südamikus tekkib magnetvoog ning mõõtemähises indutseeritakse rikkevooluga võrdeline allikapinge, mis kutsub esile voolu. Vabasti relee lahutab kaitselüliti voolukontaktid. Neutraaljuhi kontakt avaneb harilikult viimasena, sisselülitamisel sulgub aga esimesena. Kontrollnupu (testnupu) abil kontrollitakse perioodiliselt kaitselüliti korrasolekut. Kui rikkevoolu kaitselüliti ülesandeks on kaitsta inimesi ja loomi ohtliku elektrilöögi eest, siis valitakse **vabasti rakendusvooluks 30 mA.** Kaitselüliti **väljalülitusaeg** on seejuures tavaliselt **0,1 sekundit.**

Kui elektriseadmed ei kujuta ohtu inimestele ja loomadele (seadmed on lukustatud ruumis), võib rikkevoolukaitse olla ainult tuleohu vältimiseks. Sel juhul valitakse vabasti rakendusvoooluks harilikult 300 või 500 mA, väljalülitusajaks aga vähem kui 0,2 sekundit. Selleks et kaitse rakenduks ohtlike rikkevoolude tekkel, tuleb kaitstavate seadmete kered kohaliku maandussüsteemi abil maandada. Maandamiseks kasutatavat juhti nimetatakse **kaitsejuhtmeks** ja tähistatakse rahvusvaheliselt tähtedega PE (*protection earth* – kaitsemaandus). Maandustakistuse suurim lubatav väärtus arvutatakse valemiga

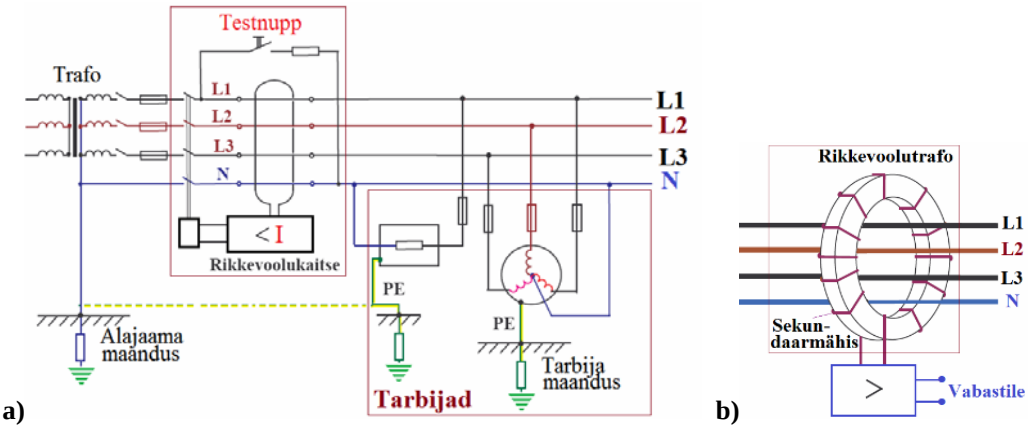
$$R_m < \frac{U_p}{I_{rak}},$$

kus R_m – maandustakistus, Ω; U_p – puutepinge, V; I_{rak} – rikkevoolukaitse rakendusvool, A.

13.5.2. Kolmefaasiline rikkevoolukaitse

Rikkevoolukaitse töö põhineb asjaolul, et igas elektriliinis on rikkevoolu puudumisel kõikide liinijuhtide ja neutraaljuhi voolude summa null. Korrasoleva isolatsiooniga kolmefaasilistes elektriseadmetes on lekkevool läbi isolatsiooni tühine, kuid see võib ohtlikult suureneda isolatsioonitakistuse vähenemisel (niiskumisel), kereühenduste tekkimisel maandatud elektriseadmetes, maaühenduste korral liinides või ka juhul, kui inimesed või ka loomad puudutavad juhuslikult pingestatud isoleerimata seadmeosi. Märkimisväärne lekkevool rikub voolude tasakaalu energiat edastavas liinis: voolude summa ei ole enam null, sest vool kulgeb ka läbi PE või maandusjuhi. Vahelduvvooluvõrkudes on rikkevoolutrafo abil võimalik kontrollida voolude summa erinevust nullist, seega rikkevoolu, ja kasutada seda voolu kaitstava võrguosa väljalülitamiseks.

Maandatud neutraaliga neljajuhtmelises süsteemis kasutatav rikkevoolukaitse põhimõtteline skeem on joonisel 13.18. Rikkevoolutrafo (joonis 13.18b) koosneb rõngassüdamikust, millel on sekundaarmähis, kusjuures primaarmähiseks on südamikku läbivad liinijuhtmed L1, L2 ja L3 ning neutraaljuhe N. Kui liinis rikkevool puudub, siis nii sümmeetrilise kui ka mittesümmeetrilise koormuse korral rikkevoolutrafo sekundaarmähise allikasisepinge on null. Vastasel korral aga põhjustab rikkevoolutrafo sekundaarmähises indutseeritud allikapinge voolu, mis rakendab vabasti ja rikkevoolu kaitselüliti lülitab kaitstava võrguosa välja.

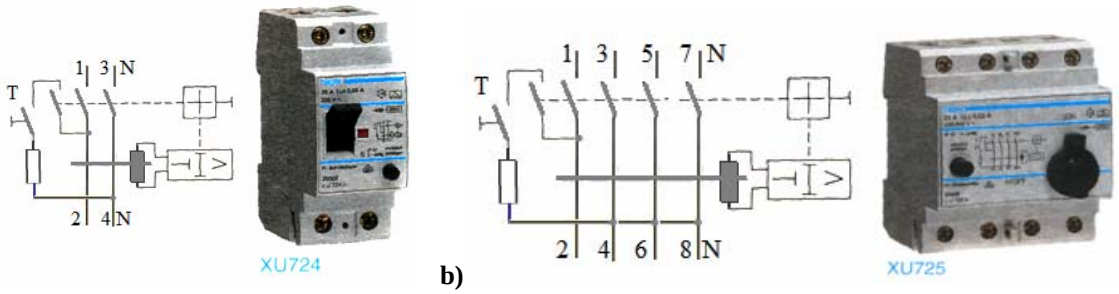


Joonis 13.18. Rikkevoolukaitse põhimõtteline skeem (a) ja rikkevoolutrafo (b)

Rikkevoolu kaitselüliti korrasoleku kontrollimiseks on kontrollahel, mille sisselülitamisel peab kaitselüliti rakenduma. Rikkevoolukaitsel on mitmeid eeliseid kaitsemaanduse ja PE kaitsejuhi ees:

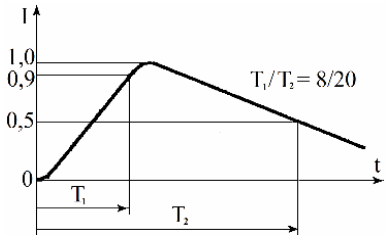
- Rikkevoolu kaitselüliti rakendusvoolu on võimalik vähendada ohutuspiirini alla 20 mA, mis välistab elektrilöögi (pingestatud osade juhuslikul puudutamisel) tagajärjel tekkida võivad traumad.
- Kere- ja maaühendustele ning ka isolatsiooniriketele reageerib kaitselüliti kohe ning see teeb ebatõenäoseks tavaliselt pingestamata ja lühikeseks ajaks pinge alla sattunud osade puudutamise, ka on sellega välditud võimaliku tulekolde tekkimine kere- või maaühenduskohas, eriti tolmuse keskkonnaga ruumides.
- Tarbijate maandustakistus ei pruugi olla nii väike, kui on vajalik potentsiaali ühtlustamiseks maandamisel või nullimisel.

Kataloogides tähistatakse rikkevoolu kaitselüliteid sümboliga XU, järgneb kolme numbri kombinatsioon, mis oleneb kaitselüliti nimirikkevoolu ja nimivoolu suurusest. Rikkevoolu kaitselüliteid valmistatakse nimirikkevooludele 10, 30, 300 ja 500 mA, mis võimaldab neid kasutada erinevatel kaitseeesmärkidel.



Joonis 13.19. Kahepooluselise (a) ja neljapooluselise (b) rikkevoolukaitselüliti skeem ning eestvaade

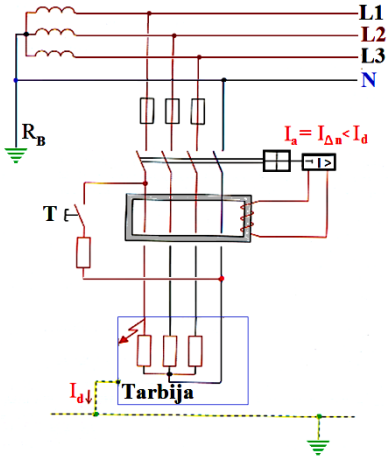
Kõik rikkevoolukaitselülitid on tundlikud pulseeriva alalisrikkevoolu suhtes, mida põhjustab pooljuhtseadmete rike. Nad on aga tundetud vooluimpulsside suhtes, mis esinevad vooluahelate lülituste korral. Selleks on rikkevoolukaitselülititel elektronskeem, mis filtreerib välja joonisel 13.20 kujutatud standarditud tüüpkujuga 8/20 vooluimpulsid.



Joonis 13.20. Standardvooluimpulss

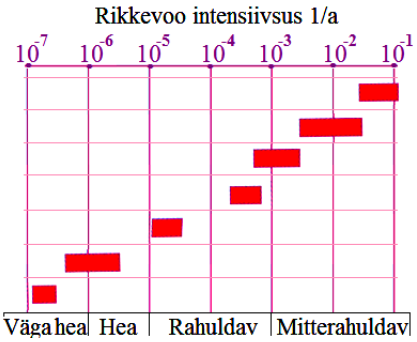
Joonisel 13.21 on rikkevoolukaitse kasutamisnäide TT-juhistikus. Siin on I_a kaitseaparaadi kindla väärtusega automaatse väljalülitamise vool, I_d – rikkevool (maaühendusvool), $I_{\Delta n}$ – rikkevoolukaitselüliti nimirakendusvool (indeks *a* ingliskeelsest sõnast *automatic*, 'automaatne'), R_B – toiteallika talitlusmaandustakistus, T – rikkevoolukaitselüliti korrasoleku kontrolli (*test*-)nupp.

Joonis 13.22 iseloomustab erinevate juhistikutüüpide puhul kasutatavate kaitseviiside ja nende kombinatsioonide tõrgete voo intensiivsust maandatud juhistikusüsteemide korral. Kasutatud kaitse tingtähised: $I>$ – liigvoolukaitse, $I\Delta$ – rikkevoolukaitse, PU – potentsiaaliühtlustus, ⧈ kaitseisolatsioon



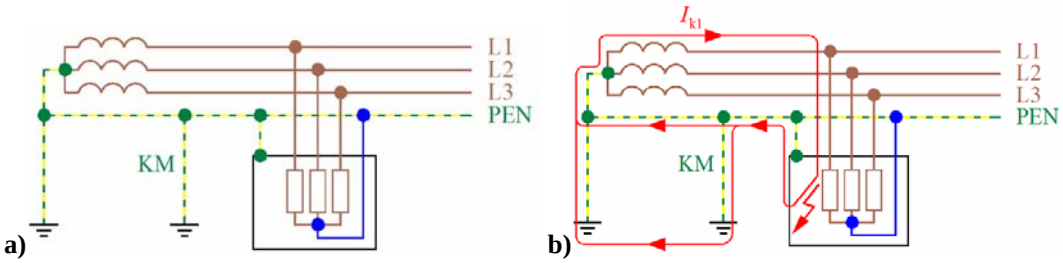
Joonis 13.21. Rikkevoolukaitse

Juhistiku tüüp	Kaitseviisid
TN-C	$I>$
TN-C-S, TT	$I>$
TN-C	$I>$ + PU
TN-S, TT	$I>$ + ⧈
TN-S	$I>$ + $I_\Delta>$
TT	$I>$ + $I_\Delta>$
TN-S, TT	$I>$ + $I_\Delta>$ + ⧈



Joonis 13.22. Kaitseviiside ja nende kombinatsioonide tõrkevoo intensiivsus maandatud juhistikusüsteemide korral. Rikkevoo intensiivsuse riket aastas (1/a) kasutamine TT-juhistikus

Joonisel 13.23a on TN-C-juhistik.



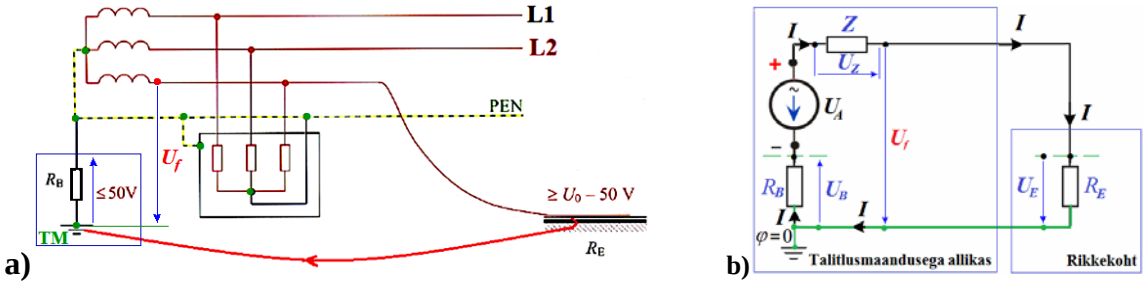
Joonis 13.23. a – TN-C-juhistik: KM – kordusmaandus; b – kereühendus TN-C-juhistikku ühendatud elektriseadmes, I_{k1} – ühefaasiline lühisvool, KM – kordusmaandus

Et tagada rikkekohas elektriohutus õhuliinide liinijuhtme katkemisel ja mahalangemisel, on joonisel 13.24a maandustakistuse suuruse valikuks selgitav joonis. Siin on allikaks trafo rikkega faasi väljundpinge U_f, mis on talitlusmaanduse olemasolu korral potentsiaal maa suhtes, voolu piiravateks elementideks (tarbijateks) talitlusmaanduse takistus R_B, trafo rikkega faasi sisenäivtakistus Z ja rikkekoha takistus R_E. Rikkevool kulgeb (joonis 13.24b) rikkega faasi väljundklemmilt rikkekohta, sealt rikkekoha takistuse R_E kaudu läbi maa ja talitlusmaanduse takistuse R_B trafo neutraalpunkti, edasi läbi rikkega faasi sisenäivtakistuse Z tagasi väljundklemmile. Seega tasakaalustavad trafo faasi allikasisepinget U_A kolm potentsiaalilangu:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_Z + \dot{U}_E + \dot{U}_B.$$

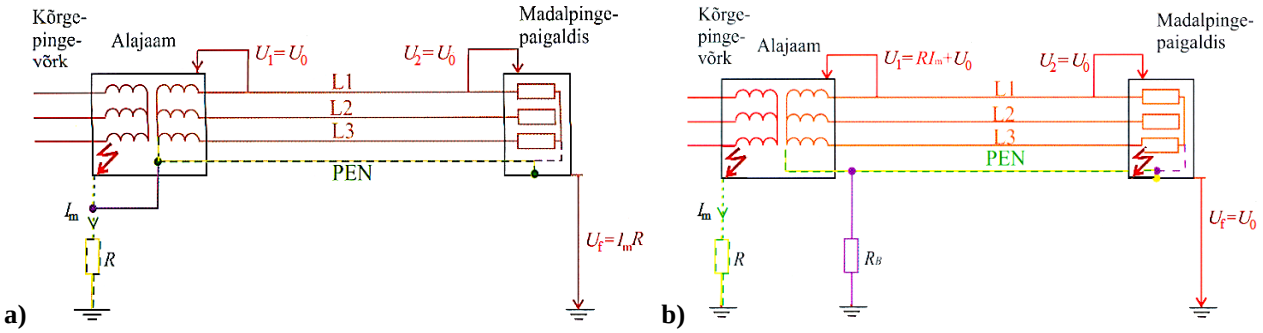
Kui rikkekohas on metalliline maaühendus, siis esimeses lähenduses $R_E \approx 0$ ja seega $U_E \approx 0$. Järelikult, võttes $U_B = 30\,\text{V}$, mis on väiksem piirväärtusest 50 V, saame avaldise $\dot{U}_A = \dot{U}_Z + 30$. Kuna $\dot{U}_Z = \dot{I}\dot{Z} = \dot{U}_A - 30$, siis, teades $\dot{U}_A$ suurust ja leides trafo lühispinge järgi näivtakistuse $\dot{Z}$ väärtuse, saab leida voolu I väärtuse. Teades voolu väärtust ja et $U_B = \dot{I}R_B = 30\,\text{V}$, leiame talitlusmaanduse takistuse

$$R_B = 30/\dot{I},\Omega.$$



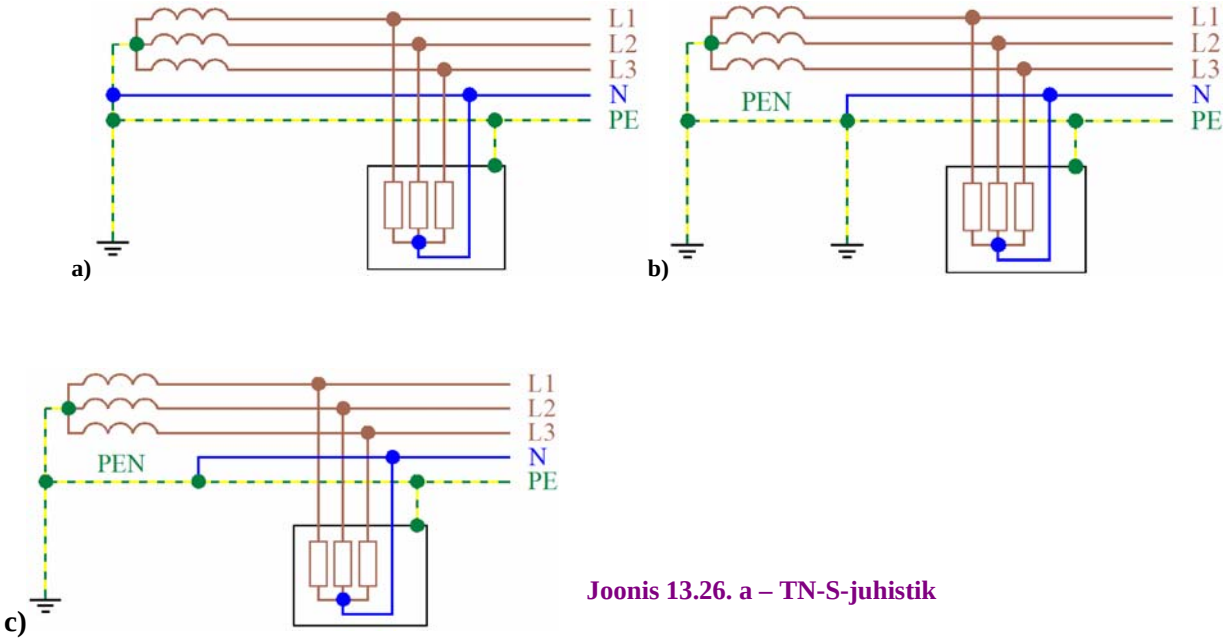
Joonis 13.24. Talitlusmaanduse R_B suurima lubatava takistuse väärtuse hindamine PEN-juhi suurima lubatava rikkepinge järgi õhuliini ühe faasijuhtme mahalangemisel (a) ja rikkeahela aseskeem (b). TM – talitlusmaandus

Joonisel 13.25 vaadeldakse rikkepingeid TN-C-juhistikus toitealajaama kõrgepingepoole maaühenduse (maalühise) puhul: joonisel 13.25a alajaama kaitsemaanduse ja madalpingevõrgu neutraali talitlusmaanduse ühitamise korral, joonisel 13.25b madalpingevõrgu neutraali omaette maandamisel. Joonisel on kasutatud järgmisi tingtähiseid: I_m – maaühendusvool toitealajaama kõrgepingeosas, R – alajaama kaitsemaanduse takistus, R_B – madalpingevõrgu neutraali talitlusmaanduse takistus, U_0 – madalpingejuhistiku faasipinge, U_1 ja U_2 – rikkepinged (ajutised liigpinged madalpingejuhistikus), U_f – rikkepinge (puutepinge) madalpinge-paigaldise pingealdiste osade ja maa vahel. Trafomähiste ühendusviis võib olla ka teistsugune (10/0,4 kV trafodel nulljärgnevustakistuse vähendamiseks ning ühefaasilise lühisvoolu suurendamiseks enamasti kolmnurk/täht).



Joonis 13.25. Rikkepinged TN-C-juhistikus toitealajaama kõrgepingepoole maaühenduse korral: a – alajaama kaitsemaanduse ja madalpingevõrgu neutraali talitlusmaanduse ühitamisel, b – madalpingevõrgu neutraali omaette maandamisel

Joonisel 13.26a vaadeldakse TN-S-juhistikku. Siin võib kaitsejuht potentsiaaliühtlustusjuhtide kaudu veel mitmes punktis olla ühendatud maaga. Joonisel 13.26b vaadeldakse samuti TN-S-juhistikku, mis algab PEN-juhi maandatud hargnemispunktist. Joonisel 13.26c käsitletakse TN-C-juhistikku, kus PEN-juht hargneb neutraali N ja kaitsejuhiks PE toitepool tarbijat.

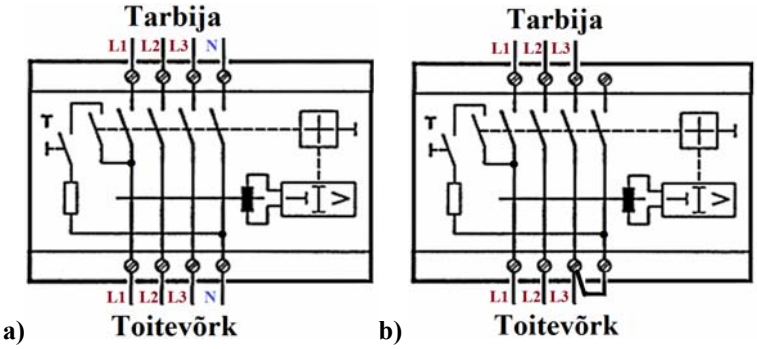


Joonis 13.26. a – TN-S-juhistik

13.6. Rikkevoolukaitselülitid

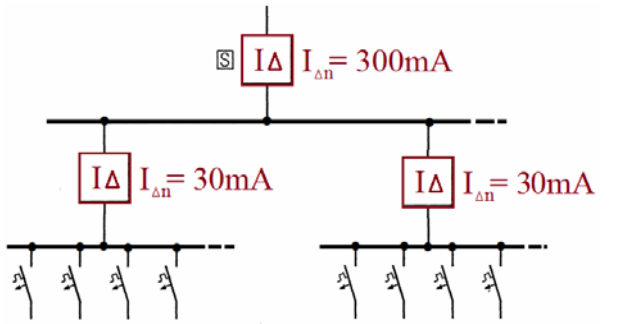
Selleks et kaitsta rikkevoolu kaitselüliteid tarbijapoolsete lühisvoolude eest, tuleb nende ja toiteallika vahele lülitada lühiskaitseseade. Rikkevoolu kaitselülitite omalühisekindlus on 1500 A.

Rikkevoolu kaitselüliteid valmistatakse kahepooluselistena (1F + N) ja neljapooluselistena (3F + N). Joonisel 13.27 on neljapooluselise rikkevoolu kaitselüliti elektrilised ühendusskeemid nulljuhtmega (a) ja nulljuhtmeta (b) süsteemis. Neljapooluselise rikkevoolu kaitselüliti külge võib ühendada abikontakti, millega saab jõuahelat katkestada ka väljatoodud lülitusnupu abil.



Joonis 13.27. Neljapooluselise rikkevoolu kaitselüliti ühendusskeeme: a – nulljuhtmega ja b – nulljuhtmeta süsteemis

Valmistatakse ka **selektiivseid** rikkevoolu kaitselüliteid tähistusega S aparaadi esipaneelil. Lülititel on aeglustatud lahutusvõime ja nad töötavad ajaliselt selektiivselt (rakendub rikkekohale lähim kaitseaparaat) samasse ahelasse lülitatud tavaliste rikkevoolu kaitselülitite suhtes (joonis 13.28).



Joonis 13.28. Rikkevoolukaitse lülitusnäide selektiivse rikkevoolu kaitselülitiga

Selektiivsed rikkevoolu kaitselülitid on neljapooluselised nimirikkevooluga 300 mA, pulseeriva voolu tundlikud ja löökvoolukindlad vooludeni 5 kA. Nõutav on **eellühisekaitse sulavkaitsmetega**.

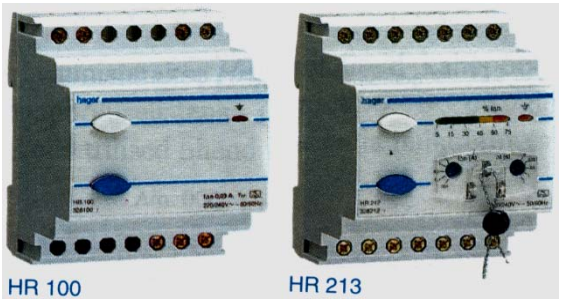
Valmistatakse ka rikkevoolu liinikaitselüliteid, mis on rikkevoolu- ja liinikaitselülitite kombinatsioon. Aparaat on kahepooluseline ja kaitseb vooluahelat rikkevoolu, liigkoormuse ning lühise eest. Ka siin on nõutav **eellühisekaitse sulavkaitsmetega.** Tavalisel liinikaitselülitil on jõukontaktid vaid faasivoolude katkestamiseks. Rikkevoolu liinikaitselülititel on jõukontaktid ka neutraaljuhi voolu katkestamiseks.

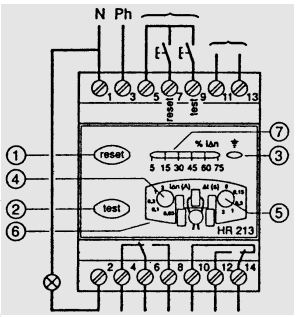
Rikkevoolu kaitselülititel on lisaks kontaktide asendi näidikule veel rikkevoolu vabasti rakendumisest informeeriv näidik, mis võimaldab kiiresti määrata aparaadi väljalülitumise põhjuse.

13.7. Rikkevoolureleed

Toodetakse ka rikkevoolureleesid, mis on mõeldud rikkevoolukaitseks juhul, kui vooluahela väljalülitamiseks peab kasutama kommutatsiooniaparaati (kontaktorit) või kui kaitstav koht asub lülitusseadmest eemal. Rikkevoolureleede juurde kuuluvad mõõtemuundurid. Rikkevoolureleed on nüüdisaegsed elektriaparaadid, neil on rida eeliseid rikkevoolu kaitselülitite ees. Rikkevoolureleedel on mitu lülitit ja näidikut (joonis 13.29). Tagastusnupp 1 on ette nähtud väljundi tagastamiseks algasendisse pärast relee rakendumist. Vastasel korral jääb väljund asendisse VIGA. Väljundit saab tagastada ka toitepinge katkestamisega. Kontrollnupu 2 abil saab kontrollida relee korrasolekut: nupule vajutamisega imiteeritakse rikkeolukorda, mil relee peab rakenduma.

Veanäidik 3 kujutab endast valgusdioodi (LED), mis süttib, kui rakendub rikkevoolurelee. Tundlikkuse ümberlüliti 4 abil valitakse nimirikkevooluks 0,03; 0,1; 0,3; 1 või 3 A. Ajalise viite sätete nupp 5 võimaldab relee rakendumisel ajalisi viiteid 0; 0,13; 0,3; 1 ja 3 s. Plommitav kate 6 kaitseb seadesuuruste muutmise eest. Optiline skaala 7 näitab rikkevoolu suurust vahemikus 5...75% nimirikkevoolust. Rikkevoolurelee sisendklemmid on 11 ja 13, mille külge ühendatakse mõõtemuundur.

a) 

b) 

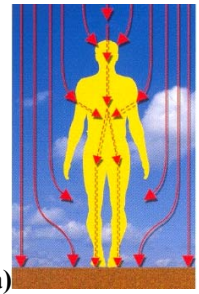
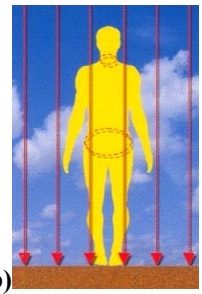
Joonis 13.29. Rikkevoolureleede HR100 ja HR213 välisvaade (a) ja relee HR213 esiküljel olevate elementide tähistus (b): 1 – tagastusnupp, 2 – töökorrasoleku kontroll, 3 – veanäidik, 4 – tundlikkuse regulaator, 5 – ajalise viite sätted, 6 – seadesuuruste kaitse kate, 7 – rikkevoolu optiline skaala

Rikkevoolureleel on kaks väljundit:

- standardväljund (klemmid 10, 12, 14) läheb olekusse 1, kui tekkib viga relee ja muunduri ühendusjuhtmes, rikkevool kontrollitavas vooluahelas;
- tõrkekindel väljund (klemmid 4, 6 ja 8) läheb asendisse 1 pingestamisel ja asendisse 0, kui tekkib viga relee ja muunduri ühendusjuhtmes, rikkevoolu kontrollitavas vooluahelas, rikkevool relee toiteahelas, viga relees. Mõõtemuundureid valmistatakse ümmarguse ja nelinurkse mõõteavaga. Rikkevoolurelee ja mõõtemuunduri vahelise ühendusjuhtme suurim lubatud pikkus on 50 meetrit.

13.8. Kõrgsagedusliku elektromagnetkiirgusvälja mõju inimesele

Kui inimene paikneb kiirelt muutuvas elektromagnetkiirguse väljas, siis tema kehas indutseeritakse kiirgusvälja toimel allikasisepinged, mis kutsuvad kehas esile mikrovoolud. Allikapinge suurus oleneb sagedusest ja vool ka inimkeha juhtivusest. Ajas muutuva elektrivälja suurus maast kõrgemal, inimese peapiirkonnas, on suurem kui maapinnal jalgade juures. Pea ja jalgade potentsiaalide erinevus kutsub esile laengute liikumise, mille tulemusel tekkivad kehas mikrovoolud. Elektri ja magnetväljast põhjustatud mikrovoolu teekonda inimese kehas on väga lihtsustatult kujutatud joonisel 13.30a ja b.

a)  b) 

Joonis 13.30. Elektri- ja magnetvälja mõju inimesele. Laengute liikumine ajas muutuva elektrivälja (a) ja voolukontuuride teke ajas muutuva magnetvälja toimel (b)

Elektromagnetvälja bioloogiline toime raadiosageduslikus madalsagedusalas 30...300 kHz. Elektromagnetvälja lühimõju on närvisüsteemi ärritus. Lubatud väljatugevuse väärtusi piiravad eri riikide standardid. Eesti Vabariigis on kehtestatud mitteioniseeriva kiirguse (sh elektri-, magnet-, ja elektromagnetväljade tugevuse) piirväärtused ja baaspiirangud sotsiaalministri 21. veebruari 2002. a. määrusega nr 38 „Mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused elu- ja puhkealadel, elamutes ning ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmine“.

Määrus kehtestab mitteioniseeriva kiirguse piirväärtused ja baaspiirangud elu- ning puhkealadel, elamutes, ühiskasutusega hoonetes, õpperuumides ning muudes kohtades, kus inimene viibib pikemat aega (edaspidi elukeskkonnas) ja mitteioniseeriva kiirguse tasemete mõõtmise meetodid. Määrus käsitleb mitteioniseeriva kiirguse piirväärtusi ja baaspiiranguid sagedusvahemikus 0 Hz kuni 300 GHz.

Määrusega kehtestatud elektri-, magnet-, ja elektromagnetvälja iseloomustavate füüsikaliste suuruste piirväärtused ning baaspiirangud tuleb võtta aluseks elukeskkonnas mõõdetud elektromagnetvälja tasemete hindamisel. Määruse eesmärk on tervisele ohutu elukeskkonna tagamine ning mitteioniseeriva kiirguse toimega seonduvate tervisehäirete ja haiguste vältimine.

Määrusega kehtestatud baaspiirangute järgi ei tohi inimorganismile mõjuva madalsagedusliku elektromagnetvälja magnetvoo tiheduse (magnetilise induktsiooni) maksimaalne arvväärtus ületada 2 mT sagedusvahemikus 2 … 1000 Hz ja f/500 mT sagedusvahemikus 1000 Hz … 100 kHz. Siin on f välja sagedus hertsides.

Sama määrus kirjutab ette, et mõõtmiste teel saadud magnetvälja tugevus ja magnetvoo tiheduse tasemed elukeskkonnas ei tohi ületada tabelis 13.1 toodud piirväärtusi.

Tabel 13.1

Magnetvälja tugevuse ja magnetvootiheduse piirväärtused

Sagedus	Magnetvälja tugevus, A/m	Magnetvoo tihedus, µT
0 … 1 Hz	$3{,}2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
1 … 8 Hz	$3{,}2 \cdot 10^4/f^2$	$4 \cdot 10^4/f^2$
8 … 25 Hz	$4000/f$	$5000/f$
0,025 … 0,8 kHz	$4/f$	$5/f$
0,8 … 3 kHz	5	6,25
3 … 150 kHz	5	6,25

Märkus: piirväärtus on elukeskkonnas elektri-, magnet- ja elektromagnetvälja iseloomustava suuruse maksimaalselt lubatav väärtus.

50 Hz sagedusega välja korral leiame mõõtmiste teel saadud magnetvoo tiheduse piirväärtuse eespool esitatud tabeli realt, kus sagedusvahemikuks on 0,025 … 0,8 kHz. Nagu näeme, määratakse maksimaalselt lubatav magnetvoo tihedus avaldisega $5/f$.

Seega on mainitud juhul **maksimaalselt lubatav magnetvoo tiheduse väärtus 5/0,005 = 100 µT.** 50 Hz magnetväljas magnetvoo tihedusega 100 µT võib inimene viibida 24 tundi ööpäevas. Võrdluseks toome väljavõtte IRPA/INIRC 1990. a avaldatud juhistest (IRPA 1990 Nr 15), mis kehtivad 50/60 Hz magnetväljade puhul ja millest soovitati Eestis lähtuda enne eespool vaadeldud määruse ilmumist:

Tabel 13.2

50 Hz magnetvoo tiheduse lubatud piirväärtused

Magnetvälja mõju kestus inimestele	Maksimaalne lubatav magnetvoo tihedus
Töötajad: • kogu ööpäeva (8 tundi) jooksul • lühiaegselt	 500 µT 5000 µT
Tavainimesed: • 24 tundi järjest • mõni tund päevas	 100 µT 1000 µT

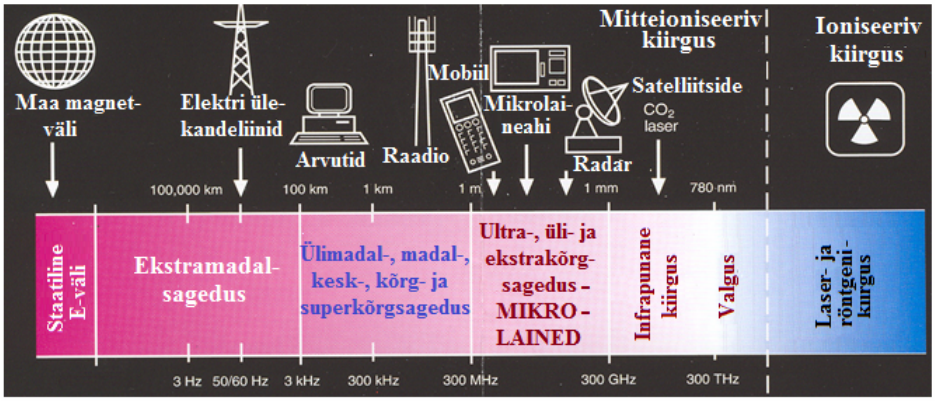
Elektromagnetväljast põhjustatud mikrovool jaguneb kehas ja voolu toimet iseloomustatakse voolutihedusega.

Voolutihedus kehas üle **1 000 mA/m²** kutsub esile tugevad südametöö häired ja suure ohu tervisele.

Voolutihedus kehas üle **100...1000 mA/m²**. Kesknärvisüsteemi muutlik ärritus, millega kaasneb muskli kudede tõmblemine. Voolutihedus kehas üle **10...100 mA/m²**. Ilmneb vahetu mõju närvisüsteemile.

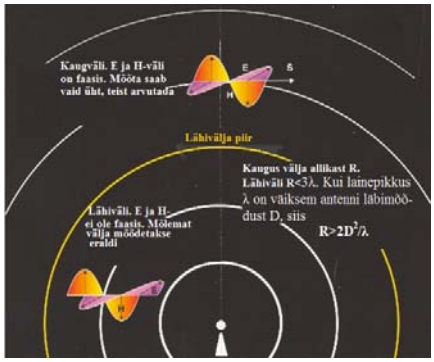
Voolutihedus kehas üle **1...10 mA/m²**. Nõrk bioloogiline mõju. Voolutihedus alla **1,0 mA/m²**, pole toimet.

