

Olev Märtens

# ELEKTROONSED MÕÖTMISED INSENEERIAS

**TAL  
TECH**

**TALLINNA  
TEHNIKAÜLIKOOL**

Tallinna Tehnikaülikool  
Infotehnoloogia teaduskond

Olev Märtens

# **ELEKTROONSED MÕÕTMISED INSENEERIAS**

Tallinn 2022

Õpik on ilmunud programmi „Eestikeelsete kõrgkooliõpikute loomise  
toetamise põhimõtted 2018–2027“  
ning Haridus- ja Teadusministeeriumi  
ja Eesti Keele Instituudi toel



HARIDUS- JA TEADUSMINISTEERIUM



Retsensenseerinud

Tartu Ülikooli pehmerobotika kaasprofessor Indrek Must

Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonika abiprofessor Anton

Rassõlkin

Kaanefoto Tiia Eikholm

Keeletoimetaja Eva Saul

Autoriõigus: Olev Märten, 2022

ISBN 978-9949-83-906-3 (pdf)

# Sisukord

	Saateks .....	7
	Lühendid ja akronüümid .....	8
<b>1</b>	<b>SISSEJUHATUS .....</b>	<b>10</b>
1.1	Terminitest.....	10
1.2	Varasemad eestikeelsed mõõtetehnika õpikud.....	11
1.3	Mõõtmine kui igapäevane vajadus läbi ajaloo .....	11
1.4	Millega tegeleb metroloogia .....	14
1.4.1	Metroloogia kui teadusharu .....	14
1.4.2	Metroloogiainstituudid ja nende ülesanded .....	16
1.4.3	IEEE ühingu osa valdkonnas .....	16
1.4.4	Mõõtetehnika arengust .....	17
1.5	Elektroonse mõõtetehnika ajaloost .....	18
1.5.1	Ajaloost USA-s ja Euroopas .....	18
1.5.2	Ajaloost Eestis ja Tallinna Tehnikaülikoolis .....	19
<b>2</b>	<b>FÜÜSIKALISED SUURUSED JA MÕÕTÜHIKUD .....</b>	<b>23</b>
2.1	Mõõtühikutest üldiselt .....	23
2.2	Enamlevinud ühikud ja SI-süsteem.....	23
2.3	Põhiühikud .....	24
2.4	Tuletatud ühikud .....	25
<b>3</b>	<b>MÕÕTMISE PÕHIMÕISTED .....</b>	<b>28</b>
3.1	Mõõtmise põhimõisted ja definitsioonid.....	28
3.1.1	Mõõtetäpsuse definitsioonid ja aspektid .....	28
3.1.2	Mõõtmiste korratavus ja reprodutseeritavus .....	31
3.1.3	Täpsuse mõiste masinõppe korral .....	31
3.1.4	Mõõteinstrumentide olulised parameetrid .....	33
3.2	Kalibreerimine ja taatlemine.....	34
3.3	Metrooloogilise ahela jälgitavus.....	38



3.4	Mõõteetalonide haldus ja arendus . . . . .	39
3.4.1	Eestis tehtud töid . . . . .	39
3.4.2	Vahelduvpinge võrdleva metroloogia näide . . . . .	40
4	<b>ELEKTRONMÕÕTERIISTAD: ARENGUST JA NÄITEID ..</b>	<b>43</b>
4.1	Analoogvoltmeetrist digitaalse multimeetrini. . . . .	43
4.2	Numbriliste mõõteriistade eelised . . . . .	48
4.3	Elektroonsete mõõteriistade näiteid. . . . .	48
4.3.1	Digitaalsed multimeetrid . . . . .	48
4.3.2	Digitaalsed ostsilloskoobid . . . . .	50
4.3.3	Juhitavad toiteplokid . . . . .	52
4.3.4	Signaaligeneraatorid . . . . .	52
4.3.5	Impedantsi (ahela)analüsaatorid . . . . .	53
5	<b>ANALOOG-DIGITAALMUUNDURID . . . . .</b>	<b>57</b>
5.1	Mõõtemuunduritest üldiselt. . . . .	57
5.2	Analoog-digitaalmuundurid. . . . .	59
5.2.1	Võendamine. . . . .	60
5.2.2	Analoog-digitaalmuundurite tööpõhimõtteid. . . . .	64
5.2.3	ADM-de mõõtevigadest . . . . .	72
5.3	Digitaal-analoogmuundurid. . . . .	75
5.4	Mõõtemuundurite efektiivne bittide arv. . . . .	77
6	<b>MÕÕTESIGNAALI MUUNDURID . . . . .</b>	<b>80</b>
6.1	Alalisvoolu mõõtemuundurid. . . . .	80
6.1.1	Alalispinge eelvõimendi. . . . .	80
6.1.2	Voolu mõõtemuundur . . . . .	81
6.2	Takistuse (ja impedantsi) mõõtelahendused. . . . .	81
6.2.1	Takistuse mõõtesild. . . . .	81
6.2.2	Takistuse mõõtemuundur. . . . .	84
6.3	Vahelduvpinge mõõtemuundurid . . . . .	86
6.3.1	Tippväärtuse mõõtemuundurid. . . . .	86
6.3.2	Keskväärtuse mõõtemuundurid. . . . .	87
6.3.3	Efektiivväärtuse mõõtemuundurid. . . . .	89
6.4	LC ja RC – generaatori ja sagedusmõõtjaga lahendused. . .	91

<b>7</b>	<b>MÕÕTEANDURITE TÖÖPÕHIMÕTTEID JA RAKENDUSI</b>	<b>93</b>
7.1	Temperatuuriandurid . . . . .	94
7.1.1	Termopaarid ja termistorid . . . . .	95
7.1.2	Pooljuht-temperatuuriandurid . . . . .	97
7.2	Takistuslikud, mahtuvuslikud ja induktiivsed andurid . . . . .	100
7.3	Fotosensorid ja nende liidestamine . . . . .	102
7.4	Piesosensorid . . . . .	107
7.5	Halli andurid . . . . .	107
7.6	Tensoandurid. . . . .	108
7.7	Vedeliku (ja gaasi) kulumõõtjatest . . . . .	111
7.7.1	Kulumõõtjatest üldiselt . . . . .	111
7.7.2	Elektromagnetiline kulumõõtja . . . . .	111
7.8	Ultrahelisensoorika . . . . .	114
7.8.1	Ultraheliga suundmõõtmine . . . . .	115
<b>8</b>	<b>ARVUTIPÕHISED MÕÕTMISED</b>	<b>119</b>
8.1	Instrumentide liidestamine arvutiga . . . . .	120
8.1.1	Riistvara liidesed: HP-IB-st USB ja LXI-ni . . . . .	120
8.1.2	HP-IB ehk IEEE-488 . . . . .	121
8.1.3	Riistvara siinide võrdlus. . . . .	123
8.1.4	IEEE-488.2 ja SCPI käsud. . . . .	124
8.2	Mõõte- ja testrakenduste tarkvara loomise vahendid . . . . .	125
8.2.1	LabVIEW' ülevaade. . . . .	126
8.2.2	Tekstilise programmeerimiskeele kasutamine . . . . .	130
8.3	Andmehõiveseadmed mõõtmisteks . . . . .	133
<b>9</b>	<b>SPEKTRAALSED MÕÕTMISED</b>	<b>136</b>
9.1	Fourier' read. . . . .	138
9.1.1	Üldist Fourier' ridadest . . . . .	138
9.1.2	Fourier' rea näide . . . . .	139
9.1.3	Euleri valem ja Fourier' rea kompleksesitus . . . . .	140
9.2	Fourier' teisendus ja pöördteisendus . . . . .	141
9.2.1	Fourier' teisendus ja pöördteisendus üldjuhul . . . . .	142
9.2.2	Fourier' teisendus ja pöördteisendus diskreetsel juhul . . . . .	143
9.2.3	Kiirest Fourier' teisendusest . . . . .	143

9.3	Lõpliku analüüsiakna probleem .....	144
9.3.1	Aknafunktsioonide kasutamine .....	147
10	SÜNKROONMÕÕTMISED JA IMPEDANTS .....	150
10.1	Sissejuhatus .....	150
10.2	Ergutussignaali lainekujud impedantsi mõõtmiseks .....	152
10.3	Sünkroondetektorid impedantsi mõõtmiseks .....	154
10.3.1	Sünkroonne või asünkroonne mõõtmine? .....	154
10.3.2	Sünkroondetektorite tööpõhimõtted. ....	155
10.3.3	Suure dünaamikaga täppisünkroondetektorid .....	159
10.4	Impedantskardiograafia näide .....	160
11	ASJADE INTERNET JA KAUGMÕÕTMISED .....	163
11.1	Mõõtmised ja asjade internet .....	163
11.2	Mõõtenäitude kauglugemisest .....	164
11.3	IoT mõõtevõrkude teostusest .....	165
11.4	Mõõteandmete serva- ja pilvetötlusest .....	166
11.5	Mõõteandmetele aja- ja kohainfo lisamine .....	167
	Tänud kaasteelistele .....	169
	Tänu sõnad abilistele .....	170
	Jooniste loetelu .....	174
	Tabelitete loetelu .....	175
	Kasutatud kirjandus .....	175

S10258266

## Saateks

Õpik põhineb autori ja ta kolleegide pikaajalisel uurimis- ja arendustegevusel elektroonse mõõtetehnika valdkonnas ning vastavate lahenduste loomisel. Autor on üle 20 aasta olnud maailma suurima inseneriorganisatsiooni IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) ja selle mõõtetehnika ühingu (*Instrumentation & Measurement Society*) aktiivne liige ning paljude leiutiste, teaduslik-tehniliste artiklite ja praktiliste arendustööde autor või kaasautor mõõtetehnika vallas.

Oluliseks motiiviks taolise õpiku koostamiseks on asjaolu, et tänapäeval (ka mitte-elektriliste suuruste puhul):

- mõõtmised toimuvad enamasti elektroonsete mõõteriistade, mõõtemuundurite ja mitmesuguse muu analoog- ja digitaal-elektronika abil;
- üldjuhul mõõdetakse pidevaid ehk analoogsuursi, aga digitaalsete vahendite ja meetoditega, mis nõuab seadmete kasutajatelt arusaamist digitaliseeritud mõõteprotsessi matemaatilistest, tehnilistest ja metrooloogilistest aspektidest;
- tänapäeval eelistatakse mõõtetulemusi saada ja mõõtmisi juhtida arvuti teel (mh on tihti osaliselt või täielikult kasutusel virtualiseeritud ehk tarkvaralised mõõtelahendused), mis nõuab vastavat ettevalmistust ja arusaamist ka taoliste lahenduste kasutajatelt.

See õpik on mõeldud ennekõike bakalaureusetaseme üliõpilastele mõõtetehnika aluste õppimiseks, mh sobiliku jätkuna elektroonikakursusele, kuna mitu õpiku peatükki eeldavad varasemaid elektroonikateadmisi. Magistrandid (ja miks mitte ka doktorandid) saavad selle abil aga korrata vastavaid teadmisi ning mõnes konkreetses (näiteks impedantsi mõõtmise) vallas omandada süvendatud teadmisi. Samuti võib õpik huvi pakkuda kõigile inseneeria ja füüsikaga seotud spetsialistidele.

## Lühendid ja akronüümid

- 2G/3G/4G/LTE – eri põlvkondade globaalse mobiilside standardid ;
- ADM – analoog-digitaalmuundur (*analog-to-digital converter*, ADC);
- API – rakendustarkvara liides (*application programming interface*);
- ASCII – Ameerika standardne sümbolite kodeerimise tabel (*American Standard Code for Information Interchange*);
- AWG – suvalise lainekuju generaator (*arbitrary waveform generator*);
- CGPM – Rahvusvaheline Kaalude ja Mõõtude Peakonverents (ka Vihtide ja Mõõtude Peakonverents, pr k *Conférence Générale des Poids et Mesures*, ingl k *International Committee for Weights and Measures*);
- DAM – digitaal-analoogmuundur (*digital-to-analog converter*, DAC);
- DFT – diskreetne Fourier' teisendus;
- DMM – digitaalne multimeeter;
- DSO – digitaalne salvestav ostsilloskoop;
- FET – välitransistor (*field-effect transistor*);
- FFT – kiire Fourier' teisendus;
- GPS – globaalne positsioneerimise süsteem;
- IDFT – diskreetne Fourier' pöördteisendus;
- IEC – Rahvusvaheline Elektrotehnika Komisjon, tegeleb elektrotehnikaalase standardimisega;
- IEEE – Elektri- ja Elektroonikainseneride Instituut (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), maailma suurim rahvusvaheline elektroonikat, elektrotehnikat, telekommunikatsiooni, arvutiteadust jm arendav mittetulunduslik erialaorganisatsioon, mis tegeleb väga laiaulatusliku publitseerimise, standardimise ja muu insenerliku teadmuse arendamise ja levitamisega;
- IEEE-488 (ka HP-IB, GP-IB) – algselt 1960-ndatel ettevõtte Hewlett-Packard loodud mõõteriistade arvutiga ühendamise siin;

- IFFT – kiire Fourier' pöördteisendus;
- IoT – asjade internet (*Internet of things*), eesti keeles ka värvvõrk;
- JTAG – IEEE 1149.1 standard digitaalskeemide ja koostude testimiseks, algse nimetusega *Joint Test Action Group*;
- LAN – arvuti kohtvõrk;
- LoRa – pikamaa (*long range*) raadioside, kasutusel ka mõõtesensorite kauglugemisel ja asjade internetis;
- NB IoT – kitsasribaline asjade internet (*narrowband internet of things*) on väikese võimsusega laivõrgu (LPWAN) raadiotehnoloogia standard, mis on välja töötatud mobiilsideseadmete ja teenuste jaoks;
- NIST – USA riiklik standardite ja tehnika instituut (*National Institute of Standards and Technology*);
- NPL – Ühendkuningriigi riiklik metroloogia instituut („riiklik füüsika laboratoorium“, *National Physical Laboratory*);
- PLC – side üle elektrivõrgu liini (*power line communication*);
- ppm – miljondik (*part per million*);
- PTB – Saksamaa riiklik metroloogia instituut (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt*);
- RMS – ruutkeskmine väärtus (*root mean square*); vahelduvpinge puhul ka efektiivväärtus;
- RS-485 – lihtne juhtmega füüsilise sideliini standard, võimalusega ühendada palju seadmeid samale liinile;
- RSSI – raadiosignaali tugevuse indikaator (*received signal strength indicator*);
- SI – pr k *Système International d'Unités*, rahvusvaheline mõõtühikute (SI-) süsteem on eelistatud mõõtühikute süsteem (CGPM otsus 1960, *SI-Brochure* 9. trükk 2019);
- TCP/IP – internetiprotokoll, täpsemalt protokollide kogum (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*);
- VI – virtuaalne instrument (mh LabVIEW kontekstis);
- WiFi – juhtmeta internet, põhineb IEEE 802.11 standarditel.



# 1. SISSEJUHATUS

## 1.1 Terminitest

Õpikus kasutatakse eestikeelseid termineid autori parima teadmise kohaselt. Autori terminikasutust on oluliselt mõjutanud Tallinna Tehnikaülikooli Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudi ja eelmiste töökohtade (mh kunagise Tallinna Raadioelektroonika Konstrueerimisbüroo) kolleegide keelekasutus. Loomulikult on taustal need terminid inglise, aga ka teistes (mh vene, saksa, rootsi, soome) keeltes.

Allpool mõned näited eri sõnade võimalikust kasutamisest samade mõistete puhul.

*Võend, võendamine* (ka mõõte-) signaalide puhul – inglise keeles *sample, sampling*, matemaatikas ka *valim* ja selle võtmine (saades *valimread*), raadio- ja helitehnikas räägitakse vahel ka signaali *diskreetidest* ja *diskreetimisest*. Piltlikult öeldes on tegu proovide võtmisega signaalist. Võendamine ehk (ajavallas diskreetsete) võendite võtmine on osa analoogsignaali (nagu enamik signaale looduses esineb) digitaliseerimisest, et numbriline protsessor saaks selle signaaliga tegelema hakata.

Kui sagedusvallas on signaal digitaliseeritud, siis diskreetseid sagedusi on autor nimetanud *sagedusbinideks* inglise keele eeskujul (*frequency bins*).

Ingliskeelsete *time domain* ja *frequency domain* vastetena on kasutatud termineid *ajavald* ja *sagedusvald*. Esimene tähendab signaali esitust piltlikult öeldes ajateljel ja teine sagedusteljel.

Termineid *sensor* ja *andur* on õpikus kasutatud sünonüümidena ingliskeelse sõna *sensor* vastena. Samas on võimalik samas kontekstis eelistada terminit **tajur**. Selle õpiku kontekstis peab autor vajalikuks rõhutada, et enamasti on tegu mitte tavaliste, vaid just mõõtetotstarbeliste ja mõõtmiseks iseloomustatud (mh mõõtetäpsuse osas) **mõõteanduritega**.

Numbrilised suurused on protsessorites reeglina esitatud kahend-süsteemis ehk bittide abil. Igal bitil on oma kaal. Kui inglise keeles kasutatakse mõisteid vähima ja suurima kaaluga bitt, vahel ka nimetatuna madalaimaks ja kõrgeimaks bitiks (vastavalt *least significant bit*, LSB, ja *most significant bit*, MSB), siis autor eelistab kasutada ilmselt levinumaid termineid, vastavalt **noorim** ja **vanim** bitt.

## 1.2 Varasemad eestikeelsed mõõtetehnika õpikud

Varem mõõtetehnika ja metroloogia vallas ilmunud eestikeelsed õpikud (autoriteks näiteks Rein Laaneots, Olev Mathiesen jt [1], [2]) paraku ei kata tänapäevaste elektroonsete (mh digitaalsete) mõõtmisvahendite tööpõhimõtteid, kasutamist ega arendamist.

Elektriliste suuruste mõõtmisi, k.a elektroonsete lahendustega (mh analoog-digitaalmuundurite tööpõhimõtteid), on kirjeldatud Uljas Tamme õpematerjalis [3].

Varasemad eestikeelsed elektrimõõtmiste (mitte elektroonsete ehk mitte veel elektroonika abil mõõtmiste) valdkonna õpikud on ilmselt aastast 1921 Aleksander Marksoni raamat „Elektri mõetmine“ [4] ning 1940. aastal ilmunud Tallinna Tehnikaülikooli toleaeegse õppejõu Helmuth Freymuthi loengukonspekt „Elektrimõõtmised ja mõõteriistad“ [5].

## 1.3 Mõõtmine kui igapäevane vajadus läbi ajaloo

Mõõtmised on meile iga päev hädavajalikud – nii kodus majapidamises (kohe hakkavad silma vee-, gaasi- ja elektrimõõtjad) kui ka tootmis-, kaubandus-, side- ja logistikaettevõtetes, kus kaalud, mõõdulindid ja paljud teised instrumendid on kogu aeg käepärast. Põllumajanduses levib *täppispõllundus*, kus näiteks mulla omadusi ja saagi kasvamist mõõdetakse nii põllul sobilike mõõteriistadega kui aina enam ka kaugseire vahenditega droonidelt või kosmosest.

Oluline osa inseneride tööst on seotud vähemalt mõõteseadmete kasutamisega, aga tihti ka uudsete mõõtelahenduste loomisega nii tootmises kui ka uurimis- ja arendustöös.

### Mis on mõõtmine?

Mõõtmine pole midagi muud, kui mõõdetava objekti võrdlemine etalonide ehk mõõtestandarditega, näiteks kaalumisel (massi mõõtmisel) mõõdetava objekti massi („kaalu“) referents (teadaoleva kaaluga) kaaluvihtidega võrdlemise teel. Rangelt võttes on mõõtmine üldjuhul muidugi keerulisem, kui lihtne füüsikalise suuruse (nt massi, pikkuse, ajalise kestuse) väärtusele hinnangu andmine etalonidega võrdlemise teel, sisaldades tehnilisi vahendeid ja vajalikku matemaatikat ja teisendusi, aga ka eri (mh etalonide endi) ebamäärasuste („mõõtemääramatuste“) ja ebatäpsuste (ning nende ajas, ruumis ja temperatuuris) varieerumise hindamist. Samuti tuleb arvesse võtta mõõteseadmete ja -meetodite osa mõõtevea kujunemisel.

### Miks on vaja täpseid mõõtmisi?

Mõned väga paljudest põhjustest, miks on vaja täpseid ja usaldusväärseid mõõtmisi:

- ohutuse piirid on seotud füüsikaliste suurustega, mida peab täpselt mõõtma: hoonete ja sildade maksimaalne kandevõime, ohutud pinge, isolatsioonitakistuse ja lekkevoolu väärtused elektritehnikas, ohutu kiirus raud-, õhu-, vee- ja maanteedel, altimeetri (kõrgusemõõtja) täpsus lennuki maandumisel jne;
- ostu-müügi korral, nt kaalumine poes, vee ja gaasi mõõtmine – kui asjadel on rahaline väärtus, on vaja täpselt arveid esitada, ilmeka näitena kulla kaalumine juveliiri juures peaks olema eriti täpne;
- kaudsete mõõtmiste korral (pöörisvooluga metallide omaduste hindamine, kaugseire puhul kosmosest maapinna temperatuuri mõõtmine jne) võib väike muutus sensori signaali mõõtmisel lõpliku suuruse hindamisel anda mõõdetava suuruse hindamise suure vea;
- tööstuses tootmisprotsessides täpne temperatuuri ja muude parameetrite (mh niiskuse) mõõtmine ja jälgimine (nt leivaküpsetusahjudes) tagab toodangu stabiilse kvaliteedi, toodangut on vaja testida (ehk mõõta valmis toodete omadusi ja nende vastavust oodatule) ka pärast valmistamist (nt kokkumonteeritud elektroonika-seadmed, valmis saanud metall- või muud konstruktsioonid);
- teadusmaailmas (füüsika, keemia, seismoloogia, astronoomia, meditsiini jne vallas) võimaldavad täpsed mõõtmised paremini maailma tundma õppida, aga ka aineid, struktuure ja nende omadusi iseloomustada;
- põllumajanduses levib üha rohkem täppispõllundus, kus kogu tegevus (kastmine, väetamine, saagikoristus jne) toimub mõõdetud täpsete mulla omaduste (mh niiskuse ja toitainesisalduse) ning saagi kasvamise (vegetatsiooniindeksite jmt) järgi.

## Mõõtmiste ajaloost

Erinevate füüsikaliste suuruste mõõtmine on olnud inimestele oluline läbi aastatuhandete, ajalooliselt ennekõike muidugi kaubanduses, kasvõi turul vahetuskaupa tehes või ostu-müügi toimingute juures – ikka on kaalud ja kaalumise ja kasvõi improviseeritud kaaluvihid käepärast olnud. Mõõtmine on oluline olnud ka hooneid, sildu ja teid ehitades ning transpordis (näiteks vahemaade hindamisel). Samuti on tähtis olnud aja mõõtmine, nii absoluutsuurusena kui ka tegevuse ajastamisel (sünkroniseerimisel), nii igapäevaelus kui kasvõi sõjaväljadel, sõiduplaanidest rääkimata.

Kurioosse näitena võib tuua 1845. aastal Inglismaal Exeteris Püha Johannese kiriku tornis olevale kellale kolmanda osuti lisamise [6], mis näitas 14 minutit varasemat aega esialgsest minutiosutist. Nagu tolaeagne ajaleht kirjutas, olevat tegu olnud „mugavusteenusega“, mis võimaldas peale kohaliku aja teada ka „raudteeaega“. Ehk selles ajastus oli tehnika (konkreetselt raudtee) kiire areng ajatäpsuse suurendamisel nii selle võimaldajaks kui ka selle nõudjaks.

Kaalusid ja kaaluvihke, nagu ka mahumõõduühikuid, on leitud juba enne meie ajaarvamist – arheoloogilised leiud näiteks Vana-Roomast, Babülooniast, Süüriast, Egiptusest ja mujalt [7]. Näiteks joonisel 1.1 kujutatud Vana-Rooma kaaluvihil meie ajaarvamise algusest oli juba kindel absoluut- (ja seega metrooloogiline) väärtus.



Joonis 1.1. Rooma basaltkaaluvihk, 1. sajand, kerakujuline, lameda üla- ja alaosa, väärtus 3 Rooma *libra*-t (naela), umbes 1 kg (©sciencemuseumgroup, UK).

## 1.4. Millega tegeleb metroloogia

Levinud abivahend kaalumisel, enne moodsamaid osut- ja tänapäeval ka digitaalseid kaalusid, oli aastasadade jooksul ka Eestis nn margapuu ehk *päsmer*. Tööpõhimõtteks on siin mitte võrdsete õlgadega kangi mõõdetava objekti kaalu tasakaalustamine kaaluvihtidega, vaid fikseeritud vastukaalu kasutamine – kusjuures tasakaal saavutatakse Eestis ja Skandinaavias levinud variandi puhul mõõdetava objekti asukoha kangil (jõuõla) liigutamisega tasakaalupunktini. Rooma tüüpi margapuu (ingl k *steelyard*) puhul toimub mõõtmine fikseeritud raskusega vastukaalu liigutamisega (joonis 1.2)



Joonis 1.2. Rooma tüüpi margapuu (valmistaja George Adams, 1762), (©sciencemuseumgroup, UK)

Eestis kasutatud vanaaegsed mõõtühikud on loetletud Metrosert AS-i kodulehel [8]. Muuhulgas on seal näiteks kirjas, et 1 vaat = 40 pange = 492 liitrit ja 1 pang = 10 toopi = 12,3 liitrit. Seejuures oli Tallinna pangel ja Tallinna toobil oma spetsiifiline väärtus.

20. sajandist pärit ehk moodsa aja kaaluvihtide komplekt on näidatud joonisel 1.3.

## 1.4 Millega tegeleb metroloogia

### 1.4.1 Metroloogia kui teadusharu

Mõõtmistega tegeleb vastav teadusharu – **metroloogia**, mis käsitleb muuhulgas mõõtetäpsust, sh tegeleb mitmesuguste süstemaatiliste ja juhuslike mõõtevigade ja mõõtemääramatuse analüüsiga ja otsib võimalusi nende vähendamiseks.



Joonis 1.3. Kaaluvihtide komplekt 20. sajandist (foto – T. Eikholm)

Metroloogia sisaldab kolme üksteisega seotud olulist tegevust:

- mõõtühikute määratlemine;
- nende mõõtühikute realiseerimine praktikas;
- nende mõõtühikute jälgitavus, mis praktikas tähendab mõõtmiste seostamist võrdlusstandarditega (etalonidega).

Metroloogia alamvaldkonnad on ka:

- teaduslik ehk teoreetiline ehk alusmetroloogia, mis on seotud mõõtühikute kehtestamise, arendamise ja hoidmisega;
- rakenduslik (tehniline, tööstuslik) metroloogia – mõõtmiste rakendamine tootmis- ja muude protsesside jaoks ühiskonnas;
- legaal- ehk juriidiline metroloogia, mis hõlmab regulatsioone ja seadustega kehtestatud nõudeid mõõtühikutele, mõõtmistele, mõõtevahenditele ja mõõtmismeetoditele.

Metroloogiat ehk mõõtmise teadust ja selle rakendusi kasutavad kõik tehnika, põllunduse, transpordi, sõjanduse ja teaduse valdkonnad.



### 1.4.2 Metroloogiainstituudid ja nende ülesanded

Riikides on rahvuslikud metroloogiainstituudid, mille roll riigi mõõtesüsteemis on teadusliku metroloogia ning mõõtühikute ja vastavate etalonide teostus ja riiklike esmaste („primaarsete“) standardite säilitamine. Metroloogiainstituudid tagavad riigi etalonide jälgitavuse rahvusvaheliste standardite suhtes, sidudes selle riikliku kalibreerimishierarhiaga. Selleks, et riiklik mõõtesüsteem oleks Rahvusvahelise Kaalude ja Mõõtude Komitee (CIPM) poolt vastastikuste kokkulepetega rahvusvaheliselt tunnustatud, peab rahvuslik metroloogiainstituut osalema oma mõõtmisvõimekusega rahvusvahelistes võrdlustes

Mõned olulisemad metroloogiainstituutide näited on Ameerika Ühendriikides Riiklik Standardite ja Tehnoloogia Instituut (*National Institute of Standards and Technology, NIST*, asutatud 1901), Inglismaal Riiklik Füüsika Labor (*National Physical Laboratory, NPL*, asutatud 1900), Saksamaal Füüsikalise-Tehniline Föderaalne Instituut (*Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB*, asutatud 1887), Venemaal D. I. Mendelejevi nimeline Ülevenemaaline Metroloogia Uurimisinstituut (*VNIIM*, asutatud 1842 etalonkaalude ja -mõõtude hoidlana).

Eestis on metroloogiainstituudi rollis AS Metrosert (1919 asutatud Kaalude ja Mõõtude Koja järeltulijana [9]).

### 1.4.3 IEEE ühingu osa valdkonnas

IEEE ehk Elektri- ja Elektroonikainseneride Instituut (ingl k *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) on maailma suurim rahvusvaheline elektroonikat, elektrotehnikat, telekommunikatsiooni ja arvuti-teadust arendav mittetulunduslik erialaorganisatsioon, mis tegeleb väga laiaulatusliku publitseerimise, standardimise ja muu inseneriteadmuse arendamise ja levitamisega.

Selle instituudi raames töötab hulk kitsama eriala ühinguid, näiteks mõõteseadmete ja mõõtetehnika ühing (*Instrumentation and Measurement Society, IEEE IMS*). IMS annab välja oma toimetisi (*Transactions on Instrumentation and Measurement, TIM*), kus muuhulgas käsitletakse mõõteetalonide arendust ja võrdlust. IMS korraldab ka iga-aastast rahvusvahelist mõõtetehnika valdkonna suurüritust – I2MTC konverentsi.

Samuti on IEEE oluline standardite arendaja ja edendaja. Lisaks kõigile teadaolevatele WiFi (IEEE 802.11) ja Bluetoothi (IEEE 802.15) standarditele on IEEE arendanud näiteks mõõteriistade arvutiliidese standardi IEEE-488 (hetkel versioon 488.2, algselt firma Hewlett Packard looduna tuntud HP-IB siinina), aga ka digiskeemide testimise liidese JTAG (IEEE 1149.1).

#### 1.4.4 Mõõtetehnika arengust

Käepärasteks looduslikeks ja loomulikeks mõõtudeks on inimkonna ajaloos olnud inimene ise. Näiteks on pikkusühikutena kasutusel olnud jalg, küünar, toll (pöidlalüli pikkus). Aja mööduks oli looduslik päevatsükkel, mis jagati osadeks.

Ajapikku on mõõtmised läinud üle ühtsetele ja rahvusvahelistele standarditele, kümnend- ja meetersüsteemile ja sealt edasi SI-süsteemi kasutamisele (aastast 1960). Siiski on mõnes riigis (nt Inglismaal ja USA-s) ja tööstusharus ning kohati ka igapäevaelus endiselt kasutusel *imperiaalsed* ja teised ühikute süsteemid. Nii on elektroonikakomponendid tihti tollmööduks (standardsamm 2,54 mm ehk 0,1 tolli) ja lennukite kõrgusmõõtjad näitavad kõrgust jalgades, rääkimata pindistest õlletoopidest, „miili tunnis“ näitavatest spidomeetritest, „gallonites miili kohta“ kütusekulust jmt.

Üldine areng on toimunud kohalikest standarditelt (etalonidelt) ja ühikutelt laiemalt kasutatavateni, mis on tänapäeval loomulikult rahvusvaheliselt ühtlustatud ning riiklike metrooloogialaborite jälgitavad ja võrreldavad.

Teine oluline areng mõõtühikute defineerimisel ja mõõtestandardite (etalonide) hoidmisel ja arendamisel on liikumine füüsikalistelt standarditelt ehk etalonidelt (nt kilogrammi etalon metallist objektina, mida hoitakse etteantud keskkonnatingimustes ja võrreldakse teiste etalonidega) fundamentaalsetel füüsikanähtustel (nt kvantfüüsikal) põhinevatele etalonidele [10].

Kilogramm määratleti esimest korda 1795. aastal ühe liitri vee massina. Seda määratlust oli lihtne ja praktiline kasutada. Paraku pole vee omadused tänapäevase metrooloogia taseme jaoks küllalt täpselt määratletud. 1799. aastal asendas plaatinast massi näidis selle veekoguse massi standardi rollis. 1889. aastal muutus plaatina-iriidiümsilinder rahvusvaheline kilogrammi prototüübina (inglise k *International Prototype of the Kilogram*, IPK) meetersüsteemi massiühiku standardiks, mis püsis sellisena kuni 2019. aastani. Kilogramm oli SI-ühikutest viimane, mis määrati füüsilise objektiga (*artefaktiga*).

Tänapäeval määratletakse kilogramm kolme põhilise füüsilise konstandi – valguse kiiruse, konkreetse aatomi siirdesageduse ja Plancki konstandi – abil. See uus kilogrammi definitsioon on kooskõlas vanemate määratlustega, erinedes ühe liitri vee massist 30 ppm piires [10].

Teine näide on rahvusvaheline voldi (V) – pingeühiku – definitsiooni areng. 1893. aastal defineeriti volt Clarki keemilise elemendi pinge kaudu (väärtusega 1,434 V) ning 1908. aastal rahvusvahelise ampri

(voolutugevus) ja rahvusvahelise oomi (elektritakistus) järgi:

$$1V = 1A \times 1\Omega. \quad (1.1)$$

Alternatiivselt saab voldi SI-süsteemis defineerida ka

$$1V = 1J/1C, \quad (1.2)$$

kus džaul  $J$  (töö ühikuna) on jagatud kuloniga  $C$  (elektrilaeng, mis omakorda on amper korda sekund,  $1C = 1A \cdot 1s$ ).

Defineerituna 1987 ning olles kasutusel 1990. aastast, põhineb voldi määratlus Josephsoni efektil, mis võimaldab sageduse täpselt pingeks teisendada, kusjuures sageduse etalon omakorda põhineb tseesiumi sagedusstandardil.

Kolmas areng on loomulikult mõõteseadmete ja lahenduste elektroonikal põhinev (1930-ndatest ja varemgi) ja digitaalne (laial skaalal 1960-ndatest) teostus ning arvutipõhine mõõtmise võimalus (samuti 1960-ndatest). Elektroonsete mõõtmiste ajaloost on põhjalikumalt juttu järgmises osas.

Siin tuleb tähele panna, et mõõdetavad elektrilised (pinge, voolutugevus, võimsus jne) ning mitte-elektrilised (pikkus, mass, aeg) suurused on igapäevases mõistes pidevad ehk analoogsuurused, kuid mõõteseadmed ja lahendused on mõistlik ja tõhus teostada numbriliste ehk digitaalsete seadmetega. Vastavaid asjaolusid käsitletakse järgmistes peatükkides.

## 1.5 Elektroonse mõõtetehnika ajaloost

Allpool on toodud mõned näited esimestest elektroonsete ja raadiomõõteriistade arenduse ja tootmise ettevõtete ajaloost maailmas.

### 1.5.1 Ajaloost USA-s ja Euroopas

#### Hewlett-Packard

Ettevõtte Hewlett-Packard (HP, hilisem Agilent, nüüdne Keysight, mõõtetehnika osas) asutasid Bill Hewlett ja Dave Packard 1939. aastal Palo Altos (USA, California, praegu Silicon Valley) ühe auto garaažis. Nende esimene toode oli helisagedusgeneraator (HP200A, H200B, joonis 1.4) ja üks nende esimesi kliente oli Walt Disney. Disney kasutas generaatorit audioseadmete testimiseks kaheteistkümnnes spetsiaalselt varustatud kinoteatris, mis näitasid 1940. aastal filmi „Fantaasia“. Joonisel 1.4 on keskel näha suur pöördkondensaator, mille ülemisest osast paremal on signaali amplituudi reguleeriv lambipirn (positiivse temperatuurikoefitsiendiga takistina).



Joonis 1.4. Hewlett-Packardi HP 200A sisemus (CC BY-SA 2.0 / Wikimedia Commons).

## Rohde & Schwarz

Ettevõtte asutasid Lothar Rohde ja Hermann Schwarz, kes kohtusid Jenas füüsikat õppides. Nad ehitasid oma esimese mõõteinstrumenti 1932. aastal ja augustis 1933 asutasid nad Münchenis ettevõtte *Physikalisch-Technisches Entwicklungslabor Dr. Rohde & Dr. Schwarz*. Esimene eksporditellimus tuli neile 1934. aastal Suurbritanniast, kust isolatsioonimaterjalide tootja tellis materjali dielektrilise läbitavuse mõõtja (sagedusribas 50–200 MHz), et mõõta dielektrilisi kadusid keraamilistel ketastel kuni 100 MHz sagedustel.

### 1.5.2 Ajaloost Eestis ja Tallinna Tehnikaülikoolis

Ajastule iseloomulikult oli XX sajandi alguses levinud mehaaniliste mõõteriistade, näiteks kaalude tootmine (nt 1919–1949 Tallinna Kaalude ja Masinavabrikus Wega, mis 1949–1976 kandis nime Tallinna Mõõduriistade Tehas ja 1990-ndatest AS Wega ning arendas ja tootis elektromagnetilisi vedeliku kulumõõtjaid).

Elektroonsete mõõteriistade (tol ajal loomulikult raadiolampidel analoog-elektroonikaseadmetena) ajastu algas Eestis 1930-ndatel, nii raadiovabrikutes (nt 1936 asutatud RET OÜ-s) kui ka Tehnikaülikoolis (millest eraldi allpool) tegeleti oma vajaduste tarbeks mõõteriistade väljatöötamisega.

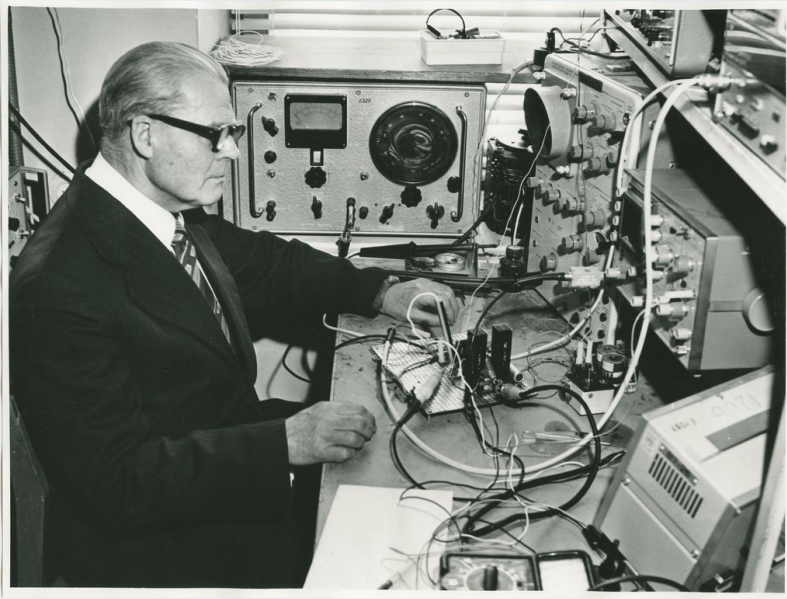
### Paul Plaki tööst Tehnikaülikoolis, 1930-ndatest alates

Tallinna Tehnikaülikoolis (asutatud 1936 Tallinna Tehnika Instituudina, ajalugu on jälgitav 1918. aastast, eelkäijad Tehnika Erikursused ja Tallinna Tehnikum) tegeles elektroonsete mõõteseadmete arendamisega **Paul Plakk**

(1909–2001), hilisem tehnikaülikooli (tollaegse nimega TPI – Tallinna Polütehniline Instituut) elektroonikakateedri esimene juhataja (1962).

1930-ndatel arendas Plakk paljusid mõõteriistu elektrokeemia uurimistöödeks [11], muuhulgas:

- elektrilise takistuse ja mahtuvuse mõõtja (2 MHz-ni), 1939;
- kõrgsagedusgeneraator, elektronvoltmeeter ja resonantsvõnkering ainete dielektrilise läbitavuse mõõtmiseks, sagedusribaga 2–130 MHz, 1939;
- pH-mõõtja (elektromeeter), 1940.



Joonis 1.5. Dotsent Paul Plakk TPI elektroonikakateedris transistorilairibavõimenditega töötamas, 1982 (©Tallinna Tehnikaülikooli fotokogu).

1940-ndatel arendas Plakk mitu universaalset elektronmõõteriista, muuhulgas:

- vahelduvvoolu efektiivväärtuse voltmeeter sagedusribaga 20 Hz – 50 MHz;
- signaaligeneraator sagedusribaga 20 Hz – 200 kHz;
- ostsilloskoop sagedusribaga 1 Hz – 1 MHz.

Ehk siis nagu näha, võrreldes kasvõi Hewlett-Packardi või Rohde & Schwarzi töödega, toimus samal ajal ja sarnane tegevus.

## Peatükk 1. SISSEJUHATUS

1950-ndatel arendas Plakk freesturba ja paberirullide niiskuse mõõtjaid, esimene neist oli ka tema kandidaaditöö teemaks.

Elektroonikakateedris (1962–1969 tööstuselektronika kateedri nime all) on mõõteelektronika alased tööd jätkunud mitmes suunas – elektromagnetiliste kulumõõtjate, pooljuhtide mõõteseadmete ja paljudel muudel teemadel. Omaette löik on prof Mart Mini juhtimisel ja juhendamisel tehtud tööd, millest allpool.

### **Mart Mini töödest Tallinna Tehnikaülikoolis, 1980-ndatest tänini**

Mart Min (s 1943) tegeles 1980-ndatel koos Toomas Parve (1949–2020) (foto joonisel 1.6) ja teiste kolleegidega vahelduvvoolu vektorvoltmeetrite arendamisega. Samasse perioodi mahub ka koostöös Tõravere observatooriumiga (Uno Veismann, s 1934) Nõukogude Liidu tehiskaaslastele sünkroondetektorite baasil mõõteelektronika arendus spektromeetrile Faza [12]. Hilisem tegevus, kuni 2020-ndateni ja edasi, on viinud elektrilise impedantsi ja selle spektri (*impedantsspektroskoopia*) mõõtelahenduseni ning sellega seotud meditsiiniliste ja tööstuslike rakenduste arendamiseni.