Maa ja seadmete elektromagnetväljade spekter. Joonis 13.31 iseloomustab meid ümbritsevate erinevate kiirgusallikate kiirguse sagedusala ja lainepikkust. Keskkonnas on kiirgureid alates sagedusest 0 Hz kuni 1000 terahertsini. Lainepikkused mikronitest sadade tuhandete kilomeetriteni. Nende kiirgurite väljatugevuste väärtusi piiravad üle 100 elektromagnetilise ühilduvuse alase standardi.



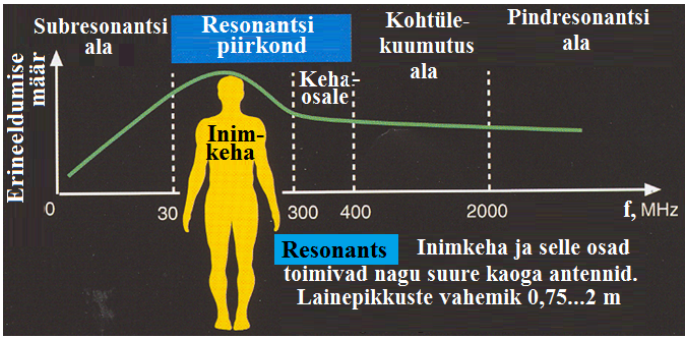
Joonis 13.31. Maa ja erinevate tehnorajatiste elektromagnetkiirgusväljade sagedused

Allikast lähtuva kiirguse korral eristatakse lähi- ja kaugvälja. Kiirgurist eemaldumisel (joonis 13.32) loetakse lähivälja piiriks kolmekordset lainepikkust 3λ. Juhul kui lainepikkus λ on lühem antenni läbimõõdust D, siis lähivälja piir $R>2D^2/\lambda$. Lähiväljas elektri- ja magnetväli (E ja H-väli) pole faasis, nad on lahti sidestatud ning nende suurusi peab eraldi mõõtma. Kaugväljas on väljad faasis. Siin piisab ühe suuruse mõõtmisest, teise suuruse saab arvutada. Lähi- ja kaugvälja olemus on seotud antenni otsese ja peegeldunud kiirguse liitumisega, mis tõhusa kiirguse korral on kindla suhtega.



Joonis 13.32. Kiirgusallika lähi- ja kaugvälja iseloomustus

Elektromagnetvälja bioloogiline toime raadio kõrgsageduse 3...30 MHz alas. Olenevalt sagedusest võib see kiirgus kuumutada keha või kehaosa. Lühiajaliseks mõjuks on kudede soojendamine või põletamine. Joonis 13.33 iseloomustab kiirguse neeldumist inimkehas. Suurim on resonantstingimustel, mil keha ja kehaosad toimivad kadudega antennina lainepikkustel 0,75...2 m. Ka kehaosad eraldi toimivad kadudega antennina lainepikkustel 0,05...0,75 m. Tekkivad mikrovoolud soojendavad inimkeha.

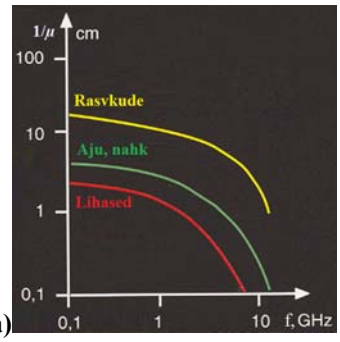


Joonis 13.33. Keha kiirgusneeldumiskõver olenevalt kiirgusallika sagedusest

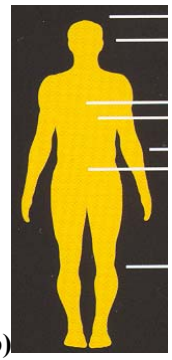
Raadiosagedusliku kõrgsageduskiirguse sissetungisügavus. Sissetungisügavus (joonis 13.34) oleneb kiirguse sagedusest ja kudede liigist. Kõrgematel sagedustel see väheneb. Kiirgus sagedusega üle 10 GHz neeldub inimkeha pinnal ja põhjustab naha põletust. Ühtlases **3...30 MHz** kiirgusväljas on erinevates kehapiirkondades erinev neeldumine (joonis 13.34b). Kiirguse ja aine korral eristatakse elastset ja mitteelastset vastastikmõju. Elastse vastastikmõju korral muutub kiirguse levisuund, kiirguse impulsienergia ei muutu. Mitteelastse vastastikmõju korral muutub nii kiirguse energia kui ka impulss. Toimub nii kiirguse neeldumine (*absorption*) kui ka hajumine (*scattering*). Neeldumist iseloomustab Bouguer' (loe: *buzee*) seadus, mis kirjeldab kiirguse nõrgenemist neelavas keskkonnas, mida nimetatakse neeldumisseaduseks.

$$I = Ie^{-\mu x}.$$

Siin I_o on laine amplituudväärtus; μ – neeldumistegur ja $1/\mu$ – neeldumissügavus, mis on ainekihi paksus, kus kiirgus väheneb e korda. Negatiivne eksponent lainevõrrandis tähendab amplituudi I_o vähenemist, see aga kajastub laine intensiivsuse I vähenemises.



a)



b)

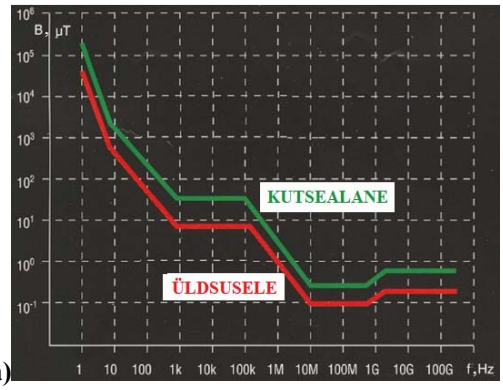
Aju keskmine neeldumine
Silmaläätsed – tugev
Hambaplommid – tugev

Süda – nõrk neeldumine
Kopsud – nõrk neeldumine
Nahk – nõrk neeldumine
Siseorganid – nõrk

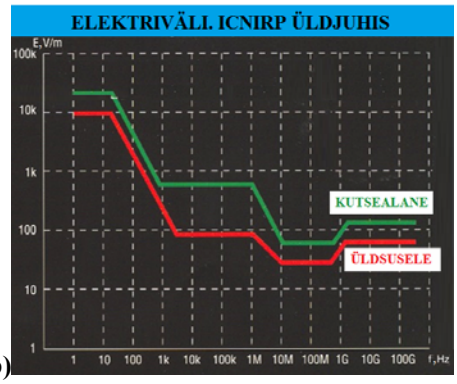
Metall-liigesed – tugev neeldumine
Põlvekeder – tugev neeldumine

Joonis 13.34. Kiirguse sissetungisügavus inimkehasse olenevalt sagedusest (a) ja selle piirkondlik neeldumisintensiivsus (b)

Kõrgsageduskiirguse lubatud piirväärtused. Elektromagnetilise kiirguse lubatud piirväärtusi normivad rahvusvahelised ja rahvuslikud standardid. Neid võib leida: www.cenelec.com, www.ieee.com, www.icnirp.org, www.who.int, www.bfs.de (Saksamaa), www.ansi.org (USA), www.bsi-global.com (Inglismaa). Rahvusvahelise Mitteioniseeriva Kiirguskaitse Komisjoni ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) magnet- (a) ja elektrivälja (b) väärtuste piirkõverad on joonisel 13.35. Eristatakse laiale üldsusele elukeskkonna ja kutseala töötajatele töökeskkonnas kiirguse piirväärtusi. Üldsusele ettenähtud piirnormid on rangemad.



a)



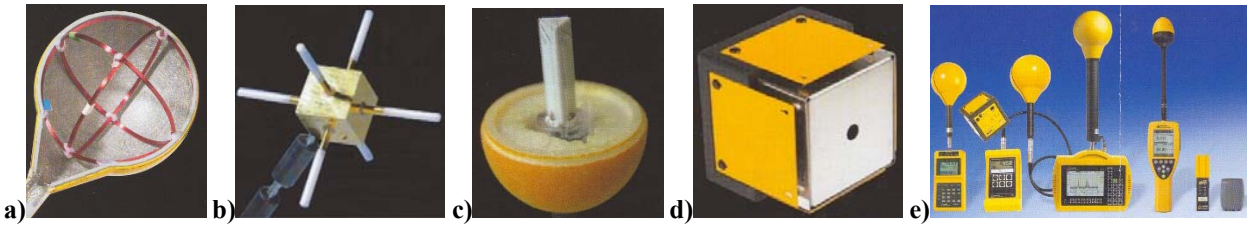
b)

Joonis 13.35. Kiirguse piirväärtused magnet- (a) ja elektriväljale (b)

Elektromagnetkiirgusväljade mõõtmine. Joonisel 13.35 on erinevate tehnorajatiste, elu- ja töökeskkonna elektromagnetkiirgusväljade mõõtmiseks mõõtevahendite näiteid. Magnetvälja mõõtmisel mõõtemuunduris kasutatakse üht või kolme pooli. Pooli ahelduv magnetvoog tekitab poolist allika, indutseerides allika sisepinge (elektromotoorjõu), mis on võrdeline aheldusvoo muutumise kiirusega. Joonisel (a) näidatud mõõtemuunduril on 3 pooli, mis on põiki telgede x, y ja z suhtes ning iga pooli akna pindala on 100 cm². See vastab Euroopa standarditele.

Elektrivälja mõõtemuundurid tuginevad isoleermaterjalides vastusuunalise dipoolide elektrivälja – potentsiaalilangu tekkele, mis on võrdeline kiirguse elektrivälja tugevusega. Joonisel (b) muundab kolmtelgne dipoolide võre kuni 18 GHz, joonise (c) muundur kuni 3 GHz ning joonise (d) kondensaatorite kogum madalsagedusvahemikus. Joonisel (e) on näitena esitatud ühe firma raadiosagedusliku madal- ja kõrgsageduskiirguse mõõteaparatuuri komplekt.

Mõõdetavateks suurusteks on: B – magnetvoo tihedus, T; magnetvälja tugevus – H, A/m; elektrivälja tugevus – E, V/m; võimsusvoo tihedus – S, W/m².



Joonis 13. 36. Erinevate tehnorajatiste ja keskkonna elektromagnetkiirgusväljade mõõtevahendid: a – x-, y-, z-telje magnetvälja ja kolm elektrivälja mõõtemuundurit (b, c, d); b – sagedusele ...3 GHz; c – ...18 GHz; d – madalsagedusel; e – madal- ja kõrgsageduskiirguse mõõteaparatuuri komplekti näide

Tabel 13.3

Võimsusvoo tihedusele vastavad magnet- ja elektrivälja tugevuse väärtused

***S*(mW/cm²)**	***S*(W/cm²)**	***E*(V/m)**	***H*(A/m)**
0,0001	0,001	0,61	0,0016
0,0002	0,002	0,86	0,0023
0,0005	0,005	1,37	0,0036
0,001	0,01	1,94	0,0051
0,002	0,02	2,74	0,0072
0,005	0,05	4,34	0,0115
0,01	0,1	6,14	0,0162
0,02	0,2	8,68	0,0230
0,05	0,5	13,73	0,0364
0,1	1	19,42	0,0515
0,2	2	27,46	0,0728
0,5	5	43,42	0,1152
1	10	61,40	0,1629
2	20	86,83	0,2303
5	50	137,3	0,3642
10	100	194,2	0,5150
20	200	274,6	0,7284
50	500	434,2	1,152
100	1 000	614,0	1,629

Seosed raadiosagedusliku kaugvälja kõrgsageduse (30...300 MHz) vahemikule:

võimsusvoo tihedus $S = E \cdot H$;

elektrivälja tugevus $E = Z_0 \cdot H$;

vaakumi ja õhu (vaba ruumi) näivtakistus $Z_0 = 377\ \Omega$;

magnetvälja tugevus $H = E / Z_0$.

Seosed raadiosagedusliku kaugvälja madalsageduse (30...300 kHz) vahemikule:

magnetvoo tihedus $B = \mu_0 \cdot H$;

magnetvälja konstant $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am.

13.9. Kordamisküsimused

1. Elektri ohtlikkus.
2. Maandamise ja potentsiaaliühtlustamise idee.
3. Rikkevoolu olemus.
4. Rikkevoolukaitse põhimõte.
5. Kõrgsagedusliku elektromagnetkiirgusvälja mõju inimesele.

Kasutatud ja soovitatav kirjandus

1. J. Sarw. Elekter I. Tartu. 1911. 78 lk.
2. L. Graetz. Elekter ja elektri tarwitamine. Tln, Mõte, 1912. 288 lk.
3. O. Reinwaldt. Üldelektrotehnika. Tln, 1928. 148 lk.
4. H. R. Wõrk. Elektrimasinate ehituse ainete omadused. Tln, 1930. 48 lk.
5. A. Põdrus. Elekter igapäevases elus. Eesti Kirjanduse Selts. 1934. 112 lk.
6. A. Kalmus. Elektrotehnika õpperaamat. II trükk. Tln, 1939. 230 lk.
7. H. R. Võrk. Elektrimasinad I. Tartu: Teaduslik Kirjandus, 1947. 554 lk.
8. R. Hollmann. Elektrotehnika I. Teaduslik Kirjandus. 1947. 290 lk.
9. J. Lang jt. Füüsika üldkursus I. Tartu : Teaduslik Kirjandus. 1947. 562 lk.
10. A. Põdrus. Jaotusvõrgud, siseinstallatsioon ja jõujaamad. Pedagoogiline Kirjandus. 1947. 315 lk.
11. R. Hollmann. Elektrotehnika II. Teaduslik Kirjandus. 1948. 472 lk.
12. A. Kaskneem. Arvutusi elektrotehnikas. Tln : Eesti Riiklik Kirjastus., 1952. 134 lk.
13. H. Esop jt. Üldine elektrotehnika. Tln, 1954. 672 lk.
14. H. Esop jt. Üldine elektrotehnika. Tln, II trükk. 1954. 948 lk.
15. A. Annus, H. Lind, M. Tarma. Andurid. Tln: Valgus, 1958. 244 lk.
16. H. Jänes jt. Elektrimasinad. Tln, 1961. 648 lk.
17. L. Neumann, P. Kalantarov. Elektrotehnika teoreetilised alused I. Tln, 1964. 284 lk.
18. N. N. Mansurov ja V. S. Popov. Teoreetiline elektrotehnika. Tln, 1965. 671 lk.
19. V. Popov. Elektrimõõtmised ja mõõteriistad. Tln, 1966. 512 lk.
20. L. Neumann, P. Kalantarov. Elektrotehnika teoreetilised alused II. Tln, 1967. 446 lk.
21. H. Pedusaar. Elektro- ja raadiotehnika. Tln, 1967. 494 lk.
22. C. Weissmantel jt. Atom Struktur der Materie. Leipzig. 1970. 850 S.
23. V. S. Popov ja S. A. Nikolajev. Elektrotehnika. Tln, 1970. 643 lk.
24. E. Nero. Elektrotehnika teoreetilised alused I. 1970. 224 lk.
25. E. Nero. Elektrotehnika teoreetilised alused II. 1971. 154 lk.
26. A. Voldek. Elektrimasinad I. Tln, 1972. 339 lk.
27. A. Voldek. Elektrimasinad II. Tln, 1973. 447 lk.
28. R. Võrk. Elektrotehnika. Rein Võrk, Vahur Mägi. Tallinn : Valgus, 1973. 280 lk.
29. V. Strutškov, B. Javorski. Nüüdisfüüsika põhiküsimusi. Tallinn : Valgus, 1979. 480 lk.
30. R. Võrk, V. Mägi. Elektrotehnika. Tln, 1980. 340 lk.
31. E. Nero. Alalisvool ja elektromagnetism. 1981. 118 lk.
32. G. Repossi. Nähtamatud hiiglased. Elektroonika illustreeritud ajalugu. Tln : Valgus, 1983. 159 lk.
33. J. Lepa. Elektriseadmete ekspluatatsioon ja remont. Tln : Valgus, 1985. 232 lk.
34. L. Bengtson jt. Elektrotehnika I. Alalisvooluahelad. Tln : Valgus, 1993. 154 lk.
35. K. Jürjenson, J. Lepa. Elektriskeemide tingmärke. Tln : Valgus. 1994.
36. H. Puurand. Üldelektrotehnika. Tln, 1996. 328 lk.
37. T. Lehtla. Andurid. Tln, 1996. 124 lk.
38. J. Joller. Jõuelektroonika. Tln, 1996. 216 lk.
39. E. Tiigimägi. Elektrivõrgud. Tln, 1997. 128 lk.
40. K. Tarkpea. Füüsika I osa. Tln : Koolibri. 1997.
41. H. Kalda, J. Lootus, R. Võrk. Elektrimõõtmised. Tallinn : TTÜ, 1997.
42. H. Kalda. Elektrimõõtmised. Loengukonspekt TTÜ elektrotehnika instituudi koduleheküljel.
43. M. Liiske. Tehnoloogiaseadmete elektriajamid I. Tartu : EPA kirjastus, 1998. 98 lk.
44. M. Liiske. Tehnoloogiaseadmete elektriajamid II. Tartu : EPA kirjastus, 2001. 81 lk.
45. R. Lahtmets. Elektrotehnika I. Alalisvool. Tln, 2002. 72 lk.
46. R. Lahtmets. Elektrotehnika II. Vahelduvvool. Tln, 2002. 68 lk.
47. J. Lõhmus, R. Veskimäe. Universumi mikromaailm. Tln, 2003. 416 lk.
48. R. Pütsep. Elektrimõõtmised. Tln, 2004. 96 lk.
49. Elektroenergeetika sõnastik. Eesti, inglise, soome, saksa, vene. TTÜ elektroenergeetika instituut, 2005. 1023 lk.
50. E. Risthein. Sissejuhatus energiatehnikasse. Tln, 2007. 260 lk.
51. T. Lehtla. Elektriajamid. Tln, 2007. 201 lk.
52. M. Meldorf jt. Jaotusvõrgud. Tln, 2007. 546 lk.
53. T. Paikre. Elektropuu I. Tln, 2007. 442 lk.

54. H. Pitsner. Elekter Tallinna elektrijaamast 1913…1979. Tln, 2007. 183 lk.
55. T. Lehtla. Robotitehnika. Tln, 2008. 201 lk.
56. H. Pitsner. Esimesed sada aastat elektrit Eestis. Tln, 2008. 296 lk.
57. R. Pütsep. Elektrotehnika ja elektroonika. Tln, 2008. 252 lk.
58. J. Järvik, A. J. Schwab, A. A. Vorševski. Elektromagnetiline ühilduvus I. Tln: TTÜ. 2008. 352 lk ja teine täiendatud trükk. TTÜ. 2014. 304 lk. ISBN 978-9985-59-828-3.
59. J. Järvik, V.I. Jakovlev, N.V. Korovkin, J.M. Vinogradov, T. Williams. Elektromagnetiline ühilduvus II. Tln, TTÜ. 2008. 440 lk. ISBN 978-9985-59-829-0.
60. H. Mõlder, J. Järvik. Elektromagnetiline ühilduvus III. Laboritööde juhend. Tln: TTÜ. 2008. 114 lk. ISBN 978-9985-59-830-6.
61. V. Vodovozov, D. Vinnikov, R. Jansikene. Elektriajamite elektroonsed süsteemid. Tln: TTÜ. 2008. 240 lk.
62. T. Tamm. Valgustehnika I. Tln: TTÜ. 2008. 112 lk.
63. P. Holmberg jt. Santorius. Elusa looduse füüsika. Tln, 2008. 252 lk.
64. T. Paikre. Elektropuu II. Tln, 2010. 480 lk.
65. R.-K. Loide. Elekter ja magnetism. I osa. Tln: Koolibri. 2010. 192 lk.
66. R.-K. Loide. Elekter ja magnetism. II osa. Tln: Koolibri. 2010. 128 lk.
67. J. Challoner. 1001 leiutist, mis muutsid maailma. Tln: Varrak. 2010. 960 lk.
68. J. Loorens. Elektripaigaldiste elektromagnetiline keskkond ja seadmete ühilduvus. Tln, 2011. 60 lk.
69. Z. Nenova, S. Ivanov, T. Nenov. Andurid tööstusautomaatikas. Gabrovo, 2011. 111 lk.
70. Kiirgus, inimesed ja keskkond. IAEA. Kiirguskeskus. 81 lk.
71. K. Janson. Elektrimasinad. Loengukonspekt. Tln: TTÜ, 2012. 124 lk.
72. M. Pinn jt. Elekter päikesest ja tuulest. Tln, 2012. 155 lk.
73. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker. Füüsika põhikursus. I köide. Eesti Füüsika Selts. 2012. 560 lk.
74. D. Halliday, R. Resnick. Füüsika põhikursus. II köide. Eesti Füüsika Selts. 2012. 561…1257 lk.
75. E. Risthein. Energiatehnika ja maailm. Tln, 2013. 440 lk.
76. A. Slaby. Entdeckungsfahrten in den elektrischen Ozean. Berlin. 1923. 314 S.
77. R. Richter. Elektrische Maschinen, Bd. I. Allgemeine Berechnungselemente. Die Gleichstrommaschinen. 1924. 630 S.
78. M. Vidmar. Die Transformatoren. 1925.
79. R. Richter. Elektrische Maschinen, Bd. II. Die Synchronmaschinen und Einankerumformer. 1930.
80. R. Richter. Elektrische Maschinen, Bd. III. Die Transformatoren. 1932.
81. R. Richter. Elektrische Maschinen, Bd. IV. Die Induktionsmaschinen. 1936.
82. Th. Bödefeld, H. Sequenz. Elektrische Maschinen. Wien. Springer-Verlag. 1942. 439 S.
83. G. Oberdorfer. Lehrbuch der Elektrotechnik B. I. München u Berlin. 1944. 504 S.
84. F. W. Sears. Electricity and Magnetism. Massachusetts, USA. 1958. 454 p.
85. R. M. Fano, L. J. Chu, R. B. Adler. Electromagnetic Fields, Energy, and Forces. John Wiley&Sons, New York, London 1960. 520 p.
86. C. A. Desoer, E. S. Kuh. Basic Circuit Theoriy. London. 1968. 876 p.
87. E. Jezierski. Transformàtory. Praha. Academia. 1973. 492 s.
88. J. Pierce. Almost all about Waves. London. 1974. 175 p.
89. R. P. Feynman. The Feynman Lectures on Physics. Volume I (5th printing). 1975. USA.
90. E. M. Purcell. Electricity and Magnetism. (Berkeley Physics Course, Vol. 2) McGraw Hill, New York. 1975. 440 p. ISBN: 0-07-004908-4.
91. B. Brentjes, S. Richter, R. Sonnemann. Geschichte der Technik. Leipzig 1978. 502 S.
92. I. Lindell. Sähkötekniikan historia. Helsinki, Otatieto. 1994. 377 lk.
93. Robert Lomas. The Man who Invented the Twentieth Century. Nikola Tesla, Forgotten Genius of Electricity. HEADLINE Book Publishing. London. 1999. 248 p.
94. G. Neidhöfer. Michael von Dolivo-Dobrowolsky und der Drehstrom, Geschichte der Elektrotechnik Band 19, VDE Verlag Berlin, 2004.
95. G. Neidhöfer. 150. Geburtstag Michael von Dolivo-Dobrowolsky. Pionier der Drehstromtechnik. 2. Auflage. TU Darmstadt. 2012. 91 S.
96. J. Ahoranta. Sähkötekniikka. Helsinki, 2010. 335 lk.
97. A. J. Schwab. Managementwissen für Ingenieure. Springer. 2008. ISBN: 978-3-662-08472-4
98. A. J. Schwab, W. Kürner. Elektromagnetische Verträglichkeit. Springer. 2011. 544 S.
99. A. J. Schwab. Elektroenergiesysteme. Springer. 2012. 1051 S.
100. A. J. Schwab. Begriffswelt der Feldtheorie. Springer. 2013. 368 S.

101. P. Hempowicz jt. Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków. Warszawa. 2004. 623 s.
102. T. Kuphaldt. Lessons in Electric Circuits. Volume I and II. 2000–2003. http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/.
103. K. L. Kaiser. Electromagnetic Shielding.
104. J. Walker. Principles of Physics. VIII edition. John Wiley&Sons. 2008.
105. T. Floyd. Electronics Fundamentals. USA: Pearson Education, 2009.
106. T. L. Floyd, D. Buchla. Electronics Fundamentals: Circuits, Devices and Applications, Pearson.
107. T.L. Floyd. Principles of Electric Circuits (9th Edition).USA, Pearson. 2009.
108. R. L. Boylestad. Introductory Circuit Analysis (12th Edition). Prentice Hall, New Jersey, 2010.
109. Modern Sensors Handbook. Edited by P. Ripka and A. Tipek. ISTE Ltd, London, 2007. 518 p.
110. H. W. Jackson. Introduction to Electric Circuits (9th Edition). USA Prentice-Hall.
111. S. Braibant, G. Giacomelli, M. Spurio (2009). Particles and Fundamental Interactions: An Introduction to Particle Physics. Springer. pp. 313–314. ISBN 978-94-007-2463-1.
112. О. Д. Хвольсона. Курс физики т. IV. С.-Петербургъ. 1907. 750 с.
113. Р. Н. Фролов. Курс электротехники. Ч. III. Ленинград. 1926. 477 с.
114. А. Е. Зорохович, С. К. Крылов. Основы электротехники. М., 1957. 454 с.
115. В. А. Говорков. Электрические и магнитные поля. М.-Л., ГЭИ. 1960. 463 с.
116. Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Том I. М.-Л., Энергия. 1966. 522 с.
117. Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. Теоретические основы электротехники. Том II. М.-Л., Энергия. 1966. 407 с.
118. Григорьян А. Т., Вяльцев А. Н. Генрих Герц. 1857–1984. М.: АН СССР Наука, 1968. 312 с.
119. А. И. Важнов. Электрические машины. Ленинград. Энергия. 1969. 768 с.
120. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. М., Высшая школа. 1973. 750 с.
121. М. Ю. Анвельт. Электротехника. 2-изд. М., Высшая школа. 1976. 560 с.
122. И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. Электротехника. С.-Петербург. 2003. 496 с.
123. К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. Том 1. - СПб.: Питер. 2003. 464 с.
124. К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. Том 2. - СПб.: Питер. 2003. 576 с.
125. К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники. Том 3. - СПб.: Питер. 2003. 384 с.
126. Н.В. Коровкин, Е. Е. Селина, В.Л. Чечурин. Теоретические основы электротехники: Сборник задач.- СПб.: Питер, 2006. 512 с.
127. Ян Шнейберг. Титаны электротехники. М. Издательство МЭИ, 2004. 270 с.
128. А. С. Касаткин, М. В. Немцов. Курс электротехники. 8-е изд. М., Высшая школа. 2005. 541 с.
129. Ян Шнейберг. История выдающихся открытий и изобретений. Электротехника, электроэнергетика, радиоэлектроника. М., 2009. 252 с.
130. Б. Грин. Ткань космоса. Пространство, время и текстура реальности. Либроком. 2011. 608 с.
131. О. Н. Веселовский, Я. А. Шнейберг. Очерки по истории электротехники. М., 2012. 252.
132. Brian Greene. The Fabric of the Cosmos. Space. Time and the Texture of Reality. New York. 2004.
133. http://et.wikipedia.org/wiki/Superkondensaator
134. http://www.e-ope.ee/_download/euni_repository/file/1121/Klassikalinemeetod.pdf
135. Osakeste füüsika ülevaade: pdg.lbl.gov
136. Osakeste füüsika bibliograafia http://www.ppds.ihep.su:8001/ppds.html
137. library.cern.ch/home
138. Elektroni 100 aasta juubeliks: http://www.iop.org/Physics/Electron/Exhibition

ELEKTROTEHNIKA AJALOOST

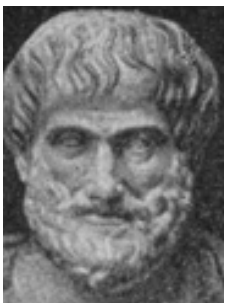
Elektrotehnika algaastad

Juba iidsetel aegadel puutus inimkond kokku elektriliste nähtustega, mis tekitasid hirmu, ebakindlust ja aukartust. Need nähtused olid välk, virmalised ja laeva mastis teatud looduslikel tingimustel tekkivad itaalia meremeeste kaitsepühaku järgi nimetatud Elmo tuled. Viimased kujutavad endast teravikel võimenduvast elektriväljast põhjustatud koroonalahendust (corona – lad k pärg).

Elektrilised nähtused muutusid meelelahutuslikeks pärast avastust, et merevaik hakkab külge tõmbama õhkkergeid esemeid, kui seda villase lapiga hõõrutakse. Neid nähtusi uurisid ka Vana-Kreeka teadlased. Hõõrumine „elustas“ merevaigu. **Thales** (625 † 547 eKr) eeldas, et ka näivalt elutu loodus sisaldab jumalaid – see pole surnud, seda tõestab merevaik, mis tõmbab külge ebemeid. Oletatakse, et sellest ajast räägitakse elektriliste nähtuste puhul **elektronist** (kr k merevaik). Thales uuris ka looduslikku püsimagnetit: Magneesia linna lähedalt pärinevat kivi – magnetiiti. Ta leidis, et merevaik ja magnetiit tõmbavad mõlemad materjale ligi – esimene udusulgi, teine rauda. Thalest peetakse esimeseks filosoofiks ja esimeseks teadlaseks üldse.

Thales

Demokritos



Aristoteles Mileetosest

Platon (428 † 348 eKr) – Kreekas kordas ja kinnitas Thalese katseid.

Demokritos (460 † 370 eKr) väitis, et olemas on **aatomid** (kr *atomos* 'jagamatu') ja **tühjus**. Aatom on väga väikene ning seetõttu ei saa teda ei näha ega käega katsuda. Asjad on aatomite kooslused.

Aristoteles (384 † 322 eKr) – vanaaja suurim mõtleja ja paljude teadussuundade rajaja, kahjuks ei käsitlenud elektrit ja magnetismi.

Hispaanlane **Isidorus** (570 † 636) avastas, et magnetiit suudab rauale magnetilisi omadusi edastada.

1269 – prantslane **Peter Peregrinius de Maricourt** avaldas katsetulemused magnetiidiga – „Epistlid magnetist“. Avastas magnetpoolused *N* ja *S*. Paigaldas magnetiidi vedelikus olevale puutükile, mis oli algeliseks kompassiks.

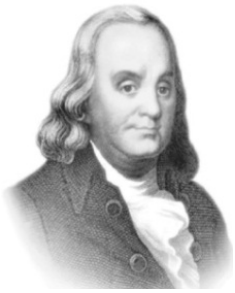
Alates m.a.j võib kokkuvõtvalt öelda, et aastatel 0…1600 erilisi uurimistulemusi elektrotehnika vallas polnud. 1600. a lõi **William Gilberti** töö aluse süsteemsetele uuringutele elektriliste nähtuste vallas. Edasi uuris elektrostaatilisi laenguid **Otto von Guericke** oma laengumasinaga.

1600. aastal ilmus inglise teadlase **William Gilberti** teaduslik töö “*De magnete, magneticis que corporibus, et de magno magnete tellure*“ („Magnetist, magnetkehadest ja suurest magnetist – Maa“), milles selgitati magnetilisi nähtusi üldiselt ja kompassi magnetnõela käitumist, aga samuti jälgiti autori poolt elektrilisteks nimetatud nähtusi. Ta tegi kindlaks, et magnetil on alati kaks poolust: põhja- ja lõunapoolus ning et erinimelised poolused tõmbuvad ja samanimelised tõukuvad.

1663 – saksa füüsik **Otto von Guericke** ehitas esimese elektrostaatilise generaatori. Uuris elektrilisi ja magnetilisi nähtusi.

William Gilbert 1544 † 1603

Otto von Guericke 1602 † 1686



Benjamin Franklin 1706 † 1790

Charles Coulomb 1736 † 1806

Luigi Galvani 1737 † 1798

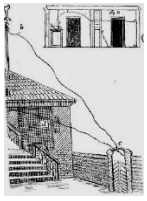
Krahv Alessandro Volta 1745 † 1827

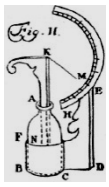
1729 – **Ch. F. Dufay** (1698†1739) eraldas kaht liiki elektrit – klaasi ja vaigu elektrit.

1745 – Leidenis töötas hollandi teadlane **Pieter van Musschenbroek** välja esimese elektrienergia salvesti, nn Leideni purgi – sisuliselt esimese kondensaatori.

1750 – Ameerikas leiutas **Benjamin Franklin** (sõltumatult P. Divišist (1754) piksevarda ja 1752. aastal kasutas tegelikkuses. Tõestas katseliselt, et äike on elektriline nähtus. Lõi ühtse elektriteooria. Elektriline fluidum, kui liiga palju, siis „+“ (klaas), puudujääk „–“ (vaik). Uued mõisted: patarei, kondensaator, laadimine, tühjakslaadimine, mähis.

1753 – **Georg W. Richmann** katsetas Venemaal piksevarrast. Katse käigus sai Richmann surma.





Joonis L 1.1. G.W. Richmann, elektroskoop ja hukkumine

Georg Wilhelm Richmann (1711 † 1753) sündis Pärnus baltisaksa perekonnas. Pärnu oli siis Rootsi võimu all, Liivimaa koosseisus. Põhjasõja tulemusel (1700...1721) läks Eesti Venemaa koosseisu. Enne Georgi sündi isa suri. Ema abiellus uuesti. Hariduse omandas Tallinnas. Edasi õppis Saksamaal Halle ja Jena Ülikoolis. 1741 valiti ta St. Peterburi Teaduste Akadeemia liikmeks. Tema olulisemad tööd olid kalorimeetria ja elektri alal. Lõi esimese töökõlbuliku skaalaga elektroskoobi. Ta paigaldas oma maja katusele isoleeritud metallvarda, mille ühendas elutuppa tuleva traadiga, mille teises otsas oli metallist skaala ja siidiniit, mille kaldenurga alusel uuris ta õhu elektrit. Oli M. V. Lomonossovi sõber ja nad tegid koostööd. Hukkus õhuelektri katsete ajal, olles esimene inimene, kes hukkus elektrilisi nähtusi uurides (joonis L 1.1).

1778 – prantsuse füüsik **Charles Coulomb** avastas seose laetud kehade vastastikuse tõmbejõu väärtuse sõltuvuse laengu suurusest ja nendevahelisest kaugusest – esimene elektromagnetismi seadus (Coulombi seadus).

1781 – **Luigi Galvani** (Bologna, Itaalia) tegi loomkatseid, uurides elektri mõju närvidele ja musklitele; 1790. a avastab galvaanilise elektri.

1784 – inglise leidur **James Watt** leiutas universaalse pöörleva võlliga aurumasina, mis pani aluse murrangule tootmises.

19. sajandil saavutasid elektromagnetismi uuringud oma õitsengu: pidevalt avastati uusi elektromagnetilisi nähtusi; avastati seaduspärasused, millele need nähtused alluvad; leiutati erinevaid elektrotehnilisi seadmeid.

1799 – itaallane **Alessandro Volta** leiutas ja valmistas esimese elektrokeemilise alalisvooluallika, galvaanielemendi – Volta samba. Seda sündmust võib lugeda praktilise elektrotehnika alguseks. Tema terminid: elektriahel, vool, elektromotoorjõud (EMJ), potentsiaalide vahe U.

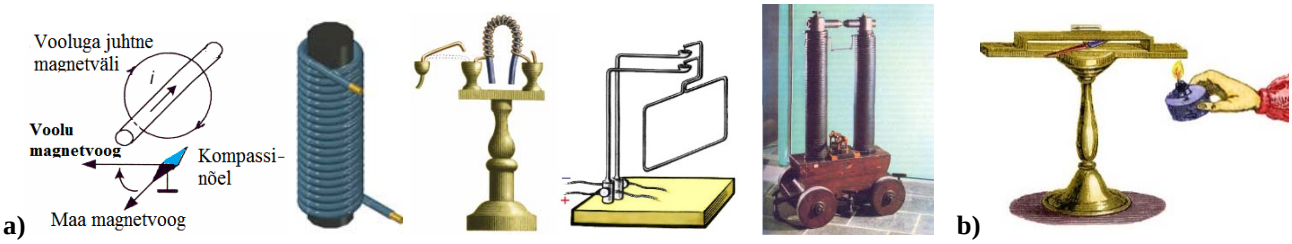
Pavia Ülikooli professor A. Volta avastas, et vask- ja tsinkjuhtmete vahel, mis on paigutatud keedusoola lahusesse, tekib potentsiaalide vahe, mida ta tajus keelega katsumisel, samasugune hapukas maitse, mis taskulambipatarei klemmide keelega puudutamisel. Et suurendada potentsiaalide vahet, paigutas Volta sambakujuliselt kümned vask- ja tsinkrõngad vaheldumisi papprõngastega (joonis L 1.2). Viimaseid immutas Volta soolalahusega. Kui ta puudutas ühe käega ülemist vaskrõngast ja teisega alumist tsinkrõngast, siis sai ta tajutava elektrilöögi. Volta leiutas ka elektrofoori (1775), tundliku elektroskoobi (1781) ja elektromeetri. Ta avastas kontaktelektri ja järjestas metallid kontaktpotentsiaalivahe järgi (1801). Volta põhjendas galvaanilise ja staatilise elektri sarnasuse. Sõna pinge pärineb Voltalt. Volta kirjatöös on ka telegraafi idee.