Joonis 1.6. TPI leiutajad Toomas Parve ja Mart Min enda projekteeritud vektorvoltmeetriga, 1980–1981 (©Tallinna Tehnikaülikooli fotokogu).



## Kordamisküsimused

1. Millega tegeleb metroloogia üldiselt?
2. Milliste konkreetsete alamvaldkondadega tegeleb metroloogia?
3. Miks on igapäevaelus vaja mõõtmisi?
4. Milles seisneb sisuliselt mõõtmine?
5. Mis aastakümnel alustasid USA-s ja Saksamaal tegevust elektroonseid mõõteseadmeid arendavad ja tootvad firmad?
6. Mis aastakümnel algas Eestis elektroonsete mõõteseadmete arendus?
7. Mis eesmärgil lisati aastal 1845 Inglismaal Exeteri Püha Johannese kiriku tornikellale kolmas osuti?
8. Mis on ka Eesti aladel levinud margapuu (päsmeri) tööpõhimõte?
9. Mille kaal oli algselt aastal 1795 määratud kui kilogrammi võrdühik?

## 2. FÜÜSIKALISED SUURUSED JA MÕÖTÜHIKUD

### 2.1 Mõõtühikutest üldiselt

Füüsikaliste suuruste mõõtmisel kasutatakse ühikuid. Näiteks on kilogramm massiühikuna pikka aega olnud määratletud kui konkreetse plaatinaploki mass, veel varem 1 liitri vee massina. Teisi masse mõõdetakse neid kaaludes ja sellega otseselt või kaudselt võrreldes.

Ühikuid on kahte tüüpi: põhiühikud, millel on sarnaselt kilogrammiga põhimääratlus (tänapäeval kvantfüüsikal ja muudel fundamentaalsetel nähtustel põhinevad) ja tuletatud ühikud, mis on määratletud nende põhiühikute alusel. On olemas mitmesuguseid ühikute süsteeme, mis põhinevad teatud baasühikutel – „imperiaalsetel“ (jalg, nael, sekund), CGS (sentimeeter, gramm, sekund) või MKS (meeter, kilogramm, sekund) ühikutel. Teaduslikel eesmärkidel ja ametlikus metroloogias on kasutusele võetud SI ühikud.

### 2.2 Enamlevinud ühikud ja SI-süsteem

Tänapäeval on füüsikalised suurused reeglina defineeritud rahvusvahelises mõõtühikute ehk SI (*Système International d'Unités*) süsteemis. SI on eelistatuks tunnustatud mõõtühikute süsteem CGPM (*Conférence Générale des Poids et Mesures*) otsusega 1960. aastast. SI-süsteem arenes välja meetermõõdustikust.

SI-süsteem koosneb seitsmest esmasest põhiühikust – pikkus, mass, aeg, elektrivoolu tugevus, temperatuur, valgustugevus ja aine hulk (vt tabel 2.1) –, kahest lisaühikust – (tasa)nurk ja ruuminurk (tabel 2.2) – ja kaheksateistkümnest põhiühikutest tuletatud ühikust (tabel 2.3).

Eesti on vastu võtnud (viimane redaktsioon 2019) ka valitsuse määruse „Rahvusvahelise mõõtühikute süsteemi (SI) põhiühikud, nendest tuletatud ühikud, nende kord- ja osaühikud ning rahvusvaheliselt kehtestatud lisaühikud ja nende kasutamise viis“ [13].

## 2.3 Põhiühikud

SI-süsteemi põhiühikud on toodud tabelis 2.1 ja põhiühikute lisaühikud tabelis 2.2.

Tabel 2.1. SI põhiühikud

Jrk	Suurus	Tähis	Ühik	Di- men- sioon	Definitsioon
1	pikkus	$l$	meeter	[m]	Meeter on teepikkus, mille valgus läbib vaakumis $1/299\,792\,458$ sekundi jooksul
2	mass	$m$	kilo- gramm	[kg]	Kilogrammi määratlus põhineb Plancki konstandi $h$ fikseeritud arvvaartusel $6,62607015 \cdot 10^{34}$ , ühik $J \cdot s$ ehk $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , kusjuures meeter ja sekund on määratletud vastavalt $c$ ja $\Delta\nu C_s$ kaudu.
3	aeg	$t$	sekund	[s]	Sekund on võrdne $^{133}\text{Cs}$ aatomi põhiseisundi kahe ülipeene (struktuuri)nivoo vahelisele üleminekule vastava kiirguse $9\,192\,631\,770$ perioodi kestusega
4	elektri- vool	$i$	amper	[A]	Ampri määratlus põhineb elementaarlaengu (elektroni laengu) $e$ fikseeritud väärtusel $1,602176634 \cdot 10^{-19}$ kulonit (C) ehk ampersekundit ( $A \cdot s$ )
5	tempe- ratuur <sup>1</sup>	$T$	kelvin	[K]	Kelvini määratlus põhineb Boltzmanni konstandi $k$ fikseeritud arvvaartusel $1,380649 \cdot 10^{-19}$ , ühik $J \cdot K^{-1}$ ehk $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
6	ainehulk	$n$	mool	[mol]	Mooli määratlus põhineb Avogadro arvu $N_A$ fikseeritud arvvaartusel $6,02214076 \cdot 10^{23}$ , ühik $mol^{-1}$

## Peatükk 2. FÜÜSIKALISED SUURUSED JA MÕÕTÜHIKUD

7	valgus-tugevus	$I$	kandela	[cd]	Kandela on kiirgusallikast etteantud suunas kiiratud monokromaatse $540 \cdot 10^{12}$ – hertsise kiirgussagedusega ja samas suunas 1/683 vatti steradiaani kohta kiirgus-tugevust omava kiirguse valgustugevus
---	----------------	-----	---------	------	---

<sup>1</sup> Temperatuuri puhul võib kasutada ka Celsiuse temperatuuri (tähis  $t$ ), mis määratletakse kui erinevus kahe termodünaamilise temperatuuri  $T$  ja  $T_0$  vahel võrrandiga  $t = T - T_0$ , kus  $T_0 = 273,15K$  [13].

Tabel 2.2. Põhiühikute SI lisäühikud [13]

Jrk	Füüsikaline suurus	Ühiku nimetus	Ühiku tähis	Avaldis SI põhi- ja tuletatud ühikutes
1	(tasa)nurk <sup>1</sup>	radiaan	[rad]	Nurk on ringjoone kaare pikkuse ja ringjoone raadiuse jagatis, dimensioonita suurus (m/m)
2	ruuminurk <sup>1</sup>	steradiaan	[sr]	Ruuminurk 1 sr piirab 1 m raadiusega keral pindala $1 \text{ m}^2$ , dimensioonita suurus ( $\text{m}^2/\text{m}^2$ )

<sup>1</sup> Radian ja steradian loetakse SI-süsteemi erinimetusega dimensioonita tuletatud ühikuteks [13].

## 2.4 Tuletatud ühikud

Põhiühikutest tuletatud SI süsteemi mõõtühikud on toodud tabelis 2.3.

Tabel 2.3. Tuletatud SI ühikud

Jrk	Füüsikaline suurus	Ühik	Ühiku tähis	Avaldis SI põhi- ja tuletatud ühikutes
1	Sagedus	herts	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
2	Jõud	njuuton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
3	Rõhk, mehaaniline pinge	paskal	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
4	Energia, töö, soojushulk <sup>1</sup>	džaul	J	$\text{N} \cdot \text{m}$ või $\text{W} \cdot \text{s}$
5	Võimsus, soojusvoog <sup>2</sup>	vatt	W	$\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$
6	Elektrilaeng	kulon	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ s} \cdot \text{A}$
7	Potentsiaal, pinge, elektromotoorjõud	volt	V	$\text{W} \cdot \text{A}^{-1}$
8	Elektriline takistus	oom	$\Omega$	$\text{V} \cdot \text{A}^{-1}$
9	Elektri-juhtivus	siimens	S	$\text{A} \cdot \text{V}^{-1}$
10	Elektriline mahtuvus	farad	F	$\text{C} \cdot \text{V}^{-1}$
11	Magnetvoog	veeber	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
12	Magnetvoo- tihedus (induktsioon)	tesla	T	$\text{Wb} \cdot \text{m}^{-2}$
13	Induktiivsus	henri	H	$\text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}$
14	Valgusvoog	luumen	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
15	Valgustatus	luks	lx	$\text{lm} \cdot \text{m}^{-2}$
16	Radioaktiivse aine aktiivsus	bekerell	Bq	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$
17	Neeldumisdoos	grei	Gy	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
18	Ekvivalentne kiirgusdoos	siivert	Sv	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

<sup>1</sup> Elektri- ja soojusenergeetikas kasutatakse energiaühikuna W·s ja selle kordühikuid.

<sup>2</sup> Elektrienergeetikas kasutatakse võimsuse ühikuna erinimetusega ühikuid voltamper (V·A) vahelduvvoolu näivvõimsuse ja varr (var) vahelduvvoolu reaktiivvõimsuse tähistamiseks.

## **Kordamisküsimused**

1. Kuidas on mõõtühikute süsteemid läbi aegade arenenud?
2. Millisest mõõdustikust arenes välja SI-süsteem?
3. Millised on seitse SI põhiühikut?
4. Tooge mõned näited (4–5) tuletatud ühikutest!
5. Millised kaks temperatuuri esitust on lubatud SI-põhiühikute süsteemis?



## 3. MÕÕTMISE PÕHIMÕISTED

### 3.1 Mõõtmise põhimõisted ja definitsioonid

#### 3.1.1 Mõõtetäpsuse definitsioonid ja aspektid

Siin kirjeldatakse mõõtetäpsusega seotud mõisteid:

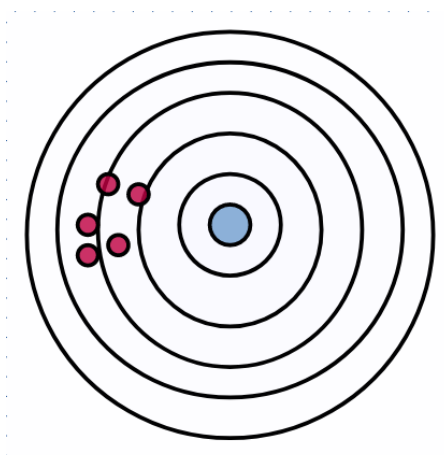
- a) täpsus (*accuracy*);
- b) kordustäpsus (*precision*);
- c) mõõtemääramatus;
- d) juhuslikud ja süstemaatilised mõõtevead ning millest on need tingitud elektron- ja teistes mõõteriistades;
- e) kalibreerimine ja taatlemine.

Täpsus (*accuracy*) iseloomustab **erinevust** (vahet) mõõteriista hinnatud (st „mõõdetud“) füüsikalise suuruse ja tema „tegeliku“ (ehk „õige“) väärtuse vahel. See erinevus on tingitud paljudest põhjustest ja tegu on neile põhjustele vastavate mõõtevea komponentide summaga.

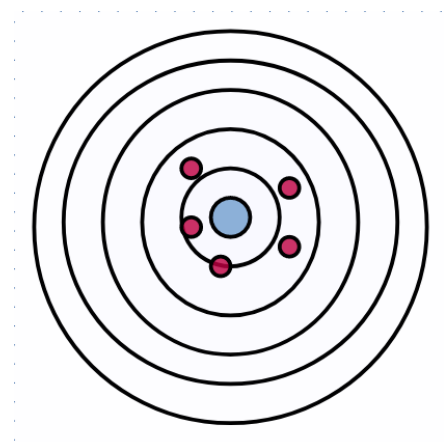
Kordustäpsus (*precision*) näitab mõõtetulemuste ühesugusust ehk väikest hajumist, iseloomustatuna näiteks matemaatilisest statistikast tuntud standardhälbega.

Ideaalis on mõõteseadet nii (absoluutselt) täpne (*accurate*) kui ka kordustäpne (*precise*). Ehk ideaalsel juhul on mõõtetulemused kõik nii tegeliku väärtuse lähedal kui ka tihedalt selle ümber. Mõõtmisprotsessi täpsus ja kordustäpsus määratakse tavaliselt mõne jälgitava võrdlusetaloni (standardi) korduva mõõtmisega. Sellised standardid on määratletud rahvusvahelises ühikute süsteemis (prantsuse keeles *Système international d'unités*, SI) ja neid haldavad riiklikud standardiorganisatsioonid, näiteks USA-s Riiklik Standardi- ja Tehnoloogiainstituut (NIST), Eestis AS Metrosert.

Mõned piltlikud näited mõõtetäpsuse ja kordustäpsuse kohta märklaua pihta tulistamise analoogial (kui hästi tulemus „saab pihta õigele väärtusele“) on toodud joonistel 3.1, 3.2 ja 3.3.



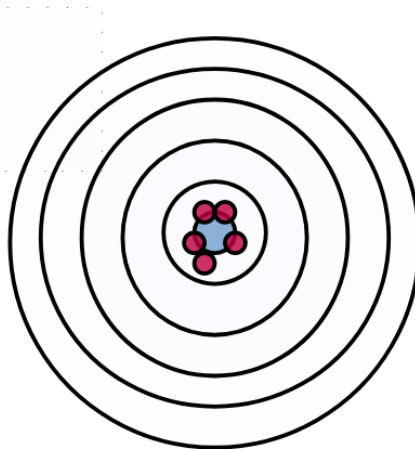
Joonis 3.1. Mõõtetäpsuse määratlus – hea kordustäpsus, aga vilets absoluutne täpsus



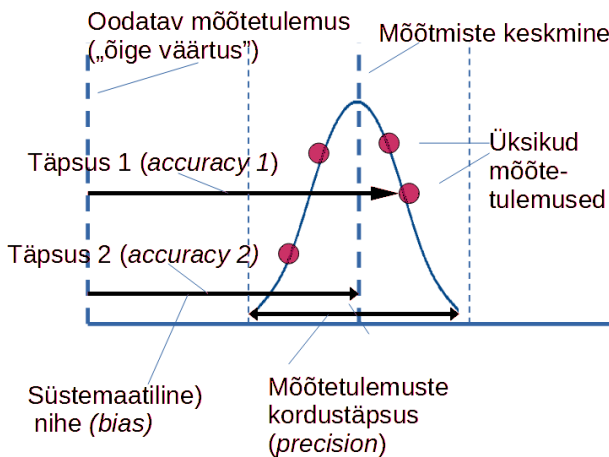
Joonis 3.2. Mõõtetäpsuse määratlus – täpne, aga hajuv tulemus

Standard ISO 5725 [14] defineeribki kolm kategooriat – lisaks mõõtetäpsusele (*accuracy*) ja kordustäpsusele (*precision*) ka tõepärasuse (*trueness*).

Neil joonistel ja eriti joonisel 3.4 on näidatud, et mõõtetulemuste punktid hajuvad teatud keskmise väärtuse ümber (enamasti on tegemist Gaussi jaotusega, kui mõõteviga on juhuslik ehk müralaadne), kusjuures seda mõõtetulemuste hajumist (iseloomustatuna näiteks standardhälbega) ehk juhuslikku mõõtevea komponenti iseloomustab mõõtmiste kordustäpsus.



Joonis 3.3. Mõõtetäpsuse määratlus – nii kõrge täpsus kui hea korduvus



Joonis 3.4. Mõõtetäpsuse määratlus ISO 5725 [14] järgi

Teisalt on kõik mõõtmised ja ka nende keskmine tulemus süstemaatilises nihkes „õigest“ ehk tõepärasest („tõesest“) mõõtetulemusest.

ISO 5725 defineerib täpsuse kahel võimalikul viisil. Ühel juhul loetakse täpsuseks mõõtmiste seeria iga üksiku tulemuse (maksimaalset) erinevust eeldatavast ehk tõepärasest tulemusest („täpsus 1“ joonisel 3.4). Sellisel juhul määratleb ISO täpsuse nii, et kirjeldab mõlema ülaltoodud vaatlusvea kombinatsiooni (juhuslik ja süstemaatiline), seega nõuab kõrge täpsus nii suurt täpsust kui ka „tõepärasust“ (*trueness*).

Teisalt, levinumal juhul loetakse täpsuseks mõõtmiste seeria keskmistatud tulemuse erinevust tõepärasest tulemusest („täpsus 2“ joonisel 3.4). Sellisel juhul on mõõtetäpsus statistilise nihke (*bias*) näitaja. Ehk sellise mõõtevigade esituse puhul näitab täpsus (ainult) süstemaatilist mõõtevea komponenti (nihet) ja kordustäpsus tulemuse juhuslikku viga (mis tulemust keskmistades väheneb).

**Mõõtemääramatus** näitab, mis piirides on mõõdetud tulemus mingi tõenäosusega (näiteks 99%) tõesest väärtusest.

Nagu teada, on standardhälve matemaatilises statistikas defineeritud ruutjuurena mõõtmistulemuste keskmisest erinevuse ruutude summast skaleerituna  $1/(N - 1)$ -ga:

$$sd = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}. \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Mõõtmiste korratavus ja reprodutseeritavus

Kordustäpsuse mõistega on seotud mõõtmiste korratavuse mõiste. Mõõtmiste **korratavus** näitab mõõtetulemuste varieeruvust, mis tekib siis, kui kõiki instrumendiga ja operaatori tegevusega seotud tingimusi püütakse hoida konstantsena (ühetaolisena) ja mõõtmisi korratakse suhteliselt lühikese aja jooksul.

Mõõtmiste **reprodutseeritavus** on mõõtetulemuste varieeruvus, mis tekib sama mõõtmisprotsessi kasutamisel erinevate instrumentidega ja eri operaatorite poolt ning pikema aja jooksul.

### 3.1.3 Täpsuse mõiste masinõppe korral

Huvitav on tähele panna, et ka masinõppes kasutatakse (isegi kahte!) täpsuse mõistet (inglise keeles nii *accuracy* kui ka *precision*). Tüüpiliseks masinõppe (näiteks kompuutertomograafia kujutistelt teatud tüüpi vähkkasvaja avastamise) lõpptulemuseks on eesmärk saavutada objektide (või sündmuste) statistiliselt täpne tuvastus, mis oleks võimalikult väikese vigade arvuga.

Enamasti on tegu binaarse „mõõtetulemusega“ – „tõene“/„väär“ (1/0, *true/false*) – iga „vaatluse“ puhul.

Loodud lahenduste täpsuse hindamisel kasutatakse testandmeid, mille kohta on teada oodatav tulemus (1/0) ja teisalt „tehisintellekti“ pakutud tulemused (1/0). Saadud tulemused võib kanda niinimetatud segaduse maatriksisse (*confusion matrix*). Tabeli nelja kvadranti kantakse õigesti määratud positiivsed ja negatiivsed ning valesti määratud positiivsed ja

negatiivsed tulemused (näiteks õigesti või valesti määratud haigus või selle puudumine).

Seega segaduse maatriksis on nelja tüüpi tulemused:

- TP (*true positive*) – tõeselt positiivsed;
- TN (*true negative*) – tõeselt negatiivsed;
- FP (*false positive*) – valepositiivsed;
- FN (*false negative*) – valenegatiivsed.

Täpsus on siin defineeritud kahel viisil järgmiselt:

- täpsus 1 (T1, *accuracy*) – siin vaadatakse üle kõigi juhtude ennustuse täpsust:

$$T1 = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}; \quad (3.2)$$

- täpsus 2 (T2, *precision*) – siin vaadatakse ennustuse täpsust ainult üle „positiivsetelt“ ennustatud juhtude:

$$T2 = \frac{TP}{TP + FP}. \quad (3.3)$$

Ehk siis piltlikult öeldes, kui tehakse 1000 haiguseproovi, millest 30 õigesti määratud positiivsed ja 5 valepositiivsed ning 20 positiivset juhtu (proovi) jäävad avastamata (valenegatiivsed tulemused), siis esimesel juhul vaadatakse, kui palju 1000 proovist õigesti määrati. Kuna valesti hinnati 5 + 20 = 25 testi, siis õigesti hinnati 1000 – 25 = 975 proovi ehk täpsus on 97,5%.

Teisel viisil täpsust hinnates: kokku oli positiivseid 30 + 20 = 55, õigesti määrati neist 30, seega täpsus on 30/55 · 100% = 54,5%.

Selle näite puhul oleks reaalsuses teine hinnang mõistlikum. Üldiselt püütakse masinõppes testandmete hulgad teha **tasakaalustatult**, et eri klassid (antud juhul „tõene“ ja „väär“) oleksid katsetel võrreldaval määral esindatud. Siis kahel erineval täpsuse määratlusel nii drastilist vahet ei teki.

Üldistades võib öelda, et test- ja mõõtetehnikas, näiteks mõõteriistade täpsuse hindamisel, peaks katma ühtlaselt kõik piirkonnad, signaalid, signaalikujud, piirkondade sees võimalikud erinevad signaali amplituudid ja sagedused jne.

	Tegelikud väärtused	
Ennustatud väärtused	<i>TP</i> (tõeselt positiivsed)	<i>FP</i> (valepositiivsed)
	<i>FN</i> (valenegatiivsed)	<i>TN</i> (tõeseltnegatiivsed)

Joonis 3.5. Masinõppes kasutatav segaduse maatriks

### 3.1.4 Mõõteinstrumentide olulised parameetrid

Peale mõõtetäpsuse on mõõteinstrumentidel hulk muid olulisi parameetreid, mis on lühidalt kirjeldatud alljärgnevalt.

#### Lineaarsus

Enamasti on mõõdetava suuruse ja mõõteseadme näidu vahel esimeses lähenduses lineaarne seos. Kuna mõõtemuundur (või sensor) võib omada mittelineaarsust, mis võib olla tingitud näiteks mehaanilisest hüstereesist, elektroonikakomponentide mitteideaalsusest, elektroonikaskeemide küllastusest täisskaala lähedal jne, siis võib mõõteseadme omada mittelineaarset skaalat. Tänapäeval, mikroprotsessoriga seadmetes on süstemaatilisi mittelineaarsusi lihtne korrigeerida mõõteseadme tarkvaras.

#### Tundlikkus

Mõõteseadme tundlikkus näitab, kui väikest mõõdetavat suurust mõõteriist veel „tunnetab“ (annab eristatava näidu muutuse). Tundlikkust piirab vähim biti väärtus või kümnendkoht tulemuse indikaatoril, eriti lineaarsete mõõtemuundurite ja teisendustega mõõtelahenduste puhul, samuti müratase.

Samas võib väikestele suurustele reageerimine mõõteriista poolt olla raskendatud, näiteks kui mõõtelahenduses (nt mehaanilises sensoris) on hüsterees, siis tuleb mõõdetava suuruse muutusel selle registreerimiseks ületada teatud lävi.

Näiteks vahelduvpinge (AC) efektiiv- (ehk ruutkeskmise, RMS) väärtuse voltmeetris toimub kõigepealt signaali ruutuvõtmine, mille tulemus kaob väikeste signaalide puhul seadme elektroonsesse ja kvantimise (digitaalvoltmeetri puhul) mürrasse, mistõttu võib tundlikkus olla oluliselt halvem kui seadme eraldusvõime (näiteks viimane kümnendkoht tulemuses).

### Mõõtepiirkond

Mõõteseadmel võib olla üks, näiteks 300 V täisskaalaga mõõtepiirkond 230 V vahelduvpinge jälgimiseks elektritoite olulises kohas. Tihti on mõõteriistadel aga mitu mõõtepiirkonda, näiteks metrooloogilisel vahelduvpinge voltmeetril võivad olla piirkonnad 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V ja 1000 V. Mõõtepiirkond näitab nominaalset täisskaalat (ehk selle piirkonna nimiväärtust). Maksimaalne mõõdetav väärtus antud piirkonnas võib siiski tihti ületada seda väärtust, näiteks 10% kuni 100% võrra, et luua mõõdetava suuruse dünaamiline varu. Siis võib näiteks 10 V mõõtepiirkonnas maksimaalne näit olla vastavalt 11,000 V või 19,999 V.

### Mõõdetava suuruse dünaamiline ulatus

Mõõteseadme dünaamiline ulatus iseloomustab, kui väikest ja kui suurt mõõdetavat väärtust saab sama instrumendiga mõõta. See võib olla oluline nii üle kõikide mõõtepiirkondade kokku kui ka ühe konkreetse mõõtepiirkonna piires. Tihti on mõõteseadmetel võimalik kasutada automaatset mõõtepiirkonna valikut, mis lisaks mugavusele võimaldab ilma mõõtepiirkonda käsitsi vahetamata mõõta samas seadmes nii hästi väikest (nt 1 mV 100 mV piirkonnas) kui ka hästi suurt (nt 1000 V) pinget.

Enamasti mõõdetakse dünaamilist ulatust (DU) logaritmilisel skaalal, kümnendsüsteemis väljendatuna detsibellides (dB):

$$DU = 20 \cdot \log_{10}(U_A/U_B), \quad (3.4)$$

kus  $U_A$  on mõõtepiirkonna ulatus (nt voltides) ja  $U_B$  mõõteseadme tundlikkus (või müratase või eraldusvõime, enamasti valitakse, mis neist halvim, samades ühikutes, nt voltides).

### Eraldusvõime

Mõõteseadme eraldusvõime näitab, kui väikseid mõõdetava suuruse muutusi mõõteseadme esitab. Üldjuhul on see numbrilise näidu puhul viimane näidatav kümnendkoht (või arvutisse saadetakse vähim bitt). Näiteks 6 1/2 kümnendkohaga digitaalsel multimeetril on eraldusvõime miljondik (ppm) nominaalsest täisskaalast.

## 3.2 Kalibreerimine ja taatlemine

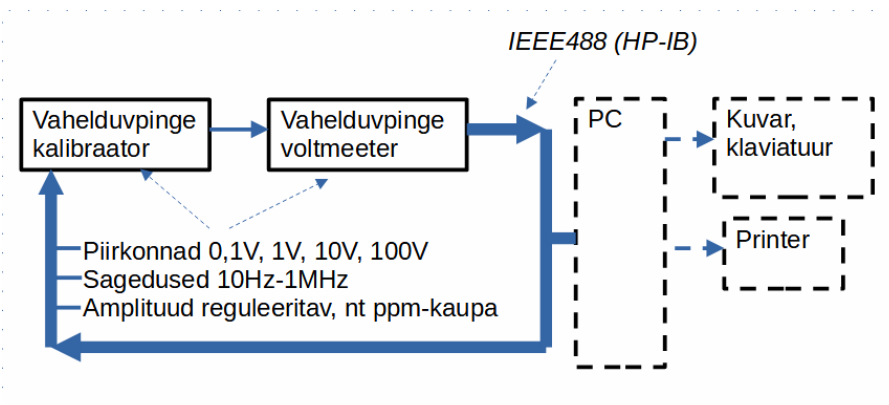
Kalibreerimine seisneb kalibreeritava mõõteseadme mõõtetulemuse (väljundi) võrdlemises teadaoleva väärtusega ja kalibreeritava mõõteseadme justeerimises ehk õigeks sättimises, et kalibreeritava

### Peatükk 3. MÕÕTMISE PÕHIMÕISTED

mõõteseade näitaks võimalikult täpselt teadaolevat „õiget“ väärtust. Teisisõnu on kalibreerimise mõte süstemaatilise veakomponendi minimeerimine (ideaalsel juhul nullimine). Teatavasti koosneb mõõteviga süstemaatilise komponendist (*bias*), mille võrra on mõõtetulemused nihutatud eeldatavast („õigest“) tulemusest, ning teisalt juhuslikust (müralaadest) mõõteveast.

**Taatlemine** on sarnane kalibreerimisega, mõõteriista võrreldakse teadaoleva(te) etaloni(de)ga. Aga taatlemise puhul piirduakse kontrolliga, kas taadeldava seadme mõõtevead on lubatud piirides, seadet ei häälestata (reguleerita-justeerita) täpsemaks. Muus osas on protseduur ja võimalikud lähenemised samasugused.

Praktikas on kalibreerimisel kaks võimalust. Esimesel juhul on etaloniks (referentsiks, standardiks) täpselt teada olev mõõdetav suurus (näiteks kalibraatori väljundpinge voltmeetri puhul), mis antakse kalibreeritava mõõteseadme sisendisse ja viimase näit korrigeeritakse õigeks. Selline vahelduvpinge voltmeetri kalibreerimise konfiguratsiooni näide on kujutatud joonisel 3.6.

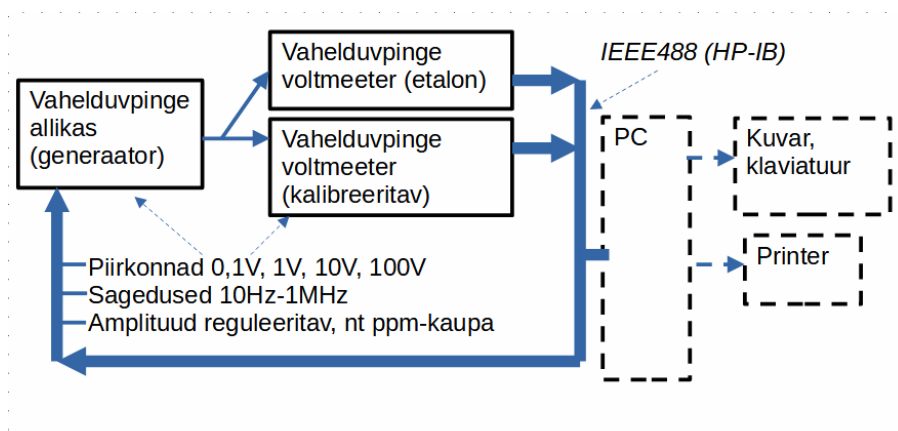


Joonis 3.6. Kalibreerimise konfiguratsiooni näide 1

Alternatiivselt saab kasutada (vähemalt lühiajaliselt) stabiilset mõõdetava suuruse allikat, mida mõõdavad paralleelselt (või suhteliselt väikse ajalise vahega kordamööda) kalibreeritava mõõteseade ja etalon(referents)mõõteseade ning kalibreeritava seadme näit korrigeeritakse õigeks (samaks, mida näitab etalonseade). Selline vahelduvpinge voltmeetri kalibreerimise konfiguratsiooni näide on kujutatud joonisel 3.7

Protseduuri saab teostada mõõteseadmete käsitsi juhtimise ja näitude võtmisega ning seejärel tulemuste käsitsi dokumenteerimisega (kasutades näiteks vastavaid vorme). Tõhusama, täpsema, kiirema ja usaldusväärsema kalibreerimistulemuse saab siiski (näiteks personaal-) arvuti juhtimisel,





Joonis 3.7. Kalibreerimise konfiguratsiooni näide 2

kasutades vastavat rakendust arvutis ning mõõteinstrumentidele sideprotokolle riistvaras (nt IEEE-488, tuntud ka nn Hewlett-Packardi liidesiina *HP-IB*).

Loomulikult võib olla otstarbekas või lausa hädavajalik kontrollida ja kalibreerida mõõteseadet paljudes mõõtepunktidest, mis valitakse olenevalt mõõteseadme tööprintsibist. Näiteks kahendkaaludega analoogdigitaalmuundurid toimivad analoogiliselt võrdsete õlgadega kaaluga, kus kaaluvihid 1, 2, 4, 8 jne grammi kombineeritakse tasakaaluks – selline mõõtmine ei ole juba põhimõtteliselt automaatselt lineaarne ega isegi monotoonse sisend-väljund-karakteristikuga, erinevalt ajaloolisest „margapuust“ (mis on juba oma loomult ühtlaselt muutuv ja monotoonne).

Samuti tuleb kalibreerimisel silmas pidada järgmisi asjaolusid:

- kalibreerimisprotseduuri tuleb läbida perioodiliselt (tüüpiliselt üks kord aastas), seda põhjusel, et vananedes mõõteseadme komponentide omadused muutuvad (n-ö triivivad) – seadet kasutades, aga isegi ka laos hoides mehaanilised komponendid kuluvad füüsiliselt;
- kalibreerimisel, mis toimub enamasti vastavas ruumis, tuleb hoida konkreetsele seadmele ette nähtud keskkonna tingimusi, ennekõike temperatuuri (tüüpiliselt 20 °C, ±0,5 °C või ±1 °C täpsusega), aga ka õhuniiskust (tihti on nõutav näiteks 30–45% tase). See nõue on seotud konkreetsete etalonide ja mõõteseadmete temperatuuri- jm keskkonna tundlikkusega; näiteks mehaanilistel mõõtmistel metallid paisuvad või tõmbuvad kokku temperatuuri muutudes, aga elektronmõõteriistades muutuvad tugipingevaldkate ja mõõtepiirkondade takistite väärtused jne;

### Peatükk 3. MÕÕTMISE PÕHIMÕISTED

- mõõdetava suuruse etalon(referents)allikas või -mõõtja peaks olema oluliselt (nt vähemalt kolm korda, parem kui kümme korda) täpsem kalibreeritavast mõõteriistast.

Kalibreeritakse kõikidel mõõtepiirkondadel ning tüüpiliselt vähemalt kahes punktis – null ja täisskaala (et kompenseerida nullinihe ja mastaabi ehk skaala viga). Eeldades mõõteseadme lineaarsust suuruse mõõtmisel, saab tihti eeldada nende kahe punkti piisavust ühes piirkonnas. Sealjuures, kui enamasti (nt alalispingevoltmeetri) puhul võib nullise väärtusega (nt nullpinge ehk sisendi lühispinge mõõtmisel) mõõtepunkt kalibreerimisel olla mõistlik ja asjakohane, siis näiteks vahelduvpinge mõõteriistadel (eriti neil, mis mõõdavad efektiiv- ehk ruutkeskmist väärtust) on enamasti otstarbekam kasutada nt väärtust 10% täisskaalast, kuna eriti ruutkeskmise väärtuse detektorid ei reageeri väikestele pingetele tänu ruutu võtmise funktsiooni iseärasusele, mis matemaatiliselt surub maha väiksed signaalid ega võimalda neid täpselt detekteerida. Või mõõdavad tippväärtuse detektorid müra ka signaali puudumisel ja tekitavad segava nihke nullpunktis.

Ülitäpsete (k.a etalonideks kasutatavate) mõõteriistade kalibreerimisel ja taatlemisel võib olla probleemiks oluliselt täpsema referentsmõõteriista leidmine. Sellisel juhul võib lahenduseks olla mõne kalibreeritavaga võrreldava täpsusklassi mõõteriista kasutamine, mis omab piisavat eraldusvõimet ja stabiilsust, kalibreerides ja taadeldes selle täpsemaks enne selle kasutamist etalonina.

Sügav teoreetiline arusaamine mõõteseadmete ehitusest ning vastav elukogemus võivad aidata kalibreerimist läbi viia tõhusamalt ja paremini. Loomulikult on automatiseeritud protsessid alati kvaliteetsemad kui käsitsi läbi viidavad toimingud, tagades mh kalibreerimise parema korratavuse, korduvuse ja usaldusväarsuse.

Mõõtmisteks kasutatavad seadmed peavad läbima kohustusliku taatlemise ja vajaduse korral (ümber)kalibreerimise. Taatlemist ja kalibreerimist teostavad selleks volitatud (akrediteeritud) metroloogiaasutused, nt AS Metrosert Eestis. Eestis on ka teisi ettevõtteid, kes on akrediteeritud teatud valdkondades (nt soojusmõõtjate või veearvestite osas) vastavaid metrooloogilisi töid tegema. Taatlemisel ja kalibreerimisel fikseeritakse muuhulgas järgmine teave:

- kalibreeritud seadme tüüp ja identifikaator (seerianumber);
- saadud taatlemise või kalibreerimise tulemused (võrdlevate mõõtetulemuste protokollina);
- kalibreeritud seadmete kasutamise piirangud ja iseärasused;
- kalibreerimise kuupäev ja koht;

- viide volituste (akrediteeringu) alusele.

Suures ettevõttes võib olla mõistlik oma metrooloogilise labori loomine kalibreerimisvõimaluse pakkumiseks ettevõtte allüksustele. Sealjuures nõutav metrooloogiline tase on aga majanduslikult tasuv ainult väga suurte ettevõtete puhul, kus on suur mõõteseadmete arv, mida tuleb kalibreerida mitmes allüksuses. Väikeste ja keskmise suurusega ettevõtete puhul ei ole metrooloogiliste (etalon)seadmete ostmine ja ülalpidamine enamasti õigustatud ning mõistlik on kasutada spetsialiseeritud metrooloogiaasutuste teenuseid, kes saavad kasutada oma seadmeid ja spetsialiste tõhusalt ning ühtlasi tagavad teenuse kvaliteedi (metrooloogilise ahela jälgitavuse, protsesside dokumenteerituse, vajaliku kvaliteedijuhtimissüsteemi rakendamise, usaldusväarsuse jne).

Metrooloogilabori loomist lihtsustab vastava ISO/IEC 1702 [15] standardi olemasolu. samuti on abiks riiklikud standardiorganisatsioonid, kes kehtestavad metrooloogilisele laborile vajalikud ranged tingimused ja kontrollivad nende täitmist (mh töö keskkonda – temperatuuri ja niiskust, dokumentatsiooni koostamist ja hoidmist, seadmeid, labori juhi pädevust jmt).

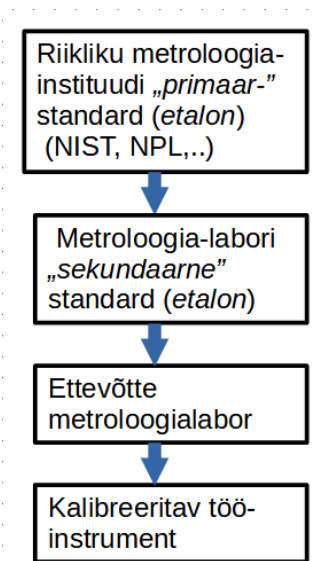
### 3.3 Metrooloogilise ahela jälgitavus

Mõõteseadmed vajavad pidevat (näiteks iga-aastast) taatlemist või kalibreerimist – see tähendab, kontrollimist ja vajaduse korral justeerimist –, et mõõteriista mõõtetäpsus vastaks nõuetele kõigis mõõtepunktidest. Sealjuures peavad ka taatlemiseks või kalibreerimiseks vajalikud etalonid ja mõõteriistad olema täpsemad kui kontrollitav seade ning need peavad omakorda olema taadeldud (kontrollitud) jne. Kokkuvõttes tekib mõõteetalonidest omavahel seotud metrooloogiline ahel, mis viib taadeldavast või kalibreeritavast mõõteseadmest kuni esmaste (primaarsete) etalonideni metrooloogiaasutustes (nt NIST-i, NPL-i, PTB-sse jne). See ahel peab olema esiteks katkematu ja teiseks peab igal sammul olema selge mõõtemääramatuse hinnang, muuhulgas maksimaalsed mõõtevead. Üldjuhul on kalibreerimise sertifikaadid mõõteseadmetel juba ostes kaasas ja tihti viib taoline katkematu ahel NIST-i.

Metrooloogiline ahel (vt joonis 3.8) sisaldab esmast etaloni, mis peab olema ülitäpne, ja selle täpsus tagatakse tihti fundamentaalsete (nt kvantfüüsikal põhinevate) nähtustega. See esmane etalon (standard) ei ole üldjuhul transporditav ja sellega võrdlemine saab toimuda ainult vastavas riiklikus laboris kohapeal. Järgmine, sekundaarne ehk teisene etalon võib olla juba transporditav, tehes võimalikuks kohapealse (nt ettevõtte või muu kohaliku metrooloogilabori) vastava etaloniga võrdlemise ühelt poolt ja

esmise etaloniga teiselt poolt, viies need omavahel vastavusse.

Lisaks kirjeldatud metrooloogilisele ahelale võrdlevad riiklikud metrooloogialaborid aeg-ajalt oma (nt pinge, voolu) etalone omavahel, saades kokkuvõttes usaldusväärsema ja täpsema (ka täpsuse poolest) ettekujutuse oma mõõteetalonidest.



Joonis 3.8. Kalibreerimise jälgitavuse ahel

## 3.4 Mõõteetalonide haldus ja arendus

### 3.4.1 Eestis tehtud töid

AS Metrosert on teostanud uuemas ajaloos mitu mõõteetalonide (-standardite) arendust. Mõned näited:

- Eesti riikliku alalispingestandardi loomine (Andrei Pokatilov, Toomas Kübarsepp jt, 10 V pooljuhtseadistel, mh Zeneri diodidel põhinev süsteem iga-aastase kalibreerimisega) [16];
- Eesti riikliku temperatuuristandardi loomine (Riho Vendt jt [17]);
- koostöös Tallinna Tehnikaülikooliga kontaktivaba (pöörivooluga) metallide elektrilise juhtivuse etalonide arendus, Euroopa Pettusevastase Ameti (OLAF) tellimusel (T. Kübarsepp, A. Pokatilov, O. Märtnens jt). [18, 19].

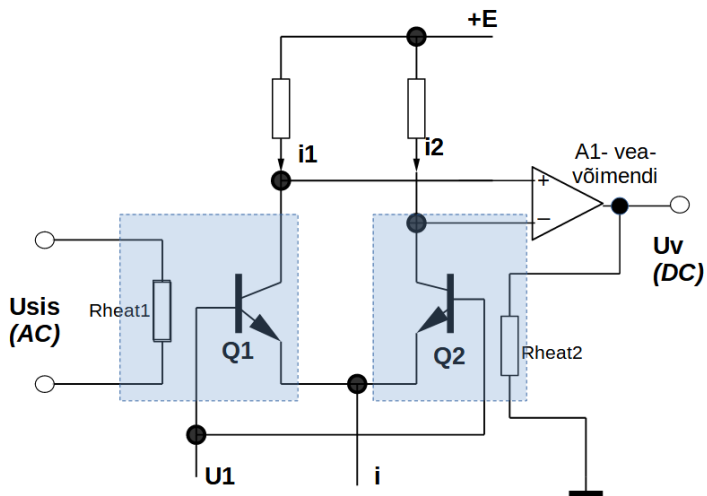
### 3.4.2 Vahelduvpinge võrdleva metroloogia näide

Taustaks: Teise maailmasõja järel kuni Nõukogude aja lõpuni on ka Eestis (ettevõttes RET, Tallinna Raadioelektronika Konstrueerimisbüroos) tegeldud vahelduvpinge mõõteriistade ja kalibraatorite arenduse ja tootmisega ning vastava metrooloogilise kindlustatuse arendamisega. Üheks teemaks on olnud täpsete ja suure eraldusvõimega (numbriliste) mõõteriistade ja kalibraatorite arendus, mida saab kasutada teiste instrumentide kalibreerimiseks ja taatlemiseks.

Üldiselt, kõige esmasemad vahelduvpinge mõõtestandardid põhinevad alalispingel, mida termopaari vmt elemendiga võrreldakse etaloniks justeeritava vahelduvpingega. Kui alalis ja vahelduvpinge tekitavad seejuures ühepalju soojust ehk termoelemendi väljundpinge on täpselt sama, ongi vahelduvpinge etalon justeeritud võrdseks etalon-alalispinge väärtusega. Tegemist on soojusliku ehk nn efektiivvõimsusega, mis matemaatiliselt vastab ruutkeskmisele (RMS) väärtusele. Kuna termoelemendid koosnevad näiteks miniatuursesse vaakumkolbi pandud küttekehast ja termopaarist (mis soojuste elektripingeks muundab), annavad taolised muundurid välja väga väikest pinget (nt millivoldid) ning vajavad signaali ülitäpseks registreerimiseks väga tundlikke alalispingevõimendeid. Termoelemendilt suurema signaali saamiseks, mis on vajalik mõõtemääramatuse vähendamiseks, on arendatud paljuelemendilisi (kus on mitu termopaar järjest) või siis tundlikumaid pooljuhtelemente (küttekeha ja takistuslik soojuste sensor on samas kiibis). Ülevaade metroloogia arengust on toodud artiklites [20, 21, 22, 23].

Firma Fluke on arendanud pooljuhttehnoloogial põhinevaid termomuundureid ning nende baasil vahelduvpinge täppismõõteriistu ja etalone, näiteks tüüp 792A [24]. Seadme põhiosaks on diferentsiaalne termomuundur (joonis 3.9), kus vahelduv sisendpinge kuumutab ühte diferentsiaalpaari transistori  $Q_1$  ning veapingevõimendi  $A_1$  väljundis oleva alalisväljundpinge kuumutab diferentsiaalpaari teist transistori  $Q_2$ . Tasakaalu olukorras kuumutavad mõõtemuunduri vahelduva sisendpinge ja alalise väljundpinge ühepalju ning  $A_1$  sisendis on nulline veapinge. Vea olemasolul saavutab veapingevõimendi  $A_1$  uue tasakaalu  $U_{sis}$  ja  $U_V$  vahel.

### Peatükk 3. MÕÕTMISE PÕHIMÕISTED



Joonis 3.9. Fluke 792A vahelduvpinge standardi mõõtemuundur [24]

## Kordamisküsimused

1. Kuidas on defineeritud mõõtetäpsus?
2. Kuidas on defineeritud mõõtmistel kordustäpsus?
3. Mille poolest erinevad kaks võimalikku mõõtetäpsuse definitsiooni?
4. Mis vahe on mõõtetehnikas korduvusel ja reprodutseeritavusel?
5. Mida jälgitakse metrooloogialaborite akrediteerimisel?
6. Mida tähendavad mõõteriista puhul järgmised mõisted:
  - tundlikkus;
  - eraldusvõime;
  - mõõtepiirkond;
  - mõõdetava suuruse dünaamiline ulatus?
7. Mis vahe on taatlemisel ja kalibreerimisel?
8. Mida kujutab endast metrooloogilise ahela katkematus ja jälgitavus? Mis lülidest metrooloogiline ahel tavaliselt koosneb?
9. Millised on mõõtevea kaks komponenti (matemaatilistelt omadustelt)? Kuidas neid võib nimetada ja iseloomustada?

## 4. ELEKTRONMÕÕTERIISTAD: ARENGUST JA NÄITEID

### 4.1 Analooqvoltmeetrist digitaalse multimeetrini

Olulisteks mõõteriistadeks uuemal ehk elektroonsete mõõteriistade ajastul on olnud elektroonsed voltmeetrid ning multimeetrid, algselt analoog- ja tänapäeval digitaalsete (numbriliste) multifunktsionaalsete mõõteriistadena.

Voltmeeter on mõõteriist, mis mõõdab alalis- või vahelduvpinget skaalal, mis on tavaliselt gradueeritud voltides, millivoltides (0,001 volti) või kilovoltides (1000 volti) [25]. Taolised mõõteinstrumendid võivad esitada näidu analoogkujul (nagu see on on olnud ajalooliselt, liigutades skaalal pinge väärtust näitavat osutit või valgustäppi). Tänapäeval on voltmeetrid pigem digitaalsed, andes näidud numbriliselt. Digitaalsete voltmeetrite täpsus on üldjuhul suurem kui analoogseadmetel. Samuti on neil palju lisafunktsioone, nagu näeme ka digitaalsete multimeetrite juures – näiteks automaatne piirkonnaalik, tulemuste aritmeetiline töötlus – näiteks keskmistamine, minimaalse või maksimaalse väärtuse fikseerimine mõõteseriates jpm.

Tavaline vanamoodne analooqvoltmeeter kasutab mõõtetulemuse esitamiseks tõenäoliselt elektromehaanilist galvanomeetri-taolist mehhanismi, millest allpool.

Muud tüüpi voltmeetrid hõlmavad elektrostaatilist voltmeetrit, mis kasutab elektrostaatilist jõudu ja on seega mitteelektroonne voltmeetri tüüp, mis mõõdab pinget otse, mitte elektrivoolu mõju kaudu. Potentsiomeetriline voltmeeter töötab, võrreldes mõõdetavat pinget suure eraldusvõime juures teadaoleva pingega. Seda tööpõhimõtet kasutatakse mh väga madala pinge mõõtmiseks. Elektronvoltmeeter kasutab tihti võimendust või alaldust (või mõlemat), et mõõta vahelduv- või alalisvoolu pinget. Elektroonse mõõteseadme puhul seadme käitamiseks vajalikku voolu ei võeta mõõdetavast vooluringist. Seega ei põhjusta seda tüüpi instrumendid mõõdetava vooluahela koormamisel lisa-mõõteviga. Samuti on digitaalseid mõõteriistu lihtne siduda arvutimaailmaga, kaugmõõtmistega jne.



## 4.1. Analooqvoltmeetrist digitaalse multimeetritini

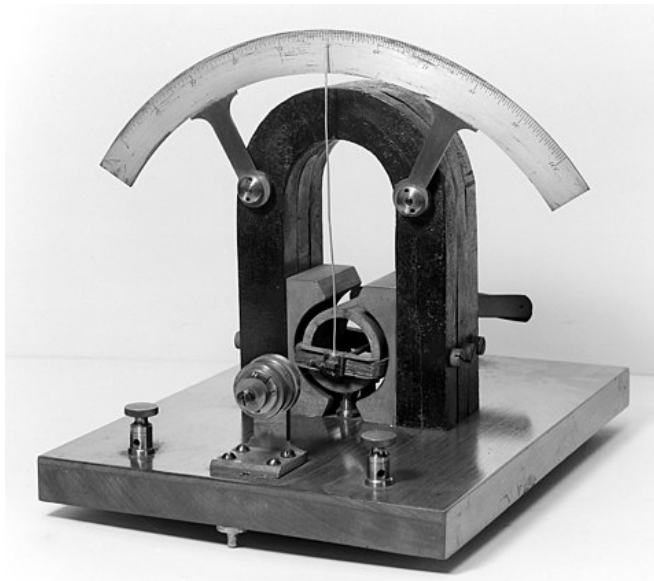
Instrumenti, mis mõõdab ka oome ja ampreid (või milliampreid), nimetatakse multimeetriks või mõnikord volt-oom-milliampermeetriks (VOM).

### Elektromehaanilised analooqvoltmeetrid

Galvanomeetri, elektromehaanilise elektrivoolu mõõteseadme, ajalugu ulatub 1820. aastasse, kui Taani füüsik Hans Christian Ørsted märkas kompassinõela liikumist elektrivooluga juhtme lähedal.

Galvanomeetri nimi tuli Itaalia füüsikult Luigi Galvanilt, kes mitte ainult ei katsetanud elektrijuhtidega, vaid uuris ka elektrilisi nähtusi organismide lihaste kokkutõmbumise ajal.

1800-ndate teisest poolest pärit galvanomeetrit on kujutatud joonisel 4.1. Liikuva pooliga galvanomeetrit saab kasutada voltmeetrina, ühendades instrumendiga vajaduse korral järjestikku takisti. Galvanomeetril on peenikesest traadist mähis, mis asetseb tugevas püsिमagnetväljas. Elektrivoolu rakendamine tekitab mähise ja statsionaarse magneti magnetväljade koosmõjul pöördemomendi, mis paneb mähise pöörlema. Pöördemoment on proportsionaalne mähise läbiva mõõdetava vooluga. Spiraal pöörleb, surudes kokku pöörlemisele vastupanu osutava vedru. Spiraali läbipaine on seega proportsionaalne vooluga, mis omakorda on võrdeline rakendatud pingega, mida näitab osuti skaalal.



Joonis 4.1. Varajane magneti ja pöörleva mähisega D'Arsonvali galvanomeeter (CC BY-SA 4. 0/ Wikimedia Commons)

Üks pinget mõõtva seadme arendamise eesmärke on olnud mõjutada vooluringi nii vähe kui võimalik ja seega peaks seade võtma tööks minimaalselt voolu. Ehk vajalik on väike voolu ja võimsuse omatarve. See saavutatakse, kasutades tundlikku galvanomeetrit koos järjestikuse suure takistiga ja seejärel ühendatakse kogu instrument paralleelselt mõõdetava vooluahelaga.

Sellise mõõtelahenduse tundlikkust saab väljendada „oomi voldi kohta“, mõõteahela kogutakistus jagatuna täisskaala mõõdetud väärtusega. Näiteks mõõteriist, mille tundlikkus on 1000 oomi voldi kohta, võtaks 1 V pinge korral 1 milliampri voolu. Mitme piirkonnaga mõõteriistadega puhul on sisendtakistus varieeruv, kuna seadmes lülitatakse vastavalt mõõtepiirkonnale sisse sobiv eeltakisti.

Pöördmähisega püsomagnetväljas instrumendid reageerivad ainult alalisvoolule. Vahelduvpinge mõõtmiseks on vaja vooluahelas alaldit, nii et mähis koos osutiga kalduks ainult ühes suunas. Mõned liikuva mähisega instrumendid on valmistatud nullpositsiooniga skaala keskel, mitte ei asetse nullväärtus skaala ühes otsas. See on kasulik kahepoolaarsel pingemõõtmisel.

Elektrostaatilisel põhimõttel töötavad voltmeetrid kasutavad kahe laetud plaadi vastastikust tõmbumist või tõukumist, et pöörata vedru külge kinnitatud osutit. Nad on tundlikud ainult rohkem kui 100-voldisele pingele ja töötavad nii vahelduv- kui ka alalispingega. Seda tüüpi mõõtmine ei tarbi voolu alalispinge mõõtmisel ja on mahtuvuslikuks koormuseks mõõteahelas vahelduvpinge mõõtmisel.

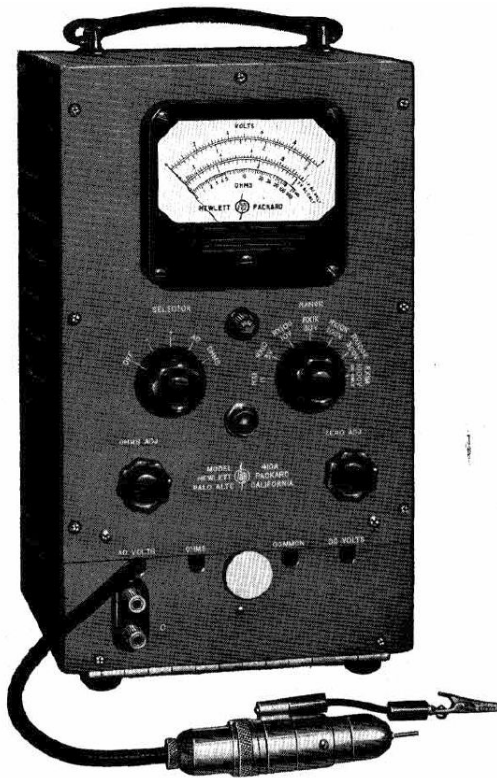
Kui elektrienergiatööstus 19. sajandi teisel poolel arenema hakkas, tekkis vajadus voolu ja pinget regulaarselt mõõta. Üks inseneridest, kes täppisalalisvoolu ampermeetri praktiliselt kasutusele võttis, oli Inglise keemik Edward Weston. Seadet nimetas ta kaasaskantavaks (portatiivseks) instrumendiks, kuna seni võis taolisi mõõteriistu kasutada ainult laboris ja neid ei saanud mõõtmiste tegemiseks kuhugi kaasa võtta [26].

### **Analoog-elektronvoltmeetrid**

Raadiolampide kasutamine elektronmõõteriistades (näiteks elektronvoltmeetrites) sai võimalikuks pärast vastavate vaakumseadiste leiutamist.

1904. aastal lõi Inglise elektriinsener Sir John Ambrose Fleming esimese vaakumdiodi. See sobis vahelduvvoolu alaldamiseks ehk sisuliselt vahelduvpinge alalispingeks mõõtemuunduriks.

1906. aastal leiutas Ameerika raadioinsener Lee De Forest vaakumtriiodi, millega sai ka võimendada nii alalis- kui ka vahelduvpinget ehk luua ka nt millivoltmeetreid.



Joonis 4.2. Kõrgsagedusvoltmeeter HP410A [28]

Ülevaade vaakumseadistega (nii alalis- kui vahelduvpinge) voltmeetritest on toodud raamatus *Vacuum-tube voltmeters* (1941 ja 1951 [27]), mis annab põhjaliku ülevaate lampvoltmeetrite arengust ja tasemest tol ajastul.

Näiteks voltmeetrit HP410A (joonis 4.2) toodeti 1945–1952 [28]. Selle arendaja oli David Packard. Seadme pingemõõtmise piirkonnad (nii alalis- kui vahelduvvoolul) olid 1, 3, 10, 30, 100 ja 300 V ning lisaks alalisvoolul 1000 V. Seade võis mõõta ka takistust kuni 500 M $\Omega$  seitsmel eri piirkonnal. Vahelduvvoolu pinget sai mõõta sagedusribas 20 Hz kuni 700 MHz. Mõõtmiseks kuni 3 GHz ribas oli seadmel ka mõõteproovik, mis põhines erilisel vaakumdiodil.

Voltmeetrite ajaloos oli oluliseks sammuks mitte vaakumdiodil põhinenud, vaid algselt vaskoksiidil põhinenud alaldite kasutuselevõtt vahelduvvoolu mõõteriistades. Vaskoksiidialaldeid hakkas tootma firmas Westinghouse (USA) 1920-ndate lõpus.

### Esimesed multimeetrid

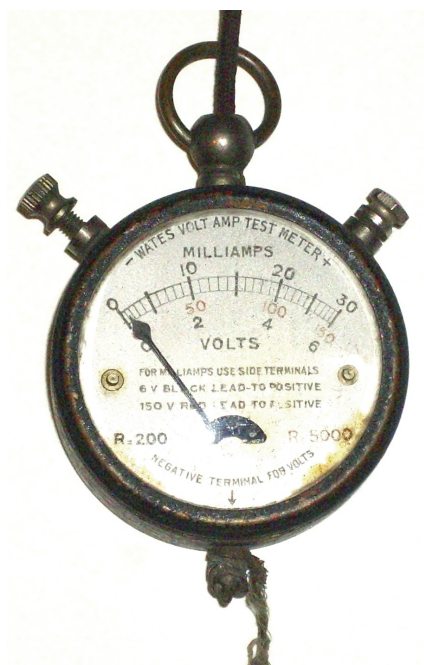
1920. aastal arendas Briti postiteenistuse insener Donald Macadie esimese multimeetri. Lugu räägib, et ta oli pettunud vajadusest sideliinidel töötades kaasas kanda hulka erinevaid mõõteriistu. Nii lõi ta ühe universaalse instrumendi, mis suutis mõõta ampreid, volte ja oome. Seadme nimeks sai *AVOMeter*.

Esimene AVO-meeter oli tänapäevaste digitaalsete multimeetritega võrreldes üsna kohmakas, kuid juba 1930. aastateks oli seadmest loodud kaasaskantav variant, millel olid lisa-mõõtepiirkonnad ja -funktsioonid.

### Numbrilised elektronvoltmeetrid

Tänapäeval on mõõteriistad üldjuhul numbrilised ehk digitaalsed.

Esimese numbrilise voltmeetri valmistas Andrew Kay ettevõttest Non-Linear Systems 1954. aastal. Juba 1950. aastatel püüdsid tehnoloogia-pioneerid valmistada pooljuhtidel voltmeetril, kuid pooljuhid muutusid kasutamiseks piisavalt odavaks alles 1970. aastatel. Fluke 8020A sai **1977. aastal** esimeseks levinud käeshoitavaks digitaalseks multimeetriks [29].



Joonis 4.3. Varajane VOLT-AMP-METER (CCO 1.0/ Wikimedia Commons)

## 4.2 Numbriliste mõõteriistade eelised

Üldjuhul on numbrilistel mõõteriistadel (nt voltmeetritel) hulk eeliseid, võrreldes vastavate analoog-mõõteriistadega:

- suurem täpsus;
- kompaktsus;
- nad on vähem mõjutatud elektromagnetväljadest;
- neid on odavam toota;
- nad võtavad enamasti vähem voolu, mis on eriti oluline patareitoitega seadmete puhul;
- nad on tihti arvutiga hõlpsalt seotavad;
- on võimalus kasutada automaatset mõõtepiirkonna valikut;
- on hõlpsalt võimalik mittelineaarsete sensorite mõõtetulemusi lineariseerida, samuti muid süstemaatilisi kõveraid ja mõõtevigu korrigeerida.

## 4.3 Elektroonsete mõõteriistade näiteid

Erinevaid elektroonseid mõõteseadmeid ja lahendusi on kirjeldatud näiteks raamatutes [30, 31] ning mõõtmisteks vajalike andureid kahekõitelises raamatus [32, 33].

Mõned näited elektroonsetest mõõteriistadest on toodud allpool ning mõõteriistades olevatest mõõtemuunduritest ja anduritest järgnevas peatükis.

### 4.3.1 Digitaalsed multimeetrid

Lauapealse digitaalse multimeetri (DMM) näiteks võib tuua seadme 34410A firmalt Keysight (Hewlett-Packardi järeltulija). Seadme eest- ja tagapaneeli vaade on toodud joonistel 4.4 ja 4.5.

Seadme põhiparameetrid on järgmised:

- 6,5 kümnendkohaga näit (seega miljondikuline ehk *ppm* eraldusvõime);



Joonis 4.4. Digitaalne multimeeter 34410A (Keysight), eestvaade (foto – T. Eikholm)

- kümme mõõtefunktsiooni: alalis- ja vaheldvpinge ja -voolu, 2- ja 4-juhtmeline takistuse, diodi ning signaali sageduse ja perioodi mõõtmine;
- põhitäpsus 0,035% (võib lisanduda mõõteviga sõltuvalt mõõtepiirkonnast, samuti olenevalt sellest, millist füüsilist suurust mõõdetakse, mõõtepunkti ja vahelduvvoolu parameetrite puhul ka mõõtesagedusest);
- suurim mõõdetav pinge on 1000 V ja vool 3 A;
- arvutiga juhitav (IEEE-488, LAN- ja USB-liides).

Tagapaneelivaates (joonis 4.5) on näha, et lisaks esipaneelil olevatele mõõtejuhtmete pesadele saab alternatiivselt ühendada mõõtejuhtmed tagapaneeli kaudu, mis võib olla mugav mõõtesüsteemide puhul, kus palju mõõteinstrumente on pandud ühte kappi (nn *rack*'i). Samuti on tagapaneelil sideliidesed – IEEE-488, LAN ja USB.

Omaette meistriklass on Keysighti 3458A-tüüpi digitaalne multimeeter (joonis 4.6), eraldusvõimega 8,5 kümnendkohta alalispinge, alalisvoolu ja takistuse mõõtmisel. Muuhulgas saab seadet kasutada mõõtesignaali digiteerijana, kuna seade teostab rohkem kui 100 000 mõõtmist sekundis.



Joonis 4.5. Digitaalne multimeeter 34411A (Keysight), tagapaneel (foto – T. Eikholm)

#### 4.3.2 Digitaalsed ostsilloskoobid

Ostsilloskoop on elektroonne test- ja mõõteseade, mis kuvab graafiliselt signaali lainekuju, tavaliselt kalibreeritud graafikutena ühest või mitmest signaalist aja funktsioonina. Kuvatavat lainekuju saab seejärel analüüsida eri parameetrite (amplituud, sagedus, ajavahemikud, mitmesugused moonutused jpm) järgi. Algsete analoog-ostsilloskoopide puhul hinnati parameetreid seadme ekraanilt (milleks oli tüüpiliselt elektronkiiretoru) ja tulemusi hinnati silma järgi.

Ostsilloskoobi ajaloost [34]. Saksa füüsik Karl Ferdinand Braun ehitas 1897. aastal esimese elektronkiiretoru (*cathod-ray tube*, CRT) ja esimese CRT-põhise ostsilloskoobi füüsikaliste katsete jaoks. 1920. aastatel tehti elektronkiiretorudega esimesed mõõtmised. 1931. aastal töötas *General Radio Company* välja ühe esimestest ostsilloskoopidest (tüüp 535-A), see oli kaheosaline, eraldi toiteallikaga.

Tänapäeva digitaalsete ostsilloskoopide puhul oskab seade tihti ise arvutada neid ja teisigi parameetreid (näiteks esitada ajavallas mõõdetud lainekuju sageduse vallas, tänu sisseehitatud Fourier' analüüsi matemaatikale). Samuti toetavad taolised mõõteriistad tihti konkreetsete sideprotokollide või modulatsioonide analüüsi.

Ostsilloskoopi saab reguleerida nii, et korduvaid signaale saab jälgida ekraanil püsiva lainekujuna.

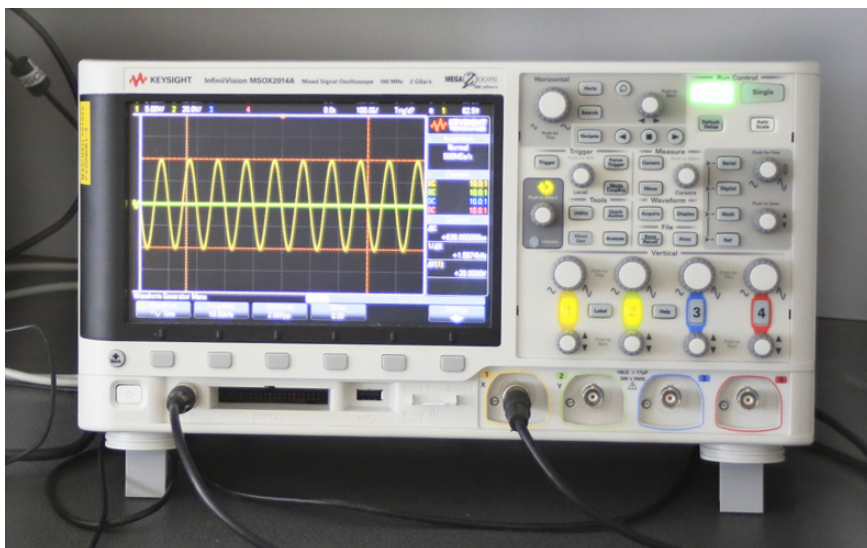
Tänapäeva ostsilloskoope nimetatakse ka DSO-deks (*digitaalsed salvestavad ostsilloskoobid*).

## Peatükk 4. ELEKTRONMÕÕTERIISTAD: ARENGUST JA NÄITEID



Joonis 4.6. Digitaalne multimeeter 3458A (Keysight, foto – T. Eikholm)

Näitena võib tuua Keysighti ostsilloskoobi MSOX2014A (joonis 4.7). Seadmega saab jälgida üheaegselt 4 analoogsignaali (võndussagedus 2Gs/s) kuni 100 MHz analoogribas ja 8 digitaalset (binaarset) signaali. Ehk seade töötab ühtlasi ka loogika-analüsaatorina, võimaldades uurida signaale mitte ainult analoog-, vaid ka digitaal- ja analoog-digitaalsetes segaskeemides.



Joonis 4.7. Ostsilloskoop MSOX2014A (Keysight, foto – T. Eikholm)

Lisaks ostsilloskoobi (ja loogikaanalüsaatori) funktsionaalsusele sisaldab seade signaaligeneraatorit, millega saab tekitada mitmesuguse lainekujuga testsignaale (näiteks siinus, saehammas, nelinurk).

Omaette klass mõõteriistu on nn digitaalsed fosfor-ostsilloskoobid



(*digital phosphor oscilloscope*, DPO) [35]. Ajalooliselt oli vajadus näidata katoodkiiretorul hõredate (väikse kordussagedusega või ühekordsete) signaalide puhul pikemat järelhelendust, mis saavutati fosfori lisamisega katoodkiiretoru ekraani siselele. Tänapäeval, kuna numbrilised ostsilloskoobid on niikuinii võimelised ka lühikesi lainekujusid salvestama ja taasesitama, on analoogfosfori imiteerimise idee pigem lainekuju heleduse (või ka värvuse) moduleerimine ekraanil sõltuvalt signaali „hõredusest või tihedusest“ (nt kordussagedusest).

Hinnalt soodsad ja mitmes mõttes mugavad kasutada on PC-ostsilloskoobid, mis on enamasti teostatud väikse karbikesena, mis ühendatakse USB-kaabliga arvuti külge. Selline seade võib sisaldada ka signaaligeneraatorit. Arvutis on loomulikult mugav lainekujusid uurida, salvestada, jagada, arhiveerida jne.

### 4.3.3 Juhitavad toiteplokkid

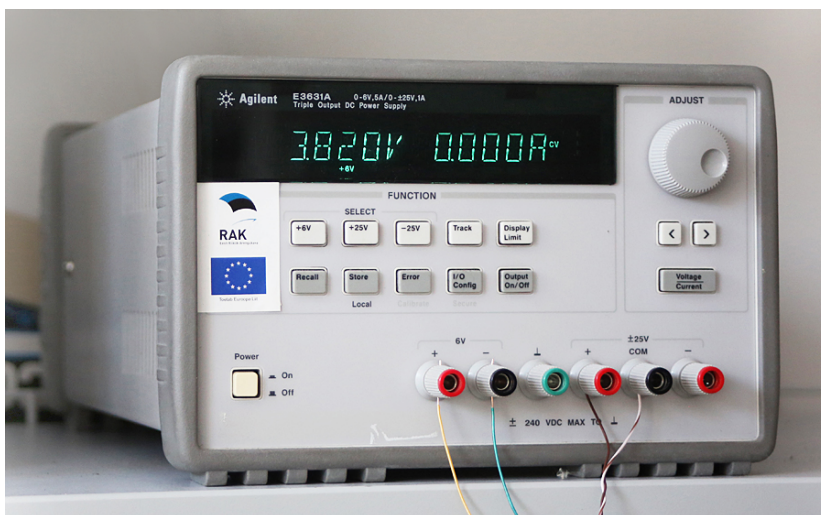
Test- ja mõõtelahendustes on enamasti vaja toiteplokkide, mh testitava seadme toitmiseks. Tihti on vajalik, et toitepinge oleks reguleeritav, nii selleks, et katta erinevaid vajadusi, kui ka selleks, et testida seadmeid eri toitepingete juures ja testitava seadme tööpinge piire.

Automaatsetes mõõtesüsteemides on vajadus arvutiga (nt IEEE-488 siini või mõne muu arvutiliidese kaudu) juhitud toiteplokkide järele. Üks taolise toiteploki näide on *E3631A 80 W Triple Output Power Supply*, 6 V, 5 A &  $\pm 25$  V, 1 A (joonis 4.8) maksimaalse väljundpingega 25 V (vooluga kuni 1 A). Nii väljundpinge kui ka (maksimaalne) vool on seadistavad nii käsitsi kui ka arvutijuhtimisega.

### 4.3.4 Signaaligeneraatorid

Testimisel ja mõõtmisel on vaja kasutada teadaolevate omadustega test- ja mõõtesignaale. Siin on abiks mitmesugused signaaligeneraatorid. Mõõte- ja testsüsteemides võib olla mõistlik kasutada programmeeritavaid ja vajaduse korral arvutiga juhitud funktsiooni- või suvalise lainekuju generaatoreid (*arbitrary waveform generator*, AWG). Näiteks, firma Tektronix seade AFG3252 (*Arbitrary/Function Generator*, joonis 4.9), omab 240 MHz analoog-ribalaiust, kahte väljundkanalit, 1 mV kuni 20 V (tipust tippu) väljundpinge amplituudi. Signaalid genereeritakse digitaalselt 14 bitiga võndussagedusega kuni 2 Gs/s.

Sealjuures saab kahte väljundkanalit kasutada nii omavahel sõltumata kui teineteisest sõltuvate lainekujude tekitamiseks. Näiteks võib ühes kanalis olla siinus ja teises koosinus samast siinuselisest lainekujust, vastava faasinihke valimisega kahe kanali signaalide vahel.



Joonis 4.8. Programmeeritav toiteplokk E3631A (Keysight, foto – T. Eikholm)

### 4.3.5 Impedantsi (ahela)analüsaatorid

Omaette klass mõõteriistu on nn (elektrilise) ahela analüsaatorid (*network analyzers*), mis mõõdavad etteantud sagedustel (või skaneerivad teatud sagedusribas) kompleksset (reaal- ja imaginaarosa või moodul-faas-esituses) kas elektriahela impedantsi (takistust vahelduvoolule) või ahela kompleksset ülekannet. Suhteliselt sarnase funktsiooniga seadet võidakse nimetada ka impedantsi mõõtjaks või impedantsi analüsaatoriks. Samuti on nn LCR-mõõtjate tööpõhimõte ja funktsioon suhteliselt sarnane impedantsimõõtja omaga.

Taolistest mõõteriistadest on üks täpsemaid Wayne-Kerri 6500B seade (joonis 4.10). Seade mõõdab sagedustel kuni 120 MHz ja selle mõõtetäpsus on alates  $\pm 0,05\%$ . See teeb sellest mõõteriistast ühe oma klassi parima.

Seade võimaldab muuhulgas karakteriseerida passiivseid komponente ja dielektriliste materjale nii nende iseloomustamiseks tootarenduses kui ka tootmiskatsetes.

Seade võib kuvada mõõdetavat objekti (L, R või R, C esituses) nii jada- kui ka paralleel-aseskeemina ning teostada mõõtmisi kas sageduse skännina (parameetrite nägemiseks sagedusvallas) või ühel etteantud sagedusel.

Samast seeriast on saadaval ka odavam 5 MHz sagedusribaga seade 6505B.



Joonis 4.9. Suvalise lainekuju generaator AFG32522 (Tektronix, foto – T. Eikholm)

#### **Lock-in impedantsi ja signaali mõõtjad**

Omaette klass seadmeid on nn *lock-in* ehk „(signaalile) lukustuvad“ mõõteseadmed. Parim näide on siin firma Zürich Instruments seadmed eri sagedusribadele: MFIA (5 Mhz – pilt joonisel 4.11), MFLI (500 kHz), H2FLI (50 MHz) ja UHFLI (600 MHz). Need seadmed sisaldavad digitaalset protsessorit, mis genereerib ja analüüsib signaali, ning analoogliidest mõõdetavate objektide ühendamiseks.

Analoogliides sisaldab ühelt poolt digitaal-analoogmuundureid analoogväljundsignaali genereerimiseks (näiteks ergutussignaali tekitamiseks impedantsi mõõtmisel, aga on kasutatav ka suvalise lainekuju genereerimiseks). Teiselt poolt sisaldab seade analoog-digitaalmuundureid, mis võimaldavad analüüsitava (näiteks impedantsi vastussignaali) digitaliseerida edasiseks töötamiseks. *Lock-in* ehk sünkroonne mõõtmine (teostatuna neis seadmetes digitaalosas) võimaldab (näiteks kompleksse impedantsi) mõõtmise teostada häirevabalt ja täpselt.

Täpsemalt sünkroonsete mõõtmiste kohta vaadake järgmisi, mõõtemuundurite ja impedantsi mõõtmisega seotud peatükke.

Peatükk 4. ELEKTRONMÕÕTERIISTAD: ARENGUST JA NÄITEID



Joonis 4.10. Wayne-Kerr 6500B impedantsi mõõtja (foto – T. Eikholm)



Joonis 4.11. (Lock-in) impedantsi mõõtja MFIA (5 MHz) (Zürich Instruments, foto – T. Eikholm)

## Kordamisküsimused

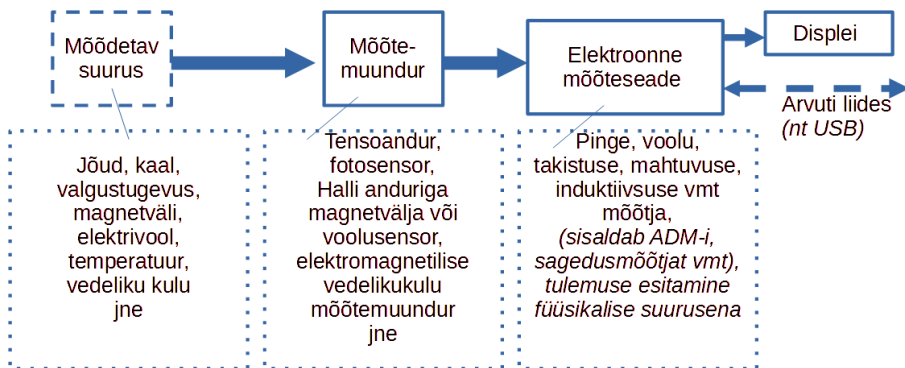
1. Nimetage võimalikult palju elektroonsete test- ja mõõteseadmete näiteid.
2. Kas elektromehaaniliste mõõtesüsteemidega (nt pöördpooliga püsिमagnetite vahel) lihtsad analoogvoltmeetrid oma füüsikaliselt tööpõhimõttelt mõõdavad pinget või voolu?
3. Umbes mis aastal algas universaalsete elektrimõõteriistade (tänapäeval tuntud multimeetritena) ajalugu? Tänu millele ja millal sai võimalikuks suhteliselt väikeste mõõtmetega vahelduvpinge ja -voolu mõõteriistade tootmine?
4. Mis laadi (eri funktsionaalsusega) ostsilloskoope on olemas?
5. Mis on numbriliste mõõteriistade eelised võrreldes elektroonsete analoogmõõteriistadega?

# 5. ANALOOG-DIGITAALMUUNDURID

## 5.1 Mõõtemuunduritest üldiselt

Reaalse füüsilise suuruse (jõud, kaal, valgustugevus, magnetvälja tugevus, temperatuur, rõhk, vedeliku kulu, kiirendus jne) tüüpiline mõõtelahendus sisaldab **mõõtemuundurit** (*transducer*), mis muundab mõõdetava füüsilise väärtuse esmalt elektriliselt mõõdetavaks suuruseks (näiteks pinge, vool, takistus, sagedus, induktiivsus, mahtuvus, impulside jada) või selle muutuseks, ning elektroonset mõõteseadet (joonis 5.1). Viimasel on tüüpiliselt oma numbriline näidik (displei) ja/või arvuti-liides (näiteks USB) tulemuste esitamiseks ja registreerimiseks arvutis, ka mõõteandmete järeltöötamiseks, analüüsiks, tulemuste logimiseks ja protokollimiseks. Samuti võib arvuti juhtida elektroonset mõõteseadet – näiteks valida mõõtepiirkonda, töörežiimi jpm.

Piltlikult öeldes võib seda elektroonset mõõteseadet käsitleda mõõtemuunduri kasutajaliidese riistvara osana, mis võib mõnel juhul olla ehitatud juba anduri konstruktsiooni sisse. Arvuti võib *virtuaalse instrumendina* sisaldada andmetöötlust ja sidestuda mõõtemuunduriga ka läbi universaalse andmehõiveseadme (vt järgmist peatükki arvutipõhistest mõõtmistest).

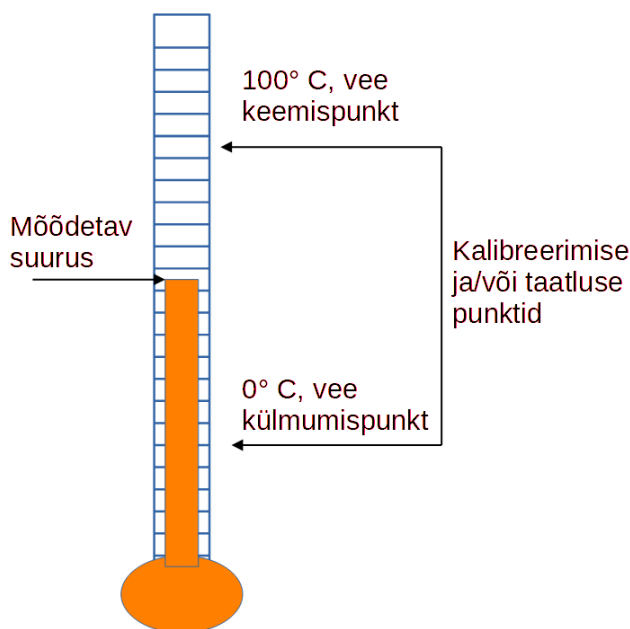


Joonis 5.1. Üldistatud tüüpiline mõõtelahendus

Mitmesuguste mõõtesensorite (näiteks Halli andur, temperatuurisensorid, mahtuvuslikud ja induktiivsed andurid mitmeks otstarbeks) näiteid on toodud järgmises peatükis. Asjakohaseid mõõtesignaali muundureid on kirjeldatud selles ja järgmistes peatükkides.

Kõige universaalsem ja tihti kasutatav on mõõdetava suuruse muundamine elektriliseks alalispingeks, mida saab analoog-digitaalmuunduriga (ADM) teisendada numbriliseks tulemuseks, näitamaks seda kas otse või pärast tulemuste teisendamist digitaalsel displeil või kasutamaks arvutis.

Retrostiilis analoogkraadiklaasi näide (joonis 5.2) näitab, et tihti (või isegi enamasti) on mõõteriistal (kui on mitme mõõtepiirkonnaga seade, siis iga mõõtepiirkonna kohta eraldi) kaks olulist mõõtepunkti, mis defineerivad vastavalt nullpunkti ja täisskaala.



Joonis 5.2. Mõõtmine kahe referentspunkti alusel

Sellisel valitud mõõteseadme kalibreerimise (või kontrollimise ehk taatlemise punktid) ei välista ilmtingimata nullist negatiivsemate ning vähesel määral üle täisskaala suuruste mõõtmist. Sealjuures saab tegelikku mõõtetulemust hinnata nende kahe punkti järgi interpoleerides (või ka ekstrapoleerides, kui mõõdetav väärtus on üle täisskaala või alla nullpunkti), eeldades seadme loomulikku linearsust. Neid nulli ja täisskaala mõõtepunkte saab kasutada seadme taatlemisel (metrooloogilises kontrollis) või võimaluse korral ka kalibreerimisel.

Möödamannes võib ka märkida, et kuigi taoline kraadiklaas on tööpõhi-

mõttelt analoogmõõteriist (vedelikusammas paisub pideva suurusena muutusena temperatuurist), siis näidu lugemisel inimese poolt toimub „digitaliseerimine“ (kvantimine) skaalal olevate jaotiste alusel ja on võimalik visuaalselt isegi kahe kriipsu vahel hinnata ka tulemuse murdosa, näiteks vähemalt seda, kas on tegemist on pigem pool- või täiskraadiga.

## 5.2 Analoog-digitaalmuundurid

Analoog-digitaalmuundurid (ADM) teisendavad ajas ja amplituudis pideva analoog- ehk reaalselt maailma peegeldava suuruse (näiteks pinge, mis peegeldab temperatuuri, rõhku, pinget, voolu, kaugust või valgustugevust) digitaalseks (numbriliseks, ajas diskreetseks) esituseks. Seda digitaalset esitust saab seejärel arvutis või ka seadme kohalikus protsessoris töödelda ja arvutuslikult teisendada, nt teostada Fourier' analüüsi või leida tulemustest statistilisi momente, nagu keskväärtus, ruutkeskmine, standardhälve jne, ning edastada saadud tulemused numbrilisele näidikule või arvutisse või salvestada.