Joonis L 1.2. Volta sammas

1801 – Volta leiutab patarei ja demonstreerib Pariisis seda Napoleonile. Napoleon andis talle Auleegioni ordeni ja pensioni. Volta nime järgi on pingeühik volt, V; Volta element, voltmeeter ja Volta kaar (elektrikaar).

Elektromagnetiliste nähtuste olulisemad uurimistulemused

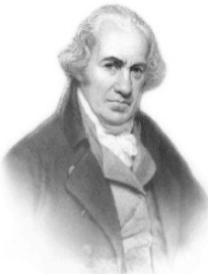
1802 – Itaalias avastas **Gian Domenico Romagnosi** elektri ja magnetismi vahelise seose, mis unustati pea. **1820** – taani füüsik **Hans Christian Ørsted** avastas uuesti elektrivoolu mõju magnetosutile, mis sidus omavahel elektrilised ja magnetilised nähtused; ta valmistas ka esimese elektromagneti (joonis L 1.3). Valmistas samal aastal ka piesomeetri. Ta arendas elektriõpet ja elektrotehnikat.



Joonis L 1.3. Elektromagnetismi alased uurimused ja katseseadmed (a) ning Thomas Johann Seebecki termoelektrilise voolu avastamise katseseade (b)

1820 – prantsuse füüsik **André Marie Ampère** avastas Ørstedi katset korrates kahe vooluga juhi vastastikuse mõju (Ampère'i seadus). Ampère'i lapsepõlv oli revolutsiooni aeg, ta isa suri giljotiini all. Ampère oli teadmishimuline nooruk. Ta arendas end eri valdkondades, kuni hakkas matemaatikat ja füüsikat õppima. Matemaatikaprofessor. Väitis, et kehade magnetismi põhjustavad molekulaarvoolud.

1821 – **baltisaksa teadlane Thomas Johann Seebeck (sündis 9.04.1770 Tallinnas kaupmehe perekonnas). 1788. aastal lõpetas Tallinna Linna Keiserliku Gümnaasiumi. Samal aastal astus Berliini Ülikooli arstiteadust õppima. Suri 10.12.1831 Berliinis) avastas termoelektrilise voolu (joonis L 1.3b). Valmistas termopaari ja kasutas temperatuuri mõõtmiseks. Tallinna Tehnikaülikooli territooriumil on talle püstitatud mälestussammas.**



James Watt 1736 † 1819

Jean Baptiste Fourier 1768 † 1830

Thomas Johann Seebeck 1770 † 1831

Andre Marie Ampère 1775 † 1836

Hans Christian Ørsted 1777 † 1851

Joseph Henry 1797 † 1878

1825 – inglane **William Sturgeon** valmistas esimese elektromagneti ja 1832 a. esimese kollektoriga alalisvoolumootori.

1832 – Ameerikas valmistas **J. Henry** 2000 kg tõstejõuga elektromagneti.

William Sturgeon 1783 † 1853

Heinrich Friedrich Emil Lenz
1804 † 1865

James Prescott Joule 1818 † 1889

Aleksandr Grigorjevitš Stoletov
1839 † 1896

Wilhelm Conrad Röntgen
1845 † 1923

Heinrich Rudolph Hertz
1857 † 1894

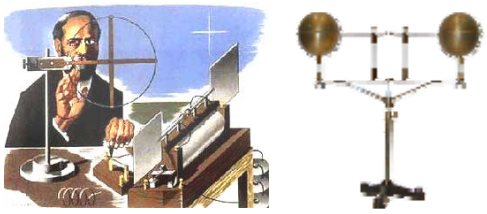
1833 – baltisakslasest füüsik, Peterburi TA liige (1834) Heinrich Friedrich Emil Lenz (24. märts 1804 Tartu – 10. veebruar 1865 Rooma) tuletas elektromagnetilist induktsiooni uurides induktsioonivoolu suuna määramise reegli. Lõpetas Tartus gümnaasiumi, õppis 1820…23 Tartu Ülikoolis keeleteadust ja teoloogiat. 1836. a-st Peterburi ülikooli prof, a-st 1863 rektor. Käis 1823...26 ümbermaailmareisil ja tegi geoüüsikalisi

mõõtmisi, jätkas neid 1829...30 Kaukaasias ja Kaspia mere rannikul. Tegi 1835 kindlaks metallide takistuse sõltuvuse temperatuurist, sõnastas 1842 elektrivoolu soojusliku toime seaduse (Joule'i-Lenzi seadus). Avastas elektromagnetiliste generaatorite ja mootorite pöörduvuse, uuris Peltier' efekti ja esitas magnetvoo mõõtmise ballistilise meetodi.

1839 – prantsuse füüsik **Alexandre Edmond Becquerel** avastas juhtivas lahuses fotoelektrilise efekti.

1841 – inglise füüsik **James Prescott Joule** avastas elektrivoolu soojusliku toime seaduse. Määras soojuse mehaanilise ekvivalendi, tõestas katseliselt energia jäävuse seaduse.

1888 – saksa teadlase **Heinrich Rudolph Hertzi** avastused (joonis L 1.4), mis võimaldasid kindlaks teha elektromagnetiliste ja valguslainete samased (identsed) omadused. Ta lõi elektromagnetilise ostsillaatori teooria ja tegi katseliselt kindlaks Maxwelli poolt ennustatud elektromagnetlainete olemasolu. Tema töödel rajaneb tänapäeva raadiotehnika.



Joonis L 1.4. Heinrich Hertzi labori katsestend

Saksa füüsik Heinrich Hertz, maailma üks kuulsaim füüsik, sündis Hamburgis advokaadi perekonnas. Gümnaasium Hamburgis, inseneriõpe Dresdenis. Aastase sõjaväeteenistuse järel õpib füüsikat ja matemaatikat. 1878 Berliini ülikoolis Hermann von Helmholtzi õppe- ja uurimisassistent. Seejärel Kielis, Karlsruhes ja Bonnis. Suri 36-aastaselt. 1886. a. õnnestus katse üle kanda elektromagnetlaineid saatjast vastuvõtjani. Need tulemused olid aluseks traadita telegraafi ja raadio väljatöötamiseks.

1888 – fotoefekti avastamine H. R. Hertzi ja vene teadlase **A. G. Stoletovi** poolt.

1895 – sakslane **W. C. Röntgen** avastas (nime saanud avastaja järgi) röntgenikiired.

1979 – ameeriklased **N. Wertheimer** ja **E. Leeper** avaldasid uurimistulemused elektromagnetiliste väljade mõjust vähi tekkele.

Teoreetilise elektrotehnika areng

1822 – prantsuse matemaatik **Baron Jean Fourier** lõi mittelineaarsete elektriahelate analüüsil laialdast kasutust leidva trigonomeetriliste ridade teooria nn Fourier' rea.

1827 – saksa füüsik **George Simon Ohm** avastas pinge, voolu ja takistuses vahelise seose (Ohmi seadus).

Carl Friedrich Gauss 1777 † 1855

George Simon Ohm 1787 † 1854

Michael Faraday 1791 † 1867

Wilhelm Eduard Weber 1804 † 1891

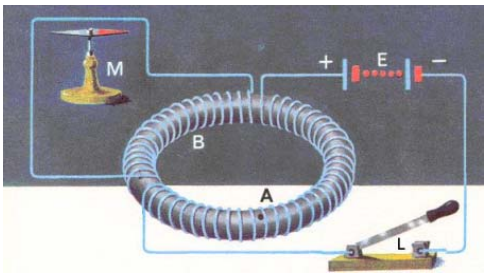
Gustav Robert Kirchhoff 1824 † 1887

James Clerk Maxwell 1831 † 1879

1831 – inglise teadlane **Michael Faraday** avastas elektromagnetilise induktsiooni, mis esmakordselt võimaldas muuta mehaanilise energia induktsiooni abil elektrienergiaks. Tema ehitas ka kondensaatori, kasutades plaatide vahel dielektrikut. 1833…34 sõnastas elektrolüüsi seaduse. Uuris seoseid elektromagnetismi ja valguse vahel. 1836. a avastas elektrostaatilise varje, diamagnetismi ja paramagnetismi. Ta võttis kasutusele järgmised terminid: katood, anood, elektrood, ioon, elektrolüüt ja elektrolüüs.

Michael Faraday, käskjalg, köitekoja tööline, algharidus. Teadmisjanu viis kuulama sir Humphrey Davy loenguid. Siis Davy käealune. Iseõppimise ajal hakkas eksperimenteerima. Tol ajal teati, et vool kutsub esile magnetvälja. Michael Faraday eeldas, et elektrilised ja magnetilised nähtused on omavahel tihedas seoses. Voolud tekitavad magnetvälju ja viimased omakorda võivad põhjustada voolude tekke. Aastaid kandis ta vestitaskus traadipooli ja väikest püsimagnetit, et probleem ei ununeks. Tõestus õnnestus lihtsa katse abil: ta asetas magnetvälja vasktraadist silmuse ja ühendas selle galvanomeetriga. Algul asetas silmuse rööbiti magnetvälja jõujoontega, seejärel pööras silmust järsku 90° võrra. Galvanomeetri osuti kaldus kõrvale ja pöördus kohe tagasi lähteasendisse. Silmuse pöörlemine tekitas juhtmes lühiajalise voolu.

20. augustil 1831. a tegi Faraday maailma arengut muutva katse. Ta koostas lülituse (joonis L 1.5), paigutades raudsüdamikule isoleeritud vasktraadist mähise A, mille ühendas lüliti L abil toiteallikaga E. Mähise B klemmid ühendas ta traadiga, mille alla paigutas magnetnõela. Iga kord, kui lülitit L sisse ja välja lülitati, registreeris ta magnetnõela abil mähises B voolu tekke. Voolu tekke korral nõel pöördus. Vool tekkis elektromagnetilise induktsiooni mõjul vaid siis, kui pooli B aheldusvoog ajas muutus. Kasutatud lülitus oli sisuliselt impulsstrafo lülitus, milles peituvaid kõiki võimalusi oli raske kindlaks teha.



Joonis L 1.5. Michael Faraday oma laboris. Akvarell (a) ja elektromagnetilise induktsiooni uurimise katseskeem (b). Toiteallikas E, poolid A ja B ühisel raudsüdamikul ja magnetnõel M, lüliti L

1831 – saksa matemaatik **Carl Friedrich Gauss** lõi kompleksarvude teooria ja tegeles potentsiaaliteooriaga. **Ta kandideeris aastatel 1803 ja 1809 Tartu Ülikooli astronoomia- ja matemaatikaprofessori kohale**.

1832 – saksa füüsik **Wilhelm Eduard Weber** lõi koos **C. F. Gaussiga** absoluutse mõõtühikute süsteemi, mõõtis maa magnetvälja tugevust ja ehitas koos **C. F. Gaussiga** Saksamaa esimese elektromagnetilise telegraafi.

1832 – ameerika füüsik **Joseph Henry** avastas endainduktsiooni, leiutas 1835. a relee ning 1841. a tegi kindlaks kondensaatori võnkelahenduse.

1845 – saksa prof **Gustav Robert Kirchhoff** avastas kaks elektriahelate teooria põhiseadust (I ja II Kirchhoffi seadus ehk voolu ja pinge seaduse). Ta töötas välja musta keha kiirguse teooria.

1845 – Glasgow' ülikooli prof **William Thomson** käsitles matemaatiliselt M. Faraday ideed, et elektriline induktsioon ei ole kaugtoime nähtus, vaid põhineb elektromagnetvälja muutumisel dielektrikus.

1852 – **William Thomson** valmistas esimese soojuspumba ja 1853. a rajas elektrivõnkumiste teooria alused. 1906. a valiti Rahvusvahelise Elektrotehnikakomisjoni (IEC) esimeseks presidendiks. Kuninganna Victoria omistas William Thomsonile baroneti tiitli ja teda tuntakse lord Kelvini nime all. Ta on termodünaamika rajaja ja võttis kasutusele absoluutse temperatuuri mõiste. 1851 esitas termodünaamika teise printsiibi ja selle üldistusena universumi soojussurma idee.

1856 – šoti päritolu inglise teadlane **James Clerk Maxwell** arendas välja elektri ja magnetismi teooria, 1865. aastal kinnitas, et eksisteerib elektromagnetiline kiirgus ja 1873. a koostas elektromagnetvälja fundamentaalse võrrandisüsteemi (Maxwelli võrrandisüsteem) ja valguse elektromagnetteooria. Maxwell kirjutas ka **1871** – soojusteooria õpiku; **1876** – õpiku kehadest ja liikumisest.

William Thomson Kelvin
1824 † 1907

Charles Proteus Lord Steinmetz
1865 † 1923

1886 – **Heinrich Hertz** avastab fotoefekti, mida tema assistent **Wilhelm Hallwachs** 1887. a edasi uuris.

1897 – Saksa-Ameerika teadlane **Charles Proteus Steinmetz** publitseeris "Theory and Calculation of Alternating Current Phenomen", kus esitleti vahelduvvooluahelate arvutuseks sümbolimeetodit, mis on põhiarvutusmeetodiks tänaseni.

Toiteallikate areng

1799 – Itaalias valmistas prof **Alessandro Volta** esimese galvaanielemendi.

1832 – **Michael Faraday** pakkus välja magnetohüdrodünaamilise generaatori idee.
1838 – sakslane **Christian Friedrich Schönbein** avastas, et vesinik ja hapnik võivad ühineda elektrolüütiliselt – ilma leegita.

1839 – inglise füüsik **Robert Grove** valmistas plaatina- ja kuldelektroodiga elektriallika, mille nimetas gaasipatareiks.

1859 – prantsuse füüsik **Gaston Planté** töötas välja pliiakumulaatori.

1867 – prantsuse keemikult **Georges Leclanché'lt** kuivsüsi-tsinkelementpatarei.

1880 – prantsuse füüsik **Camille Faure** võttis pliiakus kasutusele urbsed elektroodid.

1883 – **Erasmus Kittler** avas Saksamaal Darmstadti Tehnikakõrgkoolis 4-aastase elektrotehnika inseneriõppe, millele 1885. a järgnes sarnane õpe Londonis ja USAs Missouri Ülikoolis.

Erasmus Kittler (1852 † 1929). Rätsepa poeg Nürnbergist. Õppis Nürnbergis, Münchenis, Würzburgis. 1879. a. andis õppeametile eksamid matemaatikas ja füüsikas. Töötas Müncheni Tehnikakõrgkoolis (1879), kaitses väitekirja Würzburgis ja Münchenis. 1882 asutas Darmstadti Tehnikaülikoolis elektrotehnika õppetooli ja koostas 4-aastase inseneriõppekava. Esimesel neljal semestril õpetati elektrotehnika aluseid, matemaatikat, füüsikat, keemiat, masinatehnikat; 5...8 semestril õpetati erimõõtetehnikat, elektriajamit, energia ülekannet, elektertransporti, elektervalgustust ja hiljem kõrgepingetehnikat. Tema kuulsamad õpilased: M. Dolivo-Dobrovolsky, Carl Hering ja Waldemar Petersen. Kirjutas ka elektrotehnika õpiku ja käsiraamatu.

1889 – inglise füüsikud **Ludwig Mond** ja **Charles Langer** täiendasid gaasipatareid ja valmistasid tõhusama muundusseadme, mida nimetasid kütuseelemendiks.

1901 – Rootsis tööstur **Valdemar Jungner** ja **T. A. Edison** USAs leiutasid sõltumatult raud-nikkel-aku.

1940 – USA füüsik **Russell Ohl** avastas räni pn-siirde ja sellel toimuva fotoelektrilise efekti.

1954 – Inglismaal demonstreeris **Francis Bacon** pärast 27-aastast uurimistööd esimest kütuseelementi. Kasutati USA satelliitide raadiotoiteallikatena.

1955 – USAs valmis esimene päikesepatarei katseeksemplar.

1962 – USA varustas sidesatelliidi „Telestar 1" 3600-elemendilise päikesepatareiga.

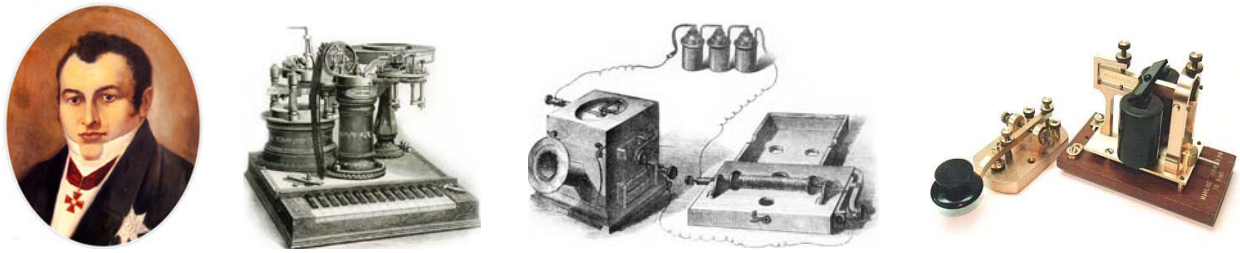
1967 – Saksamaal väävel-naatrium-akud.

1983 – USAs nikkel-metallhüdriid-akud.

1991 – USAs valmistati liitiumelement patareide tarbeks.

Elektertraatside areng

1828…1832 – **Tallinnas 5. /11. aprillil 1786. a sündinud baltisaksa diplomaat/teadlane Paul (Pavel Lvovitš) Ludwig Schilling von Cannstatt** töötas välja 21. oktoobril 1832 esimese elektromagnetilise telegraafi (joonis L 1.6), mis tugines magnetnõelte hälbimisele, milles osuti näitas telegraafi koodi abil juhtmeid pidi edastatava signaali tähti. Ta kasutas esimesena praktikas kahendsüsteemi signaalide edastamiseks ja koostas šifreerimistabelid; 1812. a lõhkas esimesena elektrivoolu abil miine.



Joonis L 1.6. Paul Ludwig Schilling, tema telegraaf ja paremal Morse elektromagnetiline telegraafiaparaat

1837 – ameerika leidur **S. F. B. Morse** (1791…1872) leiutab „Morse“ elektromagnetilise telegraafiparaadi. Muutis kasutuskõlbulikuks ja võttis kasutusele pikkade ja lühikeste signaalidega morsetähestiku.

1842 – **Samuel Morse** paigaldas telegraafside tarbeks merekaabli ja rajas 1844. aastal Washington–Baltimore'i telegraafiliini.

1854 – prantsuse telegraafitöötaja **C. Boursel** (1828…1912) leiutas telefoniside põhimõtte.

1855 – inglane **D. E. Hughes** leiutas kasutuskõlbuliku tähetrükitelegraafiaparaadi.

1858 – inglane **C. Wheatstone** leiutas automaattelegraafiaparaadi, milles tekst kantakse perforaatori abil mulgustusena lindile, millelt automaatsaatja teksti kiirelt sidekanalit pidi edastab.

1861 – Saksamaal leiutas füüsik **Johann Philipp Reis** esimese lihtsa telefoni, kõne elektrilise edastamise vahendi. Telefoni nimetus muudes keeltes pärineb Reis'ilt. Reis haigestus tuberkuloosi, suri noorelt. Seetõttu jäi telefoni areng peatuma.

Charles Wheatstone 1802 † 1875 | **Johann Philipp Reis 1834 † 1874** | **Jean Maurice Emile Baudot 1845 † 1903** | **Alexander Graham Bell 1847 † 1922** | **Belli telefoni katsetamine**

1860 – USAs katsetasid **Antonio Meucci** ja **Elisha Gray** kõne elektrilist edastamist, olid edukad. Bell sai patendi 1876. aastal.

1874 – prantsuse leidur **Jean Maurice Emile Baudot** [Bodo] leiutas viiendkoodi rakendava temanimelise telegraafside.

1876 – šoti-inglise-kanada päritolu ameerika teadlane **Alexander Graham Bell** võttis esimesena patendi telefonile. Tema järgi on logaritmiline mõõtühik bell ja detsibell (1dB = 0,1B).

Bell täiendas valjuhääldit ja mikrofoni elektromagnetpooli ja püsimagnetiga. Hiljem kasutas mikrofonikarpi söeterade ja membraaniga (inglase Blake'i patendi järgi). 1881. a. oli telefon rakenduskõlbulik.

Enne patendi sisseandmist töötas Bell oma telefoni kallal Antonio Meucci töökojas, kus olid ka Meucci telefoni arendusmaterjalid. Bell patentis telefoni 2 tundi enne A. Meucci ja Elisha Gray'd. Kahtlustatakse, et Belli aitasid patendibüroo töötajad. Pärast patendi sisseandmist kestsid kohtuistungid aastakümneid. Edutult. Meucci suri vaesena. 2002. aastal kirjutas USA Kongress resolutsiooni, et Antonio Meucci on telefoni leiutaja ja patendi omanik ning A. B. Bell on **petis**.

1877 – Pariisis ja Bordeaux's võeti kasutusele Baudot' kiirtelegraaf.

1923 – Saksamaal Weilheimis esimene täisautomaatne telefoni kaugejaam 22-kohalisele võrgule.

1927 – võeti telegrafeerimiskiiruse ühikuks baud (J. M. E. Baudot' auks), mis on üks elementaarsignaal sekundis. Kui kasutatakse kahte elementaarsignaali väärtust, siis 1 baud = 1 bit/s.

1960 – USA saadab orbiidile esimese sidetehiskaaslase.

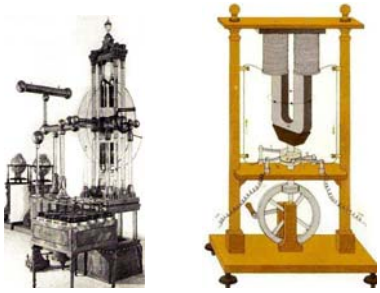
1990 – Interneti kasutamise algus.

Elektrimasinate arenguetapid

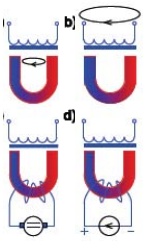
Generaatorite areng

1831 – inglane **Michael Faraday** avastas elektromagnetilise induktsiooni, mis võimaldab muundada mehaanilist energiat elektrienergiaks; 4. novembril 1831 katsetas Faraday magnetelektrilist generaatorit, mis koosnes U-kujulisest püsimagnetist ja selle pooluste vahel pöörlevast vaskkettast. Ketta pöörlemisel indutseerus ketta telje ja välisserva vahel potentsiaalide vahe.

1832 – **Hippolyte Pixii** ehitas Ampére'i tellimisel ja juhendamisel esimese pöörleva vahelduvpinge generaatori (joonis L8); H. Pixii oli A. M. Ampére'i mehaanik. Samal 1832. aastal ehitas H. Pixii alalisvoolumasina.



Joonis L 1.7. Franz X. Rachersi hõõrdeelektrimasin (1794. a) Linzi muuseumis (a)



Joonis L 1.8. H. Pixii (1832) – terassüdamikuga pool on paigal, püsimagnet pöörleb (a); Woolrich, Stöhrer (1844) – pool pöörleb, magnet on paigal (b); Wheatstone (1845) – elektromagneti toide allikalt (d); Wilde (1865) – masinalt (c)

1851 – Saksamaal soovitas **Wilhelm Josef Sinsteden** püsimagneti asemel kasutada elektromagneteid ja toita neid abigeneraatorist. Ta avastas, et masina kasutegur on suurem elektromagneti terastraadist terassüdamiku puhul.

1854 – püsimagnetid olid nõrgad ja kogukad. Seepärast kasutas Wheatstone ergutuseks patareitoitega elektromagnetit.

1854 – Taani raudteeinsener **Søren Hjorth** (1801 † 1870**)** patentis alalisvoolu-(AV)-generaatoritele endaergutuse põhimõtte: ta eeldas, et algselt on vaja väikest püsimagnetit generaatori käivitamiseks.

1865 – inglane **Henry Wilde** paigaldas erguti generaatori võllile ja valmistas võimsa (1 kW) generaatori.

1866 – inglased Samuel Alfred Varley ja Charles Wheatstone ning **Ernst Werner von Siemens** avastasid Saksamaal üksteisest sõltumatult, et endaergutusega generaator hakkab tööle jääkmagnetismi tõttu püsimagneteid kasutamata.

1867 – **Werner Siemens** esitas 17. jaanuaril (15 aastat Hjorthist hiljem) ettekande dünamoelektrilise põhimõtte kohta, mis võimaldas tal realiseerida kompaktset ja suure kasuteguriga generaatorit. Aastat 1866 võib seetõttu lugeda tugevvoolu elektrotehnika sünniaastaks.

W. Siemens kaotas noorelt vanemad. Seetõttu läks ta sõjaväkke ja lõpetas Berliini ülikooli kahurväe leitnandina. Magdeburgis osales vahekohtunikuna duellis. Mõisteti 5 aastaks vangi. Vangla laboris tegeles teelusikate galvaanilise hõbetamisega. Patentis ja müüs patendi juveliirile. Hiljem konstrueeris ja ehitas telegraafiaparaate, jaamu ja liine (**Peterburi–Tallinn–Helsingi**, Varssavi, Sevastoopoli liinid 1850ndail aastail).
1856 – elektrimasina silinderankur;
1857 – leiutas osooni elektriliseks tootmiseks toru, et puhastada joogivett;
1879 – elektrivõrgust toidetav elektrivedur;
1880 – elektrilift;
1881 – elektritramm Berliinis;
1882 – trollibussi edukas katsetus.

1867 – inglane **Charles Wheatstone** soovitas reguleeritavat rööpergutust Siemensi jadaergutuse asemel.

1869 – belglane **Zénobe Théophile Gramme** ehitas esimese alalisvoolugeneraatori – kollektori looja.

1876 – belgia tööstur **Zénobe Théophile Gramme** ehitas Pariisi tegutseva P. Jablotškovi kaarlampide toiteks vajalikud vahelduvvoolu-(VV)-generaatorid.

1881 – **Thomas Alva Edison** võttis praktikas kasutusele AV-generaatori (dünamo, joonis L 1.10).

1884 – inglane **C. Parsons** leiutas auruturbiini. George Westinghouse, kes pidas kolbaurumasinaid ebatõhusaks, valmistas enne seda esimese pöörleva aurumasina. Sellel olid suured puudused. 1885. a ostab Westinghouse Parsoni patendi, parandab konstruktsiooni ja alustab tootmist. 1889. a. valmistab 300 kW turbiini.

1883...1885 – **Nikola Tesla** võtab 7 patenti mitmefaasilistele vahelduvvoolumasinatele (joonis L 1.9) ja **1888**. aastal tähtlülitusele.

Nikola Tesla, serbia juurtega Horvaatia territooriumil sündinud serbia-ameerika teadlane. 1876…78 õppis Grazi Tehnikaülikoolis, täiendas end Praha ülikoolis ja Budapestis. Arendas ideed kasutada vahelduvvoolu elektriülekandeks ja selleks ka välja arendada vahelduvvoolumootoreid (joonis L 1.9). 1882 siirdus Pariisi ja töötas seal Edisoni ettevõttes. 1884 siirdus rahatult New Yorki ja hakkas uuesti Edisoni firmas tööle (Edison ei huvitunud vahelduvvoolu kasutamisest). Tesla leiutas kahefaasilise vahelduvvoolugeneraatori. 1885. aastal müüs patendiõigused G. Westinghouse'ile. 1893. a demonstreeris Chicago maailmanäitusel palju väiksemate kadudega vahelduvvoolu süsteemi. Ta katsetas palju valgustussüsteeme, muutis Tesla trafo kõrgsagedusvoolu allikaks, et arendada kaablita elektriülekannet. Ta oli mitmefaasiliste süsteemide leiutaja, arendas raadiosaatjat ning teostas esimesena maailmas kaugjuhtimist. Koostas ka elektrienergia ülekande alused. Tal oli 112 patenti, mõned neist olid samaaegsed teiste leidurite patentidega, osa mittekasutatavad. Osa Tesla töödest pole tänaseni suudetud lahti mõtestada ja korrata.

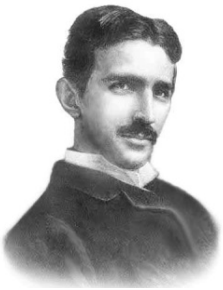
Moritz Hermann Jacobi
1801 † 1874

Werner von Siemens
1816 † 1892

Zénobe Théophile Gramme
1826 † 1901

Galileo Ferraris 1847 † 1897

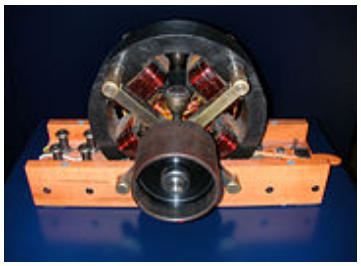
Mikhail Ossipovitš Dolivo-Dobrovolsky 1862 † 1919



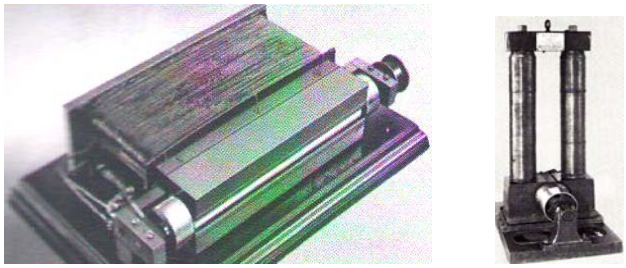
Nikola Tesla 1866 † 1943

1888 – **Mikhail Dolivo-Dobrovolsky** konstrueeris ja valmistas Firmas AEG kolmefaasilise generaatori võimsusega 2,2 kW.

Mazowszest, poola aadliperekonnast pärit **M. Dolivo-Dobrovolsky** sündis Gatšinas. Õppis Riia Polütehnikumis. Eksmatrikuleeriti üliõpilaste poliitilistest väljaastumistest osavõtu tõttu. Emigreerus 1881. a Saksamaale. 1884. a lõpetas kiitusega Darmstadti Tehnikakõrgkooli. Samas 1885…87 assistent. Pikaajaliselt firma AEG peakonstruktor. 1909. aastast tehniline direktor. 1887…88 täiendas alalis- ja vahelduvvooluvoltmeetreid ja -ampermeetreid. 1888 pakkus lisaks kolmefaasilisele generaatorile välja kolmefaasilise lühisrootoriga mootori (rootor valuterasest, millel oli õõnes vasksilinder). 1889. a. täiendas rootorit, **1890** – kolmefaasiline trafo, käivitusreostaat, fasomeeter; kaare-kustutusmeetod (1910…14); **1919 –** vahelduvvoolukaugülekanded pole võrreldes alalisvoolu omadega suuremate kadude tõttu ökonoomsed. Elu jooksul koostas üle 60 patendi.



Joonis L 1.9. Tesla vahelduvvoolugeneraatori mudel – elektromagneti toide alalisvoolu-generaatorilt



Joonis L 1.10. Edisoni dünamoelektriline masin 1866. a (a) ja AV-elektrijaama dünamo 1881. aastast (b)

1891 – horvaatia-ameerika füüsik **Nikola Tesla** ehitas esimese 384 poolusega elektromehaanilise kõrgsagedusgeneraatori.

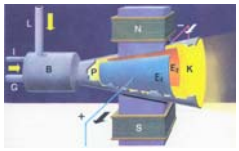
1898 – Šveitsis töötas firmaomanik **Charles Eugen Lancelot Brown** välja silindrilise rootori turbogeneraatorile.

1929 – USAs valmistas firma General Electric esimese 208 MW generaatori, mis oli võimsaim aastani 1953.

1937 – Ameerikas võttis firma General Electric kasutusele esimese vesinikjahutusega generaatori 25 MW.

1956 – Inglismaal valmistas firma Metropolitan Vickers juhtmesisese vesijahutusega generaatori.

1963 – Ameerikas võeti kasutusele esimene magnetohüdrodünaamiline (MHD) generaator võimsusega 1,5 MW.



Joonis L 1.11. MHD-generaatori koosteosad. (L – kuuma õhu sisend, I – ioniseeriv materjal, G – kuum gaas, B – põlemiskamber, P – plasma, K – kanal, N-S – magnetpoolused, E_1, E_2 – elektroodid)

Elektrimootorite areng

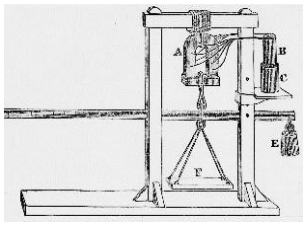
1748 – Ameerikas valmistas **Benjamin Franklin** elektrostaatilise mootori. Rootor oli hambulise ketta kujuline, millele impulsside haaval rakendati tõmbe- ja tõukejõude. Ketas tegi kuni 15 pööret minutis.

1821 – Londonis valmistas **Michael Faraday** esimese elektromagnetilise mootori, milles vooluga juhe pöörles ümber püsimagneti või vastupidi.

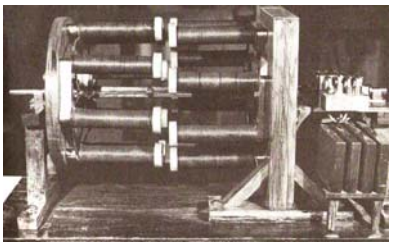
1831 – ameerika füüsik **Joseph Henry** valmistas kahest püsimagnetist, kahest alalisvoolupatareist, tugiraamist ja kiikuvast kahe pooliga elektromagnetist ning kahest elavhõbeda kontaktidega lülitist koosneva kiikuva elektrimootori (joonis L 1.12).

1831…1834 – valmistati erinevaid kulgliikumisega suuna muutmisega katselisi elektrimootoreid.

1832 – inglane **William Sturgeon** patentis lineaarmootori.



Joonis L 1.12. 1831 a Joseph Henry valmistatud elektromagnet: A – mähisega elektromagnet, toitega galvaanielemendilt B, C – liikuva alusega happe nõu, D – gradueerimisnivoo, E – vastukaal, F – kaaluvihi kauss (vasakul)



Joonis L 1.13. M. H. Jacobi 1834 a leiutatud 8-pooluseline pöörlev AV-mootor, millist kasutas ka 1839. a Neeva jõel Peterburis paadiajami katsetel

1834 – USAs valmistas **Thomas Davenport** 1834. a neljapooluselise elektrimootori. Patenti ei võetud vastu. 1837. a sai ta patendi teisele mootorile.

1834 – **saksa-vene teadlane Moritz Hermann von Jacobi (Boris Semjonovitš Jakobi) (s. 1801 Potsdam, †1874 Peterburg), 1835…40 oli Tartu Ülikooli professor ja 1835...1837 ka arhitekt, Inglisilla autor**; 1837. a Peterburi Teaduste Akadeemia) konstrueeris 1835. a Königsbergis esimese pöörleva elektrimootori.

1835. a jätkas Jacobi Tartus Königsbergis alustatud elektriuuringuid. Täiendas mootorit (joonis L 1.13). Asendas massiivsed poolused torukujulistega – vähendas massi õhupilu. Tulemustest teatas Peterburi Teaduste Akadeemiale. Edasi täiustas ta 1837. a J. F. Danielli vask-tsink-galvaanielemente. Uurides elektroodile sadestuvaid vaseosakesi, avastas ta selle kasutamisvõimaluse trükitehnikas. 9. aprilli 1837 loetakse galvanoplastika sünnipäevaks. Samal aastal kutsuti Jacobi Peterburi sõjalaevale elektrimootori väljatöötajaks. Juba 25. septembril 1838 toimusid Neeval 12-liikmelise merepaadi katsetused, millel oli esimene rakenduslik elektriajam sõurattale. See oli 8-pooluseline mootor, mille staatoril ja rootoril oli 4 U-kujulist elektromagnetit. Mootor tegi 80…120 pööret minutis. Toideti galvaanielementidelt. Võimsus 15 W, kasutegur 13%. **1840. a lõppes Jacobi töö Tartu Ülikoolis. Lõppesid ka elektriala uuringud Eestis. Need taastusid 1857. aastal Peterburi–Tallinna raudteega elektrilise telegraafi ilmumisega. Elektrimootorite uurimine ja arendamine algas Eestis tehase „Volta“ asutamisega 1899. aastal ja on jätkunud tänaseni TTÜs.**

1838 – Ameerikas demonstreeris **Thomas Davenport** praktikas kõlblikku elektrimootorit.

1879 – inglise füüsik **W. Baily** tekitas seisva kahefaasilise induktoriga pöördmagnetvälja.

1882 – horvaatia-ameerika füüsik **Nikola Tesla** arendas sõltumata Ferrarisest vahelduvvooluelektrimasinas pöördmagnetvälja. Ta patentis nii kahe- kui ka kolmefaasilised mootorid ja generaatorid, olles selle valdkonna pioneeriks.

1885 – itaallane **Galileo Ferraris** tekitas kahe teineteise suhtes 90° nihutatud vahelduvvoolumähise abil pöördmagnetvälja, mille abil pani pöörlema vasksilindri.

1886 – USAs asutas **George Westinghouse** oma firma. 1885. aastal koos William Stanleyga täiustasid trafot, 1888. aastal ostis George Westinghouse N. Teslalt vahelduvvoolumootori ja generaatori patendi ning 1889. aastal alustas kasutuskõlbulike elektrimootorite tootmist.