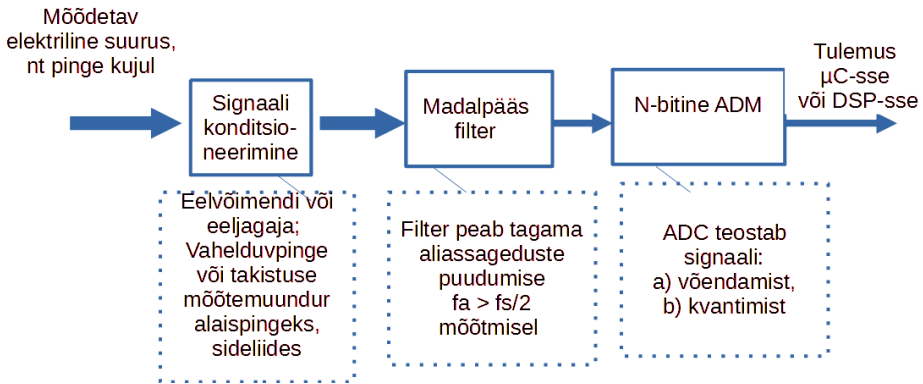
1980-ndate lõpust tekkisid monoliitsete mikroskeemidena (kiipidena) ADM-id. Enne seda koostati ADM-id diskreetsetest elektroonikakomponentidest. 1960-ndate lõpust oli võimalik kasutada operatsioonivõimendeid ja komparaatoreid, samuti digitaalseid elektroonikalülitusi (loendurid, dekooderid, multipleksorid jne).

Üldjoontes saab ADM-id jagada aeglasteks ja kiireteks. Aeglased, mis on ka üldjuhul ka täpsemad, sobivad muuhulgas digitaalsetesse multimeetritesse, kus näiteks vahelduvpinge mõõtemuundur on signaali juba alalispingeks muundanud analoogtehnoloogias ning ADM vaid registreerib alalispingeks muundatud tulemused, kiirusega näiteks mõni või mõnikümmend näitu sekundis.

Kiireid ADM-e on vaja juhul, kui mõõtmine põhineb signaali lainekuju digitaliseerimisel ja digitöötlusel reaalsajas. ADM-i võendamissagedus peab sel juhul olema vähemalt kaks korda (parem kui suurusjärk) suurem signaali maksimaalsest sagedusest (nn *Nyquisti piir*) nagu allpool selgitatud.

Tüüpiliselt on enne analoog-digitaal-muundamist vaja signaal konditioneerida, teisendades algupärase elektrilise mõõtesignaali ADM-i sisendile sobivale kujule ja väärtusele (nt alalisvoolu pingevahemikku 0...1 V), võimendades seda (nt millivolte mõõtes) või jagades maha (nt kümneid või sadu volte pinget mõõtes) (joonis 5.3) või kasutades teisi asjakohaseid analoog-mõõtemuundureid. ADM-i numbriline tulemus saadetakse tavaliselt mikrokontrollerisse või digitaalsesse signaali-protsessorisse (DSP) edasiseks töötamiseks ja esitamiseks.





Joonis 5.3. ADM-iga mõõteahela plokk skeem

Mõned näited signaalide eelmuundamisest on toodud järgnevas peatükis analoo-signaalmuunduritest.

Samuti peab silmas pidama, et vahetult enne analoo-digitaal-muundamist (täpsemalt enne võendamist ehk „sämplimist“) peaks signaali sagedusriba olema piiratud poolega võendamissagedusest ( $f_s/2$ ), mõõdetava signaali nn aliaste vältimiseks. Sellest tuleb juttu allpool.

### 5.2.1 Võendamine

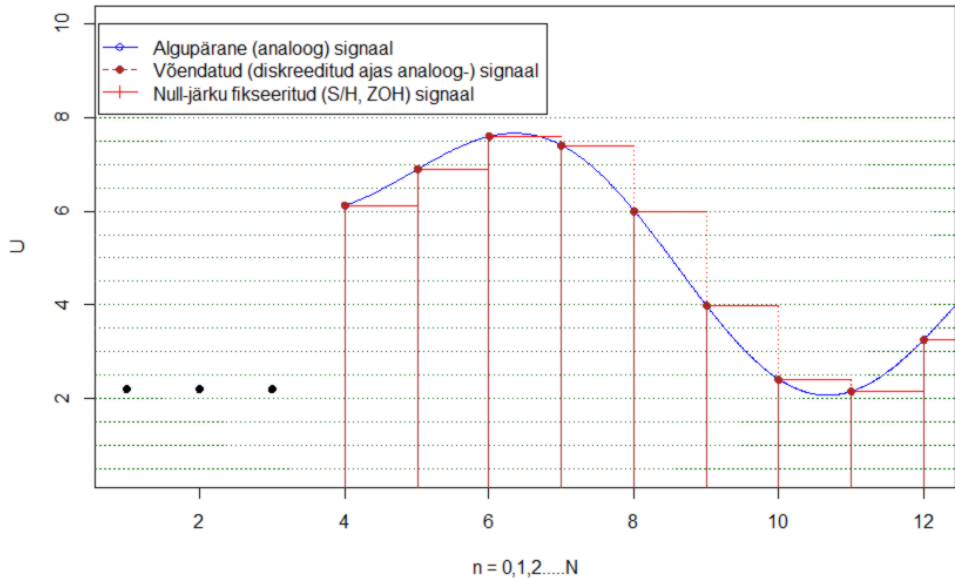
Analoo-digitaal-muundamisel signaal esmalt võendatakse (diskreeditakse ajas) ja seejärel kvantitakse numbriliseks suuruseks, n-ö bittideks. Protsessi on selgitatud joonisel 5.4 ja allpool tekstis.

Analoo-digitaal-muundamise protsess sisaldab esmalt võendamist („sämplimist“), mille käigus signalist võetakse võendid („proovid“). Enamasti võendatakse fikseeritud ja ühtlase ajalise sammuga  $T_s = 1/f_s$  (kus  $T_s$  on võendamise periood ehk samm ajas ja  $f_s$  on võendamise sagedus).

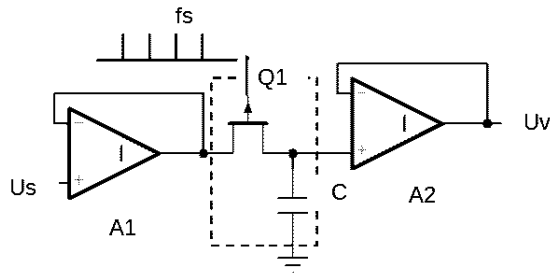
Teatud juhtudel võib mõõtetehnikas ühtlase võendamissammu (nn *uniform sampling*) asemel olla otstarbekas kasutada mittetraditsioonilist mitteühtlast (nn *non-uniform sampling*) võendamise skeemi.

Tüüpiliselt on võendamis- (*sample-and-hold*, S/H) -lüli teostatud elektronlülitiga (nt MOS-FET-transistori baasil) ja kondensaatoriga (joonis 5.5), mis fikseerib strobeeriva võendamise impulsi ajal hetkeväärtuse ja jääb seejärel seda pinget väärtust hoidma. Lüli eel ja järel on enamasti puhvrid (pingekordajad  $A_1$  ja  $A_2$ ), et ühelt poolt tagada kondensaatori kiire täislaadimine jooksva signaali pingeni ning teiselt poolt vältida kondensaatori tühjenemist kahe võendi vahel.

Sellist „hoidmisega“ (vt ka joonis 5.4) võendamise lahendust, kus järgmise võendini hoitakse konstantselt eelmist väärtust, nimetatakse ka



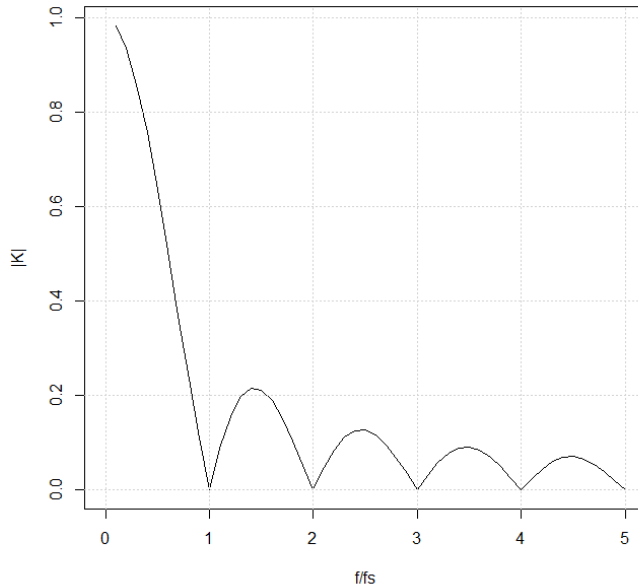
Joonis 5.4. ADM – võendamine ja kvantimine



Joonis 5.5. Võendamislüli skeem

nulljärku hoidelüliks (*zero-order sample-and-hold, ZOH*), kuna võendatud signaal on esitatud konstantsete lõikude (segmentide, mis on nullindat järku polünoomid) jadana ajas.

Tüüpilise nulljärku hoidelüli sagedusarakteristik [36] - ülekande moodul sagedusest  $f$  (normeerituna võendamise sageduse  $f_s$  suhtes – ehk  $f/f_s$  suhtena) on kujutatud joonisel 5.6). Siin võib tähele panna, et võendamise sagedusel ( $f = f_s$ ) ja selle täisarvordsetel ( $f = n \cdot f_s$ ) surutakse signaal täiesti maha (ehk võendamine toimib tõkkefiltrina neil sagedustel)



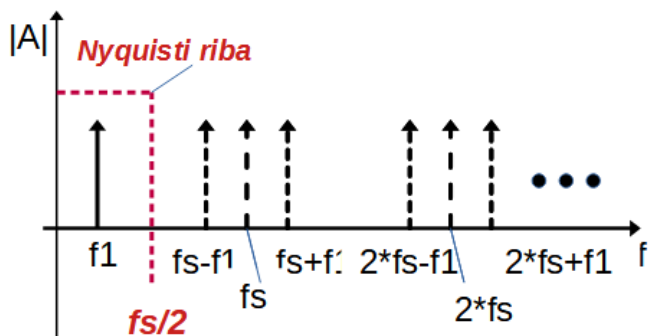
Joonis 5.6. Nulljärku võendamislüli sageduskarakteristik [36]

ja toimub ka vaheldussignaalil sagedusest sõltuv ülekandeteguri teatud langus. Kuna tegu on süstemaatilise veaga, on võimalik see arvesse võtta või kompenseerida – korrigeerida.

Samuti tuleb tähele panna, et võendatud signaal sisaldab lisaks algupärase signaali sageduskomponentidele (joonis 5.7a ühe sageduse puhul) ka uusi, nn alias-sagedusi, võendamise sageduse  $f_s$  ning samuti selle täisarv-kordsete  $k \cdot f_s$  ümber (joonis 5.7b). Siit tuleneb ka nõue, et selleks, et originaalsignaali ja aliaste spektrid et kattuks, mis tekitaks mõõtevea. Selleks peaks olema signaali spekter ADM-i sisendis piiratud poolega võendamissagedusest (nn Nyquisti sagedusriba, kuni  $f_s/2$  -ni).



(a) Algpärane signaali sagedus



(b) Algpärasele sagedusele lisanduvad võendamisel aliased

Joonis 5.7. Alias-sageduste tekkimine võendamisel

## 5.2.2 Analoog-digitaalmuundurite tööpõhimõtteid

Analoog-digitaal-muundamine eeldab (näiteks võendamislüliliga fikseeritud) signaali amplituudväärtuse konverteerimist numbriliseks koodiks. Taolist muundamist saab teostada eri printsiipidel, kusjuures igal meetodil on omad eelised ja puudused.

Näiteks integreerivad ja delta-sigma-ADM-id on suhteliselt aeglased ja eeldavad sadu, tuhandeid või miljoneid digitaalskeemi taktsageduse tsikleid igal muundamisel, mis võimaldab teostada vaid mõnikümmend kuni mõni tuhat, tänapäeval võib-olla kuni mõnikümmend tuhat mõõtmist sekundis. Tihti on see mõõtetehnikas piisav. Taolised aeglased ADM-id on lihtsa riistvaraga, eriti analoogosa teostuselt, ega eelda ülitäpselt sobitatud analoogkomponente ja suhteid (nt lasertrimmitud takisteid või mahtuvusi), vaid kõrge lineaarsus ja eraldusvõime tekib juba tööpõhimõttest lähtuvalt. Ning kuna mõõdetavat pinget võrreldakse analoog-digitaal-muundamisel tugipingega, on taolistel ADM-idel pinge muundamisel põhiline veakomponent vaid tugipinge ebatäpsus ja selle triiv. Pingete suhte mõõtmisel (või takistuste suhte mõõtmisel, mis tekitavad pingete suhteid – näiteks takistuslikud temperatuuriandurid pingejagaja osana koos täppistakistitega), taandub tugipinge väärtus ja selle muutus lõpptulemuse arvutusest välja.

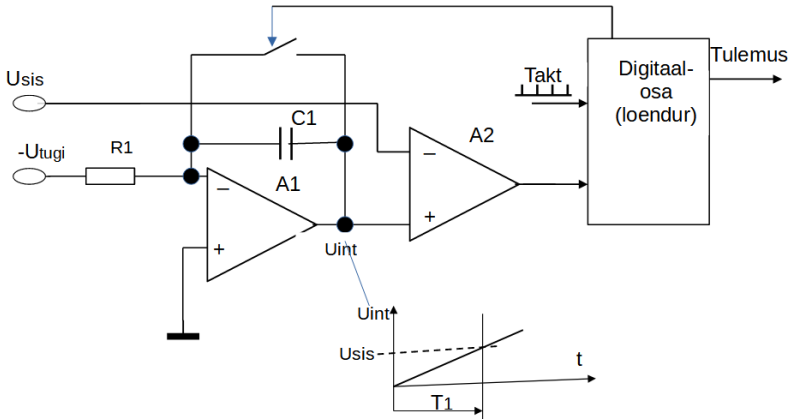
Välk-ADM-id (*flash*-ADC) on kõige kiiremad (tulemus tekib kohe, ühe digitaalosa taktiga!), aga ka keerukaimad, eriti eraldusvõime (bittide arvu) kasvades. Progresseeruva lähenemisega ADM-id (SAR-ADC) on vahepealse kiirusega (muundamisele kulub nt mõnikümmend digitaal-takti), ent nõuavad üldjuhul laser-trimmitud analoog-täppiskomponente, mis teeb nad kalliks.

Täpsemalt eri tüüpi ADM-idest allpool.

### Ühekordse integreerimisega analoog-digitaalmuundur

Joonisel 5.8 on kujutatud ühekordse integreerimisega ADM-i põhimõtteskeem. Eelmise mõõteperioodi lõppedes, mis on ühtlasi uue mõõtettsükli alguseks, nullitakse elektronvõtmega (nt MOS-FET transistor) integraatori kondensaatori  $C_1$  laeng ja pinge. Järgnevalt integreerib (integreeriv skeem  $A_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ) konstantset (skeemil negatiivse polaarsusega tugipinget, kuna konkreetne integraatori skeem operatsioonivõimendiga  $A_1$  on invertteeriv), mis tekitab  $A_1$  väljundis ajas lineaarselt kasvava pinge. Komparaator  $A_2$  fikseerib ajahetke, mil see ajas kasvav lineaarne pinge saab võrdseks mõõdetava sisendpingega  $U_{sis}$ . See ajaline kestus  $T_1$ , mõõdetuna skeemi digiosa taktsageduse taktide summana, digitaalse loenduriga, vastabki lõpptulemusele.

Kui integraatori ajakonstant



Joonis 5.8. Ühekordse integreerimisega ADM-i tööpõhimõte

$$T_0 = R_1 \cdot C_1, \quad (5.1)$$

siis mõõdetud sisendpinge väärtuse hinnang on

$$U_{sis} = U_{tugi} \cdot T_1 / T_0. \quad (5.2)$$

Siin omakorda

$$T_1 = N_1 \cdot T_{takt}, \quad (5.3)$$

kus  $N_1$  on digitaktide arv,  $T_1$  vältel ning

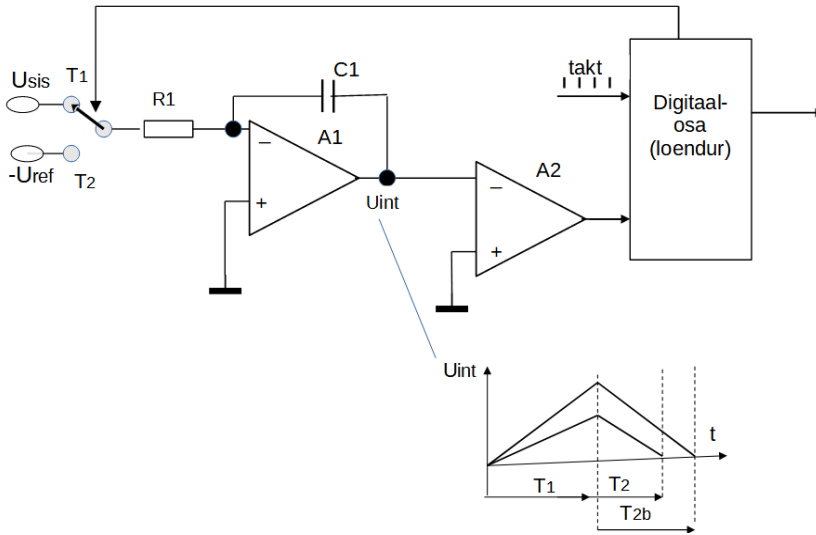
$$T_{takt} = 1/f_{takt} \quad (5.4)$$

on taktsageduse periood.

Kuna tulemus sõltub otseselt integraatori ajakonstandist ( $R_1 \cdot C_1$ ), siis võib olla mõistlik lisada mõõtesüsteemi perioodiline automaatne kalibreerimine, näiteks nullpingel ja täisskaalal.

### Kahekordse integreerimisega analoog-digitaalmuundur

Joonisel 5.9 on kujutatud kahekordse integreerimisega (*dual-slope*) ADM-i põhimõtteline skeem. Mõõtetükk koosneb siin kahest poolest. Esmalt toimub (integraator  $A_1$ ,  $R_1$ ,  $C_1$ ) sisendpinge  $U_{sis}$  integreerimine üle konstantse aja  $T_1$  (mis määratakse digiosa taktsageduse etteantud taktide arvuga:



Joonis 5.9. Kahekordse integreerimisega ADM-i tööpõhimõte

$$T_1 = N_1 \cdot T_{takt}. \quad (5.5)$$

Integraatori väljundpinge väärtus perioodi  $T_1$  lõpus on proportsionaalne sisendpinge suurusega;

$$U_{int} = U_{sis} \cdot T_1 / T_0, \quad (5.6)$$

kus  $T_0$  on jälle integraatori ajakonstant ( $R_1 \cdot C_1$ ).

Teises etapis toimub tugipinge „tagasi“ integreerimine tugipingega vastupidise sisendpinge polaarsusega, kuni integraatori ( $A_1$ ) väljund jõuab nullpingeni. See „tagasi“ integreerimise ajaintervall  $T_2$  on proportsionaalne integraatori väljundpinge ( $U_{int}$ ) väärtusega  $T_2$  alguses, mis omakorda on võrdeline mõõdetava pingega ( $U_{sis}$ ).

Ajaintervallid  $T_1$  ja  $T_2$  mõõdetakse digiosa taktsageduse taktide arvuga  $N_1$  ja  $N_2$  vastavalt:

$$T_1 = N_1 \cdot T_{takt}, \quad (5.7)$$

$$T_2 = N_2 \cdot T_{takt}. \quad (5.8)$$

Seega sisendpinge ( $U_{sis}$ ) hinnang on

$$U_{sis} = (N_2/N_1) \cdot U_{tugi}. \quad (5.9)$$

### Delta-sigma analoog-digitaalmuundur

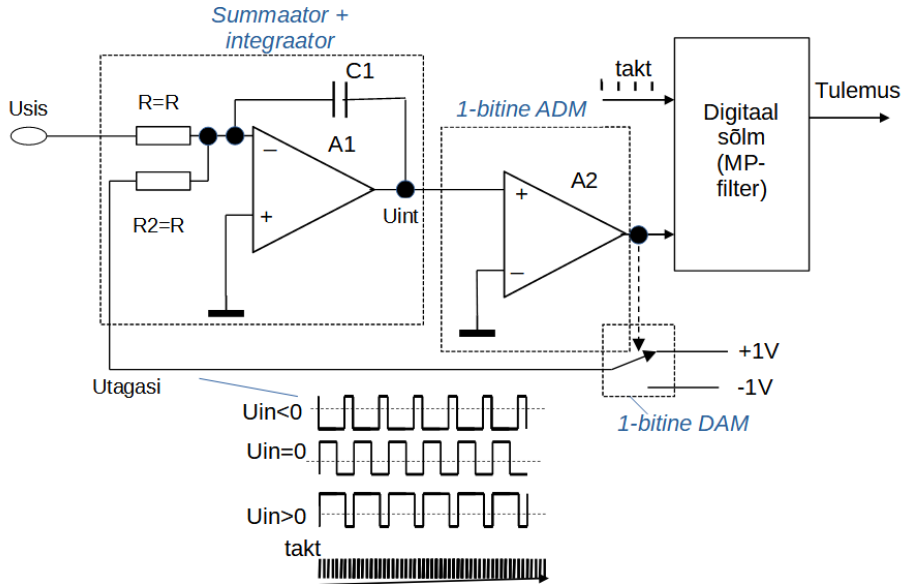
Joonisel 5.10 on kujutatud delta-sigma analoog-digitaalmuunduri põhimõtteskeemi ühe võimaliku teostuse näide. Delta-sigma-muundur sisaldab sisendis summaatorit ja seejärel integraatorit (mõlemad teostatud ühise skeemina  $R_1, R_2, C_1, A_1$  baasil) ning integraatori väljundis omakorda komparaatorit ( $A_2$ , mida võib vaadelda 1-bitise ADM-ina). Komparaator juhib omakorda 1-bitist digitaal-analoogmuundurit (DAM, näiteks väljundpingega  $+1\text{ V} / -1\text{ V}$ , sõltuvalt komparaatori biti väärtusest). See „bitijada analoogkujul“ näiteks ( $+1\text{ V} / -1\text{ V}$ ) summeeritakse ADM-i sisendis sisendpingega. Paneme tähele, et tekkiv tagasiside ( $A_1, A_2, DAM$ ) on negatiivne. Seega tasakaalu saavutamiseks püüab integraator hoida keskeltläbi nullpinget oma väljundis, milleks sisendsignaali ( $U_{sis}$ ) ning tagasi tuleva ( $U_{tagasi}$ ) „analoog-bitijada“ väärtused peavad olema keskeltläbi (vastasmärgiliselt) võrdsed. Samas on sisendpinge loomult pidev analoogsuurus (omades suvalisi väärtusi) ning tagasitulev analoog-bitijada on antud binaarse jadana. Ehk siis mainitud tasakaal saab olla antud üle pikema aja ehk statistilise keskmisena, mitte igal ajahetkel eraldi. Seega komparaatori väljundi bitijada peegeldab sisendsignaali väärtust. Näiteks nullpingel on „-1“ ja „+1“ bitte ühesuguse esinemissagedusega, samas kui  $U_{sis}$  muutub positiivsemaks või negatiivsemaks, hakkab vastavalt tihedamalt olema  $+1$  või  $-1$  bitte. Seega pinge väärtust näitab vastavate  $+1$  või  $-1$  bittide summa. Ehk muunduri digitaalosa peab sisaldama lihtsaimal juhul lihtsalt bitiloendurit.

On tuntud ka kõrgemat järku (ehk mitme integraatoriga) analoog-saga ja keerukama kui lihtsalt keskmise bittide loendamise digitaalosaga muundamise skeeme [37]. Sellised lahendused võimaldavad saavutada kiiremat analoog-digitaal-muundamist või suuremat (rohkemate bitte) eraldusvõimet sama muundamisaja sees.

Tänapäeva delta-sigma-tüüpi (nagu ka integreerivad) muundurid võivad tagada rohkem kui 20-bitise eraldusvõime (mis vastab ppm-ile ehk miljondikule analoogmaailmas). Samuti katavad delta-sigma-muundurid näiteks kvaliteetse (HiFi) audiokodeerimise.

Alternatiivne vaade delta-sigma-muundurite tööpõhimõtte kirjeldamisel on selgitus, et tegu on 1-bitise ADM-iga, millel on vastavalt väga suur kvantimise viga, aga kuna tegu on ülevõendamisega (*over-sampling*), kus





Joonis 5.10. Delta-sigma-ADM-i tööpõhimõte

muundamise tulemus pannakse kokku paljude üksikute bittide seeriast, ja tänu ülevõendamisele on Nyquisti piir suhteliselt kõrgel, saab digitaalosas oleva madalpääs- või ribafiltriga kvantimismüra märgatavalt vähendada ning vastavalt suureneb muundamise tulemuse efektiivsete bittide (ENOB) väärtus [37].

### Progresseeruva lähenemisega analoo-digitaalmuundur

Joonisel 5.11 on kujutatud progresseeruva lähenemisega analoo-digitaalmuunduri (*Successive approximation ADC*) põhimõtteskeem. Lahendus sisaldab komparaatorit  $A_1$  ning digitaal-analoo-gmuundurit (DAM), kusjuures digitaalosa genereerib sellise koodi, millele vastav analoogpinge (DAM-i väljundis) peaks olema võimalikult võrdne sisendpingega  $U_{sis}$ . Sealjuures „progresseeruv lähenemine“ tähendab, et muundatav pinge väärtuse „äraarvamisele“ lähenetakse „kiirete“ sammudega, 1 bitt korraga.

Näiteks kujutame ette 3-bitist ADM-i, kus bittidele vastavad analoo-gkaalud on 1, 2, 4 V (bitid  $b_0, b_1, b_2$ ).

Olgu mõõdetav pinge  $U_{sis} = 6,1V$ . Muundamine algab vanimast bitist (antud juhul  $b_2$ ). Igal muundamise sammul seatakse lisaks juba määratud bittidele järgmine noorem – määratav – bitt kõrgeks ehk üheks ja kui komparaatori tulemus on suurem kui DAM-i pinge, jäetakse see bitt

## Peatükk 5. ANALOOG-DIGITAALMUUNDURID

kõrgeks (vastasel juhul seatakse nulliks) ning liigutakse järgmise (noorema) biti juurde muundamisel. Vastav protsess on toodud tabelis 5.1. Enne muundamise algust (samm 0) on „progresseeruva lähenemise“ registris kood 000(*b*). Järgmisena (samm 1) on muundamise alul kood 100b ( $b_2 = 1$ ) ja kuna  $U_{sis}$  (6 V) on suurem kui 4 V, jääb see kood ka selle sammu lõppkoodiks. Järgmisel sammul (samm 2) seatakse prooviks kõrgeks järgmine bitt ( $b_1 = 1$ ), kokku on tulemus registris 110(*b*) ning  $U_{dam} = 6V$ , tulemus jääb püsima (kuna  $6,1V > 6V$ ). Järgmisel sammul (samm 3) seatakse prooviks kõrgeks järgmine bitt ( $b_0 = 1$ ), kokku on tulemus registris 111(*b*) ning  $U_{dam} = 7V$ . Edasi noorim bitt nullitakse ( $b_0 = 0$ , kuna  $6,1V < 7V$ ) ehk tulemuseks jääb 110(*b*) ehk  $U_{sis}$  hinnanguks jääb 6 V.

Tabel 5.1. 3-bitise ADM-i muundamise sammude näide

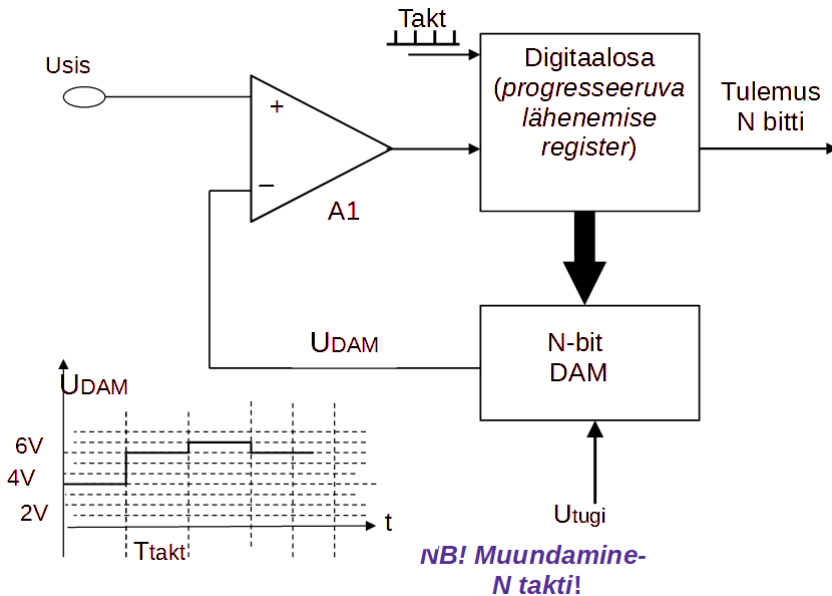
Samm	Algne kood (b)	$U_{dam}$	$U_{sis} > U_{dam}?$	Lõppkood
0	000(b)	0 (V)	x	x
1	100(b)	4 (V)	1!	100(b)
2	110(b)	6 (V)	1!	110(b)
3	111(b)	7 (V)	0!	110(b)

NB! Paneme tähele, et *N*-bitine ADM nõuab vaid *N* (mitte  $2^N$ ) muundamise tsüklit, näiteks 16-bitise ADM-i puhul 16 takti, mis võimaldab teha kiireid ja täpseid (nt firma Analog Device *PulSAR*-seeria 16- ja 18-bitised ADM-id).

### Välk-analoog-digitaalmuundur

Joonisel 5.12 on kujutatud nn välk-analoog-digitaalmuunduri (*flash-ADC*) põhimõtteskeem. *N*-bitine ADM-muundur sisaldab  $2^N$  komparaatorit  $A_1 \dots A_N$  (väga täpne olles  $2^N - 1$ ), mille üks sisend on ühendatud mõõtesisendiga ( $U_{sis}$ ) ja teine „kraadiklaasi“ tüüpi (*N* ühesugust takistit tekitamas ühesuguste sammudega kasvava jagatud tugipinge) pingejagaja vastavale väljundile. Seega loogilist „1“ näitavad alumised komparaatorid moodustavad mõttelise samba, näidates, kui „kõrgele“ mõõdetava pinge „samm“ ulatub. Järgnevalt muundab digitaalosa selle  $0 \dots 2^N - 1$  astmega samba kõrguse *N*-bitiseks kombinatsioonkoodiks.

Taolise ADM-i eeliseks on suur muundamiskiirus, kuna tulemus tekib peaaegu silmapilk (olles piiratud vaid komparaatorite ja kombinatsioonloogikast koosneva digitaalosa ajalise viitega. Lülituse keerukus aga ( $2^N$  komparaatorit) kasvab bittide arvu suurenemisega ülikiiresti. Näiteks



Joonis 5.11. Progresseeruva lähenemisega ADM-i tööpõhimõte

16-bitine lahendus eeldaks umbes 65 000 ja 20-bitine juba 1 miljonit komparaatorit, mille teostamine ei ole realistlik.

Tihti kombineeritakse välk-ADM-e keerukamaks ADM-iks, näiteks muundades esmalt 8 vanemat bitti signaalist, saadud tulemus muundatakse tagasi analoogsignaals, leitakse muundatud ja veel muundamata signaalide vahe, mis võimendatakse üles ning muundatakse uuesti, nt teise välk-ADM-i poolt.

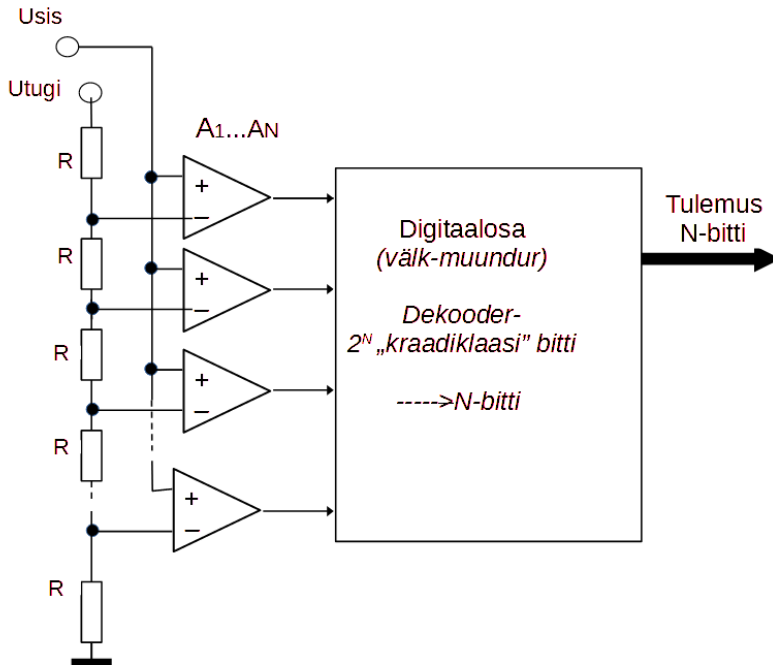
### Lisakommentaare ADM-ide kohta

Eeltoodud ADM-ide puhul kirjeldatud tööpõhimõtted kehtivad ühepolaarse (nt positiivse) pinge mõõtmisel, ent on modifitseeritavad ka kahepolaarse pinge mõõtmiseks.

Üks variant selleks on kasutada ADM-i sisendpinge nihutamist skaala keskele  $U_{sis} = 0$ , nii et negatiivse või positiivse sisendsignaali puhul muutub tulemuse kood keskmisest väärtusest suuremaks või väiksemaks.

Teine võimalus on teha skeemist kaks eraldi haru, positiivse ja negatiivse pinge mõõtmiseks. Kahekordse integreerimisega ADM-i puhul (joonis 5.9) lisatakse skeemi teise polaarsusega tugipingega allikas ning sõltuvalt integraatori pingega  $U_{int}$  polaarsusest perioodi  $T_2$  lõpus teostatakse „tagasi-integreerimine“ kas negatiivse või positiivse tugipingega. Kuna kaks tugipinget võivad reaalsuses olla pisut erineva väärtusega,

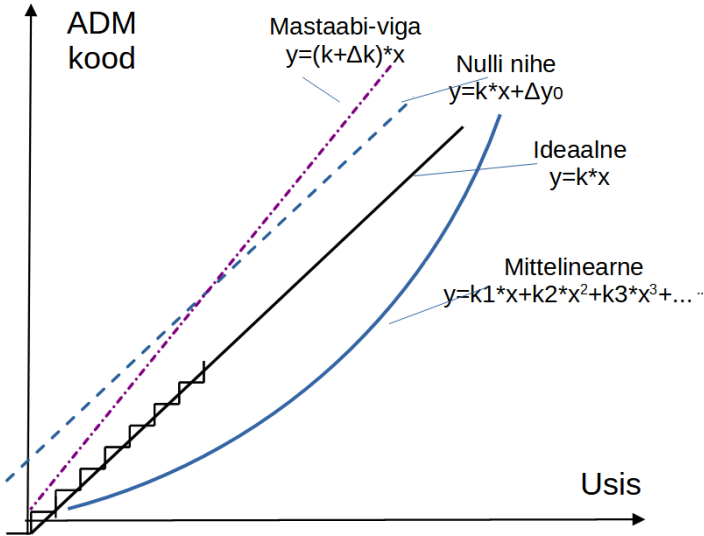
## Peatükk 5. ANALOOG-DIGITAALMUUNDURID



Joonis 5.12. Valk-ADM-i tööpõhimõte

tuleks ADM kalibreerida mõlemal polaarsusel eraldi. Samuti kasutatakse tihti automaatset nulli kompenseerimist. Selleks ühendatakse ADM-i sisend nullpingega (vastava elektron-, nt FET-võtmega) selle fikseerimiseks ja seejärel kompenseerimiseks (nulli nihke maha lahutamiseks) skeemi analoog- või digitaalosas.

## 5.2.3 ADM-de mõõtevigadest



Joonis 5.13. ADM-i läbivarakteristiku mitteideaalsused

Ideaalsel juhul on analoog-digitaalmuunduri läbivarakteristikuks  $y = f(x)$  ehk  $ADM_{kood} = f_n(U_{in})$  sirge (lineaarne, täpsemalt proportsionaalne funktsioon, vt joonis 5.13):

$$y = k \cdot x, \quad (5.10)$$

kus  $k$  on ülekandetegur. Reaalsuses iseloomustavad ADM-e mitmesugused skeemitehnika ja elektroonikakomponentide mitteideaalsustest tingitud muundamisvead:

- juba väärtuste digitaalsest (numbrilisest) esitusest tingituna on läbivarakteristikus kvantimise astmed, kuna teatavasti koosneb  $N$ -bitise ADM-i läbivarakteristik  $2^N$  (ideaalsel juhul ühtlase sammuga) astmest;
- nulli nihe ja täisskaala viga (ning nende triivid ajas ja eriti temperatuuris), esimene tingituna skeemielementide (nt operatsioonivõimendite või komparaatorite sisendastmete transistoride tööpunktide muutumisest) ja teine tugipingeallikate ebatäpsusest ja ebastabiilsusest. Ehk ülekandefunktsiooniks on ideaalse funktsiooni 5.10 asemel funktsioon:

$$y = (1 + \Delta k) \cdot k \cdot x + \Delta y_0, \quad (5.11)$$

kus  $\Delta k$  on ülekandeteguri suhteline viga (ehk nn multiplikatiivne viga) ning  $\Delta y_0$  on nullinihe (nn aditiivne viga);

- mittelineaarsus, mida iseloomustavad integraalne ja diferentsiaalne mittelineaarsus (inglise keeles vastavalt *integral non-linearity*, INL, ja *differential non-linearity*, DNL); samuti saab siinuselise (harmoonilise) signaaliga vaadata muundatud väljundspektrisse mittelineaarsusest tekkivaid harmoonilisi komponente (teine, kolmas jne põhisageduse harmoonik), mida saab integraalselt väljendada nn harmooniliste kogumoonutusena (*total harmonic distortion*, THD); üldiselt eeldatakse ADM-idel läbivarakteristiku monotoonsust, s.t. et peaks olema välditud olukord, kus mõnes tööpunktis sisendväärtuse kasvamisel ADM-i väljundi kood hoopis väheneb (või vastupidi);
- ADM-i mürataset iseloomustatakse signaali-müra-suhtega (*signal-to-noise ratio* – SNR);

### Diferentsiaalne mittelineaarsus

Diferentsiaalne mittelineaarsus (DNL) on digitaal-analoog- (DAM) ja analoog-digitaalmuundurites (ADM) tavaliselt kasutatav kvaliteedi näitaja. See kirjeldab kõrvalekaldeid kahe analoogväärtuse vahel, mis vastavad omavahel järgnevatele sisendväärtuste koodidele. Ideaalis vastavad mis tahes kahe kõrvuti asuvat digitaalkoodi sisend- (ADM) või väljund- (DAM) analoogpingele, mis on omavahel täpselt ühe noorimale bitile (LSB) vastava väärtuse kaugusel. Diferentsiaalne mittelineaarsus on maksimaalne kõrvalekalle ideaalsest 1 LSB astmest.

Konkreetses mõõtepunktis saab diferentsiaalset mittelineaarsust arvutada:

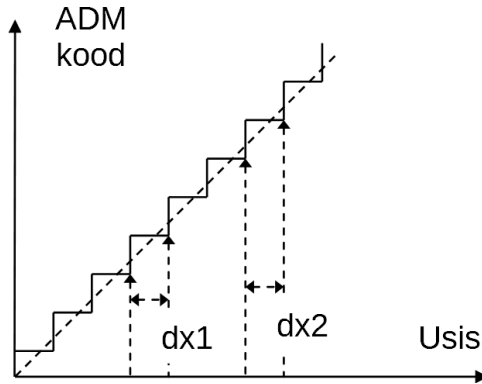
$$DNL = \left( \frac{U_2 - U_1}{\Delta U_0} - 1 \right) \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

kus  $\Delta U_0$  on ideaalne (eeldatav) analoogsamm kahe naabernivoo vahel ning  $U_2 - U_1$  tegelik vastav väärtus.

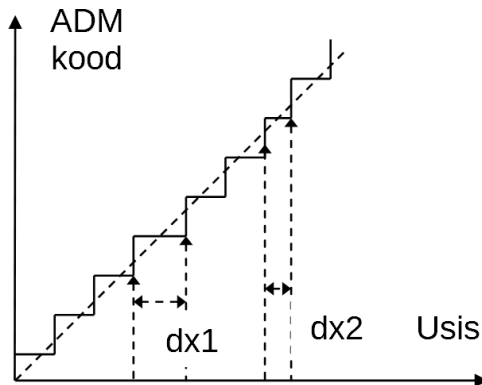
Näiteks DAM, millel on 1 LSB digitaalse koodi muutmise korral 1,5 LSB väljundi muutus, on 0,5 noorimat bitti (LSB) diferentsiaalset mittelineaarsust. Diferentsiaalset mittelineaarsust võib väljendada kas murdosana bitist või protsendina täisskaalast. Diferentsiaalne mittelineaarsus, mis on suurem kui 1 LSB, võib DAM-is põhjustada

mittemonotoonset ülekandefunktsiooni, mis võib kaasa tuua puuduvad koodid ülekandefunktsioonis.

Diferentsiaalne linearsus (mh monotoonsuse olemasolu läbivarakteristikus) on loomult omane sellistele süsteemidele nagu ühekordse ja kahekordse integreerimisega analoo-digitaalmuunduritele ning teised „kraadiklaasi“ tüüpi analoo-digitaal- ja digitaal-analoo-muundurid.



Joonis 5.14. ADM – diferentsiaalne mittelinearsus puudub



Joonis 5.15. ADM – olulise diferentsiaalse mittelinearsusega

### 5.3 Digitaal-analoogmuundurid

Sarnaselt analoog-digitaalmuunduritega on mõõtelahendustes vahel vajalik numbriline (digitaalne) väärtus (näiteks arvutist või mikrokontrollerist) saada kätte analoogsignaalina. Sellisel juhul kasutatakse digitaal-analoogmuundureid (DAM).

Kuna arvutid toimivad kahendsüsteemis ehk bittidega, siis ühe DAM-i teostuse viisina pannakse iga biti digitaalse (binaarse) kaaluga vastavusse selle analoogkaal (1, 2, 4, 8, ... täisarvudes mõeldes), mida vastav biti väärtus sisse lülitab, kui see bitt on muundatavas koodis olemas (väärtus „1“). Taoline sisselülitatud bittidele vastavate kahendkaaludega analoogsuuste liitmine võib toimuda, kasutades binaarselt kaalutud voolusid ( $I, 2 \cdot I, 4 \cdot I, 8 \cdot I$  jne). Selliseid voolusid saab tekitada, pannes iga biti haru jaoks paralleelselt ühesuguse geomeetriaga transistore vooluallikatenä (1, 2, 4, 8 jne tükki). Vastav skeemitehnika on toodud joonisel 5.16. Üks esimesi selle põhimõtte rakendamise 14–16-bitiste DAM-ide rakendusi olid laserplaadimängijate (*CD-player*) jaoks, CD-plaadi bitijada muundamiseks analoog-audiosignaals kõrge kvaliteedi (n-ö HiFi ehk „loomutruuduse“) juures. Taoliste DAM-ide täpsuse suurendamiseks pakkus Van De Plassche (Philips, USA patent US3982172, 1976) välja vooluallikate „dünaamilise sobitamise“ idee, kus vooluallikate (nt transistoride geomeetria) ebavõrdsus tasandatakse nende kiire omavahealise vahetamisega (multipleksimisega), misjärel **keskmiselt ehk keskelt-läbi** on teatud suhteliselt lühikeses ajaaknas kõik vooluallikud ühetaolised ehk „omavahel sobitatud“.

Teine põhimõte, mida kasutatakse suure täpsuse ja eraldusvõimega alalispinge tugiallikate tegemiseks, on impulss-laius-modulatsiooni (ILM, *pulse-width modulation*, PWM) kasutamine. Tegemist on väga lihtsa ja tõhusa võttega, kus skeemi digitaalpoolel kasutatakse kahte loendurit etteantud taktsageduse „kella“ lugemiseks. Üks loendur – etteantud  $N_1$  takti lugemiseks, määrab ära kogu perioodi ja  $N_2$  „täiteteguri“, mitu „kella takti“ perioodist on „täidetud“. Suhteline täitetegur on  $N_2/N_1$  ja see saab omada väärtusi 0% (kui  $N_2 = 0$ ) kuni 100% (kui  $N_2 = N_1$ ).

Binaarse ILM-i digisignaali juhivad omakorda analoog-modulaatorid, mis praktikas võib tekitada kahe nivooga (binaarse) analoogsignaali, näiteks analoogtasemetega väärtustega (sisuliselt tugipingete väärtustega) 0/1 V, 0/10 V või -1 V/+1 V, vastavalt sellele, kas vajatakse ühepolaarset (nt positiivset) või kahepolaarset ( $\pm$ ) DAM-i väljundpinget.

Väiksema täpsusega lahenduste juhuks võib kasutada otse digitaal-skeemi CMOS vastastakt-väljundit, mis nt toitepingel 0 ja 3,3 V annab täpse ILM signaali, kus tugipingeks on sisuliselt digitaalse skeemiosa toitepinge.

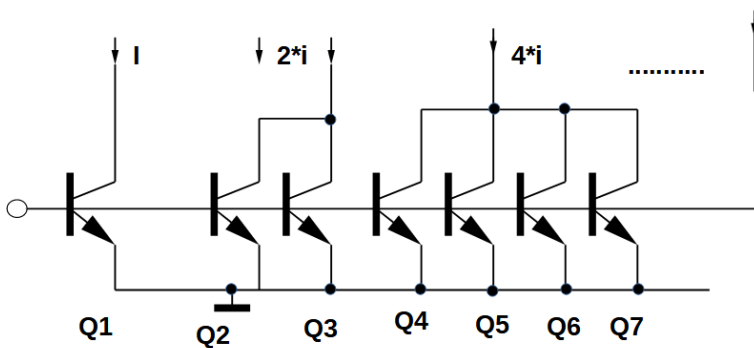
Saadud ILM analoogsignaali, mis on suhteliselt suure pulsatsiooniga,



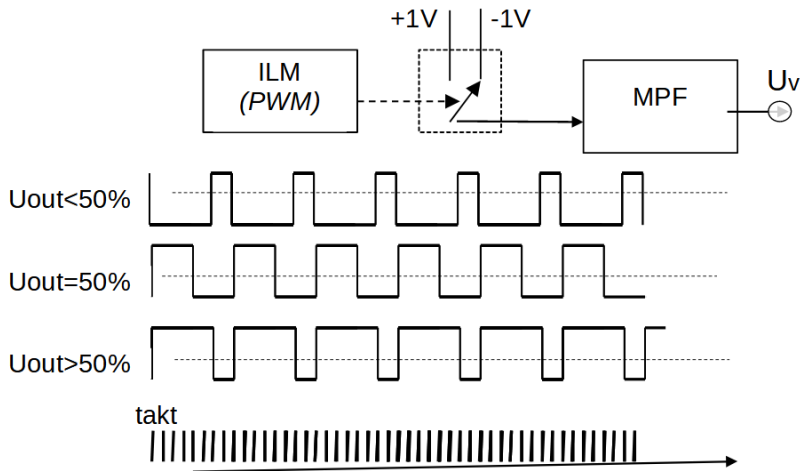
tuleb järgnevalt keskmistada alalis- või suhteliselt aeglaselt muutuvaks pingeks läbi sobiliku madalpääsfiltri (milleks lihtsamail juhul võib olla üks esimest järku RC-lüli).

Taolist ILM-põhist DAM-i on lihtne teostada, kuna ka igas mikrokontrolleris ja protsessoris on riistvaras valmiskujul loendurid olemas. Kuna selle tööpõhimõtte puhul on eraldusvõimeks (vähimaks muudetavaks sammuks) üks „kellatakt“ (nt  $f_{takt} = 100$  MHz puhul 10 ns, madalama protsessori taktsageduse juures on eraldusvõime samm veelgi pikem), siis näiteks 6 kümnendkohaga DAM-iks (ppm ehk miljondik ehk 20-bitiseks eraldusvõimeks) on vajalik ühe miljoni takti lugemine, s.t antud näite puhul (100 MHz takt) saaks DAM-i väljundpinge uuendus toimuda 100 korda sekundis. Selline mõõtekiirus ja täpsus ei tarvitse olla probleemiks, aga võib ka olla kitsaskohaks – kui vajatakse suuremat muundamise kiirust või hoopis eraldusvõimet (rohkem bitte). DAM-i töö kiiruse suurendamiseks suure eraldusvõime säilitamisega (või isegi parendamisega) saab kasutada mitmesuguseid skeemitehnikaid – näiteks kombineerides kokku mitme väiksema eraldusvõimega DAM-i väljundsignaalid.

Tõhusam lahendus on siiski kasutada impulss-laiuse tekitamisel digitaalosa, kus on lisaks väiksema bittide arvuga loenduri põhiosale veel „murdosalised“ (*fractional*) viit-elementid täiteteguri modifitseerimiseks. Näiteks kui firma Texas Instruments TMS320F28xxx seeria digitaalsete signaaliprotsessorite (DSP) taktsagedus võib olla 100 MHz (vastava takti pikkus 10 ns), siis murdosalist viidet saab sättida umbes 150 ps sammuga ehk umbes sajandiktäissammulise eraldusvõimega [38].



Joonis 5.16. Voolutoimeline DAM



Joonis 5.17. Impulss-laius-modulatsiooniga DAM

## 5.4 Mõõtemuundurite efektiivne bittide arv

Igal analoog-digitaal- (nagu ka digitaal-analoog-) muunduril on tihti otstarbekas iseloomustada üheainsa arvulise väärtusega – efektiivse bittide arvuga (*effective number of bits*, ENOB). See võib olla võrdne või suhteliselt lähedane ADM-i või DAM-i tegeliku ehk füüsilise bittide arvuga.

Sageli kasutatav ENOB-i määratlus on

$$ENOB = \frac{SINAD - 1,76}{6,02}, \quad (5.13)$$

kus:

- hinnatav ENOB on antud bittides;
- SINAD (signaali suhe mürasse ja moonutusse kokku panduna) on võimsussuhe, mis näitab signaali kvaliteeti dB-des (kümnenend logaritmiline ühik heli-, raadio- ja muudes tehnikavaldkondades);
- arv 6,02 jagajas teisendab detsibellid ( $\log_{10}$  ehk kümnenendlogaritmina esituse bittideks ( $\log_2$  kahendlogaritmina esitus);
- tegur 1,76 tuleneb kvantimisveast (noorimale bitile vastav analoogmuutus) ideaalses ADC-s.

Täpsemalt saab nii efektiivsest bittide arvust kui ADM-ide ja DAMi-de mitteideaalsuste iseloomustamisest lugeda W. Kesteri (firma *Analog Devices* pikajaline kaastöötaja) raamatust [37].

#### 5.4. Mõõtemuundurite efektiivne bittide arv

Lihtsustatult võib öelda, et efektiivsete bittide arv sobib hästi seadme (mh ADM, DAM) signaali-müra-suhte iseloomustamiseks, kusjuures müra puhul võetakse arvesse ka mittelineaarsuse ja kvantimise vead, mida võib detsibellide asemel iseloomustada kahendlogaritmilise suhtena ehk bittides.

Kuna ENOB sõltub ainult signaali-müra-suhtest (pluss muud mitteideaalsused), võib ENOB-i mõistet kasutada ka näiteks 100% analoogskeemide iseloomustamiseks, kus digitaalosa puudub täiesti. Sealjuures, kui seadmes või süsteemis on palju eri plokkide signaali- või mõõte-elektronika ahelates ja üks plokk domineerib suhteliselt väikese (viletsa) ENOB-iga, siis see määrabki jämedalt kogu süsteemi või seadme kvaliteedi, ka ENOB-i mõttes.

Mõnes mõttes võib mõelda, et mõlemad logaritmilised ühikud – nii detsibellid [dB] kümnendlogaritmidena kui ka alternatiivselt bitid kahendlogaritmidena – sobivad suurepäraselt igasuguste signaali- (k.a mõõte-) muundurite jm signaaliplokkide iseloomustamiseks, sealhulgas mõõtetehnika aspektist signaali-müra-suhte, võimenduse, summutamise jne puhul.

## Kordamisküsimused

1. Nimetage erinevaid analoog-digitaal-muundamise põhimõtteid.
2. Kuidas on tüüpiliselt teostatud võendamise (*sample-and-hold*) lüli?
3. Miks nimetatakse kõige tüüpilisemat võendamise skeemi just **nulljärku** lülis? Mis on taolise lüli omadused aja ja sageduse vallas?
4. Mismoodi töötavad ühe- ja kahekordse integreerimisega ADM-id?
5. Millistel ADM-idel on hästi lihtsalt teostatav riistvara? Millistel keerukaim?
6. Kuidas iseloomustatakse ADM-ide mitteideaalsust? Millised on põhilised ADM-ide mitteideaalsuse liigid?
7. Kirjeldage mõnda viisi, kuidas saab digitaal-analoogmuundurit teostada. Kas kirjeldatav on teostamiseks lihtne või keeruline? Kas muundamise täpsus realiseerub lihtsalt või tuleb selleks eriliselt komponente valida vmt?
8. Mida iseloomustab efektiivne bittide arv (ENOB) signaalimuundurite puhul? Kuidas seda arvutatakse? Mis suhe on detsibellidel [dB] ja bittidel?
9. Miks on delta-sigma-tüüpi analoog-digitaalmuundur sobivaim lahendus kvaliteetse audio kodeerimiseks?
10. Millist lahendust kasutati vooluallikate ebavõrdsuse tasandamiseks, et saavutada CD-plaadi bitijada loomutruu muundamine kvaliteetseks analoog-audiosignaalsiks ?

## 6. MÕÖTESIGNAALI MUUNDURID

Tihti on vaja mõõta muid elektrilisi suurusid kui alalispinge, näiteks elektrilist takistust või vahelduvpinget (või voolu). Veelgi enam, kui näiteks kasutada takistuslikke temperatuuriandureid (neist tuleb juttu järgmises peatükis), on takistuse mõõtemuundur alalispingeks vajalik mõõtetulemuse digitaliseerimiseks. Samuti on vahelduvpinge mõõtmise lahendused vajalikud tihti otseselt, nt meie 230 V 50 Hz vooluvõrgus pinge mõõtmiseks, ent ka paljud andurid (nt elektromagnetiliste kulumõõtjate puhul) eeldavad ergutust vahelduvvooluga ja ka sensori vastussignaali on sama sagedusega vahelduvpinge.

Allpool kirjeldatakse mõningaid elektroonsete mõõtemuundurite võimalikke skeemitehnilisi lahendusi.

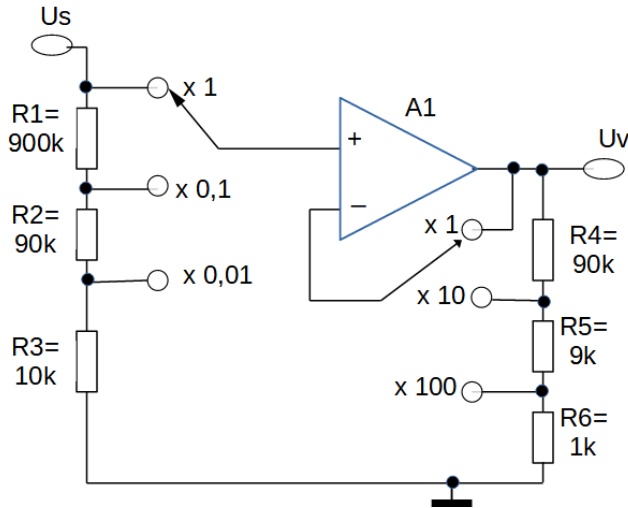
### 6.1 Alalisvoolu mõõtemuundurid

#### 6.1.1 Alalispinge eelvõimendi

Universaalses mõõteseadmes on mõistlik omada mitut alalisvoolu ja pinge mõõtepiirkonda, kus millivoldid võimendatakse volti suurusjärku ning kümned ja sajad voldid jagatakse sisendpingejagajaga samuti samasse suurusjärku.

Alalispinge eelvõimendi võimalik põhimõtteskeem on toodud joonisel 6.1. Skeem sisaldab operatsioonivõimendit  $A_1$  ning valitavaid pingejagajaid  $R_1/R_2/R_3$  skeemi sisendis ja eri võimendusi pakkuvaid pingejagajaid  $R_4/R_5/R_6$  operatsioonivõimendi  $A_1$  negatiivse tagasiside ahelas.

Märkus: sarnast skeemi saab kasutada ka vahelduvpinge jaoks, aga takistid sillatakse tavaliselt siis mahtuvustega, nii et kõrgetel sagedustel tekivad mahtvuslikud pingejagajad ja keskmistel sagedustel on kombineeritud R, C jagajad. See on vajalik vältimaks parasitsete mahtuvuste mõju võimendi karakteristikute sagedussõltuvustele.



Joonis 6.1. Alalispinge eelvõimendi ja jagaja

### 6.1.2 Voolu mõõtemuundur

Mõõdetava alalisvoolu (nt fotodiodile langeva valgusvoo mõõtmiseks) muundamiseks pingeks võib kasutada inverteerival operatsioonivõimendil põhinevat skeemi, mis on toodud joonisel 6.2. Operatsioonivõimendi inverteeriv sisend tekitab mõõdetava voolu  $i_x$  jaoks virtuaalse maa (lühise), kuid samas see mõõdetav vool  $i_x$  tekitab takistil  $R_0$  pingelangus

$$U_V = -i_x \cdot R_0. \quad (6.1)$$

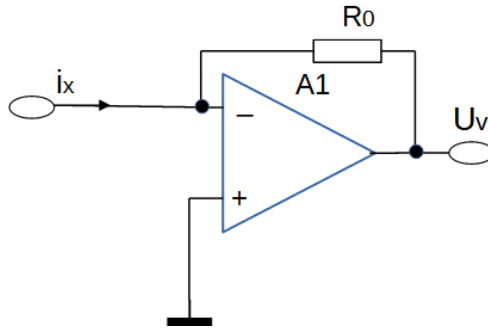
Ka seda skeemi saab kasutada vahelduvvoolu muundamiseks vahelduvpingeks, mida saab omakorda vastava järgneva mõõtemuunduri abil mõõta.

## 6.2 Takistuse (ja impedantsi) mõõtelahendused

### 6.2.1 Takistuse mõõtesild

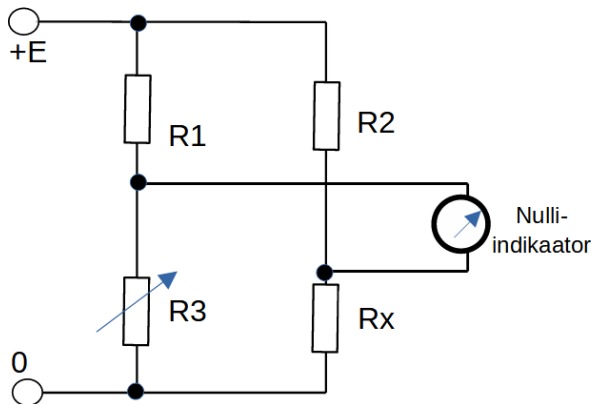
Ajalooliselt üks esimesi takistuse mõõtelahendusi oli mõõtesilla (nn *Wheatstone'i sild*) kasutamine – vt joonis 6.3. Idee on siin nelja õlaga takistusliku silla kasutamine, kus kaks takistit ( $R_1$  ja  $R_2$ , enamasti  $R_1 = R_2$ ) on fikseeritud. Kolmas takisti  $R_3$  on reguleeritav etalontakisti (nt takistusmagasin, joonis 6.4), kust saab valida nt dekaadi ehk kümnendastmete kaupa vajaliku takistuse väärtuse, mis oleks lõpuks võrdne mõõdetava

## 6.2. Takistuse (ja impedantsi) mõõtelahendused



Joonis 6.2. Voolu pingeks muundur

takistusega  $R_x$ . Näiteks kui viimane dekaadlüliti valib  $\times 1 \Omega$ , järgmine  $\times 10 \Omega$ , veel järgmine  $\times 100 \Omega$  jne ning kokku 6-dekaadise valiku puhul oleks viimane valik  $\times 100 \text{ k}\Omega$  ehk saab ühe oomi kaupa valida kuni  $999\,999 \Omega$ . Neljandaks olaks ongi mõõdetav takistus  $R_x$ .



Joonis 6.3. Takistuslik mõõtesild

Ergutamisel pingega  $+E$  tekib esimeses ( $R_1, R_3$ ) harus vool

$$I_{R_3} = \frac{E}{R_1 + R_3}, \quad (6.2)$$

mis omakorda tekitab takistil  $R_3$  pingelangu:

$$U_{R_3} = I_{R_3} \cdot R_3 = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_3}, \quad (6.3)$$



Joonis 6.4. Takistusmagasini näide (foto – T. Eikholm)

Analoogiliselt saab näidata, et takistusel  $R_x$  tekib pinge

$$U_{R_x} = I_{R_x} \cdot R_x = \frac{E \cdot R_x}{R_2 + R_x}. \quad (6.4)$$

On lihtne näidata, et kui valida selline  $R_3$  väärtus, kus mõõtesilla diagonaalis nulli-indikaator (milleks võib olla piisava eelvõimendusega tundlik analoog- või digitaalne mõõteriist) näitab nulli ehk kui sild on tasakaalus ehk kui  $U_{R_x} = U_{R_3}$ , siis

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_x}{R_2}, \quad (6.5)$$

kust omakorda

$$R_x = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1}, \quad (6.6)$$

ehk kui  $R_1 = R_2$ , siis tasakaalustatud silla puhul  $R_x = R_3$ .

Ehk takistuse  $R_x$  mõõtmiseks tuleb saavutada nulli-indikaatori nulline näit  $R_3$  valikuga ning  $R_x$  mõõtetulemus ongi valitud  $R_3$  väärtus.



Analoogilist mõõtesilda võib kasutada ka kompleksse takistuse (aktiivne takistus ehk reaalkomponent kombinatsioonis mahtuvusliku või induktiivse näivtakistusega) ehk impedantsi mõõtmiseks. Sellisel juhul peaks:

- ergutus olema vahelduvpinge (+E asemel), sagedus peaks olema selline, kus mõõdetava ahela näivtakistus ( $R_x$  asemel  $Z_x$ ) oleks võrreldav  $R_1$  ja  $R_2$ -ga (näiteks suurusjärgus 1 k $\Omega$  või 10 k $\Omega$ );
- nulli-indikaator peab olema vahelduvpinge indikaator (näiteks tundlik vahelduvvoolu millivoltmeeter);
- $R_3$  asemel peab olema valitav kompleksse etalonimpedantsi magasin, näiteks kui  $Z_x$  soovime mõõte takistuse ja mahtuvuse paralleelse aseskeemiga, siis peab  $R_3$  asemel olev etalonimpedants koosnema takistusmagasini ja mahtuvuste magasinini paralleelühendusest ning mõlemad väärtused (takistuslik ja mahtuvuslik) tuleb sillastasakaalustada.

### 6.2.2 Takistuse mõõtemuundur

Mõõdetava takistuse alalispingeks muundamiseks saab kasutada invertteerival operatsioonivõimendil põhinevat skeemi vastavalt joonisele 6.5. Siin:

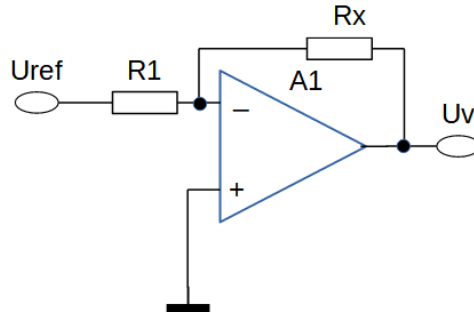
$$U_v = -U_{ref} \cdot \frac{R_x}{R_1}, \quad (6.7)$$

ehk operatsioonivõimendi väljundpinge on proportsionaalne mõõdetava takistiga  $R_x$ . Fikseeritud tugipinge  $U_{ref}$  korral saab mõõtepiirkonda muuta sobiva  $R_1$  valikuga.

Taalise skeemi üheks puuduseks on asjaolu, et tegemist on kahejuhtmeline süsteemis takistuse mõõtmisega, kus mõõdetavat takistit (takistust) käsitletakse kaks-klemmina. Sel juhul takistusega järjestikku olevate mõõtejuhtmete takistus liitub otseselt tulemusele, tekitades vahel (eriti väikeste takistuste puhul) olulise mõõtevea. Lahenduseks on nelja juhtme süsteem, kus voolu läbi takisti  $R_x$  genereeritakse (või mõõdetakse) eraldi juhtmepaariga ning pingelangu takistusel  $R_x$  mõõdetakse omaette juhtmepaariga.

Selline 4-juhtmeline mõõtevariant on praktiline. Seda lahendust saab teostada näiteks arvutiga ühendatud andmehõiveseadmega, kus on programmeeritava pingega analoogväljund ja kaks diferentsiaalset mõõtesisendit, nagu kujutatud joonisel 6.6. Programmeeritav pinge  $U_v$  tekitab voolu läbi etalontakisti  $R_0$  ja mõõdetava takistuse  $R_x$  järjestik-ühenduse. Ning mõõteseadme üks diferentsiaalne mõõtesisend mõõdab

## Peatükk 6. MÕÕTESIGNAALI MUUNDURID

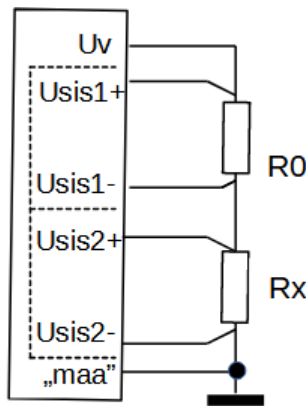


Joonis 6.5. Takistuse pingeks muundur

pingelangu etalontakistil  $R_0$ , millest saab arvutada ahelas (ka  $R_x$ -is) oleva voolu. Teine diferentsiaalne sisend mõõdab pingelangu mõõdetavalt takistusel  $R_x$ .

On lihtne näidata, et

$$R_x = R_0 \cdot \frac{U_{2dif}}{U_{1dif}} \quad (6.8)$$



Andmehõive  
seade

Joonis 6.6. Takistuse mõõtmise skeem andmehõiveseadmega

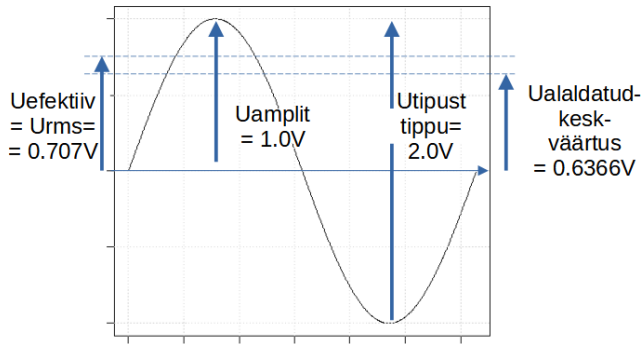
Samu skeeme (joonised 6.5 ja 6.6) saab kasutada ka impedantsi (elektriline takistus vahelduvvoolu puhul) mõõtmiseks, kui tugipingena  $U_{ref}$  kasutada (näiteks siinuselist) vahelduvpinget ja lisada seadme väljundisse sobilik vahelduvpinge mõõtmise skeem (analoog- või digitaallahendusena).

## 6.3 Vahelduvpinge mõõtemuundurid

Selles osas käsitletakse ainult tavalisi ehk asünkroonseid vahelduvpinge mõõtelahendusi. Sünkroon- ehk faasitundlikku vahelduvpinge mõõtmist käsitletakse edaspidi, impedantsi mõõtmise peatükis.

Kõige levinum vahelduvpinge on siinuselise kujuga. Näiteks elektri võrgus on taoline pinge 50 Hz sagedusega (50 perioodi ehk 50 „tsükli“ sekundis) pingega 230 V. Viimane tähendab pinge efektiiv- ehk ruutkeskmist väärtust (*root-mean-square*, RMS) ehk selline vahelduvpinge annab sama palju soojust küttekehal kui 230 V alalispinget. Vastav amplituudväärtus on  $\sqrt{2} \cdot 230\text{V} = 325\text{V}$  ning tipust tippu väärtus  $2\sqrt{2} \cdot 230\text{V} = 650\text{V}$ .

1 V amplituudväärtusega siinuse efektiiv- (RMS ehk ruutkeskmise) ja alaldatud keskväärtuse suhted on toodud joonisel 6.7 .



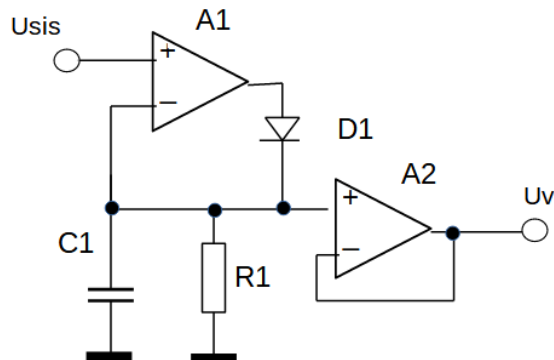
Joonis 6.7. Amplituud-, efektiiv (RMS)- ja alaldatud keskmise väärtuste suhted siinuspinge korral

Üldjuhul mõõdavad mõõteriistad efektiiv- (ruutkeskmist) väärtust, aga kuna „tõelist“ RMS-i võib olla keerukas mõõta, võivad reaalsed volt- ja multimeetrid sisaldada alaldatud keskväärtuse või amplituud (tipp-) või tipust tippu (kahekordse amplituudi) detektorit, kusjuures tulemus esitatakse ikka efektiivväärtusena. Nimelt lähtutakse eeldusest, et tegu on siinuskujuga signaaliga ja saab kasutada konstantset (siinusele sobilikku) kujuteguri koefitsenti [39]. Selline lahendus mõõdab oluliselt valesi mittesiinulise signaali efektiivväärtust. Näiteks meandri (nelinurga) puhul tähendab 1 V amplituudi ka 1 V efektiiv- (ruutkeskmist) väärtust, siinuselise signaali puhul aga 0,707 V.

### 6.3.1 Tippväärtuse mõõtemuundurid

Tippväärtuse mõõtemuundur (teostuse näide joonisel 6.8) sisaldab tipu- ehk amplituud- ehk mähisjoone detektorit  $D_1, C_1, R_1$ , mis täpsuse suuren-

damiseks (mh mõõtevea vältimiseks diodi päripingelangust) on skeemil paigutatud operatsioonivõimendi  $A_1$  negatiivse tagasiside ahelasse, võrdlemaks signaali tippväärtust kondensaatoril  $C_1$  oleva pingega, ja fikseerib vajaduse korral uue tipu sisendpingest  $U_{sis}$ .  $R_1$  tagab kondensaatori aeglase tühjenemise, et valmis olla jälgima aeglaseid tippväärtuse muutusi (kuna enamasti pole vaja fikseerida ühte globaalset tippu ehk signaali maksimumi).



Joonis 6.8. Tippväärtuse mõõtemuundur

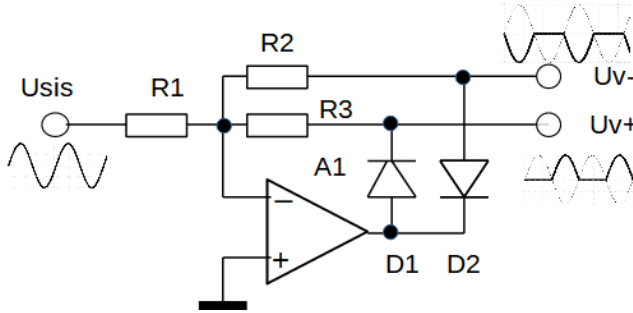
Operatsioonivõimendi  $A_2$  baasil pingekordaja tagab kondensaatoril  $C_1$  fikseeritud amplituudväärtuse puhverdamise, kui on vaja suhteliselt madala väljundtakistusega väljundit mõõtemuunduril.

Vahel võib olla ka vajadus omada nn tipust tippu (*peak-to-peak*) mõõtedetektorit (vt ka joonis 6.7), vahelduvvoolu pinge väärtuse mõõtmiseks. Sellise lahenduse saab luua kahe tipudetektori paralleelse tööga, kus teine kanal mõõdab negatiivset tippu (diod on selles kanalis teistpidi pööratud), tipust tippu väärtuse saab leida positiivse ja negatiivse tippväärtuse vahena, seda vahet diferentsiaalselt mõõtes.

### 6.3.2 Keskväärtuse mõõtemuundurid

Keskväärtuse mõõtemuundurid, nagu ka tippväärtuse mõõtjad, on lihtsa tööpõhimõttega – vaheldussignaal – näiteks siinuselise kujuga vahelduvvool või -pinge alaldatakse täppis-alaldiga. Tüüpiliselt on alaldusdiodid skeemiliselt pandud operatsioonivõimendite negatiivse tagasiside ahelasse nende diodide päripinge langudest tingitud mõõtevea mahasurumiseks ning alaldatud signaal keskmistatakse madalpääsfiltriga. Tegu on lihtsate ja täpsete (mõõdetava signaali suure dünaamilise ulatusega lineaarsete) muunduritega. Enamasti on need mõõtemuundurid kalibreeritud siinuse

efektiiv- (ehk ruutkeskmise) väärtuse näitamiseks ja muu kujuga signaalide korral toimub mõõtmine olulise mõõteveaga.



Joonis 6.9. Poolperiood-keskväärtuse detektor

Esimene skeem (joonis 6.10) on arendatud invertteerival operatsioonivõimendil põhineva skeemi alusel. Operatsioonivõimendi  $A_1$  tagasiside ahel on jagatud kahe alaldusdioidiga ( $D_1, D_2$ ) positiivse ja negatiivse voolu ahelateks. See tähendab, et detektori sisendisse voolav vahelduvvool (väärtusega  $U_{s\text{is}}/R_1$ ) peab jooksma summaarselt läbi  $D_1, R_2$  ja  $D_2, R_3$  operatsioonivõimendi invertteerivasse sisendisse. Ehk siis alaldusdioidid  $D_1$  ja  $D_2$  alaldavad mainitud vahelduvvoolu, ühed siinuse poolperioodid voolavad läbi  $R_2$  ja teised läbi  $R_3$ , tekitades neil takistitel poolperiood-alaldatud väljundpinge. Täisperiood-mõõtealaldi võib saada, kui väljundsignaal võtta kahe väljundi ( $U_{V+}$  ja  $U_{V-}$ ) vahelt diferentsiaalselt. Samuti on olemas teisi võimalikke skeemitehnikaid [40].

Teine skeem (joonis 6.10 [41]) töötab suhteliselt sarnase põhimõttega, sisaldades invertteerivas režiimis operatsioonivõimendit ja tagasisideahelas alaldusdiode. Erinevus seisneb järgmistes mõõtetäpsust oluliselt suurendavates asjaoludes:

- takistid  $R_1$  ja  $R_2$  on vahelduvvoolu jaoks paralleelselt, läbi kondensaatorite  $C_1$  ja  $C_2$ , dioididega alaldatud alalisvoolu jaoks hoopis järjestikku, ehk mõõtemuunduri ülekandetegur alaldatud pinge keskväärtuse jaoks on määratud suhtega

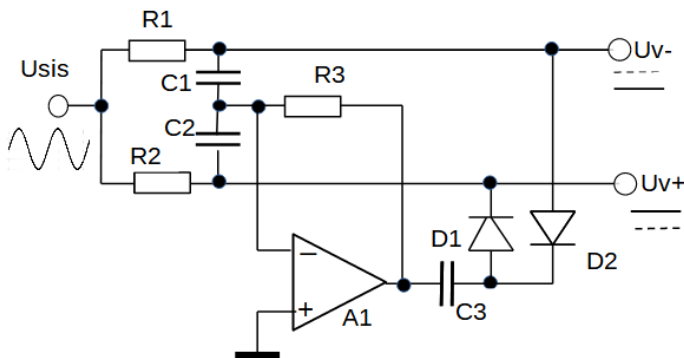
$$K = \frac{(R_1 + R_2)}{(R_1 \parallel R_2)}, \quad (6.9)$$

mis takistite ligikaudse võrdsuse korral  $R_1 \approx R_2$  annab ülekandeteguriks  $K = 2$ , mis esimeses lähenduses ei sõltu takistite täpse väärtuse veast (erinevalt eelmisest lahendusest, kus takistite suhete  $R_2/R_1$  ja  $R_3/R_1$  vigade triiv ajas ja temperatuuris annab üks-ühele-vea);

## Peatükk 6. MÕÖTESIGNAALI MUUNDURID

- kondensaatorid  $C_1$  ja  $C_2$ , ühendatuna seadme väljundist operatsioonivõimendi sisendisse, tagavad vahelduvpinge pulssatsiooni olulise mahasurumise (ehk skeem toimib ka madalpääsfiltrina);
- lisaks  $C_1$ -le ja  $C_2$ -le eraldab ka kondensaator  $C_3$  alalisvoolu suhtes alaldamise osa skeemist ja operatsioonivõimendi, seega operatsioonivõimendi nihkepinge ja selle triiv (näiteks temperatuurist) ei tekita lisaviga muundatud alalispingele eelkirjeldatud lahenduses. Sealjuures suhteliselt väga suure väärtusega  $R_3$  tagab operatsioonivõimendi alalisvoolu tööpunkti.

See lahendus (teostatuna õpiku autor poolt) on taganud vahelduvpinge muundamisel alaliseks põhivea parema kui 0,01% suurusjärgus piirkonnal 1 V, sagedusriba 10 Hz kuni 1 MHz ja väljundpinge väljakujunemisaja alla 1 sekundi.

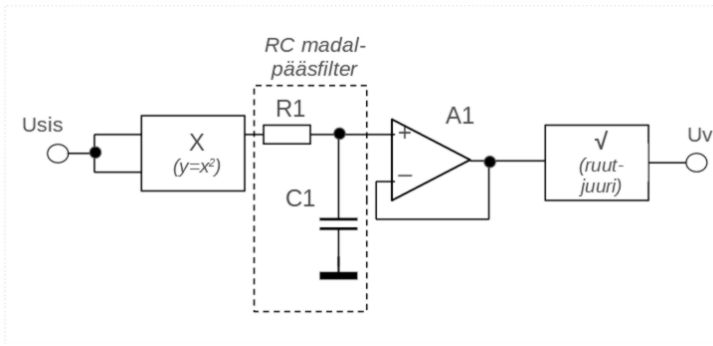


Joonis 6.10. Vahelduvpinge täppismõõtemuundur [41]

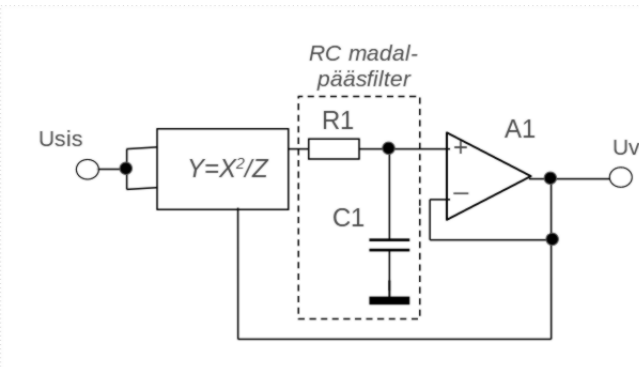
### 6.3.3 Efektiivväärtuse mõõtemuundurid

Üks võimalus efektiivväärtust mõõta on mõõdetava signaali lainekuju digitaliseerida ning saadud numbrilistest väärtusest arvutada kas ruutkeskmine (RMS) ehk efektiiv- või muud vajalikud väärtused. Ajalooliselt on aga kasutatud ka analoog-mõõtemuundureid, näiteks nagu joonistel 6.11a ja 6.11b [42].

Esimeses skeemis võetakse signaali lainekuju ruutu üle kõigi väärtuste, keskmistatakse madalpääsfiltriga ja siis võetakse saadud väärtusest ruutjuur. Seega ruutkeskmine leitakse siin vastavalt definitsioonile ehk ilmutatud kujul.



(a) Vahelduvpinge efektiivväärtuse mõõtemuundur 1



(b) Vahelduvpinge efektiivväärtuse mõõtemuundur 2

Joonis 6.11. Vahelduvpinge efektiivväärtuse (RMS) mõõtemuundurid

Teise skeemi puhul toimub analoogvallas arvutamine ilmutamata kujul. Siin leitakse keskmine sisendpinge ruudust, mis on jagatud mõõtemuunduri väljundpingega, mille puhverdatud keskvärtus (läbi madalpääsfiltri) ongi väljundpingeks.

Analoog-korruteid ja RMS-i muundamise kiipe toodab muuhulgas firma *Analog Devices*.

## 6.4 LC ja RC – generaatori ja sagedusmõõtjaga lahendused

Vahel võib olla otstarbekas kasutada ADM-i-põhise lahenduse asemel mõõdetava suuruse muundamist sageduseks (või ajaperioodiks), mida saab lihtsalt ja täpselt mõõta.

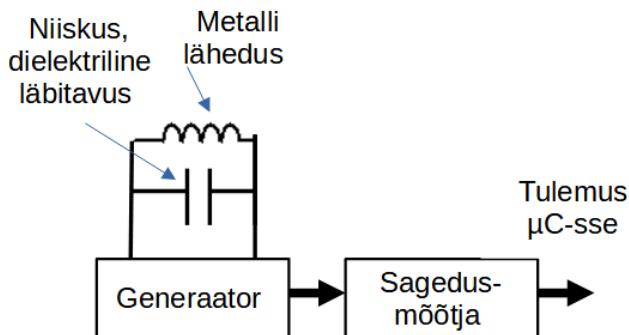
Näiteks mahtuvuslikku ( $C$ ) või induktiivset ( $L$ ) mõõtemuundurit (kasutatav nt mehaanilise nihke, kauguse, niiskuse, kiirenduse jpm mõõtmisel) saab teisendada numbriliseks tulemuseks isevõnkuva generaatori võnkesageduse järgi (vt nt joonis 6.12), mida omakorda saab mõõta sagedusmõõtjaga. Viimast saab lihtsalt ja täpselt teostada impulsside lugemisega ajaühikus (nt ühes sekundis) vastavate (nt mikrokontrolleri sisemiste) loendurite abil.

LC-generaatori omavõnkesagedus sõltub võnkeringi resonants-sagedusest, mis on määratud LC väärtusega:

$$f_{\text{resonants}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (6.10)$$

Taolist lahendust toodab valmiskiibina Texas Instruments (LDC1000 seeria jmt), vaata näiteks mittepurustava metallobjektide testimise näidet LDC1000-ga [43]. LDC1000 seeria kiibid mõõdavad ka võnkeringis (ennekõike sensorpoolis) tekkivaid kadusid ning nende muutust, mida saab väljendada võnkeringi (ja ühtlasi pooli) paralleel- või järjestik-takistusena (vastavalt  $R_p$  või  $R_s$ ).

Alternatiivselt saab teostada ka mõõdetava takisti või mahtuvuse (RC) baasil nn relaksatsioonigeneraatori, kus võnkeperiood on määratud RC ajakonstandiga ja võnkesagedust või perioodi saab mõõta mikrokontrolleri sisemiste loenduritega (näiteks [44]).



Joonis 6.12. Suuruste mõõtmine LC ja sagedusmõõtja baasil



## Kordamisküsimused

1. Kirjeldage mitmepiirkonnalise alalispinge eelvõimendi võimalikku skeemi.
2. Kuidas saab voolu täpselt mõõta operatsioonivõimendiga?
3. Kuidas saab täpselt mõõta takistust nelja juhtme süsteemis? Mis eelise annab nelja juhtme süsteem võrreldes kahe juhtme süsteemiga?
4. Kuidas toimib takistuse mõõtmine mõõtesillaga?
5. Missugust (matemaatilist) väärtust saab mõõta vahelduvvoolu pingel?
6. Kuidas töötab vahelduvpinge tippväärtuse muundur?
7. Kuidas töötab vahelduvpinge keskväärtuse muundur?
8. Kuidas töötab vahelduvpinge efektiiv- (ruutkeskmise) väärtuse muundur?
9. Kas tippväärtuse detektoriga saab mõõta siinuselise vahelduvpinge efektiiv- (ruutkeskmist) väärtust?
10. Mis lihtsa meetodiga saab mõõta sensorpooli induktiivsust?