1880ndate lõpul „sõda“ alalisvoolu (T. A. Edison) ja vahelduvvoolu (G. Westinghouse, N. Tesla) vahel. Edison püüdis igati võidelda vahelduvvoolu vastu, väites, et see on ohtlik. Kaugülekannete edu sundis Edisoni tunnistama oma kaotust.

1887 – sakslane **Friedrich August Haselwander** valmistas esimese täht- ja kolmnurklülituses väikese võimsusega kolmefaasilise seadme.

1888 – **Nikola Tesla** ja **Charles Breadley** patenteerisid Ameerikas asünkroonmootori ja mitmefaasilise süsteemi. Esimene suurem kasutamine Niagara Falls'i hüdroelektrijaamas.

1889 – poola-vene insener Saksamaal (**Michael von Dolivo-Dobrovolsky**) **Mikhail Ossipovitš Dolivo-Dobrovolsky** muutis Ferrarise ja Tesla kahefaasilise süsteemi kolmefaasiliseks. Ta konstrueeris ja ehitas esimese praktikas kasutuskõlbliku kolmefaasilise lühisrootoriga asünkroonmootori. 1888. a. kolmefaasilise generaatori. Intensiivselt tegeles ka kolmefaasilise elektriülekande loomisega;

1890 – intensiivne odavate, töökindlate, suure kasuteguriga vahelduvvoolumootorite kasutamise algus tööstuses ja muudes valdkondades.

1970 – **Aleksander Voldek (1911†1977), 1950...1961 TPI õppejõud, avaldas vedelmetalliga MHD induktsioonmasinate klassikaks kujunenud teooriaraamatu "Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом".**

Trafode areng

1831 – inglane **Michael Faraday**, uurides elektromagnetilist induktsiooni, kasutas katseseadmena (joonis L 1.5) esimest impulsstrafot – kahemähiselist toroidsüdamikuga trafot. Samaga tegeles sõltumatult **Joseph Henry** Ameerikas**.**

1836 – Iirimaal koostas füüsikaõpetaja **Nicholas Callan** katkestist ja trafost koosneva induktsioonpooli ehk sädeinduktori. Sellega sai alalisvoolu muuta kõrgepingeliseks vahelduvvooluks ja tekitada sädelahendusi. On süütepooli eelkäija.

1848 – saksa mehaaniku **G. Ruhmkorffi** poolt transformaatori loomine.

1876 – vene elektrotehnik Pariisis **Pavel Jablotškov** patenteeris esimese vahelduvvoolutrafo oma kaarlampide toite tarbeks. Trafol puudus suletud magnetahel, viimase moodustas traadikimp, mistõttu mujal kasutamist ei leidnud.

1878–1888 kasutas firma Ganz Budapestis induktsioonpoole oma VV-valgustussüsteemis. See oli esimene toroidikujulise trafo kasutus.

1882 – Lucien Gaulard ja **John Dixon Gibbs** valmistasid Londonis nn sekundaargeneraatori.

1883 – prantslane **Lucien Gaulard** ja inglane **John Gibbs** patenteerisid trafo.

1885 – Budapestis valmistasid elektriinsenerid **Max Déri, Otto Titus Plàthy** ja **Karoly Zipernovsky** suletud toroidaalse traatsüdamikuga trafo ja kasutasid vahelduvvoolu elektrivarustussüsteemi loomisel. Nende ZBD süsteem (joonis L 1.14b) on tänaste trafodega võrreldes ümberpööratud põhimõttel. Mähis 2 paigaldati mittemagnetilisele toroidsüdamikule ja mähise kohale ning alla paigaldati jämedast terastraadist kihid 1, mis moodustavad kaks lahtise magnetahela osa. Firma Ganz & Cie Budapestist tootis neid ja turustas üle maailma.

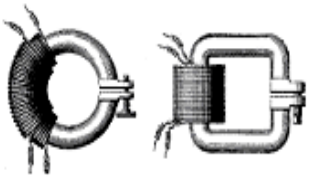
a)

b)

Joonis L 1.14. Karoly Zipernovsky, Otto Titus Plàthy ja Max Déri (a). 1885 a. valminud toroidsüdamikuga trafod (b)

1886 – USAs valmistas **William Stanley** E- ja I-kujulistest terasplekkidest koostatud südamiku, mis lihtsustas trafo ehitust (joonis L15a).

1889 – Saksamaal valmistas **Michael von Dolivo-Dobrovolsky** esimese kolmefaasilise trafo (joonis L 1.15b).

a) 

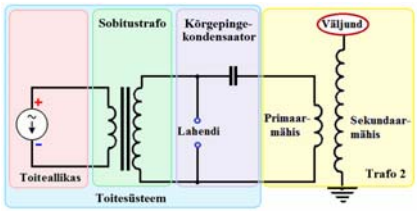
b)

Joonis L 1.15. Stanley ühe- (a) ja M. Dolivo-Dobrovolsky kolmefaasiline trafo (b)

1891 – **N. Tesla** leiutas kõrgsagedusliku kõrgepingetrafo.

TESLA TRAFO ehk TESLA POOL. Nikola Tesla patentis 1896. aastal oma leiutise USA patent nr. 56176 **„Seade kõrgsagedusvoolu ja potentsiaali tekitamiseks“**. See on sisuliselt resonantstrafo, mis muundab sisendtoitepinge kõrgsageduslikuks kõrgepingeks. Seda seadet on hakatud leiduri nime järgi kutsuma **Tesla trafoks** või **Tesla pooliks**. **Resonantstrafo** toimib sarnaselt kiigega. Kui kiigele hoogu anda, siis tekkib sundvõnkumine, mille suurim kõrvalekalle tasakaaluasendist (võnkeamplituud) on võrdeline hoo andmisel rakendatud välisjõuga. Kui kiigutada vabavõnkumise resonantstalitluses samaväärse välisjõuga kui sundvõnkumisel, siis võnkeamplituud kasvab mitu korda. Tesla trafo korral esineb kiigena sekundaarahela võnkering ja kiigutava välisjõuna primaarahela toitesüsteem. Kooskõlastatud kadude kompensatsioon toimub kiige puhul välisjõu rakendamisel täpsetel ajahetkedel ja trafo korral toitesüsteemist kadudega võrdse energiakoguse väljastamisel toitesüsteemist.

Lihtsa Tesla trafo kirjeldus. Joonisel L 1.16 on Tesla trafo lülitus, mis koosneb toitesüsteemist ja trafost 2.



Joonis L 1.16. Tesla trafo

Toitesüsteem koosneb toiteallikast, sobitustrafost, kõrgepingekondensaatorist ja lahendist. Trafo 2 koosneb primaarmähisest, sekundaarmähisest ja lõppväljundist. Primaarmähis koosneb vähestest jämedast traadist või vasktorust valmistatud mähisekeerdudest. Sekundaarmähis aga suurest arvust, näiteks 1000, väiksema läbimõõduga traadikeerdudest.

Primaarmähis võib olla tasapinnaline (horisontaalne), kooniline või silindriline (vertikaalne). Trafo on õhksüdamikuga, seega puudub ferromagnetsüdamik. Võrreldes tavatrafoga on mähiste magnetiline sidestus oluliselt nõrgem: tavatrafol *ca* 97%, Tesla trafol 10...20%. Primaarmähis koos kondensaatoriga moodustavad võnkeringi, kuhu on lülitatud mittelineaarse tunnusjoonega lahendi. Lahendiks võib olla kahest massiivsest ja reguleeritava vahekaugusega

elektroodist koosnev seade. Elektroodid peavad taluma elektrikaart ja neid läbivat suurt voolu. Neil peab olema tõhus jahutus. Ka sekundaarpoolel moodustub võnkering. Magnetvälja energia salvestiks on mähis ja elektrivälja energiasalvestiks keerdude ja ka lõppväljundi ja maa vaheline elektriväli, mida aseskeemis võime vaadelda kondensaatoritena. Et vältida sekundaarmähise keerdude vahelisi läbilööke, kaetakse nad isolatsioonikihiga. Et saavutada oodatavaid pikki sädelahendusi, võib lõppväljundi kujundada kettana, teravatipulise vardana või kerana.

Seega koosneb Tesla trafo kahest omavahel seotud võnkeringist, mis määrab tema imelise eripära tavatrafo suhtes. Selleks et trafo toimiks tõhusalt, peavad mõlemad võnkeringid olema häälestatud samale resonantssagedusele. Tavaliselt saavutatakse see primaarvõnkeringi häälestamisega sekundaarvõnkeringi resonantssagedusele. Selleks muudetakse primaarmähise keerdude arvu ja erineva mahtuvusega kondensaatorit. Võnkeringid on häälestatud, kui saavutatakse trafo maksimaalne väljundpinge. Lõppväljundisse kantav energiakogus on määratud kõrgepinge kondensaatorisse salvestatud energiaga, millest kadudena eraldub osa lahendis ja trafo mähistes. Oskuslikult kujundatud Tesla trafo korral ei ületa kaod 15%. Resonantsnähtuste oskusliku kasutamise tõttu ületab Tesla trafo pinge võimendus oluliselt tavatrafo oma. Primaar- ja sekundaarvõnkeringid häälestatakse tavaliselt sagedustele vahemikus 25kHz... 2MHz.

Tesla trafo töö. Joonisel L 1.16 kujutatud lihtne Tesla trafo toimib impulsstalituses. Esmatakti ajal toimub energiasalvestus kondensaatori elektrivälja, mil kondensaatori pinge kasvab lahendi läbilöögi pingeni. Teise takti ajal toimub kõrgsagedusvõnkumise genereerimine.

Kondensaatori laadimine. See toimub toiteallika ja pinget tõstva madalsagedusega sobitustrafo abil. Kui kasutatakse lahendit, mille sädevahemiku pikkust või kuju saab muuta, siis võetakse läbilöögipingeks tavaliselt 2...20 kV. Läbilöök toimub sõltumata pingelaine märgist „+“ või „–“, seetõttu puudub vajadus alaldi kasutamiseks. Nii kasutatakse 50 Hz sagedusega vahelduvtoitepinget.

Kõrgsagedusvõnkumiste genereerimine. Kui kondensaatori pinge kasvades saavutab potentsiaalide vahe sädelahendi elektroodide vahel kriitilise väärtuse, siis toimub laviinitaoline õhu läbilöök ning kondensaatori tühjakslaadimine läbi trafo primaarmähise. Kondensaatori tühjakslaadimise järel väheneb järsku vahemiku õhu ioniseerimise tõttu sädelahendi elektroodide vahel läbilöögipinge. Tänu sellele primaarvõnkering, mille moodustavad kondensaator ja primaarmähis, on läbi lahendi lühistatud ja algab kõrgsagedusvõnkeprotsess, kus kondensaator annab salvestatud energia mähisele ja vastupidi. Võnkeringi kadude tõttu lahendis ja sekundaarmähisesse ülekantava energia arvel hakkab protsess sumbuma. Võnked kestavad seni, kuni lahendi sädevahemiku läbib vool ehk võnkeringi pingeamplituud on piisav voolu alalhoidmiseks läbi lahendi. Sekundaarahelas tekkivad samuti resonantsvõnkumised, mistõttu trafo lõppväljundile rakendub kõrgsageduskõrgepinge. See resonantssagedusega pinge võib küündida mõne miljoni voldini ja õhus esile kutsuda muljetavaldavaid mitmemeetrilise pikkusega lahendusi. Joonisel L 1.17 on kaks näidet. Taolised saladuslikud nähtused paeluvad inimesi ja neid kasutatakse meeleolu loomiseks.

Tesla trafo erinevad lahendused. Tesla trafo kõikidel lahendustel jäävad põhielemendil trafol primaar- ja sekundaarahelad samaks. Küll aga kõrgsagedusvõngete generaatoril võivad olla erinevad tehnilised lahendused.

Joonis L 1.17. Toroidi- ja vardakujulise lõppväljundiga Tesla trafo lahendused

Elektervalgustuse areng

1700 – **Johann Bernoulli** valmistas torusid, mis sisaldasid elavhõbedat ja mille raputamisel tekkis elektroodideta huumlahendus.

1810 – sir **Humphry Davy** demonstreeris Londonis kaarleeklampi.

1835 – šotlane **James Bowman Lindsay** kirjeldas ebapiisavalt esimest elektrivalgustit.

1838…**1840** – mitmel maal katsetati hõõglampide valmistamist, kasutati plaatinahõõgniiti.

1842 – prantsuse mehaanik **L. J. Deleuil** valmistas esimese õhkkaarlambi.

1844 – prantslane **L. Foucoult** arendas välja esimese söeelektroodiga kaarlambi.

1845 – USAs patentis **J. W. Starr** elektrilambi õhuta klaaskolvis.

1855 – Prantsusmaal Lyonis paigaldati kaarlamptänavavalgustid; Prantsuse sõjavägi katsetas patareitoitega paraboolpeegliga helgiheitjat.

1858 – **H. Geissleri** lahendustoru – katseotstarbeline huumlamp (huumlahendusel toimiv lahenduslamp).

1876 – vene elektrotehnik **Pavel Nikolajevitš Jablotškov** leiutas regulaatorita vahelduvvoolukaarlambi (joonis L 1.18), nn Jablotškovi küünla, mille tootmist alustas ta Pariisis tänavavalgustuseks. Ta ehitas esimese vahelduvvoolujõutrafo.

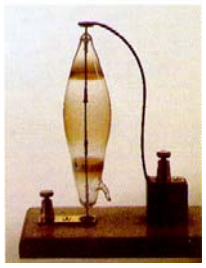
1878 – Inglismaal demonstreeris **Joseph Swan** oma algelist hõõglampi, millest oli õhk vaakumpumbaga eemaldatud (joonis L 1.19).

1878 – **Thomas Alva Edison** asutas Edison Elecric Light Co.

1879 – 10 kuud pärast J. Swani katsetas **Thomas Alva Edison** oma vaakumhõõglambi versiooni (joonis L 1.20). Lamp töötas 13,5 tundi. Edison alustas Ameerikas lampide tootmist 1. oktoobril 1880, Swan Inglismaal 1884. aasta alguses. 1891. a valmistas Edison filmikaamera eelkäija, mille ta patentis 1889.

Edison omandas alghariduse iseõppijana. 12-aastaselt läks tööle raudteele. Hiljem ajalehepoiss ja telegrafist. Esimene patent 1868. a USA kongressile valmistatud elektrilisele häältelugejale. Edasi elektrilised börsi kursinäitajad. 1870. a. 23-aastaselt asutas katsetöökoja. Sellest kasvas välja maailma suurim erauurimiskeskus. Patentide koguarv *ca* 1300.

Joonis L 1.18. P. N. Jablotškov ja tema küünal – kaarlamp



Joonis L 1.19. Joseph Swani lamp

Joonis L 1.20. Thomas Alva Edison 1847 † 1931
Kaks Edisoni hõõglampi ja dünamo

George Westinghouse 1846 † 1914

Suur osa Edisoni patentidest olid seotud tuntud lahenduste täiustamisega. Suurimad saavutused: süsiniidiga hõõglambi täiendamine laialdaseks kasutamiseks ning AV elektrienergia tootmise, edastamise ja jaotamissüsteemi loomine ning maailma esimese avaliku elektrijaama ehitus 1882. a New Yorgis. Edison alustas „sõda“ vahelduvvoolu kasutamise ja selle USAs rakendaja George Westinghouse'i vastu. Et näidata vahelduvvoolu kahjulikkust, tegi Edisoni firma katseid elusloomadega, ka Topsy-nimelise elevandiga. Loomad paigutati metallplaadile ning vahelduvvoolugeneraatori väljundklemmid ühendati plaadi ja looma külge. Need jõhkrad võtted ei aidanud. Vahelduvvool levis. Lõpuks oli

Edison sunnitud tunnistama oma suurimat viga. Edison oli üldse raske iseloomuga. 1983. aastast tähistatakse Edisoni sünnipäeva USAs rahvusliku leidurite päevana.

1879 – esimene hõõglampidega tänavavalgustuse demonstratsioon Ameerikas.

1881 – Godalmingi hüdroelektrijaam Inglismaal Siemensi seadmetega, mis toitis väikelinna tänavavalgustust.

1883 – Swan ja Edison ühendasid firmad ja tootmine jäi Inglismaale. Nad valmistasid üle 80 000 lambi (joonis L 1.19 ja L 1.20).

1893 – Ameerika insener **D. M. Moore** valmistas esimese valgustushuumlambi.

1907 – **H. J. Round** avastas elektroluminestsentsinähtuse Marconi laboratooriumis.

1908 – ameeriklane **William D. Coolidge** hakkas kasutama volframipulbrist pressitud hõõgniiti.

1910 – prantsuse füüsik **Georges Claude** demonstreeris Pariisis neoonhuumlampvalgustust.

1913 – ameeriklane **Irving Langmuir** hakkas katsetama lambi kolvi täitmist inertsgaasiga, algul lämmastiku, hiljem argooniga.

1927 – **Oleg V. Losev** esitles esimest valgusdioodi Venemaal.

1932 – arendati naatriumlambid.

1936 – prantsuse füüsik **G. Destriau** valmistas esimese elektroluminestsentslambi.

1947 – elavhõbeaurulamp.

1959 – USAs tulid kasutusele esimesed halogeenhõõglambid.

1962 – **Nick Holonyak Jr**. arendas välja nähtava punase spektriga valgusdioodi firmas General Electric Company USAs.

1968 – rahvusvaheline **Monsanto Company** alustas valgusdioodide masstootmist.

2006 – **Shuji Nakamura** (Nichia Korporatsioon) demonstreeris suure heledusega sinist leedlampi.

2009 – võib pidada leedlampidele ülemineku ja teiste lambiliikide väljatõrjumise alguseks.

Elektertranspordi areng

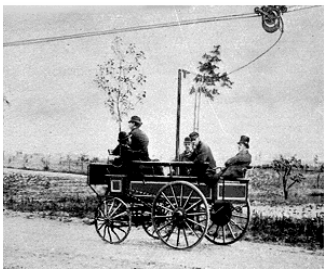
1839 – Ameerikas konstrueeris ja katsetas professor **Charles Page** esimest elektrilokomotiivi.

1874 – Inglismaal valmistas Sir **David Salomons** kolmerattalise elektriauto.

1879 – saksa insener **Werner von Siemens** ehitas väikese elektriraudtee.

1879 – asutati British Columbia Electric Railway.

1882 – Berliinis demonstreeris **W. von Siemens** trollibussi (joonis L 1.21).



Joonis L 1.21. Esimene õhukontaktvõrgust toidetav busstrollibuss Berliinis 1882. a

1890 – Londonis avatakse maailma esimene elektrimetroo, võeti kasutusele esimene avalik elektrilokomotiiv.

1894 – USAs elektrifitseeriti Baltimore–Ohio raudtee.

1905 – George Westinghouse valmistas USAs esimese ühefaasilise vahelduvvoolu elektrilokomobiili, mis pandi tööle East Pittsburghi raudteel.

2001 – USA firmalt Tesla Motors kaheistmeline sportelektriauto. Võimsus 250 kW. Maksimaalkiirus 250 km/h. Sõidukaugus ...400 km. Liitiumioonaku mahtuvus 45 kWh. Pinge 375 V.

2001 – USAs saavutas 62 000 päikesepatareiga mehitamata Helios katselennul kõrguse 22 800 meetrit.

8. juuli 2010 – päikesepatareidel töötav lennuk läbis edukalt 26tunnise reisi.

Elektroonika ja jõuelektroonika areng

1855 – prantsuse füüsik **Jean-Mothec Gaugain** (1811 † 1880) avastas elavhõbe-huumlahenduslambis ühesuunalise elektrijuhtivuse. Ta nimetas seda elektriliseks ventiiliks.

1860 – **Gaugain** uuris pooljuhtide elektrijuhtivust.

1892 – Berliini ülikooli füüsik **Leo Martin Aron** (1860†1919) leiutas elavhõbe-vaakumventiili.

1901 – USA insener **Peter Cooper Hewitt** leiutas elavhõbe-kaarlahendusventiili.

1904 – **John A. Fleming** valmistas vaakumtoru, mis lasi voolu läbi vaid ühes suunas.

1904 – **Lee de Forest** lisas kolmanda elektroodi, nimetas seda auditroniks (joonis L 1.22).

1910 – **Eugen Reiβ** ja **Siegmund Srauss** saavad patendi trioodvõimendile.

1925 – hakati kasutama seleenil, vaskoksiidil ja germaaniumil põhinevaid pooljuhtventiile.

1939 – **Henry Boot** ja **John Randall** leiutasid Inglismaal mikrolainekiirguri – magnetroni ja USAs **Russell** ja **Sigurd Vaziani** klüstroni (ülikõrgsageduslike elektrivõnkumiste tekitamiseks ja võimendamiseks).

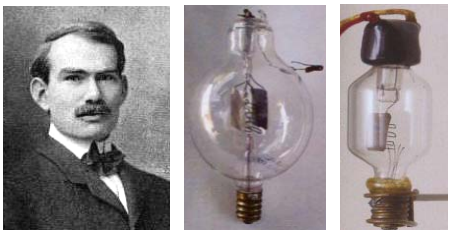
II maailmasõja ajal toimus elektroonikas kiire areng.

1947 – USAs avastasid **Walter Houser Brattain, John Bardeen** ja **William Shockley** transistori (joonis L 1.22);

1957 – USAs valmistasid firma General Electric teadurid **Gordon Hall** ja **Frank William Gutxwiller** esimesed tüüritavad räniventiilid-türistorid.

1958 – **Jack Kilby** Texas Instruments'ist leiutas integraallülitused.

1965 – esimene õnnestunud operatsioonvõimendi.

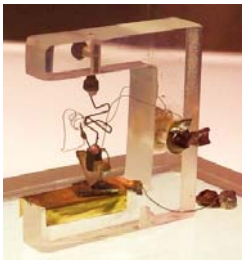


Lee de Forest. Auditron ja triood 1906. a

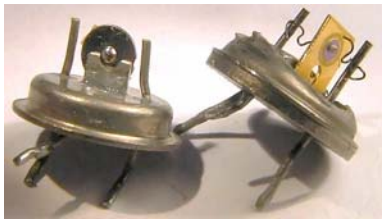
John Bardeen 1908 † 1991

William B. Shockley 1910 † 1989

Walter H. Brattain 1902 † 1987



Esimene transistor 1948. a



Transistorid arvutis 1960. a

Joonis L 1.22. Lee de Forest, John Bardeen, William B. Shockley, Walter H. Brattain ja nende leiutised

1971 – esimene mikroprotsessor.

1980 – kaabeltelevisioon.

1990 – interneti levik.

2000 – interneti jätkuv levik ja nanotehnoloogia esimesed sammud.

Elektrijaamad, ülekandeliinid ja elektrivarustus

1663 – Magdeburgi linnapea **Otto von Guericke** avastas elektrilaengu ülekandumise elektrijuhis – linases niidis.

1729 – Inglismaal kasutas füüsik **Stephen Gray** kanepinööri juhtmena ja siidinööri juhtme ülesriputamiseks isolaatorina elektrilaengu edastamiseks *ca* 25 meetri ja veidi hiljem *ca* 195 m kaugusele.

1774 – Saksamaal ehitas professor **Andreas Gordon** esimese raudjuhtmetega õhuliini.

1841 – Peterburis ehitas **Moritz Hermann Jacobi** telegraafi kaabelliini.

1870. aastatel hakati looma elektrilisi „kodu"- või plokkjaamu, mis varustasid üksikuid suuri objekte – vabrikud, tehased, ühiskondlikult kasutatavad hooned.

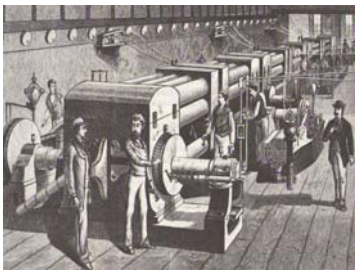
1873 – Pariisis ehitas **Zénobe Théophile Gramme** esimese elektrijaama oma tehase kaarlampvalgustite toiteks.

1879 – San Franciscos ehitas **Charles Francis Brush** esimese igale soovijale elektrit müüva 11 kW jaama.

1879 – USAs esimesed alalisvoolutoiteliinid elektrilampide jaoks.

1880 – prantslane **Marcel Deprez** kasutas akut elektrijaama koormus-kõikumise silumiseks.

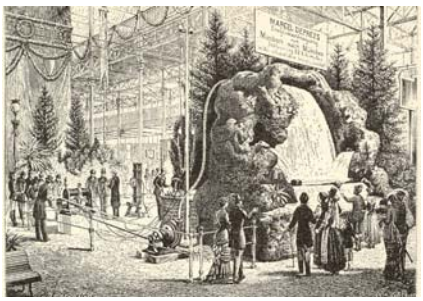
1881 – **Edisoni firma ehitas New Yorgis alalisvoolu-(AV)-elektrijaama (EJ)**, 1020 kW, pinge 110 V (joonis L 1.23). Algas pinge 110 V laiem kasutamine.



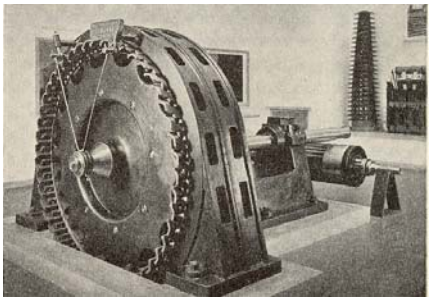
Joonis L 1.23. Edisoni AV-elektri-jaam

1881 – esimene üldkasutatav **Godalmingi hüdrojaam** Inglismaal (2 x 3 kW Siemensi seadmetega), mis toitis alalisvooluga väikelinna tänavavalgustust.

1882 – prantslane **Marcel Deprez** töötas välja esimese **elektrienergia kaugülekande alalisvooluliini** 57 km (Miesbach–München) pingega 2 kV, võimsusega 1,5 kW. Liin andis energiat elektrotehnika näitusele. Seal pani elektrimootor pöörlema tsentrifugaalpumba, mis toitis tehiskoske (joonis L 1.24). Liini kasutegur 22%;



Joonis L 1.24. Elektrotehnika näitus Münchenis 1882. a. Tehiskose tekitas pump, mille mootor sai toite esimeselt elektrienergia ülekandeliinilt Misbach–München pikkusega 57 km



Joonis L 1.25. Ülekandeliini Lauffen-Frankfurt toitev esimene generaator

Charles Eugen Lancelot Brown 1863 † 1924

1882 – **Eestis kasutati hüdrogeneraatori elektrit esmakordselt Kreenholmi Manufaktuuris ja Wiegandi tehases (hilisem „Ilmarine")**; Venemaa esimesed AV-elektrijaamad ehitati ja võeti kasutusele Peterburis (1883) ja Moskvas (1888).

1883 – Edison ehitas esimese oma AV-elektrijaama Euroopasse. USAs oli levik valdav.

1883 – Londoni metroos võeti kasutusele 5 trafoalajaama.

1885 – prantslane **Marcel Deprez** lülitas tööle 5,8 kV pingega alalisvooluliini pikkusega 50 km (vask-juhtmed läbimõõduga 5 mm) Creil–Pariis, mida toitis 40-hobujõuline aurumasin-generaator.

1885 – Budapesti tehase Ganz & Co elektriosakonna esindaja Viinis **Max Déri** esitas ettekande trafode kasutamise kohta vahelduvvooluvõrkudes.

1886 – USAs importis **George Westinghouse** Inglismaalt trafosid ja Siemensilt vahelduvvoolugeneraatori ning ehitas Pittsburghis vahelduvvooluvõrgu ning Great Barringtonis mitmeastmelise vahelduvvooluvõrgu (500/3000/100 V). G. Westinghouse asutas Electric Company. Ehitas 30 vahelduvvoolu valgustussüsteemi, koos insener Oliver Shallengeriga vahelduvvooluelektriarvesti (1888).

1888 – USAs ehitas leidur **C. F. Bruch esimese tuuleelektrijaama** võimsusega 12 kW akude laadimiseks. 144 labaga 17 m läbimõõduga puittiivik ja hammasülekanne.

1893 – valmis Kunda tsementitehase hüdroelektrijaam võimsusega 210 kW, mis oli sel ajal Vene impeeriumis suurim.

1897 – Taani õpetaja **Poul la Cour** (1846…1908) ehitas kahest tuuleveskitaolise ehitusega elektrituulikust *ca* 5 kW võimsusega tuuleelektrijaama, mida kasutas vesiniku tootmiseks vee elektrolüüsi teel. Vesinikku kasutas kooli gaasilampide täiteks.

1884 – inglise insener **Charles Algernon Parsons** leiutas auruturbiini.

1890 – **T. A. Edison** leiutas sulavkaitsmed, mõõteriistad ja elektrokeemilised elektriarvestid. 1881. a võttis New Yorgis kasutusele maa-aluse kaabli.

1890 – Londonis projekteeris **Sebastian Ziani de Ferranti** 3 MW elektrijaama (3 ühefaasilist 1000 kW, 85 Hz aurumasin-generaatorit. Pinge 10 kV).

1891 – Saksamaal tegi **Oskar von Miller** ettepaneku ehitada Lauffenist Frankfurti kolmefaasiline 175 km pikkune elektrienergia ülekandeliin pingele 15 kV võimsusega 200 kW, sagedusega 40 Hz. Selle ülekande tarbeks ehitas **Charles Brown**, firma Braun Boweri rajaja, esimese kolmefaasilise õliisolatsiooniga trafo. Ülekande kasutegur 75% (joonis L23). Kogu süsteemi projekteeris firma AEG peainsener **Michael von Dolivo-Dobrovolsky**. Süsteem läks käiku 24 augustil 1891 a. See oli vahelduvvoolu võidukäigu tegelik algus.

1892 – Šveitsis ühendati kaks elektrijaama rööptalitlusse.

1895 – Niagara kose kahe generaatoriga hüdroelektrijaam.

1897 – inglise-šveitsi insener **Charles Brown** töötas välja esimese õliisolatsiooniga võimsuslüliti.

1899 – esimese energiasüsteemi teke USAs Californias.

1900 – ehitati esimene 60 kV ülekandeliin.

1903 – Prantsusmaal ehitati kasutuskõlbulik gaasiturbiin.

1903 – asutati Taani tuuleelektri ühing ja see hoogustas tuulegeneraatorite kasutamist.

1904 – Kiievisse ehitas saksa firma MAN esimese diiselelektrijaama 6 x 300 kW = 1,8 MW.

1907 – **esimene üldkasutatav alalisvoolu elektrijaam Eestis Pärnus 100 kW, 2 x 220 V**.

1909 – Šveitsis ehitati 1500 kW võimsusega esimene pumpelektrijaam.

1910 – Saksamaal ehitati esimene energia ülekandeliin 100 kV (Lauchhammer, Riesa, Grüditz).

1912 – võimsaim generaator 35 MW ja kõrgeim ülekandeliini pinge 150 kV.

1918 – Taanis kokku 120 tuuleelektrijaama koguvõimsusega *ca* 3 MW.

1922 – Saksamaal võeti tuuleelektrijaamas kasutusele asünkroongeneraator.

1923 – Saksamaal esimene 220 kV ülekandeliin Ronsdorf–Letmathe.

1928 – USAs ühendati kolme osariigi energiasüsteemid ühendenergiasüsteemiks.

1939 – Eesti energiasüsteem.

1939 – Šveitsis maailma esimene gaasiturbiingeneraator 4 MW.

1952 – Rootsis võeti töösse esimene 380 kV elektriülekandeliin.

1954 – Rootsis töötas ASEA teadur **August Uno Lamm** välja alalisvooluülekandeliini tarbeks töökindlad elavhõbemuundurid. Need paigaldati esimesele alalisvoolumerekaabelliinile 100 kV, 30 MW.

1954 – NSV Liidus Obninskis võeti töösse esimene **aatomielektrijaam**.

1959 – NSV Liidus võeti töösse esimene 500 kV ülekandeliin.

1965 – Kanadas ehitati esimene 765 kV ülekandeliin.

Elektrienergia tarbijate arvu suurenemisel teravnesid üha enam vasturääkivused, mis olid seotud alalisvoolu kasutamisega. Linna keskel asuvaid elektrijaamu oli raske varustada kütuse ja veega ning nende varustamiseks vajalike maade maksumus oli liiga kallis. Oli ilmne, et ökonoomsem on rajada elektrijaamad kohtadesse, kus on kütuse leiukohad või veerikkad jõed.

Teoreetilised uurimused (**D. A. Latšinov** (1880) ja **M. Deprez** (1882)) näitasid, et elektrienergia ülekande ökonoomsus suurtele kaugustele kasvab pinge suurenemisel. Kuid selle aja tehnilised tingimused ei võimaldanud veel valmistada kõrgepingegeneraatoreid. Peamine raskus oli alalisvoolutrafo puudumises. Seepärast otsisid teadlased ja insenerid üha rohkem võimalusi vahelduvvoolu kasutamiseks tarbijate elektriga varustamisel.
Ka edasine elektroenergeetika ja elektrotehnika areng näitas, et reas tööstuslikes tootmisharudes on otstarbekam alalisvooluenergia kasutamine. Nendeks on elektrotehnoloogia ja osaliselt elektrokeemia seadmed. Alalisvoolumasinate head töökarakteristikud kindlustasid neile pikaks perioodiks laialdase kasutuse transpordis ja spetsialiseeritud elektriajamis. Paljudes tehnikaharudes kasutatakse erineva võimsusega alalispingeallikaid. Pinge suurenemise ja elektri ülekandeliinide levikuga määrati ökonoomne otstarbekus ja alalisvoolu kõrgepinge elektriülekande töökindlus. Esmakordselt osutas sellele **1918** – **M. O. Dolivo-Dobrovolsky** oma ettekandes „Vahelduvvoolu kasutamise piirid energia ülekandeks suurtele kaugustele“. Tänapäeval kasutatakse mõlemat ülekandeviisi. Siiani on enam levinud vahelduvvooluülekanded, kuid suund on ka alalisvoolu osatähtsuse suurenemisel.

1972 – algas türistoride kasutamine alalisvooluülekandeliinides.

1977 – Prantsusmaa Püreneedes võeti töösse 64 kW võimsusega **päikeseelektrijaam**. Päikesekiirgus suunati päikese suunda jälgivalt 2500 m^2 suuruselt paraboolpeeglilt aurugeneraatorile, sealt salvestisse ja auruturbiini.

1977 – USAs valmis fotoelektriline päikeseelektrijaam.

1979 – Iisraelis valmis Surnumere lähedal esimene 150 kW võimsusega päikesetiik-elektrijaam.

1980 – seoses kütusehindade kallinemisega aktiviseerub tuuleenergeetika. Esimene tuulepark USAs.

1981 – USAs võeti töösse 10 MW päikeseelektrijaam, mille aktiivelementide kogupindala oli 72500 m^2.

1984 – Prantsusmaal paigaldati võimsaim ühevõlliline auruturbiin-generaator-agregaat 1382 MW.

1986…1990 – Saaremaal Vätta külas katsetati NSV Liidus valmistatud 4…30 kW tuuleagregaate. 1989. a Vätta tuulejaama koguvõimsus oli 346 kW.

1993 – algab reguleeritava kiirusega tuuleturbiinide tootmine USAs.

1995 – Hiiumaal Tahkunas lülitati võrku 150 kW tuuleagregaat.

2000 – algas jõutransistoride kasutamine alalisvooluülekandeliinides.

2001 – Kopenhaagenis võeti katsetalitlusse ülijuhtiv kaabelliin 30 kV, 2 kA, pikkus 30 m.

2006 – Saksamaal Pockingis ehitati 10 MW fotoelektriline päikeseelektrijaam.

2008 – Hispaanias Granada provintsis valmib 100 MW rennpeegel-päikeseelektrijaam.

2009 – Portugalis on Moura linna lähedal kavas töösse lülitada 62 MW fotoelektriline päikeseelektrijaam.

2010 – peaks USAs valmima 500 MW pöördparaboloidpeeglitega (20 000 tk, läbimõõt 12 m) päikese-elektrijaam.

Maailma suurimad elektrijaamad

1. **Sanxia** (Hiina). Koguvõimsus **22,5** GW; 32 generaatorit à 700 MW (joonis L 1.26);

Joonis L 1.26. Vaated kolmele suurimale: Sanxia, Itaipu ja Guri hüdroelektrijaamadele

2. **Itaipu** (Brasiilia – Paraguay) – 20 x 0,7 = **14** GW (joonis L 1.26);

3. **Guri** (Venezuela) – 10,2 GW (joonis L 1.26);

4. **Tucurui** (Brasiilia) – 8,4 GW;

5. **Kashiwasaki – Kariwa** (Jaapan) Tuumajaam – 8,2 GW;

6. **Le Grande** (Kanada) – 7,3GW;

7. **Sajaani-Šušenskoje** (Venemaa) – 7,2 GW;

8. **Grand Coulee** (USA) – 6,8 GW;

9. **Longtan** (Hiina) – 6,4;

9. **Krasnojarsk** (Venemaa), **Zaporižžja** (Ukraina) tuumajaam – 6,0 GW;

10. **Bruce** (Kanada) – 5,6 GW;

2014. a alustatakse ja 2025 lõpetatakse suurima **39 GW** hüdroelektrijaama ehitust Kongos **Ingas**.