## 7. MÕÕTEANDURITE TÖÖPÕHIMÕTTEID JA RAKENDUSI

Et mõõta erinevaid, ka mitte-elektrilisi, suurusi, on vaja mõõteandureid või mõõtemuundureid, mis muundavad huvipakkuva füüsikalise suuruse (näiteks mass/kaal, kiirus ja kiirendus, rõhk (mh õhurõhk autorehvides), vedelike (mh vee) või gaaside (mh õhu) voolukiirus, lineaarne või nurga asend, temperatuur, valguse intensiivsus (ka eri lainepikkustel), objektide lähedus, seadmete vibratsioonide parameetrid aja- ja sagedusvallas jne – elektriliseks suuruseks.

Elektriline suurus, mida mõõteandur või muundur välja annab, võib olla näiteks:

- alalis- või vahelduvpinge või vool; näiteks rõhku, temperatuuri jmt mõõdetavat suurust väljastavad tööstuslikud analoogmõõtemuundurid tihti taandatuna alalispinge piirkonnale 0...5 V või alalisvooluna 4...20 mA;
- alalisvoolu takistus (näiteks takistuslikud temperatuuriandurid või koormuse- ja kaalusensorid);
- vahelduvvoolu impedants (takistus vahelduvvoolule ja selle spekter) on mh sobilik mahtvuslike ja induktiivsete sensorite jälgimiseks, piesosensorite elektromehaaniline impedants iseloomustab mehaaniliste elementide – nt tuuleveski labade – struktuuraset tervist, pöörisevoolu impedants iseloomustab metallstruktuure jne;
- mahtvuslik väärtus või selle muutus (mh mahtvuslikud niiskusandurid, kiirendusandurite kiibid – mis on tänapäeval igas mobiiltelefonis, nutikellas ja arvutis – toimivad mahtvusliku muutusena gravitatsiooni ja toereaktsiooni muutumisel);
- induktiivne sensoorika – lähedusandurid, metallide mittepurustav testimine ja mõõtmine jpm;
- piesoeffektil põhinev pinge, suhteliselt mahtvusliku väljundtakistusega, vibratsioonide ja kiirenduste mõõtmiseks;

Seega füüsikalised põhimõtted, mis muutuvad välismõjurite toimel, võivad olla mahtuvuse muutus, magnetnähtused (induktiivsus, pöörivoolud, ka näiteks Halli efekt), piesoeffekt (elektrilise pinge tekkimine piesomaterjali mehaanilisel mõjutamisel), takistuse muutus mehaaniliselt pingestatud juhtmetel, optiline sensoorika (nii läbi õhu kui mööda fiiber-optilist kaablit), ultraheli sensoorika.

Tänapäeval on olulised mikrostruktuuridena teostatud lahendused (mikrosensorid). Siia alla kuuluvad nii 100% mikrokiibid, nt räni baasil (alates temperatuurisensoritest), elektromehaanilised mikrosensorid (näiteks kiirendusandurid, millest tuleb juttu allpool) kui labor-kiip-tüüpi mikroseedised (nt vere analüüsiks optiliste või impedantsi meetoditega).

Tuleb märkida, et toodud kirjeldus on suhteliselt meelevaldne ega ütle midagi erinevate põhimõtete suhtelise populaarsuse kohta. Samuti ei ole selles peatükis käsitletud kõiki kasutatavaid tehnoloogiaid, pigem on tegemist mõnede näidetega.

### 7.1 Temperatuuriandurid

Temperatuuri jälgimine on oluline paljudes tehnika ja tehnoloogia valdkondades, tervishoius ja logistikas. Mõned näited: patsientidel mõõdetakse võimalikku palavikku või nõrkust; keemilistes ja füüsikalistes protsessides (tootmisahjud toiduainetööstuses, metallurgias jne) jälgitakse etteantud temperatuurist kinnipidamist tehnoloogilises protsessis. Samuti on oluline seadmete ülekuumenemise ja alajahtumise jälgimine. On mõõteseadmeid, kus tulemus muutub olenevalt temperatuurist ja on vajalik töötada etteantud temperatuurivahemikus või vähemalt sisse viia temperatuurist tingitud korrektsioonid, lähtudes tegelikust temperatuuri väärtusest.

Enamlevinud temperatuuriandurid on:

- termopaarid;
- termotakistid ehk termistorid;
- pooljuht-analoog-termoandurid, mis tööpõhimõttena kasutavad tihti bipolaartransistori emittersirde pingelangu temperatuurisõltuvust;
- pooljuht-digitaal-termoandurid, kus lisaks analoog-termosensorile toimub ka analoog-digitaal-muundamine ja sensor ühendub mikrokontrolleri kaudu mõne lihtsa järjestikuprotokolliga („1-wire“, I2C, SPI vmt); omaette tüübiks on „targad“ temperatuurisensorid, mis annavad tulemuse analoogkujul või näiteks impulsslaius-modulatsiooniga (SMT-172 näide on allpool kirjeldatud).

Nii selle anduri kui teiste taoliste võimalikud rakendused on:

- ülimaldala võimsusega rakendused: kantav elektroonika, juhtmevabad andurivõrgud;
- meditsiinilised rakendused, mh kehatemperatuuri jälgimine;
- mõõteseadmed, mh (bio)keemiliseks analüüsi täppisseadmed;
- keskkonnaseire nii sise- kui välioludes;
- tööstuslikud rakendused: protsessi jälgimine ja juhtimine.

Kirjeldame eri tüüpi temperatuuriandureid lähemalt.

### 7.1.1 Termopaarid ja termistorid

Termopaarid ja termistorid (takistuslikud temperatuuriandurid) on passiivsed andurid, mis vajavad signaali elektroonilist muundamist ja töötlust, et tulemus oleks kasutatav.

#### Termopaarid

Termopaari tööpõhimõte on kirjeldatud joonisel 7.1. Termopaar koosneb kahe eri metalli (A ja B) kahest kokkupuutepunktist (üleminekust, näiteks teostatuna punktkeevitusega), kus ühele üleminekule rakendatakse mõõdetavat „kõrgemat“ temperatuuri  $T_1$  ja teisele „madalamat“ teadaolevat, nt toatemperatuuri või jäävee nullkraadist temperatuuri  $T_2$ . Kui voluring katkestada, siis teades katkestuskohas tekkivat termopinget  $U$  [mV] ja Seebecki koefitsenti konkreetse termopaari kohta, saab hinnata temperatuuride erinevust  $T_1 - T_2$ , millest saab omakorda tuletada  $T_1$  väärtuse. Vajaduse korral võib  $T_2$  (nt toatemperatuuri) mõõta mõne teise tööpõhimõttega anduriga.

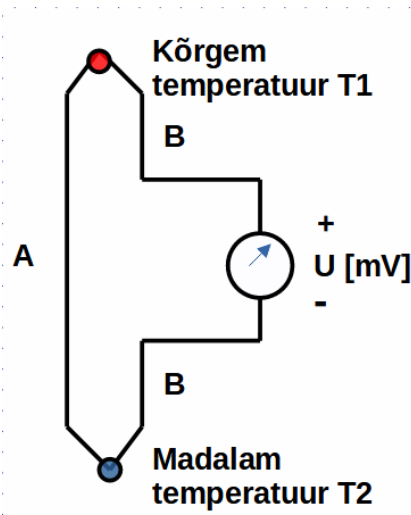
Eri tüüpi termopaaridega saab suure täpsusega mõõta temperatuuri vahemikus  $-270$  (E-tüüpi ehk kromell–konstantaan termopaar) kuni  $+2500$  °C. Kõige levinumad tüüp K (kromell–alumell) omab tundlikkust  $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$  ja töötab temperatuurivahemikus  $-200$  °C kuni  $+1350$  °C.

Termoelektrilise ehk nn Seebecki efekti, millel põhineb termopaaridega temperatuuri mõõtmine, avastas Tallinnas sündinud füüsik Thomas Johann Seebeck (1770–1831) 1820. aastal. Esialgu pidas Seebeck küll avastust „termomagnetismiks“, kuna esmaseks tähelepanekuks oli tal kompassinõela liikumine kahe eri metalli siiretele rakendatud temperatuurierinevuse puhul voluahela lähedal.

#### Termistorid

Termistorid ehk termotakistid jagunevad:

- NTC – negatiivse temperatuuriteguriga termistorid;



Joonis 7.1. Termopaari tööpõhimõte

- PTC – positiivse temperatuuriteguriga termistorid;
- RTD – takistustraadist (nt plaatina, Pt, vask, Cu) tehtud termistorid (kuna üldjuhul on RTD positiivse temperatuuriteguriga, võib seda pidada ka PTC alamtüübiks).

Näiteks Philipsi 10 k $\Omega$  NTC-termistor on kujutatud joonisel 7.2.



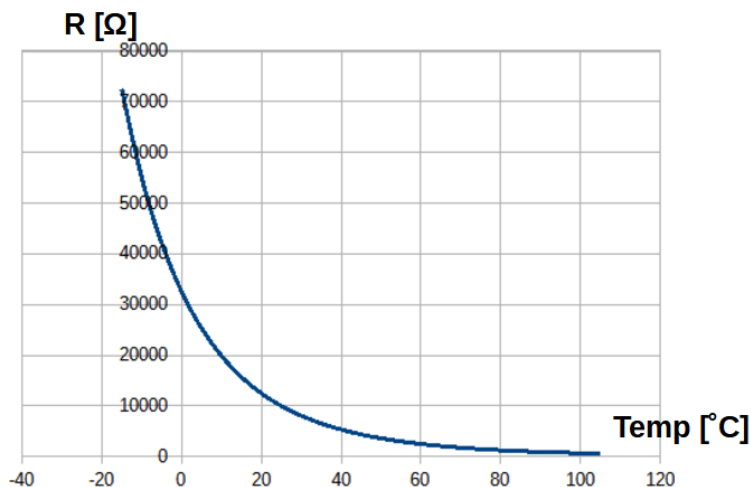
Joonis 7.2. NTC-termistori näide

Selle termistori takistuse sõltuvus temperatuurist on toodud joonisel 7.3. Tegemist on väga mittelineaarse sõltuvuse ja kõveraga, mida on tänapäevasel digiajastul lihtne käsitleda, näiteks tabuleeritud kõveraga mikrokontrolleri mälus (nt *look-up-table* põhimõttega), vajaduse korral koos lihtsa matemaatilise interpoleerimisega). Alternatiivselt saab kasutada asjakohast suhteliselt kõrget järku polünoomidega arvutamist.

Võrreldes muud tüüpi temperatuurianduritega on need andurid lihtsad ja odavad, kasutatavad ka analoogseadmetes ning väga tundlikud õue-

## Peatükk 7. MÕÕTEANDURITE TÖÖPÕHIMÕTTEID JA RAKENDUSI

ja toatemperatuuri piirkonnas (nagu näha jooniselt 7.3), mis võimaldab kasutada nende tööks lihtsamat, odavamat ja vähem häiretundlikku elektroonikat.



Joonis 7.3. 10 kΩ nimitakistusega NTC-anduri temperatuurikõver

Takistustraadist (Pt, Cu) tehtud sensorid on tüüpiliselt suhteliselt madalaoomilised (nt 100 Ω või 500 Ω). Kuna metallide takistuse sõltuvus temperatuurist on üsna lineaarne, ei vaja nende anduritega mõõtmise skeemitehnilist ega tarkvaralist lineariseerimist. Takistuse muutus ei ole eriti suur mõõdetava temperatuuri diapasaonis, nt (nii vase kui plaatina puhul) temperatuuri muutudes 0 °C kuni 100 °C muutub anduri takistus lineaarselt 100 oomilt umbes 140 oomini.

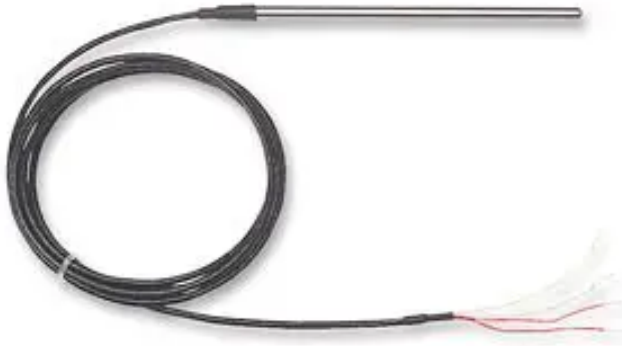
### 7.1.2 Pooljuht-temperatuuriandurid

Pooljuhtmaterjalide omadused (nt eritakistus) sõltuvad temperatuurist ja seda efekti saab kasutada, loomulikult temperatuuriandurina. Rangema seose saab pooljuhtsiirde (nt diodi või bipolaartransistori emittersiirde) pingelangust, mis sõltub (fikseeritud voolu juures) temperatuurist umbes +2,5 mV/°C.

Ideaalse diodi pingevoolu-karakteristik [45] on

$$I = I_s \cdot (e^{\frac{qU}{kT}} - 1), \quad (7.1)$$

kus  $I_s$  on siirde küllastusvool,  $q$  on elektroni laeng,  $k = 1,380649 \cdot 10^{-23}$  [J/K] on Boltzmanni konstant ja  $T$  on absoluut-temperatuur [K].



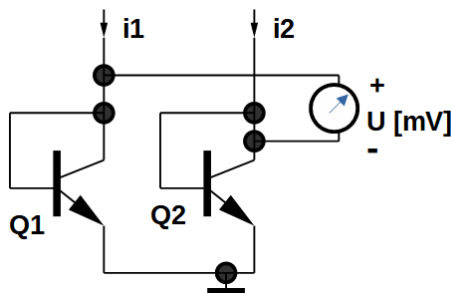
Joonis 7.4. Pt-100 anduri näide

Siit näeme omakorda, et pingelang siirdel on proportsionaalne absoluutse temperatuuriga  $T$ :

$$U = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_s} - 1\right) \quad (7.2)$$

Täpsema temperatuurianduri saab, kui kasutada diferentsiaalset transistoripaari (kahest ühesugusest transistorist, millel on sama küllastusvool  $I_s$ ), nagu näidatud joonisel 7.5, kusjuures emittersiirete voolud  $I_1$  ja  $I_2$  on erinevad. Sellisel juhul on pingete vahe siiretel ( $U[mV]$  näit):

$$\Delta U = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right) \quad (7.3)$$



Joonis 7.5. Bipolaartransistoridega temperatuuriandur

Mitmesugust skeemitehnikat temperatuuriandurite teostuseks on kirjeldatud töös [46].

### „Targad“ temperatuurisensorid

Omaette tüübiks on „targad“ temperatuuriandurid, mis väljastavad impulss-laius-modulatsiooniga (ILM) väljundsignaali (nt SMT-172 [47]), mida saab lugeda näiteks mikrokontrolleri sisemise analoog-digitaalmuunduri poolt läbi lihtsa madalpääsfiltri (nt RC-ahela) või digitaalselt (binaarse signaalina) mikrokontrolleri sisemiste loendurite baasil temperatuuri iseloomustava digitaalse täitetegurina.

Näitena toodud SMT-172 [47] on üliväikse energiatarbega suhteliselt väga täpne sensor, mille põhiomadused on järgmised:

- väga väike energiakulu mõõtmise kohta:  $0,36 \mu\text{J}$ , tarbitav vool aktiivsel ajal  $60 \mu\text{A}$  ja keskmiselt  $220 \text{ nA}$ ;
- mõõdetav temperatuurivahemik  $-45^\circ\text{C}$  kuni  $130^\circ\text{C}$ ;
- toitepinge vahemik  $2,7 \text{ V}$  kuni  $5,5 \text{ V}$ ;
- täpsus:  $\pm 0,25^\circ\text{C}$  (vahemikus  $-10^\circ\text{C}$  kuni  $100^\circ\text{C}$ ),  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  (vahemikus  $-20^\circ\text{C}$  kuni  $60^\circ\text{C}$ );
- müratase:  $0,002^\circ\text{C}$ ;
- suurepärase pikaajaline stabiilsus;
- otsene liides mikrokontrolleriga.

Nii selle kui ka teiste taoliste andurite võimalikud rakendused on järgmised:

- ülimaldala võimsusega rakendused: kantav elektroonika, juhtmevabad andurivõrgud;
- meditsiinilised rakendused, mh kehatemperatuuri jälgimine;
- mõõteseadmed, mh (bio)keemilise analüüsi täppiseadmed;
- keskkonnaseire nii sise- kui ka välioludes;
- tööstuslikud rakendused: protsessi jälgimine ja juhtimine.



## 7.2 Takistuslikud, mahtvuslikud ja induktiivsed andurid

### Takistuslikud andurid

Takistuslike andurite näidetena võib tuua eelpool kirjeldatud termistorid, samuti fototakistid (nt kaadiumsulfiidi baasil), kus valgustuse mõjul väheneb takistus ja tundlikkus valguse lainepikkusele sõltub kasutatavast materjalist.

Laialt kasutatakse takistuslikke andureid jõu mõõtmisel, mh nn tenso- ehk mehaanilise pinge mõõtmise andurites. Tööpõhimõte põhineb asjaolul, et metalli (nt takistustraadi) deformatsioonil takistus muutub. Näiteks venitamisel läheb juhtme traat pikemaks ja selle ristlõige väiksemaks, mis mõlemad suurendavad metallstruktuuri takistust. Ja vastupidi, kokkusurumisel takistus väheneb. Reaalsetes kaalu- ja tensoandurites on mõistlik kasutada sildskeemi (vt eelnevat mõõtemuundurite peatükki), nn Wheatstone'i silda. Sealjuures võivad sensortakistiteks olla 1, 2 või kõik 4 takistusliku silla õlga sõltuvalt vajalikust tööpõhimõttest (nt kui ühte sensori nurka surutakse, siis võidakse teist tõmmata). Nii saadakse mõõteskeemist rohkem signaali (takistuste muutust) mõõteskeemist ja mõõtevead (nt takistuse sõltuvus temperatuurist) kompenseeruvad olulisel määral.

### Mahtvuslikud sensorid

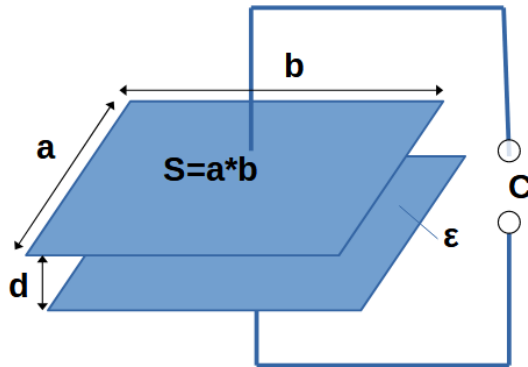
Mahtvus (nt teostatuna kondensaatorina) koosneb enamasti kahest metallplaadist, mõlemad pindalaga  $S$ , mille vahemaa on  $d$  ja mille vahel on isolaator (lihtsaimal juhul näiteks õhk) keskkonna dielektrilise läbitavusega  $\varepsilon$  (joonis 7.6).

Sellisel juhul on kondensaatori mahtvus

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d}. \quad (7.4)$$

Loomulikult võivad olla mõistlikud ka muud sensori geomeetriad, nt koaksiaalsed mahtvuslikud andurid, kus üks torukujuline elektrood on teise sees. Samuti võivad elektroodid olla mistahes (ka mittemetallilised) elektrijuhid, nt ioonid elektrilises kaksikkihis.

Taalise sensoriga saab mõõta ühelt poolt keskkonna ja selle materjali omadusi  $\varepsilon$  kaudu, identifitseerida isolaatormaterjale, mõõta ka näiteks niiskust (õhus, mullas jne).



Joonis 7.6. Lihtsaim kondensaator – kaks paralleelset metallplaati

Teiselt poolt saab mõõta plaatide vahemaad ehk siis teostada mehaanilise nihke andurit. Sama põhimõtet kasutatakse kondensaator-mikrofonides, kus akustilised lained mõjutavad mahtuvust sarnasel viisil. Taolised lahendused on teostatavad ka ränist mikrosensorite kiipidena (nt [48]).

### Mahtuvuslikud kiirendusandurid

Samuti on kiirenduse mikrosensorites (mh kasutusel igas mobiiltelefonis) tööpõhimõtteks mahtuvuse muutus „kammina“ teostatud plaatide vahel, mida liigutab inertsiaalne mass ja mis on vedrude vahel. Mahtuvuse ja selle muutuse mõõtmiseks on taolides mikrosensoris sisseehitatud ostsillaator (vahelduvpinge generaator) ergutuseks ning võimendid ja sünkroodetektorid analoogväljundiga andurite puhul. Lisaks võib kiibis olla analoog-digitaalmuundur ning mikrokontrolleri liides (I2C või SPI) anduri digitaalseks ühendamiseks. Taolise kolmemõõtmelise (3D) sensori kiibi näiteks võib tuua kiibi ADXL335 firmalt Analog Devices [49].

Selle kiibi põhiomadused on järgmised:

- tegemist on 3-mõõtmelise kiirenduse sensoriga, kõige tundlikuma piirkonnaga  $\pm 3$  g, analoogväljundiga iga ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) suuna jaoks;
- väike voolutarve (0,35 mA), toitepinge 1,8...3,6 V;
- suuruselt väike ja õhuke (4 mm  $\times$  4 mm  $\times$  1,45 mm);
- kannatab kiirendust kuni 10 000 g;
- mõõdetava kiirenduse ribalaius igal mõõtesuunal on valitav välise kondensaatoriga 0,5...1600 Hz ( $x$ - ja  $y$ -suunal), 0,5...550 Hz ( $z$ -suunal).

Konkreetsed kiibi rakendused on hinnatundlikud väikese võimsusega liikumis- ja kaldeanduri rakendused, nagu mobiiltelefonid, mängusüsteemid, kettaajami kaitse, pildi stabiliseerimine, spordi- ja terviseseadmed.

#### **Induktiivsed sensorid**

Induktiivsed sensorid põhinevad induktiivpoolidel, kas üksikult kasutatuna või kahe pooli vahel (analoogiliselt transformaatoriga) vastastikuse induktiivsuse muutumisel.

Mõned näited induktiivsest sensoorikast:

- magnetsüdamik nihkeandurina liigub pooli sees ja muudab selle induktiivsust;
- (nt õhksüdamiku) pooli lähedusse satub metallobjekt, induktiivsuse muutust saab detekteerida (kasutatakse näiteks automootorites võllide pöörlemisel asendi anduritena), samuti kasutavad seda põhimõtet metallidetektorid.

Kui asetada induktiivsus metallist elemendi kohale, siis vahelduvvooluga pooli ergutamisel tekivad pöörisvoolud magnetilisest induksioonist metallosas, mis omakorda muudab induktiivpoolil nii induktiivust kui ka aktiivkadu (ekvivalentne oomiline takistus suureneb). Mudelipõhiselt on võimalik kontaktivabalt (mõistliku õhupilu kasutamiselega mõõtepooli ja mõõdetava objekti vahel) identifitseerida metalle, avastada defekte, roostet jne [50].

### **7.3 Fotosensorid ja nende liidestamine**

Lihtsaim optiline sensor on valguskiir ja signaaliks selle katkestamine, mida on sobilik kasutada nii lineaarse kui ka pöörlemise asendi andurina (vastavate enkooderite ja dekodeerite abil). Lihtsaim näide: fotosensorit saab kasutada objektide vaatevälja sattumise detekteerimiseks – kasvõi spordivõistluse finišis või bussiuste sulgemisel takistuste puudumise kontrollimiseks).

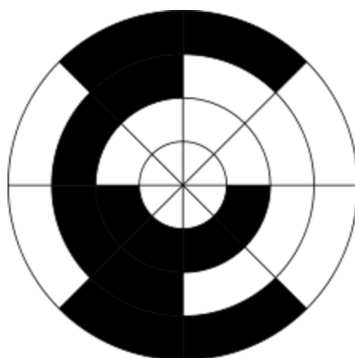
Fotosensoritena saab kasutada fototakisteid, nagu oli mainitud takistuslike andurite osas. Kiiremad ja täpsemad on fotodiodid valguse sensoritena, vajaduse korral ka valguse analoogmõõtemuundurina. Fotopaari korral kasutatakse valgusdiodi (LED) ja fotodiodi optopaarina.

## Optilised enkoodrid

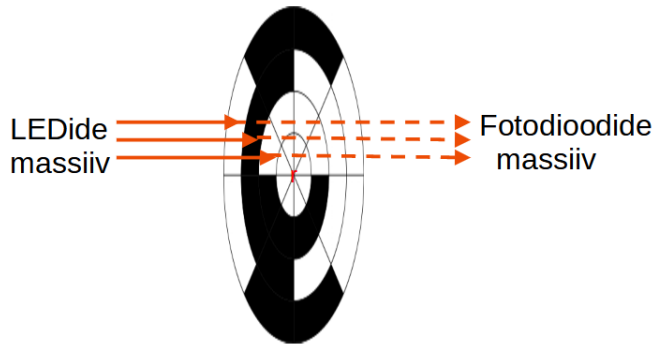
Optilise enkoodriga saab mõõta pöörlevat (roteeruvat) või lineaarset sensori asendit. Kolmebitise pöörleva asendi enkoodri optilise ketta võimalik teostus on kujutatud joonisel 7.7. Igal kolmest raadiusest ehk iga biti kohta on oma LED ja fotodiodid fotopaarina (joonis 7.8) ja vastav bittide kombinatsioon näitab enkoodri **absoluutset** asendit. Analoogiliselt saab teostada suurema eraldusvõimega pöörleva või lineaarse liikumise enkoodreid.

Alternatiivselt absoluutsetele enkoodritele, kus fotopaaride bittide kombinatsioon määrab absoluutse asendi, on võimalik kasutada ka lihtsaimaid nn inkrementaalseid andureid, kus iga enkoodri optilise mustri samm (inkrement) tekitab katkestuse 1-bitises optilises signaalis (joonis 7.9) ja need inkrementid saab loenduriga lihtsalt akumulleerida. Taolise lahenduse eeliseks on lihtsus, aga absoluutse asendi määramiseks on vaja teada enkoodri algasendit enne inkrementide kokku lugemist.

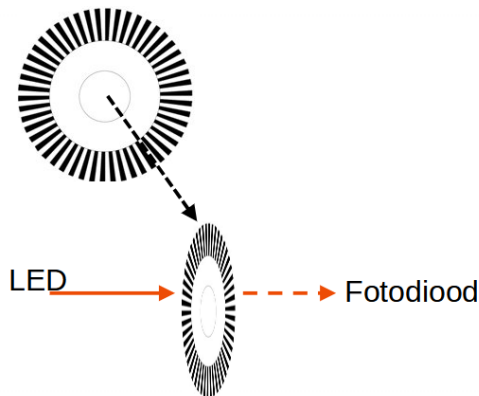
Mõnes süsteemis kasutatakse selleks anduri nullimist mehaanilises algasendis (nt määratuna lõpulülitiga). Samuti tekivad optilise signaali impulsid nii ühte- kui ka teistpidi optilist ketast pöörates. Vajaduse korral lisatakse selleks teine optiline kanal süsteemi ja optilisel kettal on joonistatud ka teine rida mustrit, mis on veerand lainet nihkes esimese kanali mustrist. Sellisel juhul saab teise kanali signaali järgi – kas see on põhikanali impulssidest pisut ees või taga – hinnata ka optilise ketta pöörlemis-suunda.



Joonis 7.7. Kolmebitise optilise enkoodri ketas (CC BY-SA 3.0 / Wikimedia Commons)



Joonis 7.8. Kolmebitine optiline enkooder



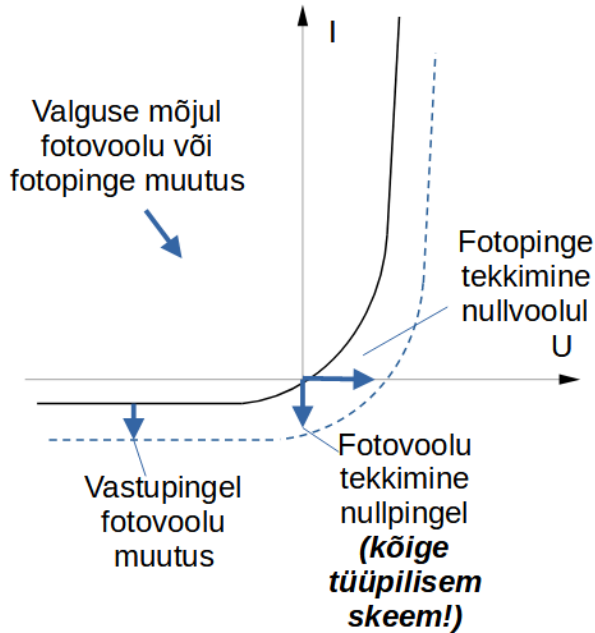
Joonis 7.9. Inkrementaalne optiline enkooder

### Fotodiodid ja nende liidestamine

Fotodiodil on tavalise (nt räni-) diodi pinge voolu karakteristik, kus vool kasvab sõltuvalt pingest eksponentsiaalselt (ehk pinge voolust logaritmiselt). Tüüpiline päripingelang fotodiodil võib olla näiteks 0,5...0,6 V ja vastupinge all lekkevool näiteks 10...100 nA (vt joonis 7.10). Pimedas (valgustamata olekus) läbib pinge-voolu-karakteristik nullpunkti. Valgustamisel nihkub karakteristik positiivsema pinge ja voolu poole. Skeemitehniliselt (joonis 7.11a) saab tööpunkti muutust mõõta, pannes fotodiodi vastupinge alla (skeem a), see annab suurema fotovoolu muutuse, võrreldes nullpinge juures tööpunktiga, aga antud nihe on ebamäärasem.

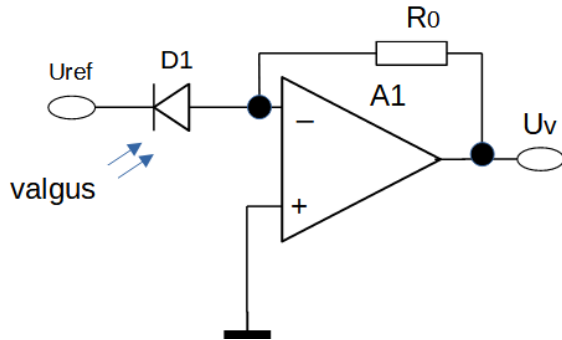
Täpsem ja enim kasutatav on skeem b, kus diod töötab nullpingel

ja tekitab valgustusest väga laias (üle mitme suurusjärgu dünaamilises diapasoonis) suhteliselt väga lineaarse fotovoolu, mille operatsioonivõimendi  $A_1$  konverteerib pingeks  $Uv$ . Võib kasutada ka skeemi c, kus fotodiod töötab tühijooksul (nullise voolu) punktis ja valgustamine tekitab päripingelangu, mille operatsioonivõimendi  $A_1$  pingekordajana lahti puhverdad.

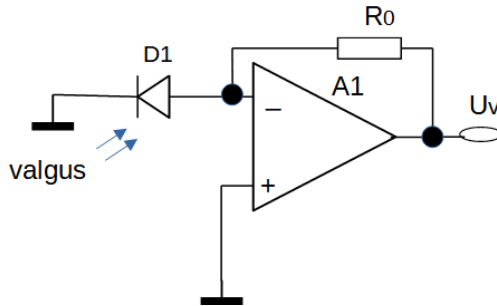


Joonis 7.10. Fotodiodi pinge-voolu-kõver

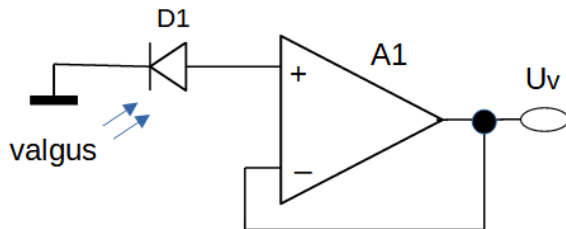
### 7.3. Fotosensordid ja nende liidestamine



(a) Vastupingel fotodiiodi voolu pingeks muundur



(b) Nullpingel fotodiiodi voolu pingeks muundur

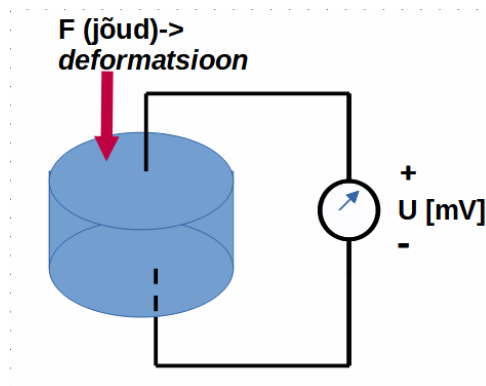


(c) Tühijooksul fotodiiodi pinge kordaja

Joonis 7.11. Fotodiiodi signaali pingeks muundurid (variandid)

## 7.4 Piesosensoriid

Piesoandur (joonis 7.12) kasutab piezoelektrilist efekti, et mõõta kiirendust, deformatsiooni või jõudu, muundades need elektrilaengute muutumiseks. Sõna *piezo* tuleb kreeka keelest ja tähendab surumist või pigistamist. Piezoelektrilisi materjalidest on tuntumad kvarts, pliitsirkonaattitanaat (PZT) ja baariumtitanaat.



Joonis 7.12. Piesoandur

## 7.5 Halli andurid

Hallii andur mõõdab magnetvälja tugevust. Halli andur on enamasti tehtud pooljuhist, mis annab meetalliga võrreldes suurema tundlikkuse. Halli andur võib olla risttahuka kujuga (joonis 7.13), kus ühte pidi lastakse andurist läbi elektrivool  $i$ , sellega risti on mõõdetav magnetväli  $B$  ja mõlema eelnevaga risti tekib anduri servadel pinge

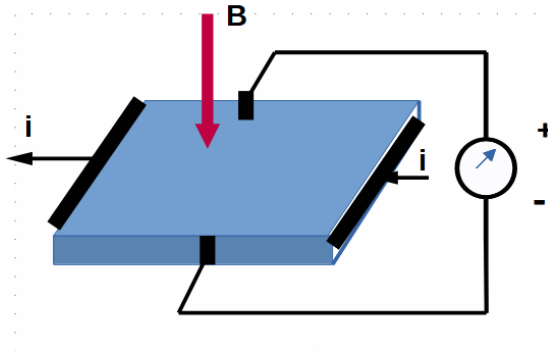
$$V_{Hall} = K \cdot i \cdot B, \quad (7.5)$$

kus  $K$  on Halli tegur (konstant, mis sõltub kasutatavast pooljuhtmaterjalist),  $i$  on anduri ergutusvool ja  $B$  on magnetvälja tugevus.

Lisaks magnetvälja mõõtmisele kasutatakse taolisi andureid elektrivoolu tugevuse mõõtmiseks (juhtides elektrivoolu läbi juhtme – ühe või mitme keeru, mis tekitab mõõdetava magnetvälja). Võrreldes muude voolusensoritega (nt voolutrafodega) on Halli anduri eeliseks, et see lahendus mõõdab nii alalis- kui vahelduvvoolu.

Liigutades Halli anduri lähedal püsimagneetit, saab teostada ka mehaanilise nihke anduri.





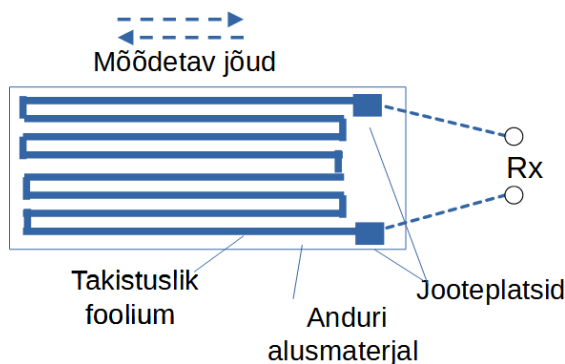
Joonis 7.13. Halli andur

## 7.6 Tensoandurid

Tihti on vajalik mõõta mehaanilist pinget, rõhku, jõudu ja teisi taolisi suursi. Üks võimalik lahendus on kasutada takistuslikke mehaanilist pinget mõõtvaid tensoandureid (*strain gauge*) [31].

Tööpõhimõtteks on siin asjaolu, et kui elektrilist juhti (näiteks takistus- traati) mehaanilise jõu mõjul venitada, siis selle pikkus kasvab ja ristlõige väheneb. Mõlemad asjaolud suurendavad elektrilise juhi takistust. Vastupidisel juhul, kokkusurumisel, elektrilise juhi elektriline takistus väheneb.

Tundlikkuse suurendamiseks ja sensori kompaktsemaks teostuseks on mõistlik pakkida elektrijuht kokku paralleelseteks järjestikku ühendatud segmentideks, nagu on näidatud joonisel 7.14. Anduri alusmaterjal peab olema elastne, näiteks paindub trükkplaadi materjal ja elektrijuht võib olla teostatud trükkplaadi vooluradadena.

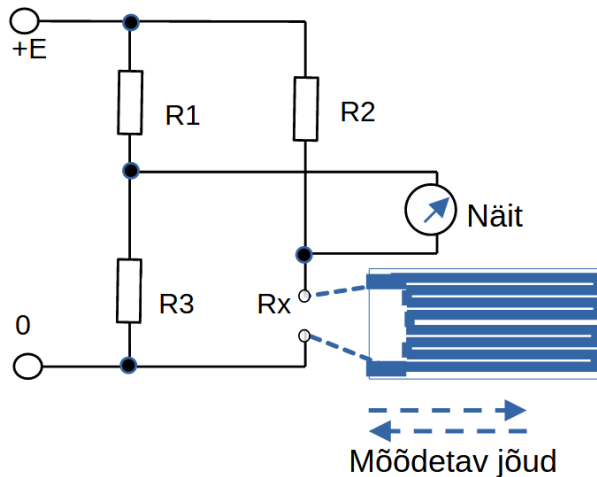


Joonis 7.14. Tensoanduri võimalik teostus

## Peatükk 7. MÕÕTEANDURITE TÖÖPÕHIMÕTTEID JA RAKENDUSI

Kuna deformatsioon on enamasti suhteliselt lineaarses seoses rakendatud jõuga, saab nii mõõta jõudu või jõudu pindalaühiku kohta (ehk rõhku).

Signaal saadakse takistuse  $R_x$  muutusena vastava analoog-signaalu muunduri kaudu, mis teisendab takistuse ja selle muutuse vastavaks alalispingeks analoog-digitaalmuunduriga digitaliseerimiseks või digitaalskeemiga mõõdetavaks sageduseks (või võnkeperioodiks), kui mõõdetav  $R_x$  on osaks lihtsas RC-generaatoris.

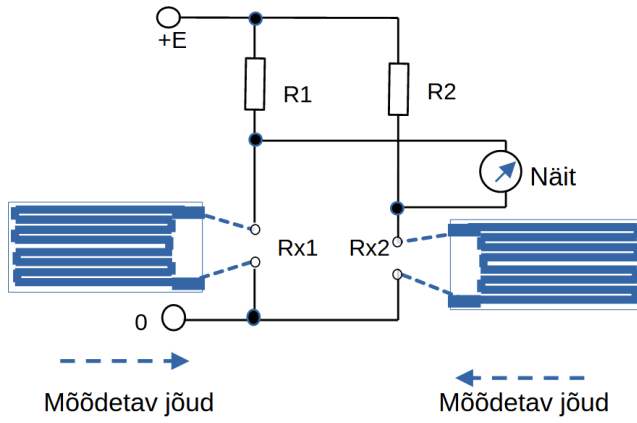


Joonis 7.15. Tensoanduri ühendamise veerandsildskeemi

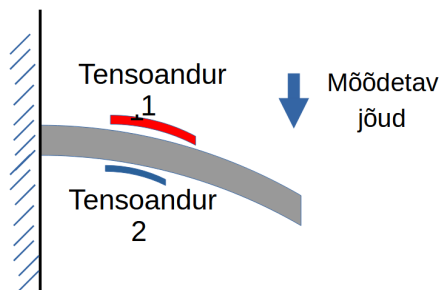
Taolisi sensoreid kasutatakse ka elektroonsete kaaluanduritena (*loadcell*).

Tihti koosneb tensoandur kahest (joonis 7.16) või neljast takistuslikku sildskeemi asetatud elemendist, kusjuures elemendid on silda asetatud nii, et jõu (või kaalu) mõjumisel ühele elemendile ühes suunas mõjub teisele elemendile jõud vastupidises suunas. See võimaldab saada andurist rohkem signaali ning oluliselt vähendada tensoanduri takistuse temperatuurist ja vananemisest tingitud mõõtmisviga ja selle triivi.

Paindedeformatsiooni mõõtmine tensoelementide paariga on kujutatud joonisel 7.17.



Joonis 7.16. Tensoanduri ühendamine poolsildskeemi



Joonis 7.17. Painde mõõtmine tensoanduritega

## 7.7 Vedeliku (ja gaasi) kulumõõtjatest

### 7.7.1 Kulumõõtjatest üldiselt

Tihti on vaja mõõta vedeliku (või gaasi) vooluhulka (kulu). Lihtsamad, näiteks koduses majapidamises kasutatavad veearvestid võivad kasutada lihtsalt vedeliku vooluavasse asetatud tiiviku pöörete loendamist, ent on ka keerukamaid printsiipe, näiteks vedeliku liikumiskiiruse või Coriolisi jõu ultraheliga mõõtmisel põhinevad mõõteseadmed [31].

Enamik vedelikukulu mõõtmise tööpõhimõtteid on rakendatavad ka gaasikulu mõõtmiseks. Oluliseks erandiks on järgnevas osas kirjeldatud elektromagnetilised kulumõõtjad, millega saab mõõta ainult elektriliselt juhtivate vedelike kulu.

Tööpõhimõttelt võib kas otse mõõta vedeliku (või gaasi) hulka (nt liitrites või kuupmeetrites) või alternatiivselt vedeliku (või gaasi) voolukiiruse järgi, integreerides viimast üle mõõteaja ( $t_1$ -st  $t_2$ -ni) ning võttes kulu  $V$  mõõtmisel arvesse lisaks voolukiirusele  $v$  ka vooluava läbimõõdu  $S$ :

$$V = S \cdot \int_{t_1}^{t_2} v dt. \quad (7.6)$$

Järgnevas osas kirjeldatud elektromagnetiline kulumõõtja toimib just vedeliku voolukiiruse mõõtmise teel.

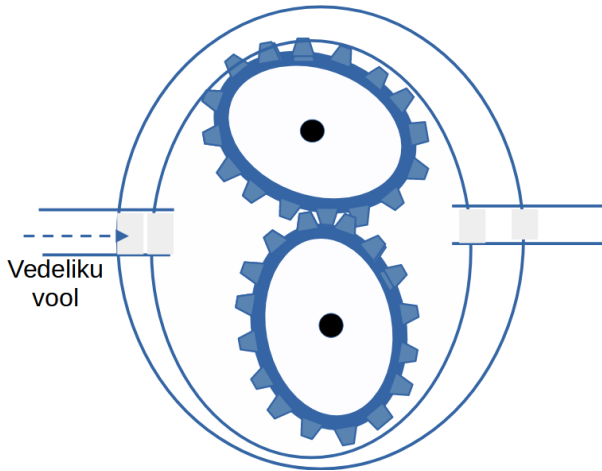
Üks tööpõhimõte võib olla vedeliku (või gaasi) hulga kogumine mõõtenõusse, selle täitumisel selle tühjendamine ja iga täitumise sündmuse registreerimine. Seda, üldisemalt nn „positiivse teisaldamise“ (*positive displacement*) printsiipi realiseeritakse tänapäeval mitmel viisil. Levinud on näiteks lahendus, kus ovaalse kujuga hammasrataste vahele „taskusse“ haaratakse igal loendataval pöördel „tasku“ mahuga määratud vedeliku (või gaasi) hulk (vt joonis 7.18).

Samuti võib mainida, et tarbitava soojusenergia (küttekulu)  $Q$  mõõtmine põhineb enamasti küttesüsteemist või kütteradiaatorist läbi voolava küttevee kulu  $V$  mõõtmisel korrutatuna küttesüsteemi siseneva ja küttesüsteemist väljuva vee temperatuuride vahega ( $T_2 - T_1$ ):

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} [(T_2 - T_1) \cdot V] dt. \quad (7.7)$$

### 7.7.2 Elektromagnetiline kulumõõtja

Elektromagnetilised kulumõõtjad [31] on sobilikud vedelikukulu kontakti-  
vabaks mõõtmiseks. Taoliste seadmete tööpõhimõte põhineb Faraday



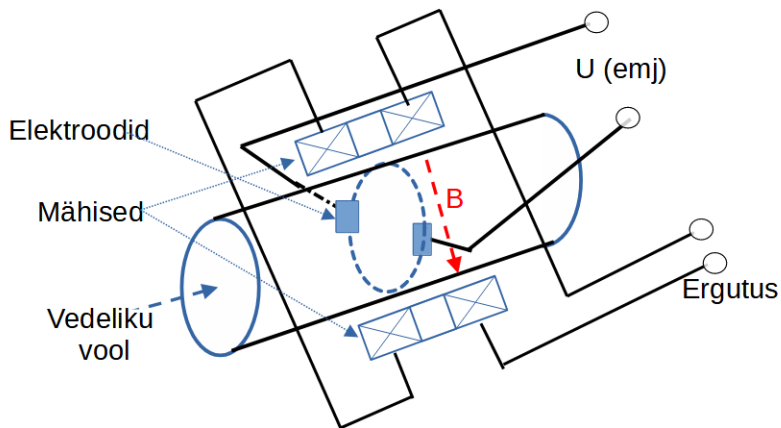
Joonis 7.18. Ovaalsete hammasratastega kulumõõtja põhimõte

elektromagnetilise induktsiooni seadusel, et muutuv magnetväli elektrijuhi suhtes tekitab elektrivoolu. Nimelt kui torus voolab elektrit juhtiv vedelik (joonis 7.19) ja toruga risti on rakendatud magnetväli  $B$  indutseeritakse torus olevate elektrodide (peavad olema omakorda risti magnetväljaga) vahele elektromotoorjõud (pinge)  $U$ , mis on proportsionaalne nii magnetvälja tugevusega  $B$ , elektrodide vahelise kaugusega  $L$  kui ka vedeliku voolukiirusega  $v$ :

$$U = B \cdot L \cdot v \quad (7.8)$$

Magnetväli  $B$  tekitatakse enamasti elektromagnetite (mähiste ehk poolide) paariga. Tüüpiliselt kasutatakse vahelduvvooluga ergutust. Sellisel juhul on ka anduri väljundsignaal moduleeritud ergutuse signaaliga sama sagedusega. Järgnev signaali sünkroondetekteerimise (nn *lock-in*-tehnoloogia) kasutamine tagab lahenduse müra- ja häirekindluse.

Eestis arendati taolisi lahendusi 1960.–1980. aastatel – Piritä tee Elektrotehnika Teadusliku uurimise instituudis, Tallinna Tehnikaülikoolis (tolleaegne TPI) ja koondises Tööstusaparaat (hilisem AS Aswega) [51]. Vastavaid lahendusi (vee ja nende baasil soojuse kulu mõõtjaid) toodeti Aswegas veel 2000-ndatel [52].



Joonis 7.19. Elektromagnetilise kulumõõtja tööpõhimõte

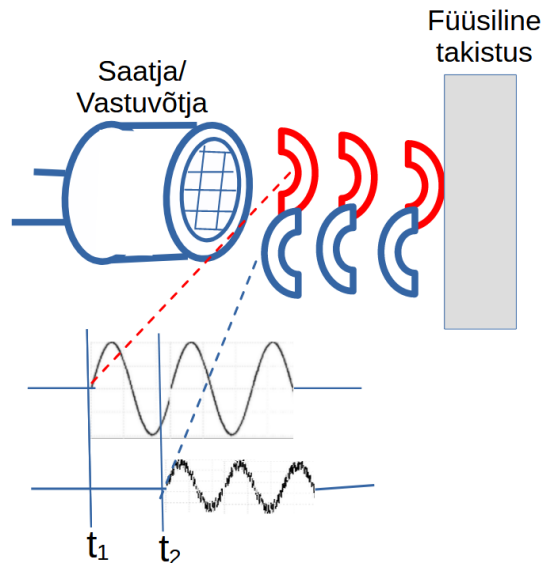
## 7.8 Ultrahelisensorika

Läheduse- ja kaugusemõõtmise sensorina saab kasutada ultraheliandurit. Vastav seadis võib olla teostatud väikses silindrilises korpuses oleva lahendusena (joonis 7.20). Aktiivseks elemendiks, mis suudab nii saata kui ka vastu võtta ultraheli (üle kuuldava heli ehk  $> 20$  kHz sagedusega) signaali, võib olla piesoelement.



Joonis 7.20. Ultraheliandur

Sellisel juhul on mõistlik signaali saatmine ja peegeldunud signaali vastuvõtmine ajas lahku viia, saates välja suhteliselt lühikese signaali pulsi, mis koosneb mõnest ultraheli siinuse perioodist, ja siis lülitades seadme vastuvõtturežiimi (joonis 7.21).



Joonis 7.21. Ühise ultrahelisaatja ja -vastuvõtjaga lahendus

Üks ultrahelisensoorika näide ongi kauguse mõõtmine takistuseni. Seda põhimõtet kasutavad näiteks autode parkimisandurid, mis mõõdavad ultrahelilaine leviaega (viidet) takistuseni ja tagasi.

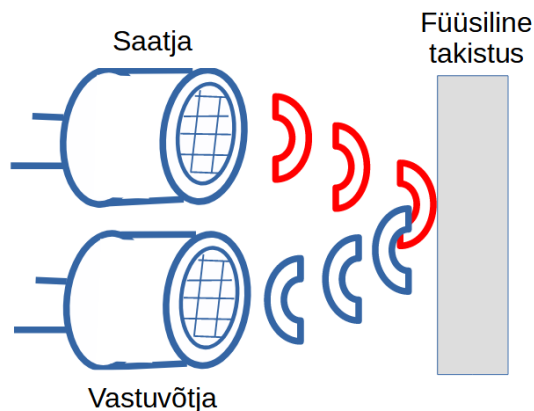
Teades (ultra)helilaine leviku kiirust õhus (u 330 m/s):

$$v = 331,6 + 0,67 \cdot T, \quad (7.9)$$

kus  $T$  on temperatuur (Celsiuse kraadides), saab hinnata kaugust objektini  $s$  laine leviku aja (viite)  $t_2 - t_1$  järgi (joonis 7.21):

$$s = \frac{v \cdot (t_2 - t_1)}{2}. \quad (7.10)$$

Alternatiivselt võivad saatja ja vastuvõtja olla kaks eraldi kõrvuti asetsevat seadist (joonis 7.22). Sellisel juhul saab seade toimida pidevalt.



Joonis 7.22. Ultraheli eraldi saatja ja vastuvõtjaga lahendus

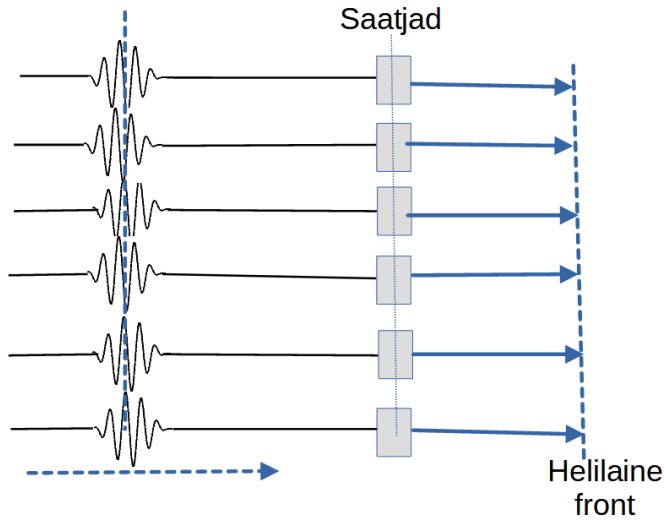
### 7.8.1 Ultraheliga suundmõõtmine

Ultraheliga mõõtmisel võib otstarbekas olla kasutada sensormassiive nn suunatud ehk suundmõõtmiseks, kombineerides mitmest sensorist kokku virtuaalse skaneeriva kiire (*beamforming*). Taolist tehnoloogiat nimetatakse (nt raadiotehnikas antennielementide massiivi puhul) ka faasivõreks, kuna kiir moodustub igal saatja (ja vastuvõtja) elemendil signaali faasinihete (või ekvivalentse ajalise viidete) asjakohase nihutamisega eri elementide vahel.

Ultrahelilaine suunamist illustreerivad joonised 7.23, 7.24 ja 7.25. Esimesel juhul (joonis 7.23) liigub signaali pulsiline (näiteks mõned



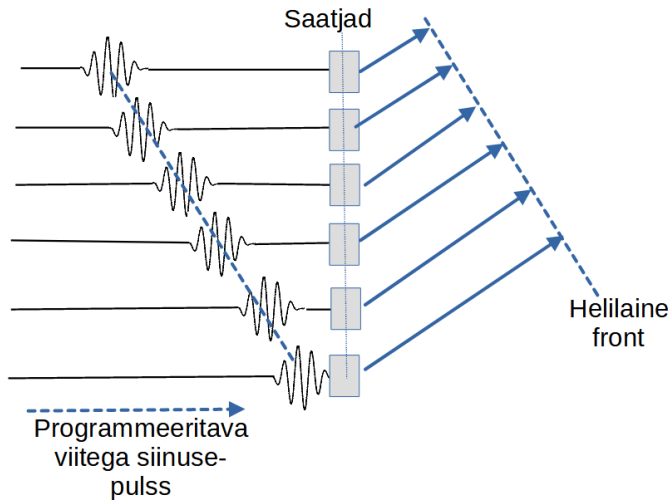
perioodid siinuselist lainekuju) samas faasis (sama ajalise viitega) ja otse saatjatest eemale. Teisel juhul, kui iga saatva elemendi pulsilaine on ajas ühtlase sammuga nihutatud (joonis 7.24), liigub signaali kiir nurga all. Kolmas näide (joonis 7.25) näitab, et kiirt on võimalik koondada virtuaalselt ka etteantud fookuspunkti, kasutades asjakohaselt valitud signaaliviiteid eri kanalites.



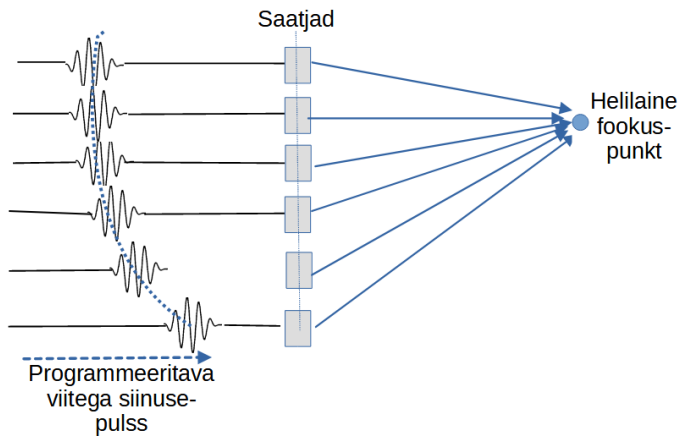
Joonis 7.23. Suunatud ultrahelilaine saatmine otsesihis

Sarnast signaali virtuaalset suunamist saab teostada nii signaali (nt ultraheli) saatmisel kui ka vastuvõtmisel või kombineeritult mõlemal poolel, kasutades sobilikke signaalide viitamisi.

Taolisi ultraheli sensormassiive kasutatakse muuhulgas meditsiinilistes ultraheli mõõteseadmetes [53].



Joonis 7.24. Suunatud ultrahelilaine saatmine kallutatud kiire sihis



Joonis 7.25. Suunatud ultrahelilaine saatmine fookuspunkti

## Kordamisküsimused

1. Milliste füüsikaliste suuruste mõõteandureid oskate nimetada?
2. Milliseid temperatuuriandurite tööpõhimõtteid oskate nimetada?
3. Milliseid takistuslikke temperatuuriandureid on olemas? Millised neist on oluliselt mittelineaarse takistus temperatuurist sõltuvusega?
4. Millist füüsikalist efekti kasutavad termopaarid?
5. Kuidas toimivad pooljuht-temperatuuriandurid?
6. Kuidas toimivad mahtuvuslikud andurid? Mida nendega mõõta saab?
7. Mis põhimõttel töötavad nutiseadmetes kasutatavad kiirendusandurid?
9. Milliseid mõõteskeeme kasutatakse fotodiodide sidestamiseks mõõteskeemiga?
10. Kuidas töötavad piesoandurid ja milleks neid kasutatakse?
11. Kuidas töötavad Halli andurid ja milleks neid kasutatakse?
12. Kuidas töötavad takistuslikud tensoandurid ja milleks neid kasutatakse?
13. Kuidas töötavad mehaanilised vedelikukulumõõtjad?
14. Kuidas töötavad elektromagnetilised vedelikukulumõõtjad?
15. Kuidas töötavad ultrahelisensorid ja milleks neid kasutatakse?
16. Kuidas saavutatakse ultrahelisensorika korral vajalikud suuna-diagrammid?

## 8. ARVUTIPÕHISED MÕÕTMISED

Aja jooksul on mõõteriistad muutunud elektroonseteks ja digitaalseteks (ehk numbrilisteks). Tänapäeval sisaldab iga mõõteseade üldjuhul vähemalt ühte mikroprotsessorit või mikrokontrollerit asjakohase püsivara, mis võimaldab saavutada laialdast funktsionaalsust (mh sisseehitatud matemaatilised teisendused, esmane andmetöötlus alates tulemuste keskmistamisest), paremat eraldusvõimet, täpsust, paindlikumat kalibreeritavust, mõõtevigade mitmesuguseid korrektsioone jne. Peale selle on digitaalseid mõõteseadmeid hõlbus ühendada arvutitega (mis samuti on tänapäeval digitaalsed ehk protsessoritel põhinevad). Seeläbi saab luua täielikult automatiseeritud mõõte-, test- ja juhtlahendusi.

Teisalt, tark, võimekas, paindlik ja paljufunktsionaalne (aga samas kulutõhus) arvuti saab mõõtmiste tulemuste töötlemise ja esitamise poole (ning tulevikus aina enam ka tehisintellektiga teadliku ja paindliku mõõtmise ning järelduste tegemise) viia füüsilisest instrumendist ära arvuti tarkvarasse – luua n-ö virtuaalsed instrumendid. Siis on vajalik ainult füüsiline (nt analoogsisendiga) liides mõõtesensori ja arvuti vahele, teostatuna sobivate (nt USB-ga ühendatud) andmehõiveseadmetena. Ülejäänud üksiku mõõteriista või terve mõõteseadmete komplekti funktsionaalsuse saab luua üheainsa arvuti tarkvaras (nt LabVIEW keskkonnas, mida on kirjeldatud allpool).

Arvutipõhiste (ehk automatiseeritud) mõõte-, test- ja juhtimislahenduste eelised on järgmised:

- automatiseeritud mõõte- ja testimise töökohad nõuavad vähem inimitööjõudu, töö on viljakam ja täpsem ning ennustatav (kuna arvuti töötab ranges vastavuses etteantud programmikoodiga);
- arvuti võib töötada kohtvõrgus ja saata mõõtelogisid serverisse ning olla ka keskselt või kaugelt juhitud ja jälgitav (nt TCP/IP protokoll kasutades);
- alternatiivselt saab arvuti väljastada kalibreerimis-, mõõte- jmt protokolle ja aruandeid trükitult iga toote, mõõtmis- või katseseeria kohta või ka hoopis statistiliselt – vahetuste, töönaädalate, kuude, kvartalite jne kaupa;

- arvutiga saab ühendada mitmesuguseid lisaseadmeid, näiteks triipkoodi ja muude märgiste lugejaid ja printereid toodete markeeringu lugemiseks või selle lisamiseks, mis on tihti otstarbekas toodete testimisel;
- arvutipõhisel lahendusel võib olla väga laialdane funktsionaalsus, mh võib üks arvuti toimida mitme mõõteriista rollis;
- kalibreerimisel saab kalibraatorid ja mõõteriistad ühendada ühte süsteemi ning luua täisautomaatse töösükli, kuni väljatrükitud sertifikaadi või protokollini.

### 8.1 Instrumentide liidestamine arvutiga

Mõõteinstrumentide ühendamisel arvutiga on ühelt poolt vaja konkreetset riistvaralist ühendust, tänapäeval endiselt pigem kaabliga, kasutades nt USB-, LAN-, HP-IB- vmt ühendust. Teisalt on vaja teatud protokolle, kokkuleppeid või standardeid, kuidas tarkvaraline infovahetus mõõteseadmete ja arvuti vahel toimib ning kuidas mõõteandmed (aga ka juhtkäsud, nt piirkonna valimine või mõõtmise käivitamine, nt ostsilloskoobil signaali hõiveks) liiguvad. Seda nii riistvaralähedastes kihtides (kaabli pistikute signaalidena), kui ka edasi – k.a andmete interpreteerimine (nt bittide järjestikulise side puhul – kas eespool on nooremad või vanemad bitid, kas 8-, 16- või 32-bitised järjestikku või paralleelselt üle kantud väärtused tähistavad teksti- (ASCII-) sümboleid või täis-, püsikoma- või hoopis ujukoma arve. Allpool vaadeldakse neid küsimusi lähemalt.

#### 8.1.1 Riistvara liideseid: HP-IB-st USB ja LXI-ni

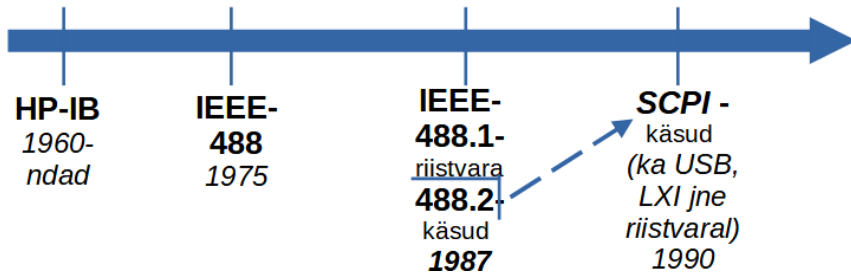
Siin käsitletakse järgmisi liideseid:

- HP-IB ehk IEEE-488 (bait-paralleelne kahesuunaline protokoll 1960-ndate lõpust);
- USB (mõõteriistadel veel tüüpiliselt vanamoodne versioon 2.0), mis on asendanud mõõtelahendustes RS-232 – asünkroonse järjestikpordi;
- LXI (*LAN extension for instrumentation*) – kohtvõrgu ühendusega liides (*Ethernet*);
- PXI (*PCI extension for instrumentation*) – PCI arvutisiini mugandus mõõtemaalma;
- muud kontrolleri maailmast tuntud nn „välisiinid“ (*fieldbus*);

### 8.1.2 HP-IB ehk IEEE-488

IEEE-488 on bait-paralleelse kahesuunalise digitaalse side spetsifikatsioon, töötamaks suhteliselt lühikestel vahemaadel (mõned meetrid). Süsteemis võib olla üks juhtkontroller (arvuti) või ka mitu (n-ö *multimaster*). Esimesena pakkus selle liidese välja mõõteseadmeid tootev firma Hewlett-Packard (nüüdne Keysight) 1960-ndate lõpus. See liides on tuntud ka üldotsarbelise (*general purpose interface bus*, GP-IB) siinina. Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon IEC selle siini standardinud IEC 60625-na (IEC 60625-1 ja IEC 60625-2) ning hiljem IEC 60488-na.

HP-IB ja IEEE-488 arengu ajajoon on kujutatud joonisel 8.1.



Joonis 8.1. HP-IB ja IEEE-488 areng

Aastal 1975 standardis IEEE siini programmeeritavate instrumentide standardse digitaalse liidesena, IEEE 488-na. Standardit muudeti 1987. aastal ja see nimetati ümber IEEE 488.1-ks (IEEE 488.1-1987). Need standardid vormistasid HP-IB siini mehaanilised, elektrilised ja põhiprotokolli parameetrid ehk liidese riistvarapoolse, kuid ei öelnud midagi käskude ega andmete vormingu kohta.

1987. aastal võttis IEEE standardiga IEEE 488.2 kasutusele ka standardsed koodid, vormingud, protokollid ja ühised käskud. Seda revideeriti 1992. aastal. IEEE 488.2 pakkus põhiliste käskude ja infovahetuse süntaksi- ja vorminguteostusi, aga ka seadmest sõltumatuid käskude, andmestruktuure, veaprotokolle jms. IEEE 488.2 käskud toimivad **ainult IEEE 488.1 (HP-IB) riistvaralisel** liidesel.

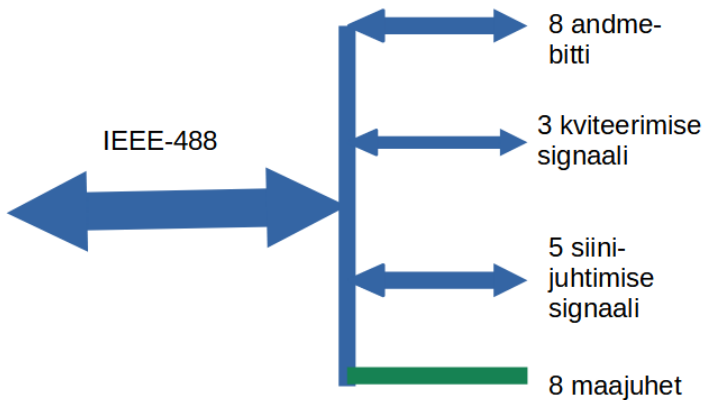
Edasi oli probleem, et kui IEEE-488.1 määratles ühe konkreetse liidese ja mõõteriista kaabli ühenduse riistvara ja IEEE-488.2 side protokollid, siis konkreetsete instrumendipõhiste käskude jaoks polnud endiselt standardit. Käskud sama klassi instrumentide, nt multimeetrite, juhtimiseks varieerusid tootjati ja isegi mudeliti.

Lahenduseks oli programmeeritavate instrumentide standardsete käskude (*standard commands for programmable instruments*, SCPI) standardi loomine 1990. aastal. Loodud standard on IEEE-488 lisakiht. Olulise

erinevusena IEEE-488.2-st saab SCPI käske kasutada erinevatel riistvara-liidestel – üle RS232/485, USB-, LAN- jt sidekaablite ja ühenduste.

### IEEE-488 omadused

IEEE-488 on 8-bitine, elektrilises mõttes paralleelne siin, kus on kasutusel 16 signaaliliini (juhet), millest kaheksat kasutatakse kahesuunaliseks andmeedastuseks, kolme kviteerimiseks ja viit siinihalduseks. Lisaks on kaheksa paralleelset „maa“-juhet (joonis 8.2).



Joonis 8.2. IEEE-488 kaabel

Kaabel ja selle ühendamise mõtteseadmega on näidatud joonisel 8.3. Pistik ja pesa on 24 kontaktiga ja D-kujuga. Kaableid saab ühendada mitmekaupa paralleelselt ühe seadme külge, et teostada täht- või muu vabalt valitav ühenduste konfiguratsioon.

Ühendussiin toetab 31 viiebitist esmast seadmeaadressi, mis on nummerdatud vahemikus 0 kuni 30, eraldades igale siinil olevale seadmele unikaalse aadressi.

Standard võimaldab kuni 15 seadmel jagada ühte füüsilist siini (kaablit), mille kogupikkus on kuni 20 meetrit. Füüsiline topoloogia võib olla lineaarne või tähtühendus (joonis 8.4).

Juhtimis- ja andmeedastusfunktsioonid on omavahel loogiliselt eraldatud. Nii võib kontrolleri pöörduda ühe seadme poole „kõnelejana“ ja olla ühe või mitme seadme „kuulajaks“, ilma et peaks andmeedastuses osalema. Sama siini võivad jagada mitu kontrolleri (arvutit), kuid ainult üks saab korraga olla „peremeheks“ andmesides.

Suurim andmeedastuskiirus oli esialgu umbes üks megabait sekundis. Hilisem HS-488 laiendus leevendab kviteerimise nõudeid, võimaldades kuni 8 MB kiirust.



Joonis 8.3. IEEE-488 kaabli ühendus mõõteseadmega (foto – T. Eikholm)

## LXI

HP-IB ühkes alternatiiviks on LAN-i (kohtvõrgu) laiendus instrumendile (LXI), mis tüüpiliselt kasutab Etherneti kaableid ja adaptereid. LXI-seadmed jagatakse klassidesse sõltuvalt **mõõtmiste sünkroniseerimise võimalustest**.

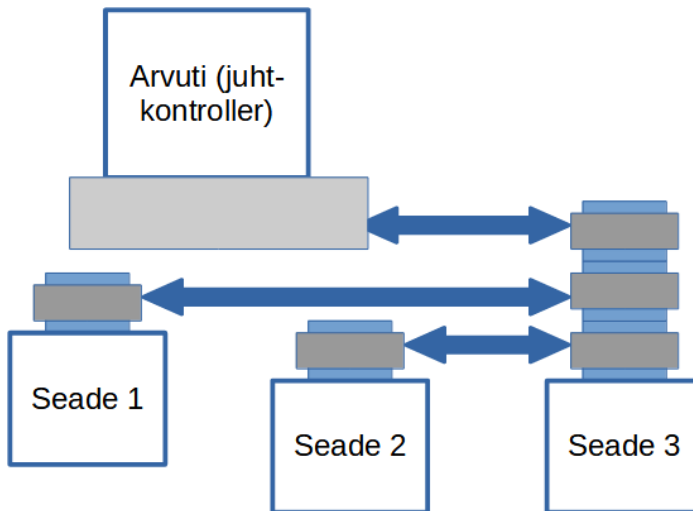
LXI klassid on:

- klass C. Pakub standardiseeritud kohtvõrgu ja veebilehitseja liidest, mis vastab LXI-standardile;
- klass C pluss. Pakub standardiseeritud kohtvõrgu ja veebilehitseja liidest, mis vastab LXI-standardile ja sisaldab lisaks füüsilise juhtmega käivituse (*trigeri*) siini (WTB) liidest;
- klass B. Pakub standardiseeritud LAN-liidest ja toetab tarkvaraliselt IEEE 1588 ajastusaspekte;
- Klass A. Pakub standardset LAN-liidest, IEEE 1588 tarkvaralist teostust ja füüsilise juhtmega käivituse (*trigeri*) siini (WTB) liidest.

### 8.1.3 Riistvara siinide võrdlus

Riistvara siinide võrdlus on toodud tabelis 8.1.





Joonis 8.4. IEEE-488 kaablite tähtühendus

Tabel 8.1. Sidesiinide parameetrid

Jrk	Nimetus	Tööstuslik tähis	Järjestik/paralleel-liides	Tüüpiline kiirus	Tüüpiline vahemaa
1	HP-IB	IEEE-488	paralleel	8 MB/s	kuni 20 m
2	USB	USB 1.1	järjestik	12 Mb/s	kuni 5 m
3	USB	USB 2.0	järjestik	480 Mb/s	kuni 5 m
4	LXI	LXI (klass A, B, C)	järjestik	kuni 1 Gb/s	kuni 100 m
6	PXI	PXI	paralleel	133 MB/s	emaplaadil

#### 8.1.4 IEEE-488.2 ja SCPI käsud

Nagu kirjeldatud, on IEEE-488.2 tarkvara kiht, mis töötab HP-IB (IEEE 488.1) riistvaralisel liidesel ning kirjeldab üldisi „süsteemi-“käskusid. Mõned näited IEEE-488.2 käskudest:

- \*CLS – instrumendi oleku nullimine (*clear status*);
- \*ESE – sündmuste oleku jälgimine lubatud (*event status enable*);
- \*IDN? – instrumendi identifikaatori (mh tüübi) küsimine (*identify*);
- \*RST – instrumendi lähtestamine (*reset*);

- \*WAI – ootamine (*wait*).

SCPI (*standard commands for programmable instruments*) käsustik lisas 1990. aastatel mõõtemaailma unifitseeritud käsusüsteemi ja andmete vahetuse sisemise loogika ning selle käsustiku kasutusnäited eri mõõteriistade juhtimisel.

SCPI ei ole enam seotud kitsalt HP-IB (IEEE 488.1) riistvaralise liidesega, vaid leiab kasutust ka RS232/485-, USB-, LAN- (LXI-), PXI- jt riistvaralistel mõõteriistade sideliidestel.

Näide: SCPI käsk digitaalsele multimeetrile (DMM), et lülitada see vahelduvpinge (AC) mõõtmiseks 20 V piirkonnal signaali 0,001 V eraldusvõime juures:

: MEASure:VOLTage:AC? 20, 0.001

## 8.2 Mõõte- ja testrakenduste tarkvara loomise vahendid

Graafilisteks (visuaalseteks) mõõte-, test- ja (nt protsessi) juhtimise rakenduste arendamise keskkondadeks on ennekõike LabVIEW ettevõtetelt *National Instruments* (NI) [54] ja *Keysight VEE* (algselt HP VEE – Hewlett-Packard Visual Engineering Environment) [55]. Mõlemad keskkonnad on paljuski sarnased:

- rakenduste puhul käib nii tööloogika kui ka kasutajaliidese loomine intuiitiivselt visuaalse programmi koostamisena;
- rakendused toimivad andmevoopõhiselt, st käsud täidetakse kohe, kui on saadaval andmed operatsioonide teostamiseks;
- enamiku NI, Keysighti ja teiste oluliste seadmefirmade instrumentide (multimeetrite, programmeeritavate toiteplokkide, ostsilloskoopide, spektrianalüsaatorite, multipleksorite jne) andmehõivega liidestamiseks rakendusega on olemas valmis draiverid;
- tegu on maksulise suletud tarkvaraga (millel on nii eeliseid kui ka tüli ja probleeme).

Allpool on taolist paradigmat avatud LabVIEW' kirjelduse kaudu, mis on enim levinud akadeemilises keskkonnas, aga mitte ilmtingimata tööstuses.

Mõõte- ja testrakendusi on võimalik teha ka tekstilistes programmeerimiskeeltes, nagu C#, C/C++, Python, Visual Basic (VB), sealhulgas näiteks Exceli (või LibreOffice'i Calci) sisse ehitatud VBA-rakendusega (*visual basic for applications*). Ka seda võimalust on allpool kirjeldatud.

### 8.2.1 LabVIEW' ülevaade

LabVIEW (*laboratory virtual instrument engineering workbench*) on USA firma *National Instruments* mõõtesüsteemide arenduse platvorm ja ühtlasi keskkond, mis kasutab visuaalset programmeerimist. LabVIEW põhineb graafilisel nn G-keelel. LabVIEW'd kasutatakse sensor- ja muude mõõteandmete hõiveks, mõõte- jm instrumentide juhtimiseks ning mitmesugustes test- ja tööstusautomaatika rakendustes. LabVIEW toimib eri operatsioonisüsteemidel, nii Microsoft Windowsil kui ka erinevatel Unixi, Linuxi, ja macOS süsteemidel. LabVIEW' üks versioone on LabVIEW 2021 (ilmus augustis 2021).

#### Andmevool põhinev programmeerimine

Kui tavaliselt põhineb tarkvara käsuridade järgnevusel, siis LabVIEW's kasutatav programmeerimise paradigma põhineb hoopis andmevool, täpsemalt andmete kättesaadavusel. Kui LabVIEW' mooduli (*subVI*) või funktsiooni jaoks on saadaval piisavalt andmeid, käivitab see vastava *subVI* või funktsiooni. Programmi täitmise voog on määratud graafilise plokk skeemi struktuuriga (mille taga on LabVIEW' lähtekood). Plokk skeem koosneb funktsionaalsetest sõlmedest, mis on sobival viisil ühendatud nn juhtmete (*wire*) abil.

Juhtmeid mööda liiguvad andmed ja nende vood (muutujad). Iga sõlm käivitub, kui kõik selleks operatsiooniks vajalikud sisendandmed on kättesaadavad. Kuna mitu sõlme võivad andmed kätte saada samaaegselt, saab LabVIEW rakendada tõhusat paralleelset andmetöötlust (juhul, kui seda toetab arvuti riist- ja tarkvara).

#### Graafiline programmeerimine

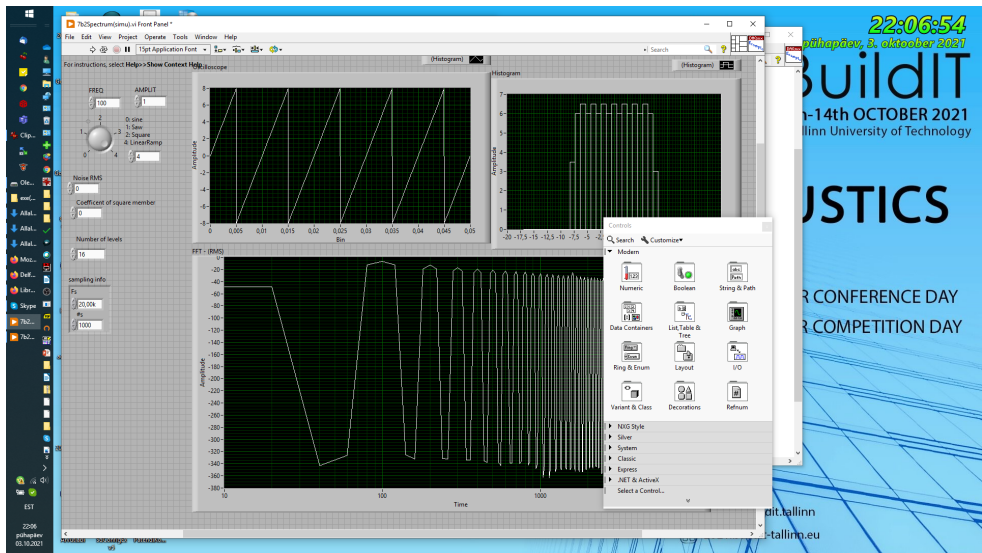
LabVIEW' rakenduses luuakse kasutajaliidesteks nn esipaneelid (*front panels*).

LabVIEW' (alam)programme nimetatakse virtuaalseteks instrumentideks (VI). Igal VI-l on kolm osa: plokk skeem, esipaneel ja pistikupaneel. Pistikupaneelis on loodud VI-moodul esitatud ühe graafilise plokina (moodulina) kasutamiseks teises, suuremas skeemis ja sellel on näidatud ühenduste võimalused teiste VI-dega (nn juhtmete ühendamiseks, mis kannavad vajalikke muutujate või parameetrite andmeid).

Esipaneelid (näide joonisel 8.5) on koostatud juhtnuppudest ja muudest juhtelementidest ning tulemuste näidikutest. Juhtelementid on kasutajaliidese sisendid: need võimaldavad kasutajal VI-le teavet edastada ja nii lahendust juhtida. Näidikud on väljundid, mis kuvavad VI tulemusi pärast sisendandmete töötlust. Tulemuste näitamiseks arvuti vmt seadme

## Peatükk 8. ARVUTIPÕHISED MÕÕTMISED

ekraanil on palju võimalusi. Näiteks saab kasutada „analoog-“ või „numbrilise“ näiduga tabloosid, aga ka lainekujude näitamise võimalusi (mh aja või sagedusvallas), imiteerides nt ostsilloskoobi või spektrianalüsaator ekraani.



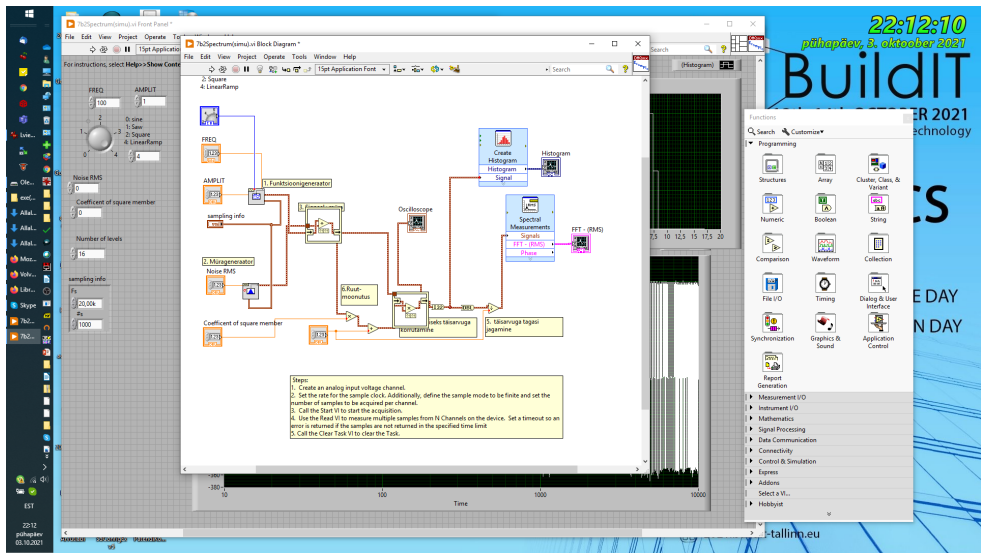
Joonis 8.5. LabView' esipaneeli (juhtnuppude ja näidikute) näide

Tagapaneelil (näide joonisel 8.6) on loodud lahenduse graafiline plokskeem, millele vastab graafiline lähtekood. Kõik esipaneelil olevad objektid näidatakse plokskeemil koos terminalidega, kuhu saab nn juhtmed ühendada. Lahenduse plokskeem sisaldab ka andmestruktuure ja funktsioone, mille abil esitatakse andmeid indikaatoritele. Struktuurid ja funktsioonid on rakendusse lisamiseks leitavad funktsioonide paletilt. Juhtelemente (k.a juhtnuppe), indikaatoreid (ja muid näidikuid), struktuure ja funktsioone nimetatakse sõlmedeks. Sõlmed on omavahel ühendatud nn juhtmete abil.

Näiteks summeerimisfunktsiooniga saab ühendada kaks juhtelementi ja indikaatori nii, et indikaator kuvab nende kahe juhtelemendi väärtuste summa. Seega saab VI-d käivitada programmina, kus esipaneel toimib kasutajaliidesena. Samal ajal saab VI olla osa-VI-ks (*subvi*) suuremas süsteemis. Iga VI-d saab hõlpsasti testida, enne kui see alamprogrammina suuremasse programmi sisse lülitatakse.

Graafiline lähenemine võimaldab ka mitteprogrammeerijatel programme koostada, kombineerides valmis VI-sid, mooduleid, funktsioone, juhtnuppe ja näidikuid. Samuti saab olulisi osasid kopeerida väga paljudest saadaolevatest LabVIEW' näidetest ja õppematerjalidest.