Eesti elektrijaamad

1882 – Tallinnas **F. Wiegandi tehases** (hilisem Ilmarine) ja Narva Kreenholmi Manufaktuuris valgustuseks esimesed generaatorid.

1885 – Tallinnas Drümpelmanni metallitehases 3 kW ja Narva Kreenholmi 5 kW generaatorit.

1893 – **Kunda tsementitehases** esimene tööstuslik elektrijaam koguvõimsusega *ca* 200 kW.

1899 – Tallinnas Dvigateli tehases esimene vahelduvvoolugeneraator 450 kW.

1903 – Tallinnas Vene tn 29 esimene eraettevõttena elektrijaam, müüs tarbijatele voolu loa alusel.

1907 – **Pärnus Eesti esimene suurem üldkasutatav elektrijaam** 110 kW võimsusega (joonis L 1.27).

Joonis L 1.27. Pärnu elektrijaam 1929. a

1909 – Tallinnas esimene suurem elektrijaam. Omanik I. Behrens. Võimsus 13 kW, alalispinge 110 V.

1910 – Tartus Soodla tänavas 124 kW elektrijaam. Nelja generaatorit käitasid 2 lokomobiili (50 ja 100 hj).

1913 – 24. märtsil lülitati tööle Tallinna elektrijaam. 3 kV kaablivõrk *ca* 9 km, madalpingekaablid 9,8 km. Trafokioskeid 24. Võimsus 525 kVA. Jaama elektriline osa ja generaatorid Voltalt. Kuuel suuremal tehasel oli oma elektrijaam.

1923 – Ulila elektrijaam 1000 kW. 15 kV liin Ulila–Tartu.

1923 – **Ellamaa elektrijaam** 1400 kW. 15 kV liin Haapsallu ja 35 kV Tallinna.

1925 – Tallinnas avatakse elektritrammi liiklus.

1930 – Eesti Rahvuslik Jõukomitee koostab Eesti elektrifitseerimise kava (Narva hüdrojaam ja Kohtla põlevkivijaam ja 110 kV liinide ehitus).

1926...1931 – ehitati elektrijaamad Tõrvas, Jõgeval, Mustvees, Suure-Jaanis, Paldiskis.

1931 – Narva Hüdroelektrijaam 3,5 MW ja 55 kV ülekandeliin ja 1937 Püssi elektrijaam 3,8 MW.

1939 – Eesti energiasüsteem.

1955 – Ahtme–Narva–Leningradi 110 kV liiniga lülitati Eesti ja Leningradi energiasüsteemid rööptalitlusse.

1960 – (11. november) lülitatakse Balti elektrijaam–Riia 470 km pikkune 330 kV liin tööle pingele 220 kV, mis ühendab Eesti–Läti–Leningradi süsteemid rööptalitlusse.

2006 – lülitati sisse Eesti–Soome alalisvooluühendus EstLink 1 (kahest ühesoonelisest kaablist koosnev merekaabelliin (350 MW, 150 kV, pikkus 105 km).

2014 – lülitati sisse Eesti-Soome alalisvooluühendus EstLink 2 (± 450 kV; 650 MW; 14 km õhuliini Soomes, 145 km merekaablit Soome lahe põhjas ja 12 km maakaablit Eestis).

Elektrotermia areng

1742 – saksa füüsik **G. M. Bose** kirjeldas esimest elektrotermia nähtust – püssirohu süütamist elektrisädemega.

1800 – inglise füüsikud **Anthony Carlisle** ja **William Nicholson** lahustasid elektrolüüsi abil vee vesinikuks ja hapnikuks.

1801 – Inglismaal uuris **H. Davy** elektrikaart.

1802 – vene füüsik **Vassili Vladimirovitš Petrov** ehitas 4200 elemendist koosneva 12 meetri pikkuse nn Volta samba, mille abil uuris ta elektrilahendust vaakumis, voolu keemilist toimet ja luminestsentsi ning avastas elektrikaarlahenduse, mis võib sulatada metalle ja muundada neid oksiidideks. 1803. aastal kirjeldas ta neid katseid põhjalikult raamatus „Известие о гальвани-вольтовских опытах посредством огромной батареи, состоявшей иногда из 4200 медных и цинковых кружков“ (Санкт-Петербург, 1803).

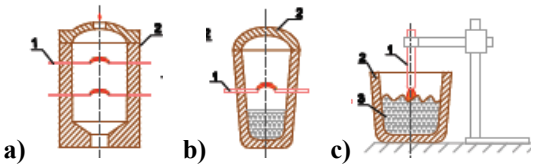
1803 – rootsi keemik **Jöns Jacob Berzelius** eraldas elektrolüüsiga soolalahustest puhtaid metalle.

1810 – Inglismaal **H. Davy** tegi sarnaseid uuringuid ja kirjutas raamatu.

1849 – prantslane **Marcel Deprez** (1843–1918). Tema ahjus põles kaar väikese utmiskambri seina ja kambrisse paigutatud elektroodi vahel.

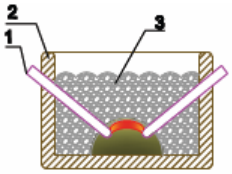
1853 – anti välja esimesed patendid metallisulatusahjudele elektrikaare abil. Pischoni ahjul (joonis L 1.28) oli kaks paari horisontaalseid elektroode, mille vahele tekitati kaar, et sulatada maaki või metalli.

1878...**1880** – saksa-inglise ettevõtja **William Siemens** ehitas mitu erinevat laboratoorset elektriahju ja 1883. a terasesulatuskaarahju.

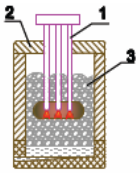


Joonis L 1.28. Kaudse toimega Pischoni (a) ja Siemensi (b) kaarleekahi ning otsetoimega Siemensi kaarleekahi (c)

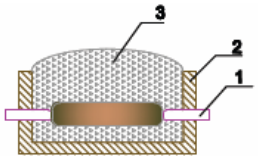
1886–1888 – tööstuses Cowles´i ja Eru ahi, milles saadi alumiiniumoksiidist ferroalumiiniumi või alumiiniumpronksi (joonised L 1.29 ja L 1.30).



Joonis L 1.29. Cowles'i alumiiniumi tootmise ahi : 1 – elektrood, 2 – ahju vann, 3 – täitematerjal



Joonis L 1.30. Eru alumiiniumi tootmise ahi: 1 – elektrood, 2 – ahju kere, 3 – täitematerjal



Joonis L 1.31. Achesoni karborundi tootmise ahi: 1 – elektrood, 2 – ahju kere, 3 – täitematerjal

Cowles'i ahjudes (joonis L 1.29) eraldus soojus, kui vool läbis täitematerjali. Täite sulamisel toimus samaaegselt ka elektrolüüs, mille läbi alumiiniumoksiidist eraldus alumiinium. Ahi sai toidet 300 kW generaatorilt pingel 60 V vooluga 6 kA. Eru ahjus (joonis L 1.30) kulges vool riputatud elektroodidelt läbi täitematerjali ahju põhja, mis oli seestpoolt vooderdatud söeplokkidega. Kõigepealt sulatati ahjus vaske, kuhu hiljem lasti sisse alumiiniumoksiidi ja nii sai ahjus alata elektrolüüs.

1889 – Šveitsis paigaldati hotellis Bernina elektriahi.

1890 – vene insener **Nikolai Slavjanov** (1854–1897) kasutas esimesena kaarkeevitust.

1892 – **Acheson** töötas välja tehnoloogia karborundi tootmiseks otsese toimega elektriahjus (joonis L 1.31). Ahi töötas nagu takistusahi. Vool läbis täidet 3 kahe elektroodi 1 vahel ja kuumutas seda karborundi tootmiseks vajaliku 1800 °C.

1892 – **Henri Moissan** (1832–1907) sulatas väikeses kaarahjus esimesena kaltsiumkarbiidi.

Üle-eelmise sajandi lõpul ilmusid esimesed Eru tööstuslikud otsetoime ahjud. **Stassano** ehitas esimese šahttüüpi elektrikõrgahju maagist malmi tootmiseks. **Acheson** töötas välja meetodi grafiitelektroodide tootmiseks takistusahjudes. Sel ajal jõudsid tööstusse ka kaltsiumkarbiidi ja ferrosulamite valmistamine šahtkaarahjudes.

1892 – Kanadas arendas **T. Wilson** kaltsiumkarbiidi tootmise ahju.

1899 – Rootsis ehitas **Frederik Adolf Kjellin** esimese raudsüdamikuga induktsioonahju.

Olme elektriseadmed. Tööriistad. Tootmisvahendid

1842 – inglise tööstur **John Stephen Woolrich** paigaldas aurumasinast ja alalisvoolugeneraatorist süsteemi elektrolüüsivanni toiteks.

1872 – vene elektrotehnik **V. N. Tšikolev** konstrueeris elektrifitseeritud tööpingi – elektriajamiga õmblusmasina.

1886 – **Elihu Thomson** patenteeris Ameerikas kontaktkeevitusaparaadi.

1895 – Saksamaal arendas **Wilhelm Fein** välja elektritrelli.

1907 – USAs valmistati tolmuimeja ja elektriline pesumasin.

1911 – USAs valmistas **W. Carrier** õhukonditsioneeri.

1928 – USAs ehitasid kapten **Rickards** ja **A. H. Refell** esimese toimiva roboti.

1953 – USAs Raytheoni tootmiskompaniis patentis insener **Percy Spencer** mikrolaineahju, mida olid uurinud Birminghami Ülikoolis kaks inglast.

Joonis L 1.32. Robot

1958 – USAs valmistasid **G. C. Devol** ja **J. Engelberger** esimese tööstusroboti.

1961 – USAs paigaldas firma General Motors tööstusroboti elektrilise külmutus-aparaadi tootmisliinile

1967 – Jaapanis õnnestus tööstusrobot tööle panna 1970. a Saksamaal.

1976 – Jaapani Waseda Ülikoolis valmis esimene osaliselt toimiv inimroboti prototüüp.

1996 – Jaapani firma Honda esitles esimest toimivat inimrobotit.

2004 – robotid põhiliselt kolmel maal: Jaapanis 356 000, 2004. aastal lisandus 37 000; Saksamaal 121 000, lisandus 13 000; USAs 115 000, lisandus 12 000. Järgneb Itaalia 53 000 robotiga.

Traadita telegraafi ja raadioringhäälingu teke

Raadioside leiutamine. Raadio leiutamisel võib eristada kolme samaaegset rööparengut: elektromagnetlained, traadita side ja raadioringhääling ning selle kasutamine. Sisuliselt on see elektrienergia ülekanne allikalt tarbijale, kusjuures nendevaheliste ühendusjuhtmete rolli täidab allika ja tarbija vaheline keskkond – **eeter**,* mille olemust pole tänaseni suudetud lahti mõtestada. Kuni ei suudetud üle kanda häält ja kõne, siis nimetati raadiosidet traadita telegraafiks. Sõna **raadio** pärineb ladina keelest (*radio* „kiirgan“). Selle all mõeldakse raadiovastuvõtja (ringhäälinguvastuvõtja), ringhäälingu ja raadioside nimetust. Mõeldakse raadiolainete abil informatsiooni juhtmeteta edastamise ja vastuvõtmise meetodit. Põhineb asjaolul, et kui ruumis vabalt asuvat elektrijuhti (saateantenni) läbib kõrgsageduslik vahelduvvool, siis kiirgab juht ruumi (nn eetrisse) sama sagedusega elektromagnetlainete kiirgusenergiat. Need indutseerivad igas elektrijuhis (ka vastuvõtuantennis) sama sagedusega sekundaarse kõrgsagedusliku allika, mille sisepinge on võrdeline saateantenni võimsusega ning pöördvõrdeline saate- ja vastuvõtuantenni vahelise kauguse ruuduga. Seega koosneb raadiosüsteem üldjuhul kõrgsagedusliku vahelduvvooluallikast – raadiosaatjast; elektromagnetlaineid kiirgavast elektrijuhtmest – saateantennist; ruumist, milles elektrienergiat edasikandvad elektromagnetlained levivad (eetrist); tarbijaks olevast elektrijuhist, millega ahelduv ajas muutuv laengute energiaväli tekitab elektriallika – vastu-võtuantennist; raadiovastuvõtjast, mis lisaelektriallika abil võimendab ja muundab antenni allikapinge helisignaaliks. Kogu süsteem tugineb energia juhtmevabal ülekandel, sel alal on tänaseni suurkujuks **Nikola Tesla.**

Raadioside kolme samaaegse arengu tõttu on erinevates keeleruumides hinnatud raadio leiutamist erinevalt. Suurimat tähelepanu on pälvinud **Marconi** ja **Popov**, tahaplaanile on jäänud terminoloogia segaduse ja füüsikalise protsessi keerukuse tõttu **Heinrich R. Hertzi** ja **Nikola Tesla** tööd. Raadioside sisu on saatja elektriallika energia ülekandmine tarbijasse (vastuvõtjasse). Ülekande elektrijuhiks on **allika ja tarbija vaheline keskkond – eeter***, mis on oma omadustelt dielektrik. Pärast A. Einsteini relatiivsusteooria loomist on eetri mõistest püütud loobuda. Eetri eitamine on pidurdanud juhtmeteta energiaülekande arengut, õhu ja vaakumi olemuse lahtimõtestamist ja ka raadiotehnika arengu suurkujude töödele objektiivse hinnangu andmist. Rakenduslik ja äriline pool (G. Marconi) varjutab füüsikalise olemuse poole (energia kiirgamine keskkonda ja seal paiknevates juhtivates keskkondades, tarbijates – antennides, nendeni laengute energiaosa muundamine antennis tasakaalustavaks allikaenergiaks ning viimase kasutamine vastuvõtjas) (H. Hertz 1886, Nikola Tesla 1893, E. Branly 1890, O. Lodge 1894, A. Popov).

1873 – inglane **J. C. Maxwell** ennustas pärast **M. Faraday** elektromagnetiliste protsesside ja valgusnähtuste vaheliste seoste avastamist oma võrranditega elektromagnetlainete olemasolu. Seejärel koostas ta matemaatilise

---

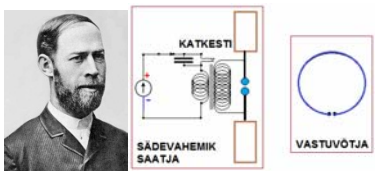
* **eeter** – (kr k) kõrgem, puhas õhk, füüsikas hüpoteetiline universaalne keskkond, mille abil klassikalises füüsikas selgitati valguse ja elektromagnetlainete levikut. Alul eeldati mitut liiki eetri olemasolu. Maxwelli-Lorentzi elektrodünaamika alusel on eeter ühtne kõigi elektromagnetlainete kandja. 20. sajandi alul eitas relatiivsusteooria eetri olemasolu [ENE 2, 1987]. Ilma eetri mudelita pole siiski võimalik elektromagnetlainete levi olemust lahti mõtestada.

teooria elektromagnetiliste protsesside lainekujulisest levimisest, mille ta avaldas 1873. aastal. Selle teooria järgi on valguslained oma iseloomult elektromagnetilised lained.

1876 – Inglismaal leiutas prof **D. E. Hughes** mikrofoni ja 1878. a demonstreeris selle tööd.

1880 – Ameerikas taasavastas **T. A. Edison** ühesuunalise juhtivuse vaakumis kuumutatava traadi ja metallplaadi vahel.

1886 – Saksamaal tõestas **H. Hertz** elektromagnetlainete olemasolu. Tal õnnestus luua esimene saatja ja vastuvõtja ning kanda elektromagnetlaineid üle saatjast vastuvõtjani (joonis L 1.33). Ta tõestas katseliselt, et Maxwellil on õigus: silmale nähtamatud elektromagnetlained on olemas, kuid tema arvates pole neil praktikas erilisi rakendusvõimalusi. **Ta esitles I traadita energiaülekannet.**



Joonis L 1.33. H. Hertz ja tema katseseade

Jooniselt L 1.33 näeme, et Hertzi katseseade on sisuliselt õhksüdamikuga trafo, mille primaarahelaks on dipoolantenn, mida toidetakse vibraatori kõrgsagedusvooluga, mille käivitab sädelahendus. Vastuvõtjaks oli sädevahemikuga raam või juhtmekeerd, millega aheldub sädelahendusvoolu laengute kiirelt muutuv energiaväli (magnetväli), mis saatja ja vastuvõtja väikese vahekauguse korral indutseerib sinna piisava suurusega potentsiaalide vahe. Viimane on suurem õhu elektrilisest tugevusest. Nii tekkis ka seal sädelahendus, mida Hertz registreeris. Suurema vahekauguse korral tekitasid vastuvõtjal muutuva aheldusvoo dipoolantennilt kiirgunud elektromagnetlained. Elektromagnetlainete allikal nn Hertzi vibraatoril on sädelahenduse tekitamiseks sirgjuhtme keskel oleva õhuvahemik, avatud võnkeringi mahtuvus ja induktiivsus väikesed ja omavõnkesagedus suur 100 MHz…1 GHz.

1886 – publitseeris **H. Hertz** katsetulemused ja dipoolantenni suunadiagrammi, luues antenniteooria alused.

1889 – Kroonlinna ohvitseride miiniklasside õppejõud **A. S. Popov** kordas Hertzi katseid ja avaldas loengusarjas „Valgus- ja elektrinähtuste seoste uusimad uurimused“ arvamust, et elektromagnetlaineid võib tulevikus kasutada traadituks signaalide üleandmiseks suurte vahemaade taha.

1890 – prantslane **E. Branly** (1844 † 1940) leiutas metallipuruga täidetud torukese – koheereri (metallipulbri tihendamisseadme – raadio teel juhitava takistusega juhtme. Klaastorus, mille kahe elektroodi vahel oli rauapuru, vähenes rauapuru takistus, kui kusagil tekitati elektrisäde. Sädet tekitati toru lähedal ja kaugemal. Tulemus oli sama. Rauapuru takistus taastus, kui klaastoru vastu koputati). E. Branly kasutas koos toiteallika ja galvanomeetriga. Valgustäpi kõrvalekalle fikseeris elektromagnetlainete vastuvõtu.

A. S. Popov esines 22.03.1890 meremuuseumis loenguga “Elektrivõnkumistest Hertzi katsete kordamisega“.

1891 – Nikola Tesla sai USA patendi 447 920, milles vahelduvvoolugeneraatori sagedus oli *ca* 10 kHz. Avalikul loengul esitles ja kirjeldas raadioside katseseadet.

1892 – Nikola Tesla pidas 3. märtsil Briti elektriinseneride instituudis Londonis ja ka Pariisis sensatsioonilise loengu „Suure potentsiaali ja suure sagedusega vahelduvvoolu katsed“.

1893 – **N. Tesla** esitleb St Louisis *ca* 6000 pealtvaatajale traadita elektrienergia, sisuliselt ka raadiolainete ülekannet. Ta leiutas mastantenni. N. Tesla, esinedes Franklini instituudis Philadelphias ja Elektervalguse Rahvuslikus Liidus, demonstreeris ja kirjeldas üksikasjalikult oma ülekande tööpõhimõtteid.

1894 – ilmub raamat „Nikola Tesla tööd, uuringud ja avastused“. See tõlgitakse kiirelt saksa ja serbia keelde. Inglise füüsik **Oliver Lodge** (1851†1940) demonstreeris elektromagnetlainete vastuvõttu 36,6 m kaugusel Hertzi vibraatorist. Vastuvõtjaks oli E. Branly koheereriga elektromagnetlainete registreerimisriist, mis koosnes toiteallikast, releest, galvanomeetrist ja raadio teel juhitava voolujuhi Hertzi lainete tundlikkuse perioodiliseks taastamiseks elektrikellast või haaratsiga haamrikesest. O. Lodge’i elektromagnetlainete mõjul rakendunud vastuvõtja – koheerer, sulges 36,6 m kaugusel alalisvooluahela.

1895 – **A. S. Popov** kordas aasta alul O. Lodge’i katseid. Ta täiustas saatjal ja vastuvõtjal Tesla leiutatud mastantenne ning Lodge’i vastuvõtjat. Popov täiendas vastuvõtjat nii, et metallipuru side lõhutakse automaatselt iga

signaali vastuvõtu järel. Teisel katsel ühildas Popov vastuvõtja registreeriva riista nädalaks üleskeeratava kellamehhanismiga trumliga, mida kasutas suvel ja sügisel Peterburi metsainstituudis äikeselahenduste registreerimiseks. Popov järeldas, et süsteemi täiustades ja piisava energiaga kõrgsagedusvõngete allikat kasutades saab signaale kaugele kanda. Märtsis sooritas **A. S. Popov** oma abilise **P. N. Rõbkiniga** raadioside katseid Kroonlinna reidil, saavutades sideulatuseks kuni 640 meetrit. Sügisel loodi laevade „Aafrika" ja „Euroopa" vahel 5 km ulatusega side. 7. mail demonstreeris **A. S. Popov** Vene Keemia Seltsi füüsikaosakonna istungil oma raadiosignaalide vastuvõtuaparaati, mille kirjeldus ilmus seltsi ajakirja 1896. a jaanuarikuu numbris. Ettekande teema oli „Metallipulbrite suhtest elektrivõnkumistega".

Itaalias tekkis **Guglielmo Marconil**, kellel olid lütseumis õpiraskused, suur huvi elektromagnetlainete alaste tööde vastu. Ta pöördus Bologna Ülikooli prof **Augusto Righti** poole, kes oli täiustanud Hertzi saatjat, pannes induktsioonpooli sädevahemiku õlisse. Right õpetas Marconit katseid läbi viima ja tutvustas talle varasemaid töid. Marconi katsetas süsteemi, kus elektrivõnkumiste generaatori üks klemm ühendati maandatud plaadiga, teine 12 meetri kõrguse antenniga ning vastuvõtja oli *ca* 1,5 km kaugusel saatjast. Katse andis positiivse tulemuse. Aasta lõpuks saavutas ta toimekauguseks *ca* 3400 m.

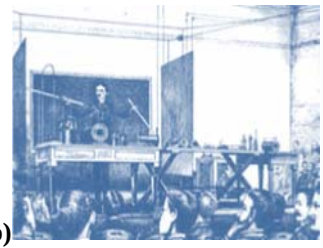
1896 – 24. märtsil edastas **A. S. Popov esimesena** 250 m kaugusele ühest sõnast koosneva raadiogrammi „Герц". Aasta lõpul saavutas **Nikola Tesla** raadiosignaali ülekande 48 km kaugusele. **G. Marconit** Itaalias ei toetatud. Ta kolis Inglismaale. Kasutades seal Popovi eeskujul koostatud „elektrivõnkumiste väljastamise ja registreerimise seadet", andis ta 2. 06. 1896. a sellele patenditaotluse. Seadet demonstreeris ta raadiolainetega morsetähestiku ülekandel Londoni postimaja katuselt 1,5 km kaugusele teise maja katusele. Katsetest huvitus mainekas füüsik **William Preece**, kelle käe all jätkas Marconi uuringuid.

1897 – **A. S. Popov** edastas kalurite päästmiseks 44 km kaugusele raadiogrammi ja 27 kalurit päästeti. Samal aastal saatis **G. Marconi** Inglismaal 6 km kaugusele üle mere raadiogrammi „Are you ready" ja sai patendi nr 12039 ning asutas Londonis Marconi Traadita Telegraafi kompanii. **W. Preece** tutvustas Marconi tööd kahe loenguga: „Juhtmeteta telegraaf" ja „Juhtmeteta signaali edastamine läbi ilmaruumi". Novembris ehitas **G. Marconi** sidepidamiseks esimese paikse saatejaama mandrilt 23 km kaugusel asuvale Wighti saarele. Popov ja ta austajad süüdistasid ajalehtedes Marconit, et patendis oleval riistal on sama ehitus ja tööpõhimõte, mille valmistas Popov 1895 a. Marconi kasutas saatjana Right'i täiendusega Hertzi generaatorit, vastuvõtjana tuntud lahendust – Popovi oma, millele Marconi lisas koheereri klemmidele kaks induktiivpooli L1 ja L2 elementi tundlikkuse suurendamiseks ja stabiilsuse tõstmiseks. O. Lodge vastuvõtjat kasutasid mõlemad.

1898 – 8. novembril esitles **Tesla** Madison Square Gardeni näitusel puldiga raadio teel juhitavat paati (USA Patent 613 809, joonis L 1.34). Süsteem koosnes saatjast, resonantsvastuvõtjast ja loogikaventiilidest. Seda võib lugeda maailma esimeseks traadita tehnoloogia patendiks.

Marconi tegi edukad traadita side katsed Iirimaal, Ballycastle'i ja Rathlini saare vahel.

1899 – **Tesla** esitles Chicagos laeva, mis suutis sukelduda. Suvel avastasid **A. S. Popov, P. N. Rõbkin** ja **D. C. Troitski** raadiosignaalide vastuvõtu võimaluse telefoni teel, st kuulmise abil. Selgus, et ebapiisava enegriatiheduse korral koheerer ei ergastu ja sel ilmnevad pooljuhi e detektori omadused, mis muundab amplituudmodulatsiooniga kõrgsagedussignaali madalsageduslikuks. Seejärel kõrvaldas Popov vastuvõtjast koheereri raputi ja asendas tundlikud releed telefonitorudega ning taotles Venemaa, Inglismaa, Saksamaa ja Prantsusmaa patenti Morse süsteemis elektromagnetiliste lainete vastuvõtuks. Patendid väljastati 1901. a. Saksamaa keeldus viisakalt. Augustis-septembris toimusid sidealased katsed Musta mere laevastiku laevade vahel. Saavutati sideulatus 22 km. **G. Marconi** teostab traadita side üle **La Manche'i** väina Suurbritannia (Lõuna-Forelandi majaka saar) ja Prantsusmaa (Wimereux) vahel (kaugus *ca* 35 km) ja esitleb sidesüsteemi USAs. Laevasõidul USAsse saadakse 66 meremiili kaugusel ühendus Inglismaa rannikuga.

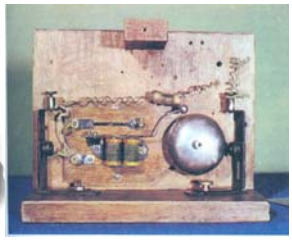
a) b)  c)

Joonis L 1.34. Nikola Tesla serbia rahvariides (a); raadioside esitlus 1891 a (b); raadio teel juhitav paat ja selle esitlus Madison Square Gardeni näitusel (c) 1898. a

1900 – **N. Tesla** sai teise patendi "Elektrienergia ülekandesüsteem" US645576 traadita elektrienergia ülekande-tehnoloogiale. Ta põhieesmärk oli üle kanda energiat valgustile. Kuu aega hiljem registreeris Guglielmo Marconi patendi traadita telegraafile. Marconi eeldab, et on võimalik transatlantiline traadita side Põhja-Ameerika ja Euroopa vahel. **A. S. Popov** teostab esimese raadioside Kotka ja Suursaare vahel, mille vahemaa on 46 kilomeetrit.

Edasisele raadioside arengule osutasid suure teene Marconi puudulikud teadmised. Ta uskus, et elektromagnetlained võivad pea kadudeta läbida vett ja maad. See võimaldas tal uskuda, et on võimalik kanda raadiolaineid väga kaugete vahemaade taha. Üldlevinud oli arusaam, et lainete levik on vaid otsenähtavuse piires ja maakera kumeruse taha pole levi võimalik. Lisaks teadis Tesla täpselt, et lainete levil vees ja maa sees on suured kaod. Seepärast ei nähtud G. Marconi leiutisele suuri rakendusvõimalusi.

1901 – Pärast 62 päeva kestnud ebaõnne suutis **G. Marconi** aerostaadiga ülestõstetud antennide abil teostada traadita telegraafiühenduse üle Atlandi ookeani (joonis L 1.36). **See õnnestumine näitas, et kõik asjatundjad, ka Marconi, eksisid oma ettekujutusega selle kohta, kuidas raadiolained levivad.** Ei teatud, et elektromagnetlained võivad ionosfäärilt ja maalt peegelduda ning levida ümber maakera. **A. S. Popov** (joonis L 1.35) määrati Peterburi elektrotehnika instituudi füüsikaprofessoriks. Sellel töökohal jätkas ta oma teaduslikke töid raadiotehnika alal.



Joonis L 1.35. Aleksandr Stepanovitš Popov 1859 † 1906 ja tema äikeseregistraator

Joonis L 1.36. Guglielmo Marconi 1874 † 1937. Marconi vaatab 1901. a antenni ülestõstmist St Johnis

1904 – **Popov** esitles III ülevenemaalisel elektrotehnika kongressil esimesena maailmas raadiotelefoni saadet. 9. oktoobril 1905 valiti ta Peterburi elektrotehnika instituudi direktoriks ja 11. jaanuaril 1906 Vene Füüsika-Keemia Seltsi füüsikaosakonna esimeheks. Kaks päeva hiljem, 13. jaanuaril 1906 suri A. S. Popov verevalumist peaajju, olles alles 46 aastat vana.

Kokkuvõte: teades Calzecchi-Onesti, Bradly ja Lodge'i katsetest koheereriga, täiustas A. Popov Lodge'i vastuvõtjat, varustas selle koputiga, mis pärast rakendumist taastas automaatselt töövõime. Ta avastas, et Hertzi lainete vastuvõtja töötab palju tundlikumalt, kui kasutada isoleeritud traati, mille üks ots oli tõstetud kõrgele ja teine ots ühendatud maaga. A. Popov otsustas kasutada sädelahenduse allikana (raadiolainete saatjana) looduslikku äikest ning selle käigus tekkivat elektromagnetkiirgust. Nende vastuvõtuks konstrueeris ta originaalse „äikesemärkija" (joonis L 1.34). Popovi idee oli ka koheereri väljundvoolu kasutamine Morse aparaadi vastuvõtja käivitamiseks ja kinnipüütud signaalide registreerimiseks, samuti raadiosignaalide vastuvõtt telefoni abil. Pärast A. S. Popovi surma polnud Venemaal raadioside alal olulist arengut.

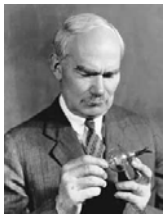
1904 – leiutas inglane **John Ambrosius Fleming** dioodi, mis tugines **Thomas Alva Edisoni** termoemissiooni efektile ja inglise füüsiku **Joseph John Thomsoni** poolt 1897. a avastatud elektronile. Diood kujutas klaaskolbi, mille alumises osas oli hõõgniit (katood) ja ülal teine elektrood (anood). Ühendades anoodi välise toiteallika „+"-klemmiga ja katoodi

„–“-klemmiga ning toites hõõgniiti (katoodi) küttepatareiga, tekkis ahelas vool. Kui anood on ühenduses „–“-klemmiga, siis hõõgniidilt tõukuvad emiteeritud elektronid anoodist eemale ja voolu ei teki.

1905 – Islandile saabub esimene telegramm, seda enne merekaabli panekut.

1906 – Austrias andis **Robert von Lieben** 4. märtsil sisse patenditaotluse „Kathoden-strahlrelais“. Patent nr 179807 (Katoodkiirguse relee). Selles reguleeritakse magnetvälja abil katoodilt lähtuvat elektronkiirguse voogu. Patendikirjelduses nimetatakse kasutusvaldkonnaks traadiga ja traadita telefoni, et võimendada ülekantavat kõnet või muusikat.

1906 – pärast Liebenit lisas ameeriklane **Lee De Forest** (joonis L 1.37) dioodile kolmanda elektroodi nn võre ja raadiolampi nimetas **audioniks**. Ta reklaamis, et audioni abil võib kanda inimhäält üle Atlandi ookeani. Selle põhjal tekkis firma aktsiaostu buum, siis skandaal, et inimesi on pettusega sunnitud aktsiaid ostma. Vangla. Sõbrad aitavad välja. Patendi nr 151907 (15. jaanuar 1907) ostis telefonikompanii. Nad hakkasid audioni kasutama telegraafiliinidel signaali võimendajana.



Joonis L 1.37. Lee De Forest audioniga 1950. a; Esimene audion, 1906, paremal esimene raadiovastuvõtja

1907 – avatakse avalik transatlantiline telegraafiside. Pärast Hertzi, Popovi, Marconi ja Tesla põhjapanevaid töid oli raadioringhäälinguni veel pikk tee.

1909 – Marconi koos K. F. Brauniga sai Nobeli füüsikapreemia. Hiljem tegeles lühi- ja mikrolainete uurimisega.

1910 – Austrias täiendasid **Robert von Lieben** koos **Eugen Reissi** ja **Siegmund Straussiga** oluliselt esimest sisuliselt trioodi patenti.

1912 – Titanicu huku ajal sai kuulsaks **David Sarnoff**, Marconi Ameerika kompanii teenistuja. Ta võttis vastu Titanicu appikutse ja juhtis traadita telegraafi teel päästeoperatsioone.

1913 – **A. Meissner** arendab mittesumbuvate võnkumiste tarbeks välja elektrontoru-generaatori; **E. H. Amstrong** leiutab tagasisideahela traadita side tarbeks USA ja Euroopa vahel.

1918 – **W. Schottky**, sõltumatult superheterodüüni põhimõte.

1919 – **D. Sarnoff** esitas ülemustele memorandumi – muuta raadio sobivaks kodus kasutamiseks. Vastuvõtja kujundada raadiomuusika kastiks, mis on häälestatav erinevatele lainepikkustele nupu keeramise või kangi liigutamise abil. Firma ideid ei toetanud, vaid nägi rahateenimise võimalust äriteadete ülekandmisega ringhäälingu kaudu. Sarnoffi ideed realiseeris raadiohuviline **Frank Conrad**, kes töötas Westinghouse'i firmas. Ta ehitas Pittsburghi lähedal kuuri raadiosaatejaama ja saatis eetrisse heliplaadimuusikat. Muusika vahele luges ajalehest uudiseid. Oma lõbuks tehtud saadete kohta tulid kirjad saadete ühekülgsuse pärast. Üllatav tagasiside innustas saateid mitmekesistama. Elektrikud hakkasid raadioaparaate konstrueerima, valmistama ja müüma „Westinghouse'i jaama vastuvõtuks“. Firma, nähes raadiohaigete entusiasmi, hakkas toetama, et kuurijaam muutuks tõeliseks saatejaamaks.

1919 – **M. Bontš-Brujevitši** juhtimisel valmistati Nižni Novgorodi raadiolaboris esimene vesijahutusega generaatorlamp.

1920 – raadio teel kanti üle USA presidendivalimiste finaal. Siis küündis raadiovastuvõtjate arv maailmas juba 7 500 000 aparaadini.

1920…1922 – esimesed ringhäälingu saatejaamad USAs, Hollandis, Inglismaal, Saksamaal, Prantsusmaal.

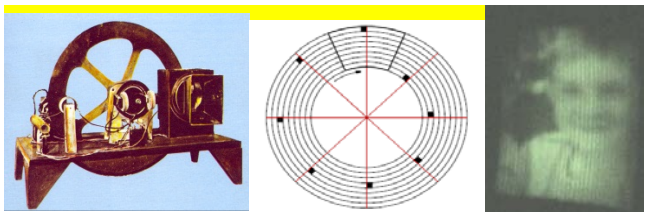
Lühikokkuvõte: kui käsitleda raadiosidet üldisemalt, siis see kujutab endast elektrienergia ülekannet allikalt (saatja) tarbijale (vastuvõtja) ilma madalsageduslikes süsteemides kasutatavate elektrijuhtmeteta. Siin peale- ja tagasivoolujuhtme rolli täidab ümbritsev keskkond – eeter, mille olemuse suhtes puudub tänaseni ühene arusaam. Sellest lähtuvalt on esimese saatja ja vastuvõtja leiutaja –„raadiotehnika isa“ **Henry Hertz.** Teiseks suurkujuks on **Nikola**

Tesla, kes tegeles juhtmeteta elektrienergia ülekandega väga laias sagedusvahemikus. Hertzi saatjat täiendas **Augusto Right**. Teise põlvkonna koheerervastuvõtja lõi **Oliver Lodge,** mida täiendas **Aleksandr S. Popov** ja ka **G. Marconi.** Kolmanda põlvkonna dedektorvastuvõtja lõi **A. S. Popov** jne. Teadlastest Hertzi populariseerijad Lodge ja Popov vajasid auditooriumis vastuvõtuindikaatoreid. Lodge kasutas galvanomeetrit, Popov elektrikella. Ärivaistuga **Marconi** püstitas praktilise ülesande, kasutades Hertzi-Righti saatjat, Lodge'i-Popovi vastuvõtjat, ühendas saatja telegraafivõtmega ja vastuvõtja telegraafiaparaadiga ning sai esimesena kokku toimiva raadiotelegraafi ja hiljem ka traadita telegraafiühenduse üle Atlandi ookeani. Rida Marconi patente sisaldasid sageli vähe uudsust ja enamasti tuginesid teiste teadlaste – A. Righti, O. Lodge'i, N. Tesla, H. Hertzi, A. Popovi, Branley – töödel. Seepärast tühistati 1943. a USAs osa Marconi patente**.** 1943. aastal tunnistas USA Ülemkohus **Nikola Tesla** ametlikult raadio leiutajaks.

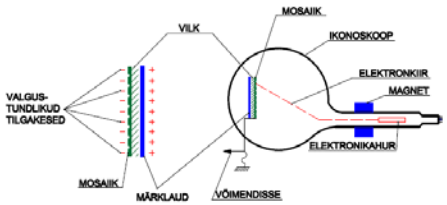
Televisiooni tekkelugu

Kujutise elektrilise edastamise ja laotumise idee tekkis 19. sajandi teisel poolel. Eeldused tekkisid siis, kui osutus võimalikuks juhtida nähtamatute osakeste, elektronide voogu. Sellele eelnes fotoefekti avastamine. Fotoefekt seisneb selles, et kui näiteks tseesiumoksiidiga kaetud hõbedat või seleeni valgustada, siis eraldavad nad (emiteerivad) elektrone – tekib vool. Fotoemissiooni avastas 1887…88 H. Hertz.

1884 – Berliini üliõpilane Paul von Nipkow ehitas omale mänguasja – nn Nipkowi ketta. Pöörlevale kettale tegi ta rea spiraaljoonel asuvaid auke (joonis L 1.38). Ketas asus mingi objekti ja seleenplaadi vahel. Ketta pöörlemisel seleenplaadile langeva valguslaigu heledus muutus. Plaadi takistus oleneb valguse intensiivsusest. Lülitades plaadi jadamisi lambiga, tekkis ahelas moduleeritud vool. Lamp paigaldati identse sünkroonis pöörleva ketta taha ja ekraanile tekkis suhteliselt selge objekti kujutis. Nipkow nimetas mänguasja televisioonikettaks ja patentis selle. Seadet hakati kutsuma Nipkowi kettaks. Traate kasutamata polnud sel ajal võimalik pilti kaugele saata. Kui kasutada pildi jaotamist punktideks, siis võis osutuda võimalikuks juhtmete abil eraldi elektrisignaalide saatmine. Lähtekujutise taastamiseks vajati aparaati, mis elektrisignaalid samas järjekorras pildipunktideks muudab.



Joonis L 1.38. Bairdi-Nipkowi televisiooniketas ja ketta abil ritta laotamise skeem ning vertikaalrealaotusega telepilt



Joonis L 1.39. Zworõkini ikonoskoop

1907 – rootsi juurtega vene leidur **Boris Rosing** (1869 † 1933) patentis elektronkiiretoru kasutamise telepildi laotamissüsteemis. Patent 18076 „Kujutise kaugülekande elektriline meetod". 1911. aastal patentis ta täiendatud seadme Venemaal, Saksamaal, Inglismaal ja USAs. 1911 a. kasutas ta viimast kujutise vastuvõtuks.

1923 – **Valdimir Zworõkin**, vene päritolu ameeriklane, varasem Rosingi abiline, ehitas **ikonoskoobi** (televisiooni saatetoru) – suurepärase kujutise analüsaatori, mis töötab sarnaselt inimsilmale. See oli õhutühi klaasampull (joonis L 1.39) elektronkahuriga ja vastas, sfäärilises osas oli ruudukujuline vilkplaat – „elektrisilma" võrkkest. Plaadi üks pool oli hõbetatud ja teisel pool isoleeritud hõbeterad, mida aktiveeriti tseesiumiga. Iga tera moodustas minifotoelemendi. Kiireks kindlas järjekorras fotorakkude ühendamiseks võimendi sisendiga kasutati elektronkahurit. Sealt väljuvat elektronide voogu juhiti magneti abil.

1924 – šotlane **John Logie Baird**, kes hakkas teostama ulmelist lahendust, valmistas Nipkowi ketta eeskujul pöörleva ketta (joonis L 1.40). Esmane katse kaubamaja külastajate pilte üle kanda ebaõnnestus. Ta vallandati. Edasi katsetas nukuga, mille nimi oli Bill. See õnnestus. Uuesti katsed liikuvate inimfiguuridega.

Joonis L 1.40. John Logie Baird (1888 † 1946) uurib telekujutist umbes 1925. a. Keskel foto Bairdi liikuvast kujutisest tema "televiisoris" (*ca* 1926. a). Paremal Baird oma viimase katseseadmega

1926 – **J. L. Baird** esitles Londonis teleülekannet teaduslikule komisjonile, saades rahuldava tulemuse.

1928 – **J. L. Baird** esitles värvilise kujutise edastamist.

1928 – **V. Zworõkin** arendab välja elektrostaatilise fokuseerimisega kineskoobi (joonis L 1.39).

1929 – Inglise kompaniid BBC ja Marconi alustasid televisiooni katsesarja. Vaja oli leida veel täiuslikum süsteem, et parandada kujutise kvaliteeti.

1930 – **Manfred von Ardenne (1907 † 1997)**, saksa füüsik Dresdenist, esitleb Berliinis esimest valgustäppskannimisel põhinevat elektrontelevisioonisaatjat. Seejärel õnnestub tal täiselektroonilise pildi- ja filmiteleülekanne. Sõja lõpul osales Venemaal tuumapommi loomises. 1953 Stalini preemia.

1933 – **V. Zworõkin** kasutas ikonoskoopi telepildi vastuvõtmiseks.

Boris L. Rosing 1869 † 1933

Vladimir K. Zvorõkin 1888 † 1982

Manfred von Ardenne 1907 † 1997

Joonis L 1.41. Nüüdisaegse televisiooni leiutajad

1934 – Berliinis võeti kasutusele esimene telesaatja.

1934…1936 – Eestis algasid esimesed televisiooni saatekatsetused.

1939 – Farnsworth ja **Rose** täiendasid ikonoskoopi.

Tööstuses toimub täiendamine tänaseni (superortikom, vidikon, plumbikon jne).

1953 – USAs värvitelevisiooni saadete algus.

1955 – **tegevust alustas Tallinna Telekeskus**.

1960 – NSV Liidu satelliit 2 tegi esimese teleülekande kosmosest.

1962 – esimene kontinentidevaheline värviteleülekanne USA–Euroopa. Selleks kasutati satelliiti Telestar.

1965 – värviteleülekanne tehiskaaslase Molnija 1 abil NSVL–Prantsusmaa.

1972 – **esimene värvitelevisioonisaade Eestis**.

Arvutustehnika arengu teetähised

Tõeliste arvutite leiutaja on inglise matemaatikaprofessor **Charles Babbage** (1799 † 1871). Vihastades Kuningliku Astronoomiaühingu vigaste arvutuste peale ütles ta: „Ma palun jumalat, et need arvutused saaks teha aurujõul!". Tema mehaaniline arvutusmasin, nn diferentsiaalmootor suutis arvutada ja vastuse trükkida. Masinale andis energiat aurumasin ja see oli lokomotiivisuurune. 1883. aastal valmistas ta arvuti ja töötas sellel 10 aastat ning siis arendas edasi uut maailma esimest arvutit, mille nimetas **analüütiliseks mootoriks**. Teda abistas **Augusta Ada King** (1815 † 1842), inglise poeedi Lord Byroni tütar, kes tundis masina ehitust ja valmistas ka masinale instruktsiooniridu ehk programme, mis tegi temast maailma esimese naisprogrammeerija. 1889 – **Herman Hollerith** (1860–1929), saksa päritolu ameerika insener-leiutaja, lõi elektrilise tabuleerimissüsteemi.

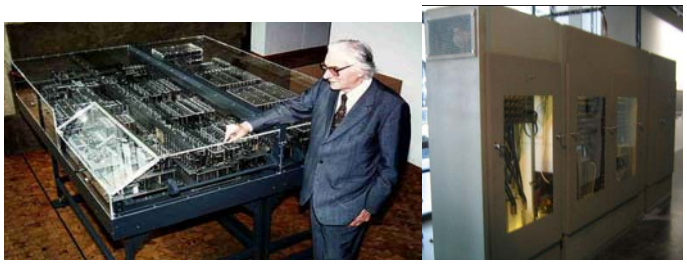
1930 – Dr **Vannevar Bush** ehitas USAs oma meeskonnaga esimese suure analoogarvuti.

1934 – **Charles Babbage** koostas Inglismaal esimese programmeeritava digitaalarvuti.

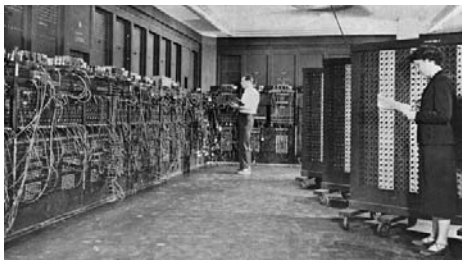
1942 – **Konrad Zuse** valmistas Saksamaal esimese töötava arvuti Z3.

1942 – Prof **John V. Atanasoff** ja üliõpilane **Clifford Berry** koostasid USAs esimese digitaalkalkulaatori.

1945 – **John Presper Eckert** ja **John Mauchly** valmistasid USAs esimese täiselektroonilise arvuti ENIAC.



Joonis L 1.42. Konrad Zuse (1910 † 1995). Tema Z2 Karlsruhes



Joonis L 1.43. ENIAC ühel USA armee pildil

1946 – **John von Neumann** koostas USAs programmi kahendsüsteemi.

1947 – Dr **John Bardeen** ja Dr **William Brattain** leiutasid USAs Bell Telefon'i laboris transistori, mida esitlesid 1948 a.

1949 – **W. B. Shockley** leiutab pindtransistori.

1950 – USAs esimene hulgitootmisse läinud arvuti.

1954 – USAs paigaldati esimene elektrooniline äriarvuti restorani ja toitlustusettevõttesse.

1958 – Jaapanis leiutab **Leo Esaki** tunneldioodi.

1960 – Transistoride tulek arvutisse.

1964 – USAs algas integraallülituste seeriatootmine.

1968 – USA firmas Intel leiutas **Marcian Edward Hoff** mikroprotsessori.

1969 – USA firma Intel alustas 4-bitise protsessori Intel 4004 tootmist.

1971 – taskuarvuti.

1971 – USA firma **Intel Corporation** patentis arvuti mikroprotsessori.

1978 – **firma Philips** leiutas digiinfo salvestuseks kompaktketta – CD.

1969 – **29. oktoobril sündis internet.** Professor **Leonard Kleinrocki** juhendamisel saatis Los Angelese California Ülikooli üliõpilane Charles Kline ülikooli arvutist Stanfordi Uurimisinstituudi arvutisse sõnumi „lo". Nii sündis interneti eelkäija **ARPANET**. 5.12.1969 oli internetis neli arvutit, 1984. a tuhat, 1992. a miljon, 2000. a sada miljonit, 2005. a miljard. 2011 a. kasutab internetti 2,2 miljardit inimest ehk 31% inimkonnast. Eestis on see suhtarv 76%, Soomes 85%, Lätis 68%, Leedus 60%, Venemaal 43%.

2001 – IBM ja USA valitsus käivitasid superarvuti 12,3 x 10^{12} tehet sekundis. 8192 protsessorit. Kaal 106 t.

Radari väljatöötamine

1922 – **Guglielmo Marconi** pakkus välja idee määrata laevade asukoht raadiolainete tagasipeegelduse kaudu.

1931 – inglased **W. A. S. Butement** ja **P. E. Pollard** koostasid seadme laeva asukoha määramiseks raadiolainete kaja põhimõttel.

1931 – **M. Knoll** ja **E. Ruska** ehitasid Berliinis esimese elektronmikroskoobi.

1934 – Kieli sadamas demonstreeris Dr **Rudolf Kuhnold** edukalt radarit.

1934…1935 – **R. Watson-Watt** katsetas radarit liikuvate objektide asukoha määramiseks.

1935 – inglased tegelesid pommitajate avastamisega ja BBC saatja impulsside alusel avastasid pommitaja *ca* 12 km kaugusel.

1936 – Prantsuse laevale paigaldati primitiivne radar jäämägede kindlaksmääramiseks.

Tuumafüüsika ja aatomienergeetika areng

1891 – iiri füüsik **J. Stoney** analüüsis aine eraldumist elektrolüüsil, püstitas hüpoteesi elementaarlaengu olemasolust aatomis. Tema ettepanekul soovitati väikseimat elektrilaengut nimetada **elektroniks.**

1895 – prantsuse füüsik **Jean Perrin** tegi kindlaks, et katoodkiired on negatiivselt laetud osakeste voog. Inglise füüsik **Joseph Thomson** leidis, et aatomid pole jagamatud. Neist võib eraldada negatiivse laenguga osakesi, millel on ühesugune mass ja laeng. Neid osakesi hakati nimetama **elektronideks**.

1899 – Manchesteri Ülikooli füüsikaprofessor **Ernest Rutherford** avastas α- ja β-kiirguse, võttis kasutusele radioaktiivse lagunemise poolestusaja mõiste (1900) ning radioaktiivse lagunemise teooria (1902); avastas 1911. a aatomituuma ja esitas aatomi tuumamudeli.

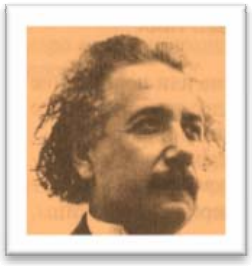
1900 – saksa füüsik **Max Karl Ernst Ludwig Planck** püstitas hüpoteesi, et elektromagnetlained kiirguvad ja neelduvad energiakvantide kaupa, kvantteooria rajaja.

1909...1912 – ameerika füüsik **Robert Millikan** tõestas katseliselt elementaarlaengu olemasolu. Hiljem saavutas täiustatud katsemetoodikaga samad tulemused üks nõukogude füüsikakoolkonna rajaja **Abram Joffe**. Selgus, et iga keha elektrilaeng on elementaarlaengu täisarvkordne. Väikseimaid murdarvkordseid laengukoguseid on teoreetiliselt ennustatud (kvargid, mille laengud on 1/3 *e* ja 2/3*e*), kuid pole avastatud.

1910 – Londoni Kuningliku Seltsi liige **Ernest Rutherford** avastas aatomituuma ning seda ümbritseva vastasmärgilise laengu ja esitas 1911. a aatomituuma mudeli. Tuumafüüsika arengu algus.

1913 – taani füüsik **Niels Henrik David Bohr** lõi aatomi esialgse kvantteooria. Põhjendas uraanituuma lõhestumise.

Max Planck 1858 † 1947



Albert Einstein 1879 † 1955

Nils Bohr 1885 † 1962

Ernest Rutherford 1871 † 1937

Enrico Fermi 1901 † 1954

Igor V. Kurtšatov 1903 † 1960

Joonis L 1.44. Aatomifüüsika rajajad

1915 – juudi päritolu saksa füüsik **Albert Einstein** lõi kvantsiirete toimumise tõenäosuse teooria. Elutööks kujunes relatiivsusteooria loomine (1905…1916).

1919 – inglise füüsik **Ernest Rutherford** teostas laboris tuumareaktsiooni, ennustas neutroni ja deutroni olemasolu.

1930 – Zürichi Tehnikaülikooli füüsikaprofessor **Wolfgang Pauli** ennustab kirjalikus avalduses neutriino olemasolu.

1931 – **Paul Dirac** ennustab antiaine olemasolu.

1932 – avastatakse elektroni **antiosake positron**.

1938 – Berliinis avastasid prof. **Otto Hahn** ja **Fritz Strassmann** tuuma lõhestumise.

1939 – Rootsi põgenenud **Lise Meitner** (O. Hahni kaastööline) avastas, et tegu on tuumareaktsiooniga.

1940 – vene füüsik **Igor Vassiljevitš Kurtšatov** avastas uraaniaatomite tuumade iseenesliku lõhustumise. Uuris termotuuma reaktsiooni ja tema osalusel teostati termotuumapommi katseplahvatus (1953).

1940 – Leipzigi Ülikooli füüsikaprofessor **Werner Karl Heisenberg** alustas ettevalmistusi raske vee moderaatoriga tuumareaktori ehitamiseks.

1942 – itaalia teadlane **Enrico Fermi** ja Ungari-USA füüsik **Leo Szilardi** patentisid tuumareaktori ja demonstreerisid tuumareaktorit Chicago Ülikoolis USAs. Nad tõestasid tuumaenergia saamise ja aatomipommi loomise võimalikkust.

1945 – USAs katsetati aatomipommi, mille väljatöötamisel osales **Nils Bohr**.

1954 – juunis lülitati Venemaal **Obninskis** tööle esimene tuumaelektrijaam elektrilise võimsusega 5 MW, reaktori soojusvõimsusega 30 MW ($\eta = 17\%$). Jaama energiaplokk oli ette nähtud tuumalaeva tarbeks. Jaam töötas 2002. a.

1955 – avastatakse **antiprooton**.

1955 – USAs valmis aatomiallveelaev **Nautilus**.

1956 – Inglismaal käivitus Calder Halli võimas aatomielektrijaam 4 x 60,5 MW Cumbrias. Töötas 2003. aastani. See oli esimene energiasüsteemi tarbeks ehitatud jaam.

1956 – avastatakse **antineutron**.

1965 – CERNis luuakse **antideuteron –** antiprootoni ja antineutroni ühendus.

1957 – Ameerikas Pennsylvanias käivitati aatomielektrijaam.

Eestis oli Paldiskis kaks allveelaeva tuumareaktorit soojusvõimsusega 70 ja 90 MW. Pärast NSV Liidu vägede lahkumist peatati nende töö ja nendest kõrvaldati tuumakütus.

1961 – esimene õnnetus (3 surnut) Idaho aatomielektrijaamas.

1966 – USAs avarii **Fermi** aatomielektrijaamas.

1975 – USAs avarii **Browns Ferry** aatomielektrijaamas.

1979 – USAs avarii **Three Mile Island**'i aatomielektrijaamas.

1986 – NSV Liidus avarii **Tšernobõli** aatomielektrijaamas.

1988 – USAs teavitas NASA teadlane **J. Hansen** kongressi kasvuhooneefekti tekkest.

1995 – CERN-is registreeritakse **antivesinik**.

2002 – CERN-is luuakse tuhandeid antivesiniku aatomeid.

2010 – CERN-is lõksustatakse 38 antivesiniku aatomit.

2010 – **Igor Sokolov** Michigani ülikoolist (USA) väidab, et vaakum või eimiski on aine ja antiaine kombinatsioon – osakesed ja antiosakesed ning kõik laetud osakesed muutuvad tugevas laserväljas kolme osakese kombinatsiooniks, millele lisanduvad veel mõned footonid.

2011 – **Fukushima** aatomielektrijaama avarii Jaapanis. Kolme reaktori südamikud sulasid üles.

2011 – Christopher Wilson kaastöötajatega Rootsi Chalmersi Tehnikaülikoolist püüdsid vaakumist kinni footoneid (valguse osakesi) selliste omadustega, mida ennustab kvantteooria. Neile anti 2011. a Nobeli füüsikapreemia. See aitab lahti mõtestada vaakumi võnkumisi, mille käigus osakesed ilmuvad eimiskist ja kaovad tagasi eimiskisse. Kvantteooria põhjal pole vaakum tühi ja on täis virtuaalseid osakesi, mis pendeldavad olematusest reaalsusse ja tagasi.

Kokkuvõte

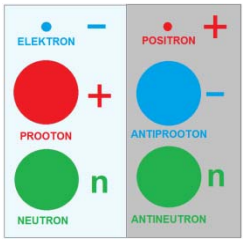
Kogu maailma füüsikud tegelesid enne aatomi mudelite loomist intensiivselt elektrotehnikaga. Seejärel lülitus enamik teadlasi ümber tuumafüüsikale ja elektrotehnika edasiarendamine jäi tagaplaanile. Tänapäeva elektrotehnika eristab elektromagnetvälja ja elektriahelate teooriat. Enamik praktikas ettetulevaid ülesandeid on nende alusel lahendatavad ja tõenäoliselt sellepärast ei peeta elektrotehnika edasiarendamist aktuaalseks. Elektrotehnika on rüütatud matemaatika „kuube“. Füüsikaliste kujutluste osa on viidud miinimumini. See kõik toimib suhteliselt lihtsate ülesannete puhul. Olukord muutub keerukamaks, kui on vaja lahendada elektromagnetilise ühilduvuse probleeme ja täpsete analüüside tegemine osutub vähetõenäoliseks. Seal võib probleemide lahendamiseks osutuda tulemuslikuks protsesside füüsikalise sisu ning põhjuslike seoste põhjalikum tundmine ja esiletoomine. Sama on vajalik ka klassikalise elektrotehnika korrastamiseks eesmärgiga muuta aine omandamine lihtsamaks ja loogilisemaks.

Ebaloogiline on olukord mõne füüsikalise suuruse nimega, näiteks: **potentsiaal, elektromotoorjõud, pinge ja elektriväljatugevus.** Kõiki mõõdetakse voltides. Järelikult on nad „veresugulased“, neil peaks olema ühine perenimi. Erinevused võiksid olla eesnimedes. Selliste sõltumatute nimede korral on elektrotehnika õppijatel raske ära tabada nende „lähisugulust“. Ühe võimaliku perenimena saaks kasutada näiteks mõistet „**pinge**“. Siis võiks potentsiaali asemel öelda – **pinge maa** (nullpotentsiaali) **suhtes**. Elektromotoorjõu (EMJ) asemel – **allikasisepinge**, **allikaväljundpinge**, **pinge** (allikapinget tasakaalustav pinge), elektriväljatugevus **– pinge pikkusühikule** (pinge pikkusühiku kohta). Kõige lähemal elektrienergia sisule (laengule) on potentsiaali mõiste, mis iseloomustab energiatihedust mingis ruumipunktis. Elektri olemuse mõistmisel saaks piirduda ka ainult potentsiaali mõistega. Siis oleks **allikasise- ja väljundpotentsiaalide vahe**, potentsiaalilang tarbijatel, potentsiaalilang pikkusühikule. Võrreldes pinge ja potentsiaali mõisteid, näeme, et pinge on lühike ja umbmäärane mõiste, potentsiaal – konkreetne, kuid kohmakam nimetus.

Pinget vaadeldakse kui skalaarsuurust. Elektrinähtuste lahtimõtestamist lihtsustab võimalus käsitleda pinget vektorsuurusena. Siis allikasisepinge (EMJ) vektori suund on vastupidine välisahela vooluvektori suunaga, mis on suunatud allika plussklemmilt tarbija kaudu allika miinusklemmile. Tarbijates tekkib tasakaalustav allikas, mille sisepingevektori suund langeb kokku vooluvektori suunaga, mis näitab, et see allikas on tarbija talitluses. Aga kõige loogikavastasem tulemus tekkis pärast 1729. aastat **Ch. F. Dufay** kaht liiki elektrivedeliku – klaasise ja merevaiguse elektrivedeliku eristamist. Klaasisele anti positiivne ja vaigusele vedelikule (merevaigu nime põhjal) negatiivne laeng. Ligi 170 aastat, kuni ei teatud aatomist ja selle siseehitusest, need kokkulepped sobisid. Hiljem jäeti aatomi mudelite koostamisel elektroni negatiivne laeng kokkuleppena kehtima. Elektronile positiivse laengu omistamise eelis selgub, kui vaadelda kõige väiksema võimaliku elektriallika sünnimehhanismi. Kui tasakaalustatud laengutega (laengute summa võrdub nulliga) aatomilt jõu abil eemaldada kõige kergemini eemaldatav osake elektron, siis nullist midagi lahutades ei saa

tulemus olla suurem (positiivne), vaid on väiksem (negatiivne). Väga lihtsustatult võib ette kujutada, et elektron eemaldati jõuga oma „pesast“ ja *aatomil* jäi järgi tühi „pesa“, mille laeng on null miinus elektroni laeng. See võrdub elektroni vastasmärgilise laenguga. **Siit saab järeldada, et me oleme ebaloogiliselt omistanud ainele antiaine laengute märgistuse.**

Hetkel kehtiva ettekujutuse põhjal on aine ja antiaine laetud osakeste märgid sellised, nagu nad on kujutatud joonisel L 1.45. Antiaine laetud osakestel on aine osakestega vastupidine elektrilaeng, nagu elektronil ja positronil, laadimata neutronil aga antineutroniga vastupidine magnetmoment. Seega on elektronil negatiivne ja prootonil positiivne ning antiainel vastupidised laengud.



Joonis L 1.45. Aine (hele) ja antiaine (tume) laengute tänane märgistus

Kahjuks on see ebaloogiline laengute märgistus levinud väga erinevatesse valdkondadesse ja märgistust muuta on ülimalt raske. Elektri toimimise mõistmist segab see aga märgatavalt. Selles õpikus tehakse katse lihtsustatult selgitada elektri olemust ja ühe sammuna omistatakse elektronile positiivne laeng. Nii kasutatakse teadlikult **ainele antiainele omast laengute märgistust.** Märgimuutus lihtsustab ka esile tuua elektri- ja veevoolu teatud sarnasust. Siis liiguvad nii elektronid kui ka veeosakesed mäetipust alla orgu, mitte vastupidi. Senine loengupraktika annab alust loota, et õpikus esitatud allika, tarbija, ferromagnetmaterjalide ja elektriahelates toimuvate energiamuundusprotsesside mudelid muudavad õppijate oma isikliku elektrimudeli loomise lihtsamaks.

Täiendavalt on loota, et tänu vaakumi kvantteooria väljatöötajatele, ka **Igor Sokolovi** (Michigani ülikool, USA) ja **Christopher Wilsoni** ning tema kaastöötajate töö tulemustele (Chalmersi Tehnikaülikool, Rootsi) hakatakse ümbritsevat maailma järjest täpsemini mõistma. Nende tulemuste alusel on lootust, et tulevikus on võimalik lahti mõtestada ka elektromagnetkiirguse levimehhanism õhus ja vaakumis ning luua selle alusel kiirgusallika ja vastuvõtja antennide vahelise levikanali piisavalt korrektne elektriline aseskeem. Kui vaakum oleks absoluutne tühjus, siis Maal tõenäoliselt elu puuduks, sest Päikese kiirgus ei jõuaks meieni...

Kõnealuse õpiku koostaja arvates pole veel jõutud elektrinähtuste lõplikku tõde välja selgitada ei enne ega ka pärast nende üksikute korrastavate ridade esitamist selles materjalis. Õpiku põhieesmärk on aidata õppijal luua oma isiklik lihtsustatud piltlik nägemust elektrist ja elektri toimimisest.

Kas õpikus võib esitada üldtunnustatud seisukohtadest erinevaid arusaamu? Tõenäoliselt vastab enamik eitavalt, eeldades, et üldtunnustatud on tuntud tõde ja sellest erinev on ekslik ja eksitav vale. Kuid võib olla ka vastupidi, kui eeldada, et lõplikku tõde pole jõutud nähtuste keerukuse tõttu välja selgitada ja loogiliseks süsteemiks korrastada. Kas elektriõppe alal on olukord nii või vastupidi?

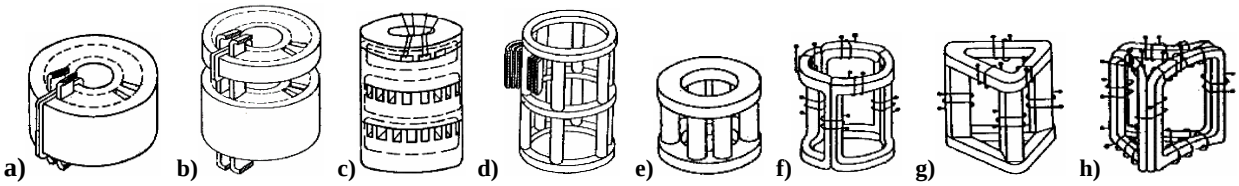
Need mõtted ei anna vastust küsimusele, kas õpikusse võib üldtunnustatud mudelitele uusi, erinevaid mudeleid lisada, mis pole üldtunnustatud ja süstematiseerida nähtusi neist lähtudes? Tõenäoliselt siis võib, kui need mudelid abistavad nähtuste olemust kergemini mõista ning soodustavad sarnaste, veel täpsemate, uute mudelite loomist järgijate poolt.

Milles võib see õppematerjal abi osutada? Aine ehitus ja elektriolemus ei ole kergelt mõistetavad. Elektriga seonduvat kirjeldatakse põhiliselt matemaatiliste valemite ja seaduste abil. Selle olukorraga ei tahaks leppida. Seepärast üritatakse kursuse algosas lähtuda energiamuundusprotsessidest, kasutada lihtsaid vastastikmõjule tuginevaid mudeleid. Loodetavasti saab nende mudelite kasutamisega paremini hõlmatava ja arusaadavama pildi elektriahelates, ahela koosteelementides ja elektriseadmetes toimuvast. Kui aga tulevikus lisanduvad uued teadmised aine ehituse ja elektri olemuse kohta, siis võib osutuda, et need mudelid vajavad edasist täpsustamist.

LISA 2

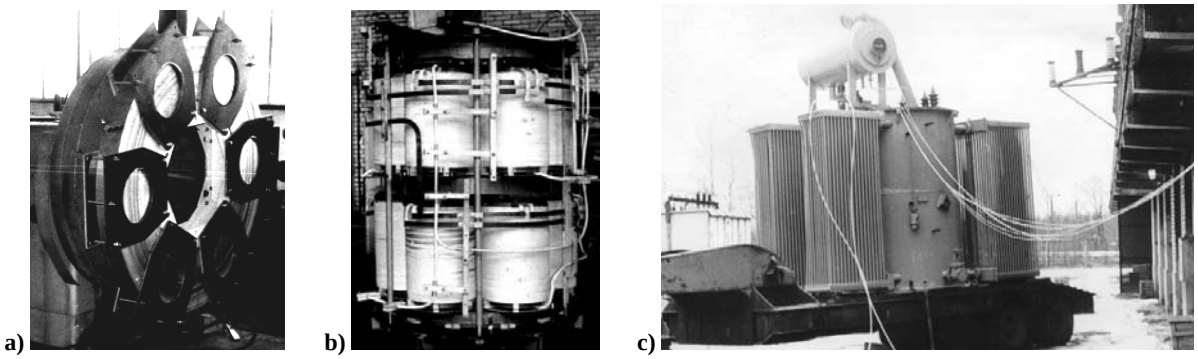
JUHITAVATE JA KÜLLASTUSREAKTORITE ALASED UURIMISTÖÖD EESTIS

Eelmagneetimisega juhitavate reaktorite alast uurimistööd tehti NSVLis väga intensiivselt aastatel 1960...1990. Alustati tehnikadoktor Mark S. Libkindi juures Moskvas, seejärel kandus põhiraskus Leningradi Polütehnilisse Instituuti, sealt Tallinna Polütehnilisse Instituuti ja Alma-Ata Energeetikainstituuti. Aastatel 1974...1990 korraldati Eestis 7 üleliidulist teadusseminari ning selle ajaga töötati välja vajalik juhitavate reaktorite oskusteave. Tallinna Polütehnilises Instituudis koostati põhilised teoreetilised alused arvutuste tarbeks ja anti Zaporožje trafotehasele üle nelja erineva konstruktsiooniga 525 kV 180 MVA reaktori eskiisprojektid koos arvutusmetoodikaga. Nende alusel koostas Zaporožje trafotehas koos Üleliidulise Elektrotehnika Instituudi ja Alma-Ata Energeetikainstituudi juhtivate teadlastega tööprojekti. Unikaalse reaktori üks faas võimsusega 60 MVA valmis 1992. aastal ja läbis edukalt põhjalikud katsed. Järgnevatel aastatel Tallinna Tehnikaülikool reaktorite juurutamisel enam ei osalenud. Majandusraskused peatasid aastateks Zaporožje trafotehases reaktorite tootmise. Alles 1997. aastal valmis järgmine 25 MVA 110 kV reaktor, siis 1999. aastal ning 2010. aastaks oli toodetud reaktorite koguvõimsus ületanud 4000 MVA piiri. Ajavahemikul 2012...2015 on kavandatud toota reaktoreid koguvõimsusega üle 8000 MVA. Seni toodetud reaktorite koguarvust on 41% – 25 MV 110 kV reaktorid, 21% – 180 MVA 525 kV reaktorid (nende osavõimsus on 49% kõigi reaktorite võimsusest), 16% – 100 MVA 220 kV reaktorid, 13% – 25 MVA 35 kV reaktorid, 5% – 25 MVA 110 kV reaktorid.



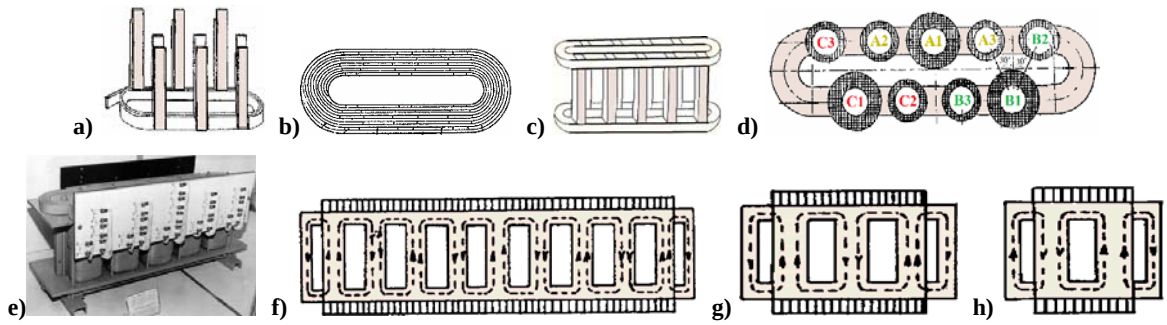
Joonis L 2.1. Sümmeetriliste magnetahelaga pöördväljaga juhitavate reaktorite konstruktsioonide areng aastatel 1972…1982 Tallinna Polütehnilises Instituudis: a…c – elektrimasin- ja d…h – trafokonstruktsiooniga reaktorid

TPIs alustati juhitavate reaktorite uurimisega 1971. a. Alul uuriti M. S. Libkindi pakutud asünkroonmootoriga sarnast reaktorit, mille staatoril paiknes kolmefaasiline töömähis, rootoril aga alalisvoolutoitega juhtimismähis. Paigalseisva rootori õhupilu oli viidud tehnoloogilise miinimumini. Pöördväljaga reaktoris tugines vooluharmooniliste kompenseerimine pöörlevate elektrimasinate arengus väljatöötatud rikkalikule oskusteabele. Kasutati kahekihilisi lühendatud sammuga jaotatud mähiseid. 1972 a. valmis joonisel L 2.1a kujutatud uue konstruktsiooniga reaktori mudel. Uuriti ka aksiaalvooga (c) reaktoreid. Pöördväljaga reaktorite põhipuudus – uurde isolatsioonipoolsed piirangud töömähise nimipingele – sundis otsima lahendusi, kus staatori ja rootori hambad muutusid sammasteks (d...h). Voolu harmooniliste kompenseerimisvajadus tingis paljusambaliste reaktorite väljatöötamise. Turba tootmisbaasis valmis esimene selline 35 kV juhitav reaktor nimivõimsusega 2,5 Mvar (joonis L 2.2). Selle aktiivosa vastab joonisel L 2.1d kujutatule.



Joonis L 2.2. Turba tootmisbaasis valminud juhitav reaktor 35 kV, 2,5 Mvar: a – ike kerimispingis, b – reaktori aktiivosa, c – reaktori katsetamine Ellamaa alajaamas

Võimsuse ja nimipinge piirangud sundisid leidma uusi ruumilisi konstruktsioone, millest viimane oli originaalse ühildatud “lipp-lapp”- ja kerimistehnoloogiaga monoliitne magnetahel, mis formeeriti rakise abil, nagu on kujutatud joonisel L 2.3b, c, d.

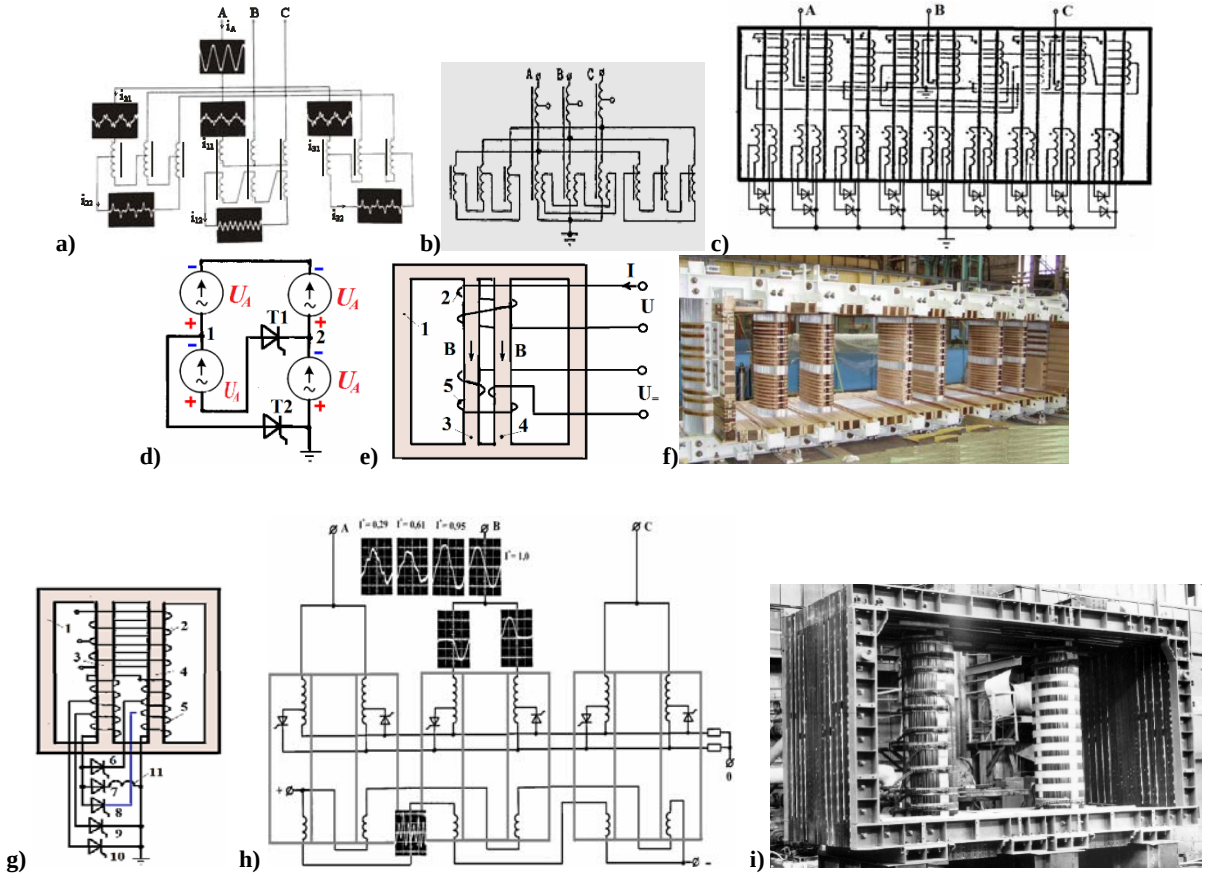


Joonis L 2.3. Ruumilise (a…e) ja tasapinnalise (f…h) magnetahelaga juhitavate ja küllastusreaktorite konstruktsioonide areng aastatel 1982…1990 Tallinna Polütehnilises Instituudis

Siin tehakse kõigepealt valmis mähised, mis fikseeritakse ettenähtud kohtadele ja siis toimub üheaegselt nii sammaste kui ka ikete kerimine ja koostamine. Sellise konstruktsiooniga valmistati kolm väikese võimsusega reaktorit. Üks nendest oli originaalne küllastusreaktor-autotrafo (joonis L 2.3e, f) võimsusega 50 kVA. See läbis edukalt katsed ja paikneb nüüd ainsana Tallinnas Põhja puiestee 27 olevas energeetikamuuseumis. Enamik mitmekümne diplomandi ja aspirandi tööde tegemise käigus aastate jooksul valminud katseseadmetest leidsid rahamaia käe abil oma lõpu EMEXi kogumispunktis.

Joonis L 2.4. Radiaalvooreaktori katseseadmed (a ja b). Aksiaalvooreaktori (c) pikkade laupühenduste probleem ja lahenduse idee. Üleminek hammastelt sammastele: d – katseseade allveelaevnikele, e – 100 kVA võimsusega reaktor, f – elektrotehnika tehasele välja töötatud ja üle antud 6 kV 400 kVA juhitava reaktori projekti joonised, g – lõhestatud sammastega reaktor, h – 110 kV 25 MVA juhitava reaktor-autotrafo projekti joonised

Tänastele üliõpilastele julgustuseks ja eeskujuks uute seadmete loomisel on joonisel L 2.4 esitatud elektrimasinaga sarnaste reaktorite katseseadmete säilinud fotod. Lisaks laboratoorsetele reaktoritele valmis ka põhjalik 6 kV 400 kVA juhitava reaktori tööprojekt Tallinna Elektrotehnika Tehasele. See jäi teostamata, sest ühise juhtimissüsteemiga paljuastmeliste kondensaatorseadmete töösse lülitamine muutis täiendava sujuva reaktiivvõimsuse kompenseerimise mittevajalikuks. Vajadus välja töötada raudteetranspordi piirangutele vastavaid piirvõimsusega reaktoreid sundis loobuma sümmeetrilise reaktori teatud eelistest ning kujundusest (joonis L 2.3a…e) ja üle minema tasapinnalise magnetahelaga reaktoritele (joonis L 2.3f…h). Sügavküllastuses töötavate juhitavate ja küllastusreaktorite (joonis L 2.3) väljatöötamisel on keerukaimaks probleemiks mittelineaarsete tunnusjoontega võimsa energeetilise seadme muutmine toitevõrgu suhtes näivalt lineaarseks. Siis tarbib reaktor siinuspinge korral siinusvoolu. Eeskujuks said doktor Erich S. Friedländeri paljusambalised konstruktsioonid Inglismaalt. Oli vaja leida uusi siinuspinge korral siinusvoolu tagavaid konstruktsioonilahendusi, mis oleksid tehnoloogilised, ökonoomsed ja kasutatavad ülikõrgepinge ning piirvõimsuste korral. Selliste lahenduste elektriskeeme esitatakse joonisel L 2.5. Joonised L 2.5a ja e illustreerivad voolu kõrgemate harmooniliste kompensatsioonil saavutatud tulemusi, kus mähiste ja magnetahela erikujundusega saavutatakse siinuselähedane voolukõverakuju. Näeme, et reaktori eri osade voolud pole siinuselised, küll aga nende summa.



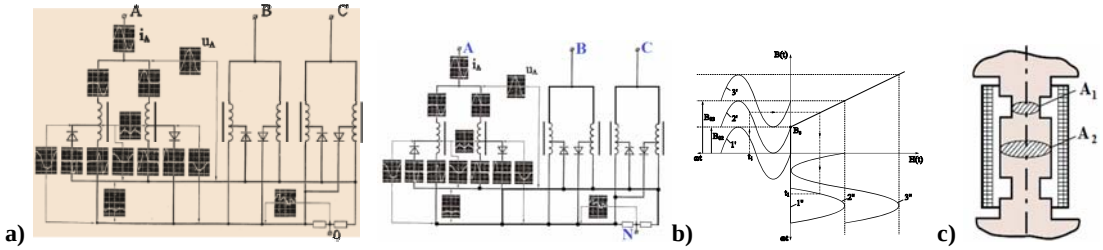
Joonis L 2.5. Võimsate 9-sambalise (a), reaktorautotrafo (b), lõhestatud sambaga (c, d, e, g) ja kahe sambaga (i) reaktorite kujundusnäited. Voolu kõrgemate harmooniliste kompensatsiooniideed küllastusreaktoris (a) ja juhitavas reaktoris (c, h). Kolmefaasilise juhitava reaktori magnetahel (f)

Kompaktsuse, lihtsuse ja ökonoomsuse tagamiseks leiti lahendus (joonis L 2.5c, d) lõhestatud sammaste ning ühildatud juhtmähistoiteallika näol. Joonis L 2.5d võimaldab selgitada eelmagneetimismähise toidet mähisepaari väljavõtete kaudu. Kui me avame lähteolukorras poolperioodil türistori T1, siis tänu kahele järjestikku lülitatud allikale (vasakpoolse mähise osad) on nende ühine allikasisepinge suurem kui skeemil paremal oleva mähise ülaosaallikapinge. Nii tekib ahelas vool, mille suund vasakus harus on suunatud ülalt alla. Järgneval poolperioodil on allikate noolte suunad joonisel ülalt alla. Siis saab avada türistori T2 ja vasakus harus säilib endiselt voolu suund ülalt alla ja paremas harus vastupidine. Seega tekkib mähise harudes vool, mille suund ei muutu ja mille suurust on võimalik reguleerida türistoride avamishetke muutmise teel. Järelikult on sel viisil võimalik teostada reaktori poolsammaste alaliseel-magneetimist. Joonis L 2.5e kujutab juhitavat reaktorit, mille juhtimissüsteem saab toidet eraldi olevalt

alalisvoolutoiteallikalt. Juhitavatele reaktoritele on sügavküllastuse kasutamise ning kõrgemate harmooniliste vältimise erimeetmete tõttu võimalik toota lihtsat lõhestatud sambaga, iga faasi kaupa reguleeritavat juhitavat reaktorit, mille mähiste paigutust magnetahelal on kujutatud joonisel L 2.5c, d ja e. Ilma sammast lõhestamata on ühefaasilisel reaktoril kaks sammast. Sellise, Moskva tehases valmistatud reaktori magnetahela väliskuju on esitatud joonisel L 2.5i ja joonisel L 2.5f Zaporožje trafotehases valmistatud kolmefaasilise reaktori magnetahelat.

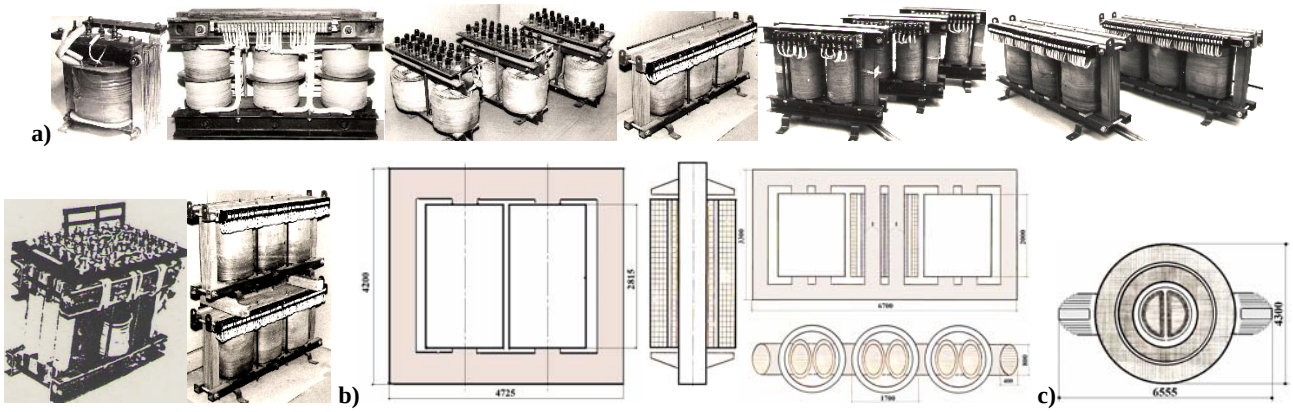
Joonisel L 2.5a on ühildatud töö- ja juhtmähistega juhitavad reaktorid. Nagu jooniselt selgub, lülitatakse faasimähised kolmefaasilisse toitevõrku. Mähiste lõppude juures on väljavõtted, mis on ühendatud türistoridega. Nende abil on võimalik tekitada mähise pooltes lisaks vahelduvvoolule ka alalisvool, mis täidab reaktori eelmagneetimisvoolu osa. Nagu jooniselt näeme, sisaldab juhitava reaktori üks faas kahte sammast, millel paiknevad ühildatud töömähise ja alalisvoolu eelmagneetimismähise osad. Faasimähis koosneb siin samuti kahest paralleelsest mähisest. Juhtimiseks pole eraldi toidet vaja, kuna on võimalik toita ühildatud mähise väljavõtete kaudu. Reaktor on lihtne, töökindel ja tema kaalu ja gabariidi näitajad on lähedased sama pingeklassi sama võimsusega trafole. Puudus: teatud voolu väärtustel on kõrgemate harmooniliste koosseis halvem kui joonisel L 2.5a. b, c kujutatud reaktoritel.

Reaktoritel, millel on faasi kohta kaks või üks lõhestatud sammas, toimub kõrgemate harmooniliste vältimine teisel põhimõttel. Joonis L 2.6b kujutab reaktori tööd sügavküllastustalitluses, mil siinustoitepinge korral on magnetvoo tihedus B ja samuti väljatugevus H ning sellest tulenevalt reaktori vool siinuselised. Need tingimused on täidetud, kui alaliseelmagneetimine (B_0) kas puudub, seega $B_0 = 0$, või kui eelmagneetimine võrdub küllastusmagnetvoo tihedusega, siis $B_0 = B_S$ või kui $B_0 = 2B_S$. Teistes talitlustes on reaktori voolus lisaks põhiharmoonilisele ka kõrgemad harmoonilised. Kolmandate ja neile kordsete kõrgemate harmooniliste vähendamiseks on võimalik kasutada kolmefaasilise reaktori korral kolmnurka lülitatud töö-, juht-, ühildatud või abimähist. Viienda ja seitsmenda kõrgema harmoonilise vähendamiseks on võimalik kasutada reaktori sambale kindla kuju andmist, tehes piki sammast samba ristlõike erinevaks (joonis L 2.6c). Piisab, kui kasutada samba ulatuses kolme erinevat ristlõiget, mis võimaldab viia kõrgemate harmooniliste koosseisu rahuldavaks, nii et kõrgemate harmooniliste vähendamiseks pole vaja lisaseadmeid kasutada.



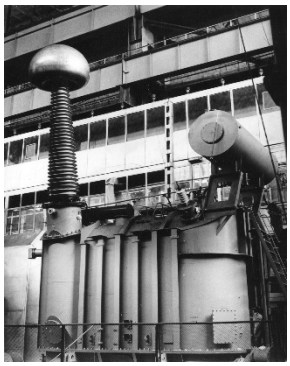
Joonis L 2.6. Sügavküllastusega reaktorite vooluharmooniliste mahasurumine: a - ühildatud töö ja juhtmähisega reaktoris, b – siinusvoolu tagavad kolm eelmagneetimisvoo tiheduste väärtust, c – eri ristlõike osaga sammas

Joonis L 2.7 illustreerib reaktorite uurimistöös uute ideede kontrolliks ja projekteerimisaluste loomiseks välja töötatud katseseadmeid. Kogunenud oskusteave, millele lisandus Zaporožje trafotehase poolt üle antud ülikõrgepingeliste mähiste isolatsioonialane oskusteave, võimaldas välja arendada ainulaadsed juhitavate reaktorite eskiislahendused kolme faasi võimsusteni kuni 900 MVA.



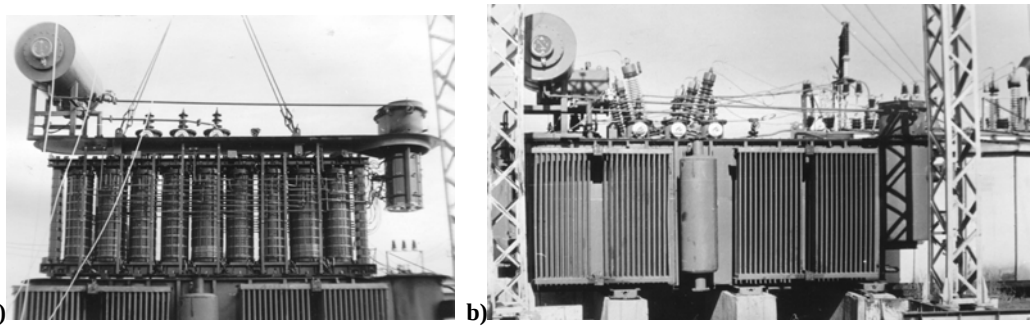
Joonis L 2.7. Sammasreaktori katseseadmed (a). Zaporožje trafotehasele üle antud kahe 525 kV 180 MVA reaktori eskiisprojekti näide (b). 300 MVA võimsusega ühefaasilise reaktori kujundus (c)

1990. a projekteeriti TTÜ elektrivarustuse automaatika teaduslaboris rida 525 kV 3 x 60 Mvar erineva konstruktsiooniga reaktoreid. Need anti koos arvutusmetoodikate ja kõrgemate harmooniliste ning kadude arvutusmeetoditega üle Zaporožje trafotehasele. Joonisel L 2.7b esitatud esimese reaktorivariandi aktiivosa konstruktsiooni ja geomeetriliste mõõtmetega lahendusele valmis Zaporožjes alul tööprojekt ja 1992. aastal reaktor (joonis L 2.8). Lisaks Zaporožje spetsialistidele osalesid töös Alma-Ata Energeetika Instituudi ja VEI (Moskva) kaks spetsialisti. Joonisel L 2.8 on Zaporožje trafotehases valmistatud 525 kV 180 MVA reaktori ühe faasi (60 MVA) välisvaade.



Joonis L 2.8. 525 kV 180 MVA reaktor katsete ajal Zaporožje trafotehases kõrval asuva trafode uurimisinstituudi katsehallis. Reaktori tööprojekt valmis koostöös Zaporožje trafotehase, Alma-Ata ja VEI spetsialistidega

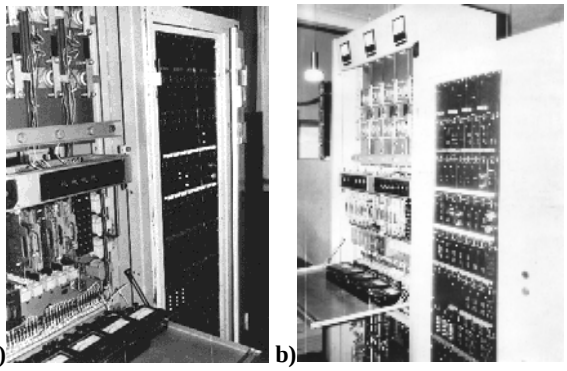
Joonisel L 2.9a esitatud konstruktsiooniga reaktor ehitati valmis Turba tootmisbaasis ja paigaldati Baikal-Amuuri raudteed toitvasse Burjatenergo alajaama. Tallinna Tehnikaülikooli meeskond koos kohalike spetsialistidega lülitasid **20. augustil 1991** reaktori pikaajalisse töösse.



a) **b)**

Joonis L 2.9. Turba tootmisbaasis valminud 10 kV 3,3 Mvari küllastusreaktor Burjatenergo alajaamas: a – reaktori aktiivosa on tõstetud paagi kohale välja, b – reaktor töösse lülitatuna 20. augustil 1991. aastal

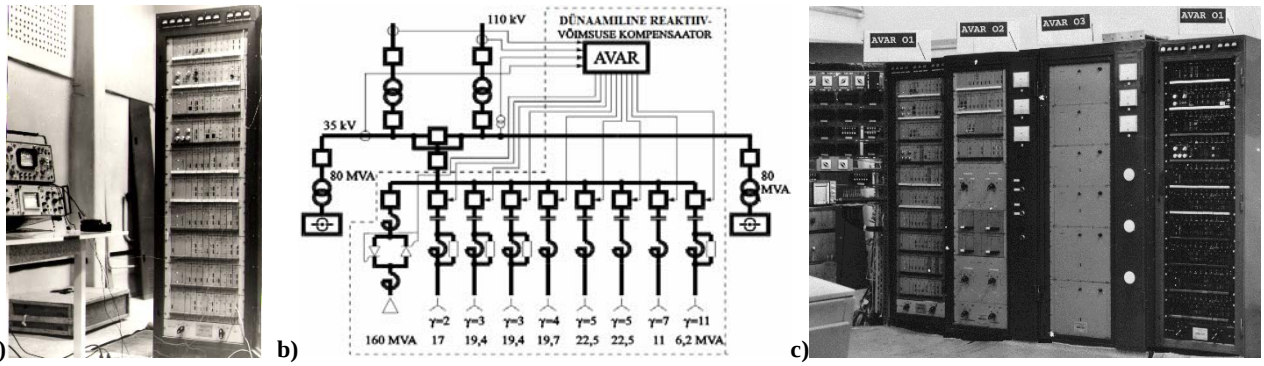
Kokkuvõttes töötati Eestis välja rida originaalseid (patendid RO 2051468C1, RU 2032262C1, RU 2033682C1, RU 2052886C1, autoritunnistused nr SU 434396A, SU 558313A, SU 726596A, SU 775764A, SU 102572A, SU 828231A, SU 860153A, SU 904002A, SU 1149804A, SU 1308080A, SU 1396840A, SU 1649951A, SU 1734506A, SU 1829734A, RU 2051468C1) juhitavaid ja küllastusreaktoreid ning ühildatud reaktorautotrafosid (joonis L 2.5b autoritunnistused nr SU 1308080A, SU 1396840). Tasapinnalise magnetahelaga reaktoreid võib toota kõikidele pingeklassidele ning samadele võimsustele kui jõutrafod. Et tagada juhitava reaktoriga täpset ja sujuvat reaktiivvõimsuse reguleerimist, oli vaja välja töötada juht-, kaitse- ja signalisatsioonisüsteem. Selline süsteem töötati välja Moskva Elektrozavodi tellimisel, valmistati koostöös TPI eksperimentaalosakonnaga ja nii anti tehasele üle kahe 35 kV 20 MVA juhitava reaktori juht-, kaitse- ja signalisatsioonisüsteemid (joonis L 2.10).



Joonis L 2.10. Välja töötatud, valmistatud ja tellijale (Moskva Elektrozavod) üle antud juht-, kaitse- ja signalisatsioonisüsteem "PIRE". Süsteem "PIRE" häälestamine TTÜ elektrivarustuse automatiseerimise laboris 1991. a

Reaktoritealastes töödes osales ligi 30 diplomandi, samuti õppejõud ja uurimislabori insenerid. Põhiautorid olid: **J. Tellinen, A. Reiner, E. Sepping, A. Pool, H. Veiler, M. Vladislavlev, M. Kodurand.** Tööde üldjuht: **J. Järvik**.

Reaktorite kasutamise uurimistöödest Eestis. Reaktoreid kasutatakse ka madala võimsusteguriga elektrotehnoloogia seadmetel, mille reaktiivvõimsuse tarbimine muutub väga kiirelt suurtes piirides. Need on eelkõige kaarleekterasesulatusahjud jt. Nende reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks on vaja kasutada reaalajas toimivat reaktiivvõimsuse kompensaatorit. Seda peab juhtima väga kiiretoimeline, häiringu- ja töökindel juhtimissüsteem. Sellistele nõuetele vastav originaalne süsteem AVAR töötati välja Tallinna Polütehnilises Instituudis. Joonisel L10b on Moldova metallurgiatehase ja tehase "AMURSTAL" kaarahjude elektrivarustussüsteem, kompensaatori lülitus ning juhtimissüsteem AVAR Moldovas (a) ja tehases "AMURSTAL" (c).



Joonis L 2.11. Dünaamilise reaktiivvõimsuse kompensaatori lülitus (b) ja süsteem AVAR Moldova metallurgiatehases (a) ja tehases „AMURSTAL"(c)

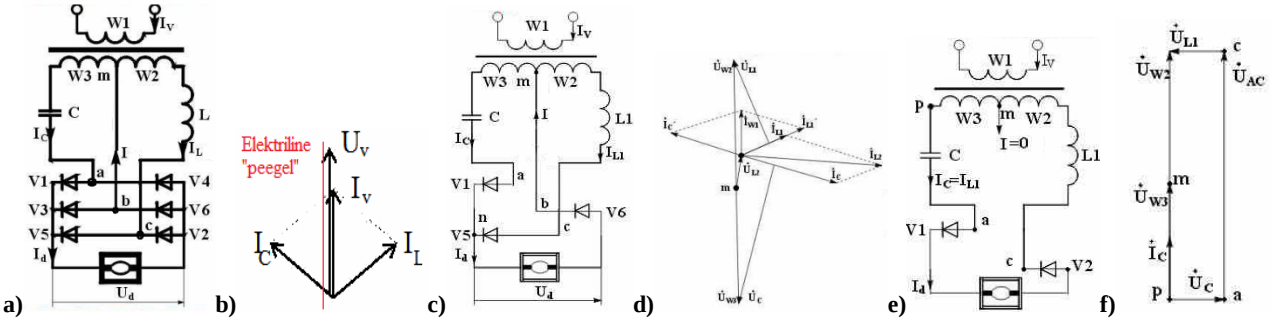
1983...1985. a töötati Üleliidulise Elektrotehnika Instituudi tellimisel välja ja juurutati Moldova metallurgiatehases kompensaatori juhtsüsteem AVAR. Kahe kaarleekterasesulatusahju reaktiivvõimsuse kompensatsiooniks ehitati sinna türistorjuhtimisega reaktor 35 kV 160 MVA ja 35 kV filterkompensaator, mis genereerib sagedusel 50Hz mahtuvuslikku reaktiivvõimsust 138 Mvar. Kompensaatori reaktiivelementide installeeritud võimsus on *ca* 400 MVA (*ca* 25% Narva Elektrijaamade koguvõimsusest) ja nad paiknevad 40 m x 60 m x h hoones. Järgmine ainulaadne AVAR-süsteem töötati välja, valmistati ja lülitati 1986. a tööle tehase AMURSTAL tellimisel. See koosnes kahest ühesugusest juht-, kaitse- ja signalisatsioonikapist AVAR 01 ning kahest lisakapist AVAR 02 ja AVAR 03 (joonis L 2.11c). Mõlemad kapid AVAR 01 töötavad üheaegselt: üks kaarleeksulatusahjude ja kompensaatoriga, teine jõumudelitega AVAR 02 ja AVAR 03, olles kuumas reservis. Kui põhikapis on tõrge, siis 1...1,5 võrgupinge perioodi vältel vahetavad kapid AVAR 01 omavahel tööülesanded. Edasi on võimalik kompensaatori tööd katkestamata tuvastada rikke põhjus ja siis kõrvaldada. Süsteemi AVAR põhiautorid on J. Tellinen. A. Reiner, M. Kodurand, J. Järvik.

Need dünaamilised kompensaatorid on edukalt töötanud üle 25 aasta. Nende põhiline puudus on reaktiivkoosteosade suur installeeritud võimsus ja juhtsüsteemi suur sisendsignaalide arv ning moonutatud voolu ja pingekõvera korral täpse mõõtmise keerukus.

Lihtsama, tõhusama ja odavama lahenduse poole püüdlemisel tekkis **uus originaalne koormusega isekohastuv resonantsmuundurite klass**, millele on väljastatud patent 19 maal. Väga lihtsustatult selgitab nende muundurite toimimisideed joonis L 2.11. Klassikalistes reaktiivvõimsuse automaatkompensaatorites määratakse anduri abil tarbija

koormusvoolu reaktiivkomponent. Regulaatoris võrreldakse selle suurust etteantud suurusega. Lahkkõlastusväärtuse alusel tagab täiturelement nõutava suurusega mahtuvusliku voolukomponendi formeerimise. Kõigi nende toimingute teostamisele kulub aega. Seetõttu erineb tulemus ideaalsest.

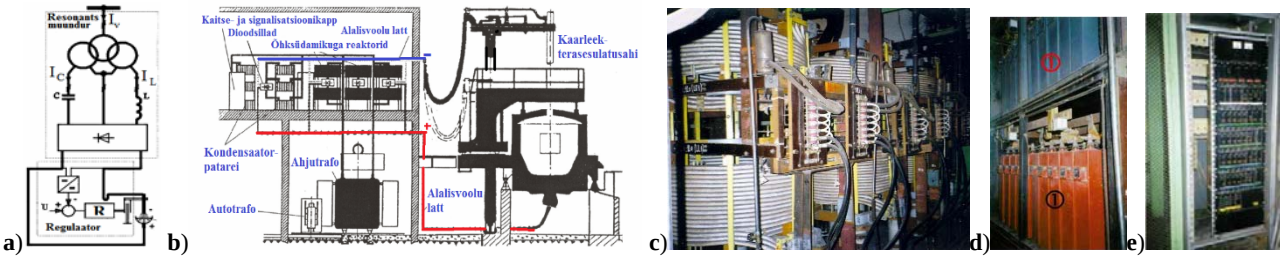
Vaatleme lihtsaimat ühefaasilist koormusega isekohastuvat resonantsmuundurit. See sisaldab trafot, mille sekundaarmähisel on keskväljavõte, faasinihutuselementidena toimivad reaktor *L* ja kondensaator *C* ning eraldusdioodid V1...V6, mis tõkestavad rööpresonantsahela teket ja suunavad voolu läbi tarbija, näiteks, kaarleekterasesulatusahju. Siin toimub reaktiivvõimsuse kompensatsioon parameetriliselt, ilma klassikalise automaatregulaatori abita. Muundur toimib nagu elektriline „peegel“, kus tarbija voolu induktiivkomponendi vektorile I_L tekkib peegelpilt mahtuvusliku vooluna I_C (joonis L 2.12b). Nende kahe komponendi summa võrdub võrgust võetava vooluga I_v. See on aktiivvool, mis on allikapingega faasis. Seda parameetrilise reguleerimise olemust võib võrrelda vee voolamisega jões. Kui me keset jõge paigutame kunstliku saare, siis tänu sellele, et saare ja mõlema jõekalda vahelise lõigu hüdraulilised takistused on võrdsed, on veevood ühel ja teisel pool saart alati võrdsed. Nad ei olene sellest, kas veetase on kõrge või madal. Et muuta voogude suhet, tuleb meil saart liigutada. Viimast tulemust võime resonantsmuunduri korral saavutada, kui asendame muunduri induktiivõlas kaks dioodi näiteks türistoridega.



Joonis L 2.12. Koormusega isekohastuva ühefaasilise resonantsmuunduri toimimise idee: a – ühefaasiline lülitus

Muunduri tegelik töö on oluliselt keerukam. Põhjuseks on *LC*-elemendid, mis toimivad faasinihutitena, formeerides ühefaasilisest toitest mittesümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi. Seega toimivad muunduri dioodid kolmefaasilise alaldina. Need dioodid juhivad voolu ainult siis, kui dioodi anoodi potentsiaal on positiivsem katoodi omast. Seetõttu muutub kolme faasi koostoimel igal poolperioodil muunduri topoloogia (joonis L 2.12c ja e).

Nende muundurite baasil töötati välja ja rakendati pikaajalisele väga tulemuslikule tööle kaks alalisvoolu kaarleekterasesulatusahju toiteallikat ESTA: esimene, võimsusega 1 MW Mustmetallurgia Teaduslikus Uurimisinstituudis Tšeljabinskis; teine, võimsusega 8,5 MW lülitati 1994. a tööle Tšeljabinski Metallurgiakombinaadis (joonis L 2.13) ja need on tulemuslikult töötanud tänaseni. Elektriskeem (a) koosneb resonantsmuundurist, ahjust ja elektroodi regulaatorist, millega reguleeritakse kaarepikkust ja ahju tööd. Ahjutrafo paikneb esimesel korrusel (b). Kondensaatorpatarei, õhksüdamikuga reaktorid, alaldussillad, kaitse- ja signalisatsioonikapp on teisel korrusel. Vesijahutusega dioodsillad on paigutatud reaktiivelementide juurde. Alalisvoolumiinuslatid on teise korruse lae all ja plusslatid teise korruse põranda all.



Joonis L 2.13. Kaarleekterasesulatusahju toiteallikas ESTA. Tšeljabinski metallurgiakombinaat: a – elektriskeem, b – koosteosade paigutus, c – õhksüdamikuga reaktorid ja vesijahutusega alaldi plokid, d – kondensaatorpatareid, e – kaitse ja signalisatsioonikapp

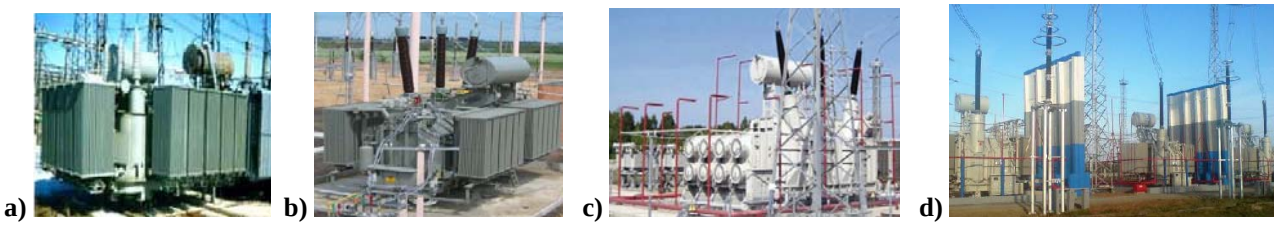
Toiteallika ESTA eelised, võrreldes klassikaliste lahendustega: oluliselt odavam, lihtsam ja töökindlam; väga võrgusõbralik, tekkivad võrgupinge kõikumised ja võrguvoolu moonutused on umbes 3 korda väiksemad kui

türistoralaldil; väga suur võimsustegur (cos φ_n = 0,99), pinge reguleerimisel võimustegur ei halvene ja võrguvoolu moonutused oluliselt ei suurene, **üleminekul lühisele võrgust võetav vool väheneb.**

India firmale Electrotherm India valmis toiteallika ESTA eskiisprojekt võimsusele 10 MW. See oli ette nähtud paigaldamiseks Bangladeshi. Kõrge elektrihinna tõttu kaarahjust loobuti. Saksa firmale valmisid ka eskiisprojektid neljale erineva lülitusega 100 MW võimsusega toiteallikale. Nende alusel töötas firma SCHORSH välja tööprojekti ja selgitas välja majandusnäitajad. Need osutusid väga headeks, kuid seni on ESTA lääneriikides realiseerimata.

Patenditud (USA nr. 5,375,053; EP1859333A1) on ka kaudse ja lihtsa võimsusteguri korrektsiooniga alalisvoolu-vahelduvvoolu-(AV-VV)-muundurid. Neil on loomulik langev pinge-voolu tunnusjoon, mis teeb nad eriti sobivaks elektrikaare toitmisel, kondensaatorite laadimisel ja muude kiiresti ning suures ulatuses muutuvate koormuste (nt kaarkeevitusaparaatide) toitmisel. Väljatöötamisel on originaalne kaarkeevitusaparaat (US7821801B2).

Reaktorite tootmisest Zaporožje trafotehases. Alates 1997. a juhitavate (magnetjuhtimisega) reaktorite tootmine jätkus. 1990. aastate alul oli Eestis väga aktuaalne juhitavate reaktorite kasutuselevõtt. Koormuste vähenemise tõttu vajas liinide poolt genereeritav mahtuvuslik reaktiivvõimsus kompenseerimist. Eesti Energias võeti vastu otsus kasutada mittereguleeritavaid sama maksumusega õhksüdamikuga reaktoreid. Täpselt reguleeritavatest juhitavatest reaktoritest loobuti. Joonisel L 2.14 on alanud aastatuhandel Zaporožje trafotehases valminud mõne 110, 220, 330 ja 500 kV reaktorite fotod. Neist vasakult kolmas 180 MVA 330 kV reaktor töötab alates 2007. aastast Leedus Ignalina aatomielektrijaamas. Reaktorite tootmisega on hakanud tegelema ka Hiina ja India.



Joonis L 2.14. Zaporožje trafotehase poolt töösse lülitatud 110...525 kV magnetjuhtimisega reaktorid. Eestile lähim 330 kV 180 MVA juhitav reaktor (c) Ignalina aatomielektrijaamas

Kokkuvõte: Juhitavad reaktorid on tõhusad reaktiivvõimsuse kompensatsiooni, pinge stabiliseerimise, ülekandekadude vähendamise, lülitite ja trafo väljavõtete kommuteerimisressursi säästvad seadmed eelkõige sellistes rakendustes, kus on vajalik kiire ja sujuv reguleerimine. Seega sobivad reaktorid muutuva koormusgraafikuga võrkudes, pikkade liinide läbilaskevõimsuse suurendamiseks ja turbogeneraatorite vabastamiseks reaktiivvõimsuse tarbimisest. Juhitavate reaktorite kasutamine võimaldab lahendada hajutatud genereerimisega (tuule-, päikesepargid jne) võrkude probleeme, mis on eelkõige seotud genereerimise ja tarbimise tasakaalu tagamisega ning sellega kaasneva pingetasemete kõikumisega. Puudusena tuleb märkida, et nende kaod on suuremad kui mittejuhitavatel põikreaktoritel, mis piirab nende kasutust valdkondades, kus kiire ja sujuv reguleerimine pole nõutavad.

ELEKTRIENERGIA ÜLEKANNE

Elektrienergia on laengute põhiomadus. Kui räägitakse elektrienergia ülekandest ühest punktist teise, siis peetakse silmas laengute energiat, nende energiavälja ja laengutega seotud energia mingit muutust, mille tulemusel vastav kogus laenguid kantakse koos energiaga genereerimispunktist tarbimispunkti, kus nende energia muundatakse teiseks energialiigiks. Lähtudes igapäevapraktikast, et elektrijaam ühendatakse tarbijaga voolujuhtide abil, tundub loogiline, et energia liigub juhtme sees. Kas see ka on nii?

Elektrienergia ülekandel on ülitähtis roll voolujuhtidel. Kuid energiat saab üle kanda ka ilma juhtideta, kuigi siiani ei rahulda sellise ülekande energeetilised näitajad (väike võimsus, madal kasutegur, suured investeeringud jne). Voolujuhtide kasutamisel saame alalisvoolu ülekande korral lihtsustatult nende ümber olevat laengute energiavälja vaadelda eraldi sõltumatu elektri- ja magnetväljana. Vahelduvvoolu korral laengute energiavälja voolujuhtide ümber ei saa eraldi käsitleda, siin on ühine elektromagnetväli.

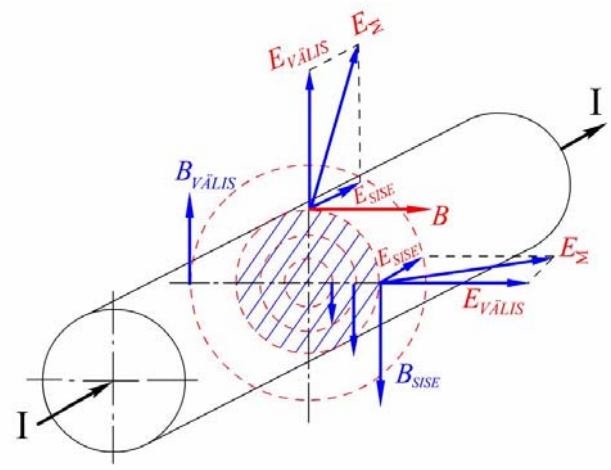
Energia ülekande rööpapaar. Kivisöe- ja naftarongid liiguvad raudteel rööpapaari pidi leiukohtadest salvestatud keemilise energiaga tarbimispunktidesse. Elektrienergia transpordil täidavad rööpapaari rolli metalljuhtmed – voolujuhid, milles „voolab“ vool. Sellega aga sarnasus lõpeb.

Alalisvoolu ülekanne

Olgu ümartraadist juhtmetega alalisvoolu ülekanne. Teame, et kui juhtmetes liiguvad elektronid (voolab vool), siis nad soojenevad ja juhtmes eraldub elektronide liikumisega kaasnev pidev elektronide energia suurenemine ja kohe toimuv omandatud liigse energia väljakiirgamine soojusenergiana. Kuidas saab selgitada energia suubumist juhtmesse?

Kui juhtmed pole ühendatud elektriallikaga, siis seal ei ole elektronide korrapärast liikumist ja voolu juhtmes. Ühendades juhtmed allikaga (generaatoriga), tekkib juhtmes allika laengute energiavälja mõjul elektronide korrapärane liikumine – elektrivool I ja piki juhet tekkib potentsiaalilang. Potentsiaalilangu ja punktide vahelise kauguse suhe on võrdne elektrivälja tugevusega (potentsiaalilanguga pikkusühikule) voolujuhi sees E_{sise}. Viimase suund on paralleelne juhtme teljega ning ühtib voolu suunaga.

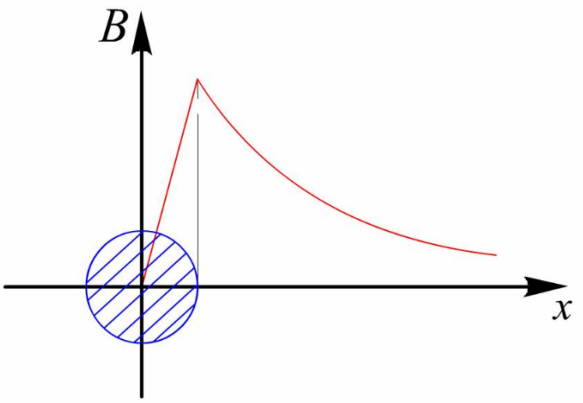
Vooluga juhtme ümber tekkib samuti liikuvate laengute energiaväli – magnetväli. Välja tekitavad elektronide laengute energiaväljad ning väline väljatugevus $E_{välis}$ oleneb allikasisepingest, juhtme läbimõõdust ja lähedal olevatest kehadest. Välisväli on risti juhi teljega. Juhi pinnal E_{sise} ja $E_{välis}$ liituvad ja ühine summaarne väljatugevus $\dot{E}_{\Sigma} = \dot{E}_{sise} + \dot{E}_{välis}$. Tavaliselt $E_{välis} >> E_{sise}$. Seepärast on summaarne väljatugevus E_{Σ} oma suuruselt ja suunalt lähedane $E_{välis}$-ele (joonis L 3.1).



Joonis L 3.1. Alalisvoolu liini voolujuhi sise- ja välisväli

Kõrgepingelise alalisvoolu ülekandeliini korral on välise elektrivälja tugevus $E_{välis}$ juhtme pinnal kilovoltides sentimeetri kohta, aga juhtme sees millivoltides sentimeetri kohta, seega *ca* miljon korda väiksem. Joonisel on $\dot{E}_{sise}$ vektor näidatud erakordselt suurena ning summaarse väljatugevuse vektor $\dot{E}_{\Sigma}$ on praktiliselt risti juhtme pinnaga.

Juhtme sise- ja väliselektriväljaga liitub voolust tingitud magnetväli. Magnetvootiheduse vektor $\dot{B}$ on igas ruumipunktis suunatud juhtme põiklõiketasapinnas oleva ringjoone puutuja suunas, mille keskpunkt paikneb juhtme telgjoonel. Magnetvootihedus võrdub telgjoonel nulliga ja eemaldumisel suureneb lineaarselt, saavutades maksimaalse väärtuse juhtme pinnal. Juhtmest eemaldumisel magnetvootihedus väheneb (vt joonis L 3.2).

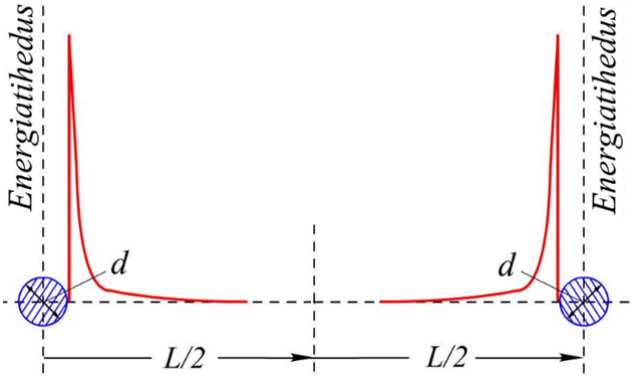


Joonis L 3.2. Vooluga juhtme magnetvootiheduse muutumine olenevalt kaugusest juhtme keskpunktist

Liikuvate elektrilaengutega on lahutamatult seotud nende energiaväli, mida võime käsitleda elektri- ja magnetväljana. Kui laengud liiguvad püsikiirusel (alalisvool), siis elektri- ja magnetvälja tugevuste vahel arvseos puudub. Seetõttu võib neid välju sõltumatult käsitleda. Vaadeldes energia ülekannet, peame laengute ja nende energiavälja (elektri- ja magnetvälja) ülekannet vaatama koos, sest **energia ülekandes osalevad lahutamatult mõlemad väljad**. Seega toimub energia ülekanne ruumis laengute ja nende energiavälja (elektromagnetvälja) vahendusel, mitte eraldi elektri- ja magnetvälja abil.

Ruumis jagunevad elektromagnetväli ja temale omane elektrienergia. Vaatame, kui palju sisaldab iga kuupsentimeeter elektromagnet(elektri)energiat voolujuhtide vahelises ruumis. Sarnaselt võime vaadelda, kui palju soojusenergiat sisaldab iga kuupsentimeeter kahe suvalise kuumutatud keha vahelises ruumis.

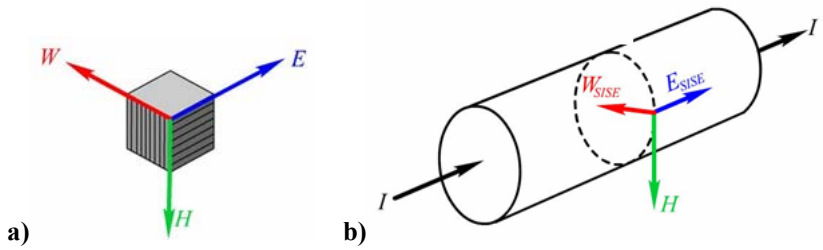
Elektromagnetenergia kogus välja ruumiühikus, energiatihedus, oleneb elektri- ja magnetvälja tugevusest ja keskkonna omadustest, milles paikneb väli. Joonisel L 3.3 on näidatud energiatiheduse jagunemine alalisvoolu elektriülekandeliinil.



Joonis L 3.3. Alalisvoolu elektriülekandeliini energiatiheduse jagunemine voolujuhtide vahel. Liinijuhtmed on kujutatud ebaloomulikult suure ristlõike pinnaga

Siin on põhiline osa energiast koondunud välisvälja vahetult voolujuhi lähedusse. Selline energiatiheduse jagunemine on iseloomulik elektriülekandeliinidele. Kui juhtmesisene energiatihedus oleks suurem, siis see osa elektrienergiast muunduks soojusenergiaks, mis kuumutaks voolujuhte.

Elektrienergia ülekandesuuna määrab laengute ja nende energiavälja liikumissuund, mis langeb kokku voolu suunaga. Seega, lähtudes klassikalisest elektromagnetvälja teooriast, kandub energia ruumis suunas, mis on risti elektri- ja magnetväljatugevuste vektoritega (joonis L 3.4a).



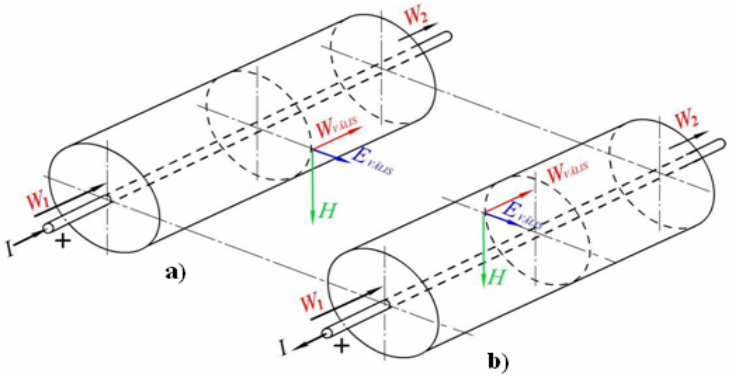
Joonis L 3.4. Energia suubumine vooluga metalljuhtmesse (a). Elektriväljatugevuse *E* , magnetväljatugevuse *H* ning elektrienergiavoo *W* vektorite suunad (b)

Joonisel L 3.4b on vaadeldud vooluga juhtmelõiku. Lähtudes väljatugevuse vektorite $\dot{E}_{sise}$ ja $\dot{H}$ suunast (ühtib magnetvootiheduse vektori $\dot{B}$ suunaga), on energiavoog W suunatud juhtme sisse ka igas juhtmesiseses ruumipunktis. Mida lähemale juhtme telgjoonele, seda väiksemaks muutub energiavoog ning juhtme telgjoonel võrdub see nulliga. Elektromagnetvälja energia juhtmes muundub soojusenergiaks.

Juhtmesse suubuv ja seal hajuv energiakogus W_{sise} on võrdeline elektriväljatugevusega E_{sise} ja magnetväljatugevusega H juhtme pinnal. Elektriväljatugevus E_{sise} on võrdeline juhtme takistuse ja voolutugevusega. Magnetväljatugevus H on võrdeline voolutugevusega I. Seetõttu on metallis eralduv soojusenergia võrdeline voolu ruuduga ja takistuse esimese astmega I^2R.

Kui voolu suund tagasivoolujuhtmes on vastupidine, siis vastupidised on ka väljatugevuste E_{sise} ja H suunad. Seetõttu jääb energiavoo suund ka tagasivoolujuhtmes muutumatuks. Seega kaasneb elektrivooluga metalljuhtmes elektrienergia muundumine soojusenergiaks sõltumata voolu suunast.

Analüüsime elektrienergia voogu väljaspool metalljuhet. Joonisel L 3.5 on kujutatud silindrilised pinnad, mis lisaks kummalegi voolujuhile haaravad veel osa juhtmeid ümbritsevat ruumi .



Joonis L 3.5. Elektrienergia ülekanne piki pealevoolu (a) ja tagasivoolu (b) voolujuhti

Allika „+“-klemmiga ühendatud voolujuhi (pealevoolujuhi vool on suunatud allikast tarbijasse) läheduses, (vt joonis L 3.5a) on energiavoo $W_{välis}$ suund määratud välise elektri ja magnetvälja tugevuse $E_{välis}$ ja H vektori suundadega, mis on paralleelne voolujuhi telje suunaga. Energia ei kandu läbi silindrilise pinna. Samasugune on olukord ka teise negatiivse klemmiga ühendatud (tagasivoolu)juhtme ümbruses. Erinevuseks on aga, et seal kandub energia vastupidises suunas voolu suunaga (joonis L 3.5b). Seega **kannavad mõlemad ülekandeliini juhtmed elektrienergiat allikalt tarbijale**.

Vastavalt energia jäävuse seadusele on energiavoog W_2 väiksem kui W_1. Nende erinevus võrdub soojusenergiaga (kadu), mis eraldub vaadeldud silindriliste lõikude juhtmetes. Kuna voolutugevus piki juhet ei muutu, siis on muutumatu ka magnetvälja tugevus H. Järelikult peab allikast eemaldudes välise elektrivälja tugevus $E_{välis}$ vähenema. Nii on ka tegelikkuses. Mida kaugemal allikast, seda väiksemaks jääb potentsiaalide erinevus liinijuhtmete vahel ja sellega võrdeline välise elektrivälja tugevus $E_{välis}$.

Kokkuvõttes kandub elektrienergia laengute ja nende energiavälja (elektromagnetvälja) vahendusel piki ülekandeliini juhtmeid. Sellest energiast muundatakse väike osa ülekandejuhtmete sees soojusenergiaks. Põhiosa energiast kantakse üle tarbijateni, kus allikas laengutele antud liigne energia muundatakse teisteks energialiikideks. Seega väheneb laengute energiavaru vahetpidamata, kuid samaaegselt täieneb allika arvelt. Seejuures jääb ajas igas ruumipunktis energiatihedus muutumatuks. See protsess on sarnane vee voolamisele torus, üks veekogus asendatakse teisega ja veetoru jääb veega täidetuks.

Alalisvoolu elektriallika korral, kui tarbija lüliti on välja lülitatud, tekkib lüliti isoleervahemikul lõpmata väikese voolu juures tasakaalustav allikas. Seetõttu on juhtmete potentsiaal praktiliselt võrdne toiteallika klemmipotentsiaaliga. Ühel juhtmel on ülekaalus elektronid, teisel elektronide tühjad pesad ja juhtmeid ümbritsevas keskkonnas on nende energiaväli (elektriväli) ka üliväikese voolu korral (pea voolu puudumisel) juhtmetes. Elektrienergia ülekanne toimub ainult laengute liikumise korral. Seega on metalljuhe vajalik eeltingimus, et kanda allikast tarbijasse laengute energiavälja energiat. Need juhtmed määravad sarnaselt rööpapaariga energiavoo suuna ruumis.

Vahelduvvooluenergia ülekanne

Kui vahelduvvoolu suuna ja suuruse muutumiskiirus on suhteliselt väike, näiteks allikasisepinge sagedusel 50 Hz, siis energiaülekanne toimub põhiliselt samuti nagu alalisvoolu korral. Seejuures aga ilmnevad mõned uued ilmingud, mis sisaldavad alget võimaldamaks elektrienergia transporti juhtmevabalt. Viimast saab realiseerida elektromagnetvälja väga kiirel muutumisel, seega kasutades kõrg- või ülikõrgsagedusvoolusid.

Nihkevool. Kui paigutada vahelduvmagnetvälja voolu juhtiv suletud kontuur, näiteks metallrõngas, siis ajas muutuv rõnga aheldusvoog indutseerib rõngas allikasisepinge, mis omakorda tekitab rõngas elektrivoolu. Nii avastati elektromagnetiline induktsioon. Kui kontuur on valmistatud isoleermaterjalist, siis elektronide liikumisest põhjustatud voolu ehk klassikalist juhtivusvoolu ei teki. Samas aga tekkib piki kontuuri tasakaalustava vastumõjuna vahelduv allikapinge, mis annab tunnistust laengute energiavälja (vahelduv-elektrivälja) tekkest. Siin on tasakaalustatavateks allikateks **väikseimad allikad – dipoolid.** Dipoolide tekkel toimub energiasalvestus elektronide ja tühjade pesade energiavälja, laengute nihkumine ruumis – **nihkevool.** Nihkevoolu teket on iseloomustatud lähemalt selle õpiku ptk 1.4 joonised 1.21...1.23.

Ajalooliselt on seisukohti, et igasugune ajas muutuv elektriväli kutsub esile ajas muutuva magnetvälja. Selline selgitus kirjeldab vaid kaudselt nähtuse olemust. Alaliselektri- ja magnetvälja saab lihtsustatult vaadelda eraldi: näiteks laetud keha elektriväli või alalismagneti magnetväli. Alalisvoolu korral on mõlemat välja võimalik üheaegselt jälgida.

Ajas muutuva voolu korral pole võimalik magnetvälja elektriväljast eraldada. Igas ruumipunktis on mõlemad väljad ning nende väljatugevused omavahel seotud, sest nad kirjeldavad üht ja sama laengute energiavälja.

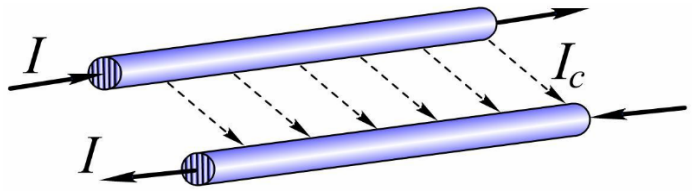
Magnetväli on liikuva laengu iseloomulik tunnus. Muud tunnused võivad ilmneda mingitel tingimustel ja puududa teiste korral. Nii mõjutab elektrivool keemiliselt vaid mõningaid juhtivaid materjale. Juhtivusvooluga kaasneb tavatingimustes soojuse eraldumine. Jahutades voolujuhti absoluutse nulltemperatuurini (–273 ºC), muutub juht ülijuhiks ja soojuse eraldumine lakkab.

Laengute liikumist iseloomustab alati nende energiavälja (magnetvälja) olemasolu ja selle ilmingud teiste energiaväljadega liitumisel on tasakaalustava allika (elektromagnetiline induktsioon) ja mehaanilise jõu teke. Kuna ajalooliselt on laengute energiavälja vaadeldud kunstlikult kahe väljana – elektri- ja magnetväljana, siis on nenditud, et magnetvälja ilmnemine muutuvas elektriväljas annab aluse vaadata elektrivälja muutust ajas kui voolu eriliiki, mida on nimetatud **nihkevooluks.**

Nihkevoolu mõiste kasutuselevõtt Maxwelli poolt 1873. aastal mängis olulist rolli elektromagnetväljade teooria ja selle praktilisel kasutamisel signaalide juhtmevabal edastamisel ning teistel eesmärkidel elektrotehnikas. See nihkevoolu nimetus tekkis käibel olnud maailma eetri hüpoteesi alusel. Eetri all kujutati keskkonda, milles osakesed nihkuvad elektrivälja mõjul oma lähteasendist. Praegu on eetri mõistest

loobutud, kuid kasutatakse nihkevoolu mõistet. Õpiku koostaja arvab, et eetri hüpotees laengute energiavälja levi selgitamiseks õhus ja vaakumis on hädavajalik ka tänapäeval.

Kui elektriväli muutub aeglaselt, siis võrreldes juhtivusvooluga on nihkevool tühiselt väike. 50 Hz sageduse korral on vaskjuhtmes juhtivusvool võrreldes nihkevooluga 10^{16} korda suurem. Seega nihkevool praktiliselt puudub. Nihkevool omandab praktilise tähenduse sagedusel 50 Hz aga vähemalt kahel juhtumil: esiteks, kui metallkontuuris on katkestus ja sinna on lülitatud kondensaator; teiseks, kui kaks vooluga metalljuhet kulgevad kaugel teineteise kõrval. Nende kahe juhtme vahel tekkib vahelduv elektriväli, seega läbib nihkevool, mille suurus pikkade juhtmete korral võib osutuda oluliseks (joonis L 3.6).



Joonis L 3.6. Vahelduvvoolu ülekandeliini voolud: I – juhtivusvool, I_c – nihkevool

Seega võib elektrivoolu olla kahte liiki: juhtivusvool metallides (alalis- ja vahelduvvool); nihkevool igas keskkonnas, kaasa arvatud vaakum („tühjus“). Nihkevool tekkib alalisvoolu korral lühikese impulsina skeemi parameetrite (allikapinge, ümberlülitamisel) muutmise korral; vahelduvvoolu korral on ta ainult ajas muutuv. Kuna iga vool on laengute ja nende energiaväljade liikumine, siis ümbritseb neid alati laengute **energiaväli** ehk **magnetväli**.

Elektrienergia kandub edasi ruumis, kui seal liiguvad laengud. Klassikalise arusaama alusel eksisteerivad ruumis samaaegselt elektromagnetvälja mõlemad komponendid: elektriväli ja magnetväli. Nihkevoolude olemasolu teeb võimalikuks juhtmevaba energia ülekande. **Nihkevoolu tekkemehhanism õhus ja vaakumis vajab uusi mudeleid**, mis selgitavad laengute ja nende energiaväljade vastastikmõju nendes keskkondades.

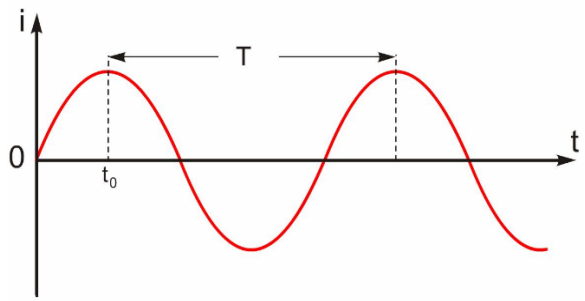
Milline peaks olema juhtmeteta (juhtmevaba) ülekande sagedus?

Mida kiiremini muutub laengute energiaväli (elektriväli), seda suurem on nihkevool ja vastav magnetväli. Järelikult on seda suuremat energiakogust võimalik üle kanda. Juhtmevabast energiaülekandest võib mõelda seega vaid väga suurte sageduste korral – mega- ja gigahertside korral.

On veel ka teine põhjus, miks madalad sagedused juhtmevabaks energiaülekandeks ei sobi.

Elektromagnetväli kandub õhus ja vaakumis „tühjuses ehk eetris“ edasi valguse kiirusel, mis võrdub 300 000 km/s. See on väga suur kiirus, kuid mitte lõpmata suur. Seetõttu ei toimu energiaallikat ümbritsevas ruumis elektromagnetvälja muutus hetkeliselt. Muutus hilineb allika voolu muutuse suhtes seda enam, mida kaugemal paikneb vaadeldav ruumipunkt.

Eeldame, et allika vool muutub siinuseliselt. Olgu mingil ajahetkel t_0 voolu väärtus positiivne ja maksimaalne (joonis L 3.7).



Joonis L 3.7. Siinuseline vahelduvvool: T – perioodi kestus, t_0 – aja algmoment

See suurus kordub ajaintervallidel T, $2T$, $3T$ jne. Siin on T ühe perioodi kestus. Aja T vältel eemaldub elektromagnetiline häiring allikast kaugusele

$$\lambda = cT = c/f,$$

kus c – valguse kiirus, f – voolu muutumise sagedus. Kaugust λ, milleni kulgeb elektromagnetväli perioodi vältel, nimetatakse lainepikkuseks.

Voolu vaheväärtustele, mida vool omandab perioodi vältel, vastavad omad elektromagnetvälja (häiringu) võrdelised väärtused. Kõik elektromagnetenergia saadetised antakse edasi ruumis samal valguse kiirusel. Häiringud voolu positiivsest amplituudväärtusest intervalli T lõpul kanduvad kaugusele λ. Häiringud järgnevast negatiivsest maksimumist kanduvad selleks ajahetkeks kaugusele $\lambda/2$, sest negatiivne amplituudväärtus saabub poolperioodi võrra hiljem.

Arendades mõttekäiku, veendume, et siinuselise voolu korral muutub ruumis siinuseliselt ka laengute energiaväli (elektromagnetväli). Kõikides ruumipunktides muutub elektromagnetväli ajas sagedusega, mille määrab allikavoolu muutumise sagedus. Välja võnkumised allikast kaugemates punktides hilinevad võrreldes võnkumistega allikale lähedasemates ruumipunktides. Selliste võnkumiste kohta võib öelda, et neil on **erinev faas** või võnked toimuvad **faasinihkega**. Juhtmevaba energiaülekande korral on faasinihkel oluline roll. Selgituseks käsitleme põhjalikumalt häiringuallika ehk elektromagnetvälja kiirguri tööd.

Vaatleme idealiseeritud kiirgurit, mis koosneb kahest lühikesest juhtmest, milles voolab kõrgsagedusvool. Olgu kiirguri juhtmete voolud ühesuguse faasiga, st nad on igal ajamomendil sama suuna ja suurusega. Kui võrreldes lainepikkusega on juhtmete vahekaugus väike, siis elektri- ja magnetväljade väljatugevused mõlemalt juhtmelt mingil kaugusel asetsevas punktis on omavahel võrdsed ja samasuunalised. Neil on ühesugune faas. Järelikult on kahe juhtme väli kaks korda tugevam kui ühel juhtmel.

Juhul kui juhtmete vahekaugus on samas suurusjärgus lainepikkusega, siis väljade faasid, mille nad tekitavad kaugel asuvas punktis, pole enam samad, kuna elektromagnetiline häiring levib teatud kindla kiirusega. Olgu juhtmetevaheline kaugus võrdne poole lainepikkusega $\lambda/2$. Siis erinevalt lähestikku paiknevatest juhtmetest ei tekita kaks sama faasiga vooluga juhet elektromagnetvälja kauguses paiknevas ruumipunktis. Iga juhtme väljatugevused on suuruselt võrdsed, kuid suunalt vastupidised, andes liitudes summaks nulli. Elektromagnetvälja nad välja ei kiirga. Vastupidi, kui voolud on nihutatud faasis poole perioodi $T/2$ võrra, siis juhtmed, mis on eemaldatud teineteisest poole lainepikkuse $\lambda/2$ võrra, moodustavad kiirguri, aga lähipaigutusega juhtmed mittekiirgava süsteemi.

Tegeliku kiirguri moodustab mingi kontuur, milles voolab kõrgsagedusvool. Lihtsustuseks eeldame, et kiirguri moodustab sõrmusekujuline metallring, millel on väike osa välja lõigatud. Sellise kiirguri elektromagnetvälja ruumi igas punktis võib vaadelda paljude väikeste ringilõikude – elementaarsete kiirgurite väljade summana. Väljade liitmisel tuleb arvestada iga elementaarväljatugevuse faasiga. Ringi saab mõtteliselt jagada diametraalselt paiknevateks elementaarjuhtmete paarideks. Nendes on voolud suuruselt võrdsed, kuid suunatud vastassuunas (faaside vahe on $T/2$).

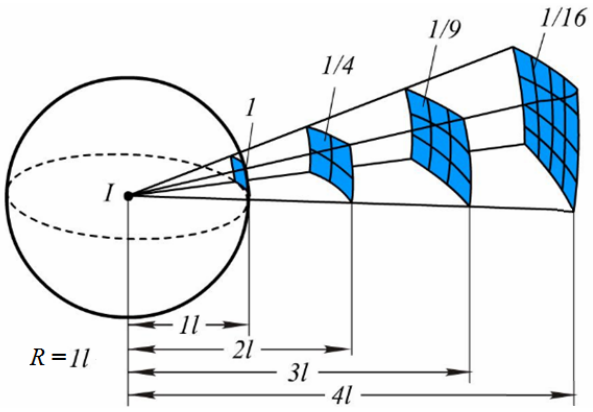
Eelnevast selgub, et kui ringi läbimõõt on lainepikkusega võrreldes väike, siis ta praktiliselt ei kiirga elektromagnetilist energiat. Ringikujulise kiirguri kohta öeldu kehtib ka kõigi teiste erinevat tüüpi kiirgurite kohta.

Siit saame selgeks, miks madalad sagedused ei kõlba elektrienergia juhtmevabaks ülekandeks. Nii on 50 Hz sageduse korral lainepikkus λ = 6 000 kilomeetrit, selliste mõõtudega peaksid olema ka kiirgurid. Sagedusel 10 MHz lainepikkus on 30 meetrit. Selliste mõõtmetega kiirguri ehitamine on mõeldav.

Juhtmevaba energia ülekanne. See on praegu veel energeetikute unistus. Elektersidetehnikas on see aga igapäevane praktika. Mis takistab energeetikutel sama tegemast?

Näiteks saadavad raadiojaamad oma signaale igas suunas. Olgu 1 km kaugusel raadiojaamast elektromagnetenergia tihedus võrdne ühe ühikuga, siis 10 km kaugusel jaamast on energiatihedus juba 0,01, sest väli levib kõikides suundades ühtemoodi. Kaugusel 100 km on energiatihedus 0,0001 võrreldes algsega 1 km kaugusel (vt joonis L 3.8). Joonisel on vaadatud nelja kera keskpunktist lähtuvat ja mõttelise ruudu tippu

suubuvat sirgjoont. Ruudu küljed eraldavad kera pinnal kaugusel $1l$ kindla suurusega pindala S_{1l}. Vaatluse all oleva kera raadius on $R_{1l} = 1l$. Kera pindala avaldis on ruutsõltuvus $S_{k1} = 4\pi R^2 = 4\pi(1l)^2$. Kaks korda suurema raadiusega kera pindala on 4 korda, kolm korda suurema raadiusega kera 9 korda, neli korda suurema raadiusega keral 16 korda suurem jne. Seega energiatihedus kera pinnal langeb raadiuse kasvades vastavalt 4, 9 ja 16 korda.



Joonis L 3.8. Kauguse suurenedes kiiratava elektri-energia tihedus väheneb

See on väga lihtsustatud käsitlus, kuid annab ettekujutuse probleemi olemusest. Kas nii on võimalik energiat üle kanda? Kas pole see raiskamine, kui osa energiavoost suubub sinna, kuhu teda pole vaja? Täna oleks selline lahendus luksus, mida võib endale lubada vaid **Päike**. Kogu Päikese poolt kiiratavast energiakogusest haarab Maa omale vähem kui 1:2 000 000 000 osa.

Energia transport on mõeldav vaid suunatud kiirguse korral, et energia suundub konkreetsele adressaadile.

Kui anda kiirguri kiirguse koondamissüsteemile vajalik kuju, siis saab elektrimagnetvälja voogu panna liikuma kindlas suunas. On olemas sellised kiirgursüsteemid, mis suunavad etteantud kohta pea kogu kiirgusenergia. Kuid see pole piisav. Vastuvõtuantenn ei võta vastu energiat, vaid suunab osa energiast tagasi, mõjutades nii kiirguri tööd. Madalate kasutegurite puhul, mis on iseloomulikud elektersidetehnikale, sisuliselt puudub vastuvõtja antennide tagasimõju saatejaama tööle.

Juhtmevaba elektrienergia ülekanne peab toimuma suure kasuteguriga. Siin pole enam võimalik ignoreerida vastuvõtuantenni mõju kiirgurile. Arvutuste põhjal on leitud, et saate- ja vastuvõtuantennide mõõtmete ning lainepikkuse ja elektrienergiaülekande vahemaa õige suhte korral võib saavutada suhteliselt suure kasuteguri.

Nii näiteks sagedusel 30 GHz tasapinnaliste antennidega 100 x 100 meetrit saab elektrienergiat kanda 5 km kaugusele kasuteguriga η = 60%. Nendes arvutustes on aluseks võetud tõsiasi, et saateantenn koosneb miljonist elementaarkiirgurist, mida läbib vool ja millel on kõikide teiste vooludega ühine faas. Sellist süsteemi aga on pea võimatu praktikas realiseerida.

See näide pole esitatud selleks, et veenda lugejat juhtmevaba energiaülekande ebareaalsuses. Võib loota, et selline ülisuur ja keerukas ülesanne tulevikus lahendatakse. Aga probleemi lahendamisel üleskerkivad takistused on väga suured.

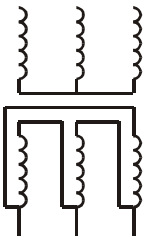
Tasapinnaliste antennide asemel on võimalik välja töötada lihtsamad ja sobivamad antennid. Näiteks kui anda antennile paraboloidi kuju ja tagada elemntaarkiirgurites voolude jagunemise kindla seaduspärasuse alusel, võib antenni mõõtmeid vähendada *ca* 10 korda ja elementaarkiirgurite arvu vähendada mõnekümne tuhandeni. Selline lahendus on oluliselt lihtsam, kuid tasapinnalise antenniga võrreldes realiseerimiseks ikkagi tõenäoliselt vastuvõetamatu.

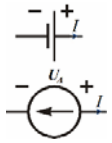
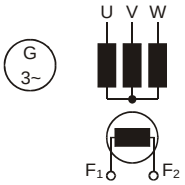
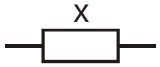
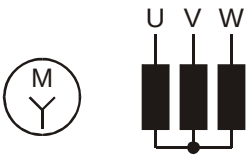
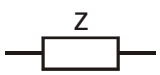
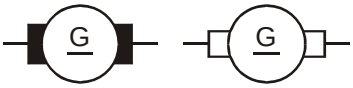
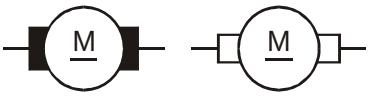
On selge, et juhtmevaba elektrienergia ülekanne on teostatav ainult väga kõrgete sageduste korral. Heade majandusnäitajatega võimsaid generaatoreid ülikõrgsagedusele pole veel loodud. Selliste generaatorite väljatöötamine on aga juhtmevaba elektrienergiaülekandmise idee realiseerimiseks ülitähtis.

Energeetika alles pöörab pilke juhtmevaba energiaülekande poole.

LISA 4

ELEKTRISKEEMIDE TINGMÄRKIDE NÄITEID

Tingmärk	Selgitus	Tingmärk	Selgitus
—	alalisvool	X_C X_C	mahtuvuslik reaktiivtakistus
≂	alalis- ja vahelduvvool		šunt (nt ampermeetrit sildav paralleeltakistus)
~	vahelduvvool		reguleeritav takisti (reostaat)
+	positiivne polaarsus (poolus, klemm)		kondensaator
Y	kolmefaasiline mähis tähtlülituses	+	elektrolüütkondensaator (polaarne; anood märgitakse plussmärgiga)
Y	sama väljatoodud nullpunktiga		elektrimõõteriist
△	kolmefaasiline mähis kolmnurklülituses		registreeriv mõõteriist
	kolmefaasiline trafo tähtkolmnurklülituses		integreeriv mõõteriist (nt energiaarvesti); märgi sisse kirjutatakse mõõtühik või mõõdetava suuruse tähis: A – ampermeeter mA – milliampermeeter V – voltmeeter mV – millivoltmeeter W – vattmeeter kW – kilovattmeeter var – varrmeeter Ω – oommeeter kΩ – kilo-oommeeter MΩ – megaoommeeter Hz – sagedusmõõtja cos φ – võimsusteguri mõõtja kWh – energiaarvesti n – tahhomeeter

Tingmärk	Selgitus	Tingmärk	Selgitus
	liini, juhtmete, kaablite tähistus		valgusti koos toiteliiniga
	juhtmete kontaktivaba ristumine		hõõglamp
	mittelahtivõetav elektriühendus		lüliti, sulguv kontakt
	lahtivõetav kontaktühendus		avanev kontakt
	ühendus kerega (korpusega)		ümberlüliti
	maandus		ümberlülituv kontakt avatud keskasendiga
	galvaaniline element, aku		mähis (pool)
	sulavkaitse		ferromagnetilise südamikuga pool
	takistuse üldine tingmärk		elektrimasin (staator) (ringi sisse võib märkida masina tüübi, voolu, faaside arvu jm)
	takisti, oomtakisti, aktiivtakistus, oomtakistus (resistor)		kolmefaasiline generaator
	reaktiivtakistus		kolmefaasiline mootor, staatori mähis täht-ühenduses
	näiv(kogu)takistus		alalisvoolu-generaator
	induktiivne reaktiivtakistus		alalisvoolumootor

Üldelektrotehnika õppekursuste väheneva mahu juures on järjest raskem elektrinähtustest tervikpilti luua. Olukorra leevendamiseks on selles õpikus püütud suurendada elektrinähtusi kirjeldavate mudelite osa ja vähendada matemaatilist poolt. Raamatus on esitatud rida lihtsustatud mudeleid, mille abil saab keerukamaid nähtusi lahata algosadeks ning mõista nende sisu.

Autori eesmärk on teha aine jõukohasemaks, huvitavamaks, treenida aine mõtlemispõhist omandamist ning aidata üliõpilasi ja õppejõude elektrinähtuste lahtimõtestamisel ning isiklike mudelite loomisel.

Õpiku kolmeteistkümnes peatükis on käsitletud elektri olemust, elektri- ja magnetahelaid, elektrimõõtmisi, reaktoreid, trafosid ja elektrimasinaid ning elektriohutust. Iga peatüki lõpus on kordamisküsimused, mis on koostaja praktikas ka eksamiküsimusteks. Lisas on ülevaade elektrotehnika ajaloost, mis võimaldab mõista, miks on meie tänane ettekujutus elektrist jäänud viimasel sajal aastal muutumatuks.

Jaan Järvik on sündinud 11. augustil 1939. aastal Järvamaal Käru vallas Raja külas. Õppis Võidula ja Käru koolis, lõpetas 1958 Tallinna Polütehnikumi. Pärast sõjaväeteenistust õppis 1961–1967 Leningradi Polütehnilises Instituudis, seejärel 1967–1970 samas instituudis aspirantuuris, kus 1971 kaitses ka kandidaadiväitekirja. 1967. aastast töötab Tallinna Tehnikaülikoolis. Õpetanud järgmisi aineid: elektrivarustus, elektrotehnika alused, elektrotehnoloogia, elektromagnetiline ühilduvus. Teadustöö põhisuunad on juhitavad ja küllastusreaktorid, terasesulatuskaaarahjude reaktiivvõimsuse reaalaja kompensatsioon, elektri kvaliteet ja elektromagnetiline ühilduvus.

9 789949 236558 >