## 8.2. Mõõte- ja testrakenduste tarkvara loomise vahendid



Joonis 8.6. LabVIEW' tagapaneeli (plokk skeemi) näide

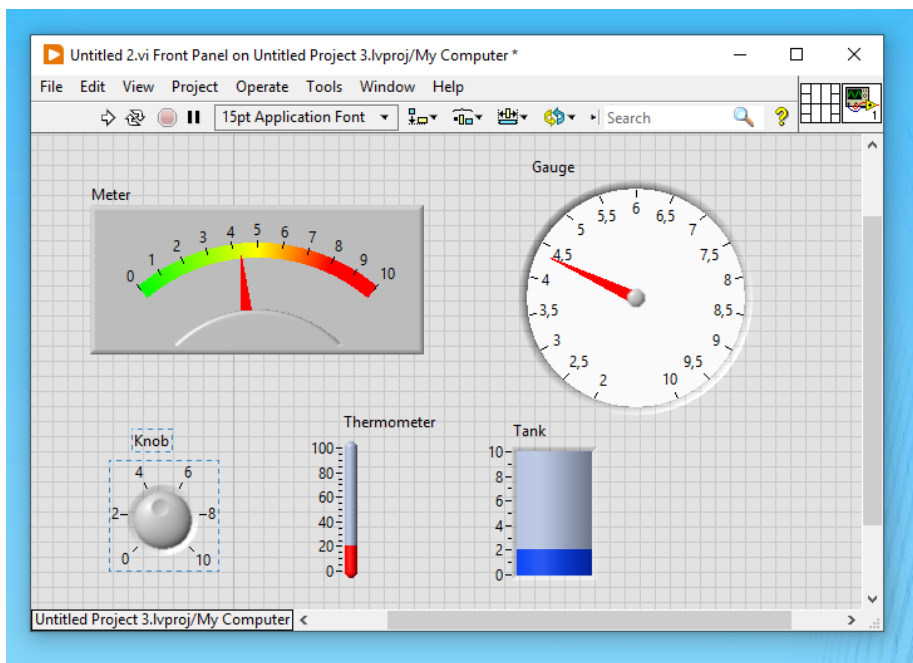
Programmeerimiskeskond LabVIEW koos kaasnevate näidete ja dokumentatsiooniga võimaldab hõlpsalt luua nii lihtsaid kui keerukamaid rakendusi. Keerukate algoritmide või suuremahulise koodi või reaalajaliste süsteemide puhul on aga oluline, et programmeerijal oleksid laialdased teadmised LabVIEW' programmeerimisvahenditest, mäluhaldusest ja programmi toimimise põhimõtetest.

LabVIEW'1 on olemas ka võimalus, et rakendus ei toimi mitte ainult LabVIEW' keskkonnas, vaid selle saab eksportida eralditoimivaks rakenduseks (nt exe-fail Windowsis). Siiski, kui arvutis ei ole tervet LabVIEW' arenduskeskkonda, peab lisaks eksportitud exe-failile olema installitud rakendust toetav keskkond, nn *LabVIEW Run-Time Engine*.

### LabVIEW' eelised

LabVIEW'1 on järgmised eelised:

- intuitiivne graafiline programmeerimine, mis ei nõua eriliste programmeerimiskeelte (nt C/C++, Python, Visual Basic) õppimist;
- andmevoo- (mitte programmi käskude järgnevuse) põhine programmi toimimine, mis vastab õigemini reaalsete pidevat toimeliste (mh nt protsessijälgimise ja -juhtimise) rakenduste loogikale;
- andmevoopõhine lähenemine võimaldab lihtsamini korraldada ka programmi paralleelset toimimist eri harudes ja seeläbi luua suure



Joonis 8.7. Labview' esipaneelil kasutatavate näidikute näiteid

jõudlusega reaalaajalisi mõõte-, test- ja juhtsüsteeme;

- LabVIEW' l on olemas palju näiteid ja suur kasutajate kogukond.

### LabVIEW' võimalikud puudused

LabVIEW' võimalikud puudused on järgmised:

- tegemist on ühe konkreetse firma (NI) maksulise suletud tootega, mis eeldab pidevat (nt iga-aastast) olulist kulu, et hoida litsentse värsketena;
- nagu ikka maksuliste tarkvaratoodete puhul, on vajalikud pidevad uuendused, mis nõuavad lisaressurssi (raha ja inimtööjõudu) keskkonna käiguhoidmiseks;
- kuna tegemist on suletud keskkonnaga, puudub kasutajate kogukonnal võimalus toodet ennast muuta;
- kuna tegu pole tekstilise programmeerimisega, võib olla keeruline automaatselt hallata arendatavate rakenduste versioone, muudatusi ja uuendusi, eriti meeskonnatöö puhul;

## 8.2. Mõõte- ja testrakenduste tarkvara loomise vahendid

- samuti ei saa lihtsalt võrrelda rakenduste eri variante „külj külje kõrval“ nagu tekstilisel programmeerimisel;
- (vähemalt vanematel LabVIEW' variantidel) puudub plokkdiagrammi vaate suurendamise võimalus ekraanil, mis teeb suuremate skeemide vaatamise väheülevaatlikuks ja ebamugavaks;
- nii arenduskeskkonna kui ka programmi enda *runtime*'i ehk „jooksutamise keskkonna“ puhul on tegemist väga mahukate failidega (gigabaitides).

### 8.2.2 Tekstilise programmeerimiskeele kasutamine

Mõõte- ja testrakendusi saab teostada ka tavalistes tekstilistes programmeerimiskeeltes, nagu C#, C/C++, Python, Visual Basic (VB), sealhulgas ka näiteks Excelisse (või LibreOffice'i Calc-i) sisse ehitatud VBA (*visual basic for applications*) rakendusega. Samuti on Matlabis olemas näited mõõteriistade juhtimise ja andmehõive teostuseks, mis võib olla mugav lahendus omada koos mõõteandmete hõivet, tulemuste töötlust ja analüüsi ning visualiseerimist.

Programmeerimiskeelte kasutamist hõlbustab asjaolu, et kõik olulised mõõteinstrumentide tootjad (nt Keysight, NI, Rohde & Schwarz, Tektronix jne) toetavad oma mõõteriistu teekidega, mis sisaldavad sisend-väljunddraivereid ja programmeerimisliideseid ning vastavaid näiteid.

Pythoni kasutamise näiteid test- ja mõõtelahenduste automatiseerimisel on toodud artiklites [56, 57].

C++ näiteid objektorienteeritud test- ja mõõtesüsteemide arendamiseks on toodud raamatus [58].

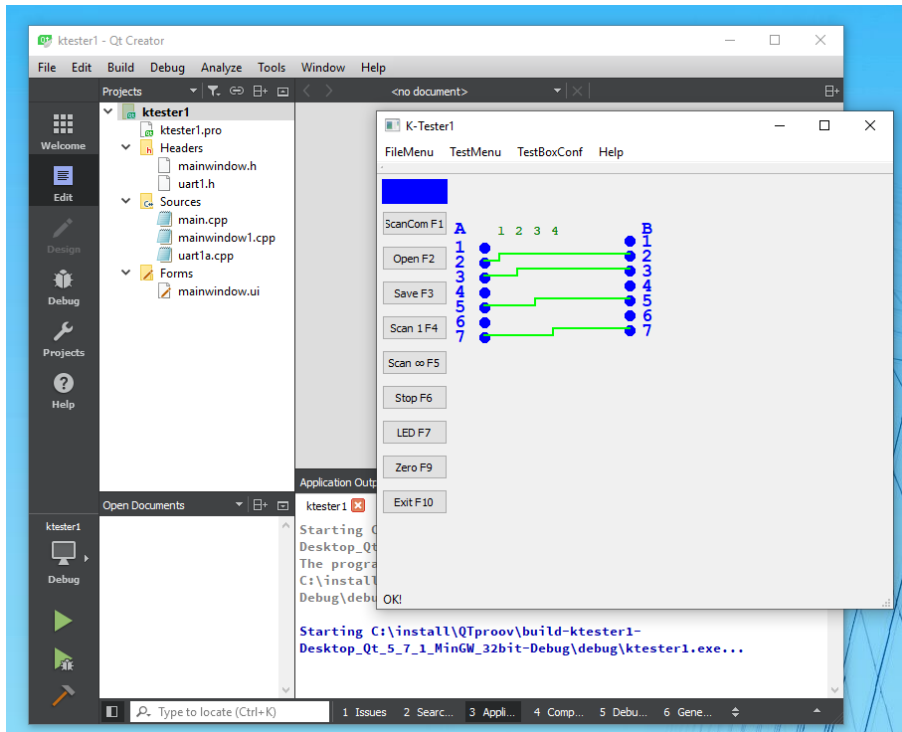
Kasutajaliidese tegemiseks test ja mõõterakendustele C/C++-s võib olla otstarbekas kasutada ka QT-keskkonda, mis töötab eri platvormidel (Linux, Windows, Android). Samuti saab QT graafilise kasutajaliidese funktsioone välja kutsuda Pythoni skriptidest. Üks autori tehtud QT testrakenduse näide kaablite testimiseks on toodud joonisel 8.8.

### Tekstilise programmeerimiskeele eelised

Tekstilise programmeerimiskeele kasutamise eelised mõõte- ja testrakendustes on järgmised:

- programmikood võib olla väga kompaktne (nt Windowsi exe või VBA või Pythoni skript) – alates mõnekümnest või mõnesajast kilobaidist – ning töötada reaalaajas väga sujuvalt;

## Peatükk 8. ARVUTIPÕHISED MÕÕTMISED



Joonis 8.8. QT ja C/C++ näide

- mainitud asjaolud teevad lihtsamaks ka rakenduse rakendamise väljaspool arendusarvutit, teistes (töö)arvutites, ja saab kasutada tehniliselt vähem nõudlikke arvuteid;
- rakendus saab töötada harjumuspärases andmeanalüüsi keskkonnas (nt Matlabi puhul);
- paljud kompilaatorid ja interpretaatorid (C/C++, Python, VBA koos LibreOffice'iga) on vabavara ja tihti ka avatud lähtekoodiga;
- on olemas suhteliselt vabalt kasutatavaid multiplatvormseid (nt Windows, Linux) graafilise kasutajaliidese keskkondi (nt QT);
- Python koos oma lisavõimaluste ja teekidega; nt *numpy* toetab reaalarvuliste ja kompleksväärtuste massiivide ja maatriksite kiireid teisendusi ja paindlikke andmetüüpe, mh liste ja nn andmeraame (*dataframes*), mis on kasutatavad nt pythoni Panda teegiga; VISA teostus Pythonile – *VisaPy* – teeb mõõteriistadega tarkvaralise suhtluse lihtsaks ning võimaldab tõhusat mõõte- jm andmete haldamist, tötlust ja analüüsi. Visualiseerida saab mõõtetulemusi näiteks Matplotlib Pythoni teegiga.



### Virtuaalne instrumentaaltarkvara arhitektuur (VISA)

Virtuaalne instrumentaaltarkvara arhitektuur (*virtual instrument software architecture*, VISA) on testimis- ja mõõtmisrakendustes (T&M) laialdaselt kasutatav rakendusliides (API) arvutist instrumentidega suhtlemiseks. VISA on tööstusstandard, mida rakendavad paljud T&M-i ettevõtted, nagu Anritsu, Bustec, Keysight Technologies, Kikusui, National Instruments, Rohde & Schwarz, Tektronix. VISA liidese kaudu on lihtne siduda eri programmeerimiskeeltes (Python, C/C++ vms) teostatud tarkvara mõõteriistadega. Selle temaga on lähedalt seotud „Vahetatavate virtuaalsete instrumentide sihtasutus“ (*Interchangeable Virtual Instruments Foundation*, IVI; vt ka nende veebisaiti (<https://www.ivifoundation.org/>)).

Allpool on toodud lihtne näide VISA kasutusest Pythoniga (*VisaPy*). Selles näites küsitakse HP-IB-siinil olevalt mõõteriistalt aadressiga 12 identifikaatorit (IDN?):

```
import pyvisa
rm = pyvisa.ResourceManager()
rm.list_resources()
inst = rm.open_resource('GPIB0::12::INSTR')
print(inst.query("*IDN?"))
```

### Tekstiliste programmeerimiskeelte puudused

Tekstilise programmeerimiskeele kasutamise võimalikud puudused mõõte- ja testrakendustes on järgmised:

- programmeerimiskeeled nõuavad nende süntaksi ja tööriistade (tarkvara kompilaatorite ja interpretaatorite) kasutuse oskust ja kogemust;
- kasutajaliidese tegemine võib olla suhteliselt suur töö, kuna tüüpiliselt üldotsarbeliste programmeerimisvahendite puhul ei ole mõõtespetsiifiliste virtuaalsete juhtnuppude ja näidikute valikuid („palette“);
- reaalajaliste paralleeltöötusega rakenduste loomine nõuab programmeerimisoskust ja terminaalseadme operatsioonisüsteemist arusaamist (või vähemalt on see eeliseks).

### 8.3 Andmehõiveseadmed mõõtmisteks

Allpool toome mõned näited Tallinna Tehnikaülikooli mõõteelektronika laboris kasutatavatest andmehõiveseadmetest.

#### NI USB-6215 andmehõiveseade

Seadme USB-6215 (ettevõtte National Instruments) foto on toodud joonisel 8.9a. Tegemist on lihtsama ja odavama seadmega, millel on 16-bitine multipleksitud (16 mõõtekanalit) analoogsisend (AI) ja kaks analoogväljundit (AO). Võendamissagedus on nii AI kui ka AO osas kuni 250 ks/s. Samuti on seadmel neli digitaalset (binaarset) sisendit ja väljundit.

#### Keysighti U2500A seeria seadmed

Keysighti U2500A seeria modulaarsete USB-andmehõiveseadmete iseärasuseks on kuni nelja paralleelse 14- või 16-bitise analoog-digitaalmuunduri olemasolu (suurim võendussagedus  $f_s = 2 \text{ Ms/s}$ ). Ühe seadme (Keysight U2531A) pilt on toodud joonisel 8.9b.

#### NI USB-6259 andmehõiveseade

Ühe võimekama seadme – USB-6259 (ettevõtte National Instruments) fotod on toodud joonistel 8.9c (esipaneel) ja 8.9d (tagapaneel).

NI-6259 seeria andmehõive seadmete põhiomadused on järgmised:

- 32 analoogisisendit (NB! seadmel on üksainus analoog-digitaalmuundur ning sisendid on multipleksitud ehk põhimõte on „üks mõõtmine korraga“);
- võendamissagedus  $f_s = 1,25 \text{ Ms/s}$  (mitme kanaliga mõõtmisel üle kõigi analoogkanalite agregateeritult kuni  $1 \text{ Ms/s}$ );
- 48 binaarset digitaalset sisendit ja väljundit (DIO);
- 4 paralleelset 16-bitist analoogväljundit (AO);
- sisendpinge piirkonnad on valitavad:  $\pm 0,1 \text{ V}$ ,  $\pm 0,2 \text{ V}$ ,  $\pm 0,5 \text{ V}$ ,  $\pm 1 \text{ V}$ ,  $\pm 2 \text{ V}$ ,  $\pm 5 \text{ V}$ ,  $\pm 10 \text{ V}$ .

### 8.3. Andmehõiveseadmed mõõtmisteks



(a) NI USB-6215



(b) Keysight U2531A



(c) NI USB-6289 esipaneel



(d) NI USB-6289 tagapaneel

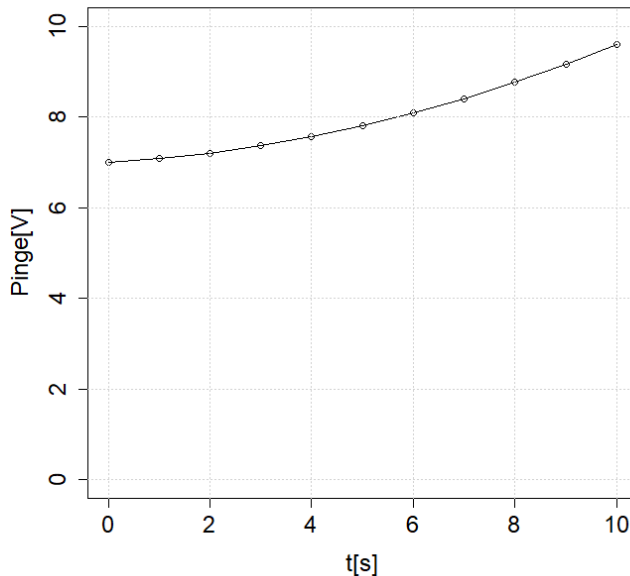
Joonis 8.9. Andmehõiveseadmete näiteid (fotod – T. Eikholm)

## Kordamisküsimused

1. Milline elektroonika areng võimaldas teha mõõteriistad arvuti poolt juhitavaks?
2. Mis on arvutiga mõõtmiste eelis?
3. Mis on LabView's mõõterakenduste tegemise eeliseks ja mis võimalikuks puuduseks?
4. Mis on tekstilistes programmeerimiskeeltes (nt Python, C/C++) mõõterakenduste tegemise eeliseks ja mis võimalikuks puuduseks?
5. Mis aastast on tuntud liides HP-IB?
6. Mis erinevus on IEEE-488.1 ja .2 standarditel?
7. Millest oli tingitud vajadus SCPI järele?
8. Mida tähendab lühend LXI mõõtetehnikas? Millised seadmete klassid on LXI-s?

## 9. SPEKTRAALSED MÕÕTMISED

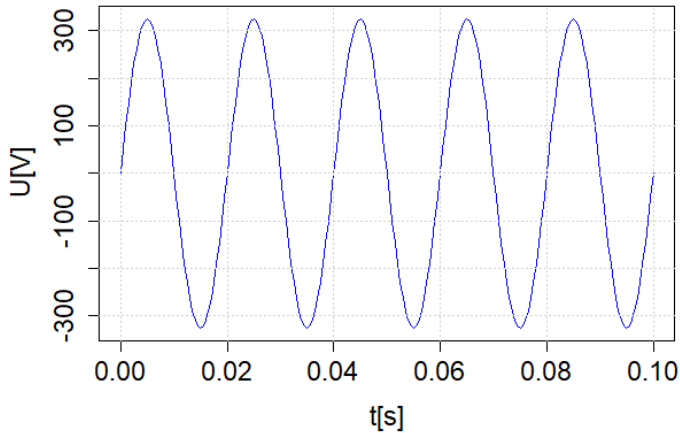
Mõõdetav suurus võib olla antud ajas aeglaselt muutuva väärtusena (nt temperatuur toas või õues, takistusliku tensoanduriga hinnatav mehaaniline deformatsioon või patarei alalispinge), nagu on kujutatud joonisel 9.1.



Joonis 9.1. Aeglaselt muutuva mõõtesignaali ajavallas esitamise näide

Mõõdetav suurus võib aga olla ka perioodiliselt muutuva hetkväärtusega, näiteks vahelduvvoolu pinge koduses 230 V / 50 Hz elektrivõrgus, mis on ajavallas esitav lihtsa siinusena ehk „harmoonilise“ lainekujuna, nagu näidatud joonisel 9.2.

Samuti on perioodilised näiteks mehaaniliselt pöörlevate masinavärkide (nt tööpingid, veeremid) sensorite poolt mõõdetavad suurused.



Joonis 9.2. Kodumajapidamises oleva 50 Hz 230 V efektiivväärtusega pinge kuju ajavallas

Perioodilisi mõõtesignaale võib olla mõistlik mõõta ja esitada mitte hetkeväärtuste lainekujuna (nagu näeksime seda ostilloskoobi ekraanil, ajafunktsioonina), vaid sagedusvallas (ehk spektrina). Lihtsaim ja „loomulikem“ perioodiline signaal on siinuselise lainekujuga, mida saab iseloomustada võrrandiga:

$$U(t) = a_1 \cdot \sin(\omega_1 \cdot t + \varphi_1) = a_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi_1), \quad (9.1)$$

kus  $a_1$  on siinussignaali amplituud,  $f$  on sagedus,  $\omega_1$  on nurksagedus (rad/s) ja  $\varphi_1$  on algaasinurk.

Reaalse maailma perioodilised signaalid võivad olla ka keerukama kujuga kui lihtne siinuslaine.

Fourier' (*Joseph Fourier, Prantsuse füüsik ja matemaatik, 1768–1830*) analüüsi ehk signaali **ajavallast sagedusvalda** teisenduse aluseks on mõte, et perioodilisi signaale saab esitada nn **Fourier' ridadena** ehk siinuseliste lainekujude summana.

## 9.1 Fourier' read

### 9.1.1 Üldist Fourier' ridadest

Fourier' teisendus lähtub ideest, et perioodilisi signaale saab esitada eri amplituudide ja faasidega siinuste summana, nn **Fourier' reana**:

$$U(t) = a_0 + a_1 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_1) + a_2 \cdot \sin(2 \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_2) + \dots \quad (9.2)$$

Siin

- $a_0$  on alalis- (ehk nullsagedusega) komponent;
- $a_1$  on põhinurksagedusega  $\omega_0$  ja algfaasiga  $\varphi_1$  komponendi amplituud;
- $a_2$  on kahekordse põhinurksagedusega  $2 \cdot \omega_0$  ja algfaasiga  $\varphi_2$  komponendi amplituud;
- jne.

Noteerides Fourier' rida lõputu summana üle kõigi täisarvkordsete põhisageduse komponentide, saame:

$$U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t + \varphi_k). \quad (9.3)$$

Siin  $k = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$  on (nurk)sageduse harmooniku järjekorranumber (indeks),  $a_k$  on vastava siinuse (ehk harmoonilise võnkumise) komponendi amplituud ja  $\varphi_k$  on algfaas.

Nurksagedusi saab avaldada hertsides antud lainekuju põhisagedusest  $f_0$ :

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0. \quad (9.4)$$

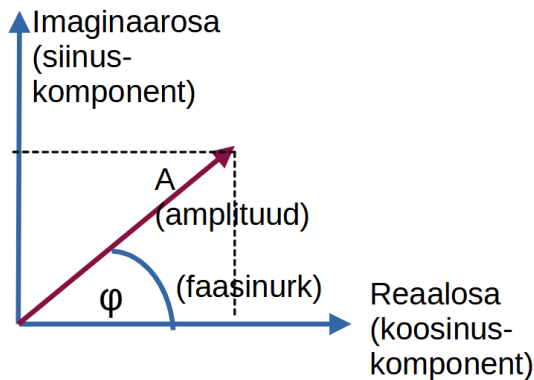
ja

$$\omega_k = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot f_0. \quad (9.5)$$

Alternatiivselt signaali iga sageduskomponendi esitamisele tema amplituudi ja algfaasi kaudu saame Fourier' rida esitada ka vastavate (nurk)sageduste siinuste (koefitsentidega  $a_k$ ) ja koosinuste (koefitsentidega  $b_k$ ) kaalutud summana.

$$U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cdot \sin(k \cdot \omega_0 \cdot t) + b_k \cdot \cos(k \cdot \omega_0 \cdot t). \quad (9.6)$$

Mõlemad, nii 9.3 kui ka 9.6 on olulised ja teineteist täiendavad Fourier' ridade esituste viisid. Esimene valem esitab signaale siinuste amplituudide ja faasinurkade kaudu, teine siinuste ja koosinuste summana. Esimene viib kompleksarvudena moodul-faas- (**polaarkoordinaatides**) ja teine reaali-imaginaarosadena (**ristkoordinaatides**) antud kujuni. Seos nende kahe esituse vahel on näidatud joonisel 9.3.

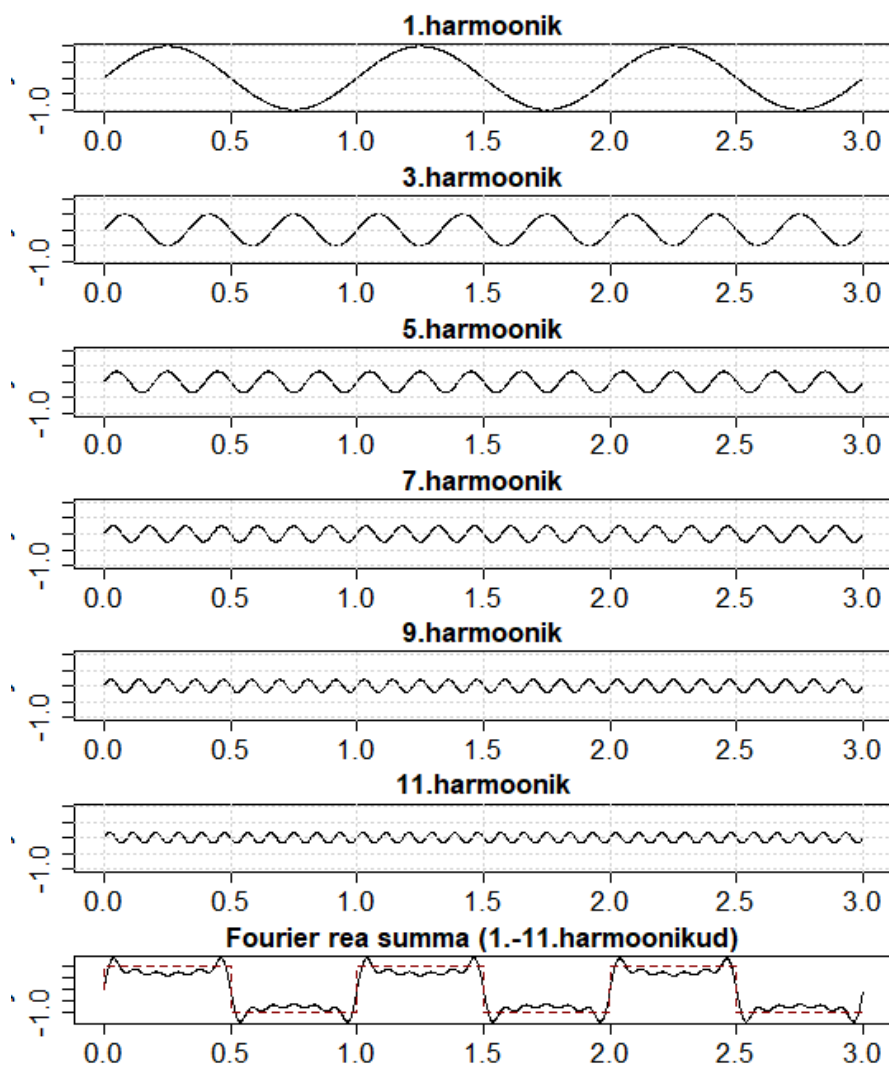


Joonis 9.3. Signaali harmoonilise komponendi amplituudi ja faasi ning reaali ja imaginaarosa seos

### 9.1.2 Fourier' rea näide

Fourier' rea näide on toodud nelinurksignaali jaoks (joonis 9.4). Teatavasti (nagu on lihtne näidata ka Fourier' teisendusega, mis on toodud järgnevatel osades), saab taolist nelinurka esitada paaritute harmoonikutega ( $k = 1, 3, 5, 7, \dots$ ) summana, kusjuures iga vastava harmooniku amplituud on  $a_k = 1/k$ . Kuna reaalses maailmas teostatakse nii Fourier' analüüsi kui ka Fourier' ridadesse arendamist üle lõpliku arvu sageduste, siis saadud lähendus lähendab algupärast signaali mingi täpsusega. Näiteks joonisel 9.4 toodud alumine kõver näitab nelinurkse lainekuju lähendust juhul, kui piirduetakse põhissageduse harmoonikutega  $k = 1, 3, 5, 7, 9, 11$ .





Joonis 9.4. Fourier' rea näide

### 9.1.3 Euleri valem ja Fourier' rea kompleksesitus

Siinuste ja koosinuste paare igal harmoonilisel sagedusel saab esitada komplekssete eksponentfunktsioonide kaudu, mis teeb Fourier' ridade (ning üldisemalt Fourier' otse- ja pöördteisenduste) matemaatilise esituse kompaktsemaks.

Abiks on selles Euleri (*Leonhard Euler, Šveitsi matemaatik ja füüsik, 1707–1783*) valem:

$$e^{i \cdot x} = \cos(x) + i \cdot \sin(x), \quad (9.7)$$

mida saab esitada ka kujul:

$$\cos(x) = \frac{e^{i \cdot x} + e^{-i \cdot x}}{2}, \quad (9.8)$$

$$\sin(x) = \frac{e^{i \cdot x} - e^{-i \cdot x}}{2}, \quad (9.9)$$

Siin  $i$  on kompleksarvu imaginaarühik:

$$i = \sqrt{-1} \quad (9.10)$$

Kasutades Euleri valemit, saab näidata, et Fourier' rida saab esitada komplekskujul:

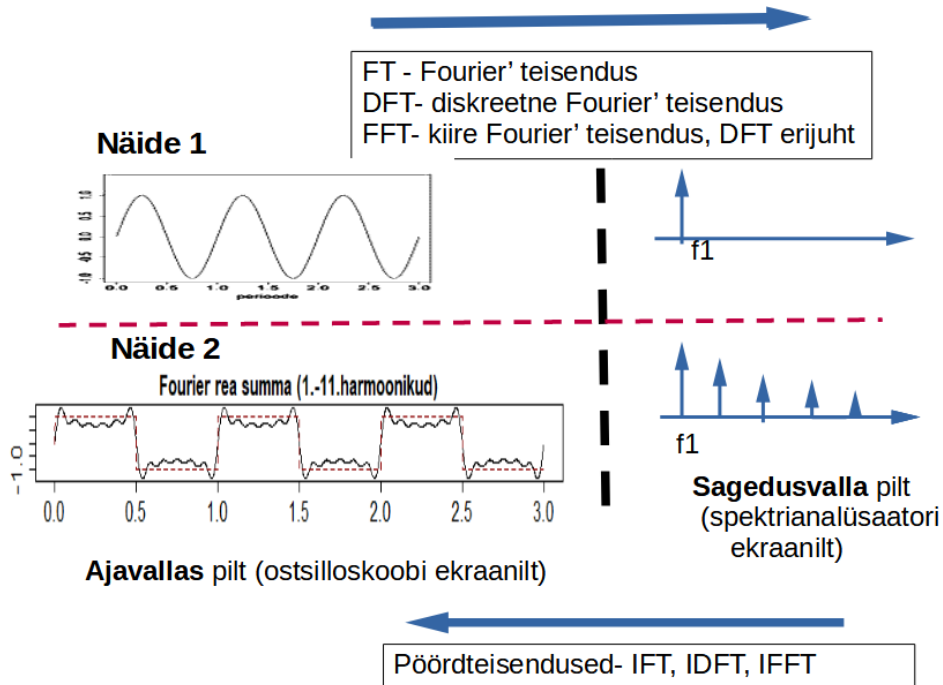
$$U(t) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \cdot e^{i \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t}. \quad (9.11)$$

Komplekskordajate  $c_k$  reaalosa on sisuliselt koosinus- ja imaginaarosa siinuskomponendi amplituudide väärtused antud sagedusel.

## 9.2 Fourier' teisendus ja pöördteisendus

Fourier' teisendust [59] (*Fourier' transform*, FT) kasutatakse ajavallas antud signaali teisendamiseks sagedusvalda ning Fourier' pöördteisendust (*inverse Fourier' transform*, IFT) sagedusvallast ajavaldaks teisenduseks, nagu näidatud joonisel 9.5.

Kuigi nii aja- kui ka sagedusvallas on signaalid pidevad ehk päris elus antud analoogkujul, on siiski enamasti mõistlik kasutada hoopis teisenduste (DFT, IDFT) diskreetseid variante. Sellisel juhul on signaal ja sagedusspekter antud diskreetselt, teatud võendamise- ja arvutus-punktides. Loomulikult peab võendamise ja arvutamise ning tulemuse esituse samm (diskreetsus) olema piisavalt väike konkreetse rakenduse kontekstis. Kuna diskreetsel arvutusjuhtudel asendub integreerimine Fourier' baasfunktsioonide (ehk siinuste-koosinuste koefitsientide) ja signaali hetkväärtuste korrutiste summeerimisega, on taoline arvutamine lihtsam ja tõhusam ning sobilikum tänapäevastele numbrilistele arvutitele, mikrokontrolleritele ja digitaalsetele signaaliprotsessoritele. Siiski, nagu näidatud ka sünkroonmõõtmiste osas, võib teatud juhtudel olla ühel sagedusel kompleksse Fourier' väärtuse leidmine mõistlik ka analoogtehnikas, pidevatoimelise signaalitöötlusega.



Joonis 9.5. Fourier' teisendus ja pöördteisendus

Diskreetsete teisenduste (DFT, IDFT) erijuhud on nn kiired (ehk arvutuslikult tõhusad) Fourier' otse- ja pöördteisendused, (*fast Fourier transform*, FFT) ja (*inverse fast Fourier transform*, IFFT). Sellest allpool.

### 9.2.1 Fourier' teisendus ja pöördteisendus üldjuhul

Siin ja edaspidi kasutatakse imaginaarosa ühikuna  $i$  asemel  $j$ , nagu on levinud elektroonsete mõõtmiste vallas.

Fourier' teisendus ja pöördteisendus üldjuhul ehk üle pideva signaali on antud valemitega [59]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt, \quad (9.12)$$

ja

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega. \quad (9.13)$$

Siin  $\omega$  on signaali nurksageduse üks konkreetne väärtus tervest pidevast spektrist,  $x(t)$  on (mõõte)signaal ajavallas ja  $X(\omega)$  sagedusvallas.

### 9.2.2 Fourier' teisendus ja pöördteisendus diskreetsel juhul

Kõige lihtsam ja igapäevaelus kõige praktilisem on juht, kus mõõdetav signaal on antud ajavalla punktidenä (võenditena) ning ka sagedusvallas on signaal esitatud diskreetselt [59].

Sellisel juhul teisenevad valemid 9.12 ja 9.13 järgmisteks valemiteks:

$$X(\omega_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT)e^{-j\omega_k n} \quad (9.14)$$

ja

$$x_n(nT) = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^{N-1} X_k(\omega_k)e^{j\omega_k n}, \quad (9.15)$$

kus

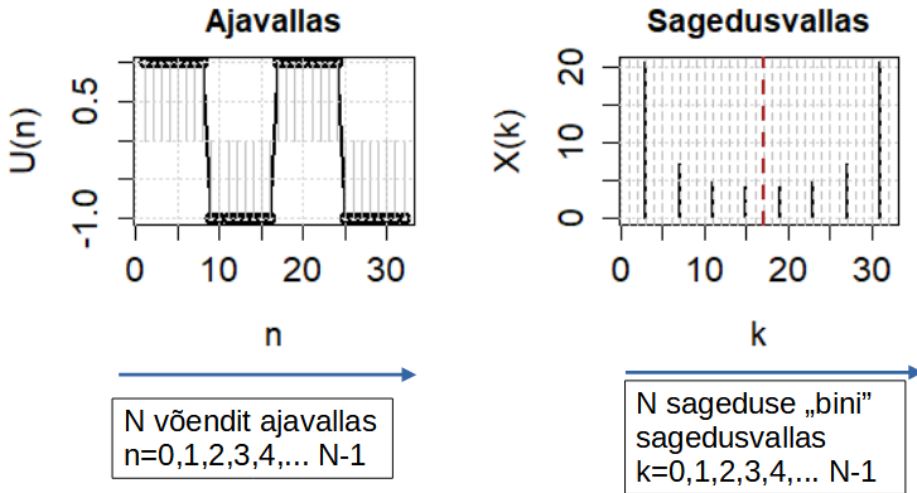
- $x(nT)$  on ajavalla signaal, antuna diskreetsel ajahetkedel ( $nT$ ), kus  $T$  on võendamissamm ajas ja  $n$  on konkreetse võendi indeks:  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ;
- $\omega_k$  on  $k$ . nurksagedus,  $\omega_k = 2\pi \cdot fs \cdot k/N$ , kus  $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1)$ ;
- $N$  on punktide arv, üle mille arvutus toimub: ühelt poolt võendite arv analüüsiaknas, teiselt poolt spektrijoonte (nn *sagedusbinide*) arv.

Joonisel 9.6 on kujutatud näide, kus nelinurkse lainekujuga signaal on analüüsiaknas antud 32 võendiga ( $N = 32$ , võendid on indekseeritud  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, 31$ ) ja samuti on spekter antud 32 joonega ( $k = 0, 1, 2, \dots, 31$ ). Sealjuures on esimesed 16 joont (indekseeritud kui  $k = 0, 1, 2, \dots, 15$ ) sõltumatud, aga teine pool arvutatud spektrist ( $k = 16, 17, \dots, 31$ ) on spektri alumise poole sümmeetriline peegelpilt.

Samuti mainime, et siin pole arvutatud negatiivsete sageduste osas spektrit ( $k = -1, -2, \dots$ ), mis on sümmeetriline positiivse poolega ega lisa uut teadmist signaali kohta.

### 9.2.3 Kiirest Fourier' teisendusest

1960-ndatel pakkusid Cooley ja Tukey [60] välja algoritmi, kuidas diskreetsel Fourier' teisendust ja pöördteisendust (DFT ja IDFT, valemid 9.14 ja 9.15) matemaatiliselt tõhusalt korraldada, nn kiire algoritmiga.



Joonis 9.6. Diskreetne Fourier' teisendus (näide)

Kiire algoritm põhineb tähelepanekul, et siinuse ja koosinuse väärtused, mis on Fourier' teisenduse koefitsentideks, on esiteks ajas perioodilised ja teiseks sümmeetrilised (pluss- või miinusmärgiga) funktsioonid. See asjaolu võimaldab arvutusi korraldada, tuues korduvad koefitsentide väärtused avaldistes sulgude ette. Kuna kiire Fourier' teisendus (FFT) põhineb tüüpilisel juhul DFT pideval poolitamisel, on tõhusaks arvutamiseks hea omada 2-astmelist punktide arvu, nt  $N = 256, 512, 1024$  jne. Vajaduse korral saab andmerea lõppu lisada nulliseid väärtusi (nn *zero-padding*).

Kuna Fourier' diskreetne otse- ja pöördteisendus (DFT ja IDFT) on matemaatiliselt arvutuskeemilt väga sarnased, on sarnased ka FFT ja IFFT (kiire Fourier' otse- ja pöördteisendus) ning nende praktilised teostused tarkvaras.

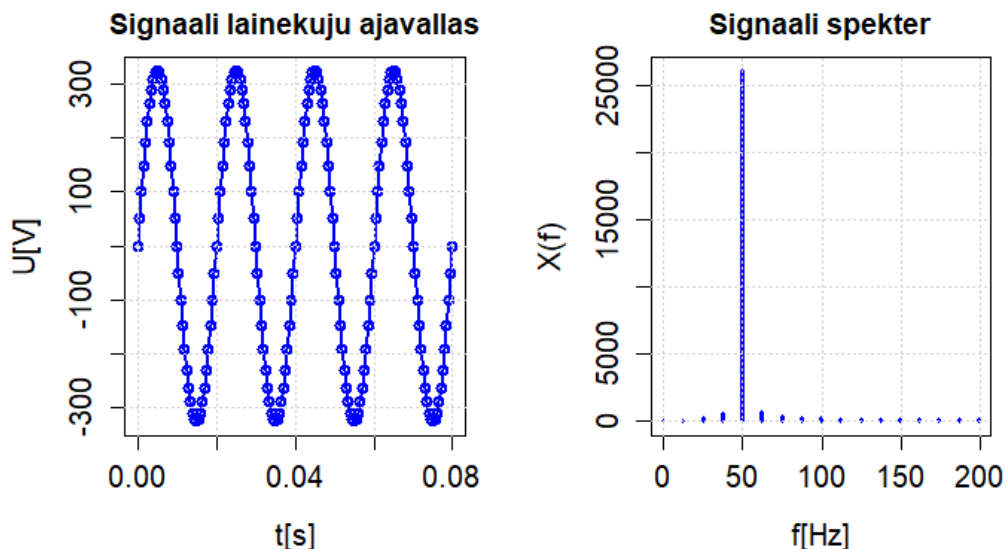
Täpsemalt FFT ja IFFT algoritmi teostusest vt [59]. Praktiliseks ja käepäraseks kasutuseks on FFT ja IFFT valmis algoritmina olemas Matlabis, R-is, Pythonis, Labview's jne.

### 9.3 Lõpliku analüüsiakna probleem

Fourier' teisendus (vt valem 9.12) eeldab, et analüüsitav signaal on antud miinus lõpmatuses pluss lõpmatuseni ja arvutamine toimub üle selle ajas lõpmatu lainekuju. Loomulikult pole reaalsuses selline mõõtesignaali hõive ega vastav lõpmatu arvutus võimalik. Reaalsuses kasutatakse

enamasti aga digitaliseeritud signaali ja DFT-d, kus on kindel arv ( $N$ ) võendeid analüüsiaknas (valem 9.14).

Kui analüüsiaknas on täisarv signaali perioode, näiteks täpselt 4 perioodi 50 Hz / 230 V pinget, on DFT-ga arvatud signaali spekter õige, näidates ühte 50 Hz sageduskomponenti (joonis 9.7).

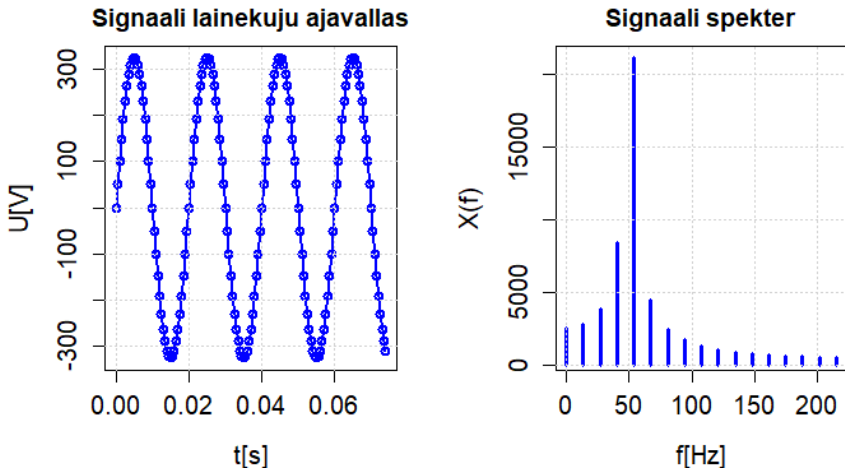


Joonis 9.7. Fourier' teisendus üle signaali 4 perioodi

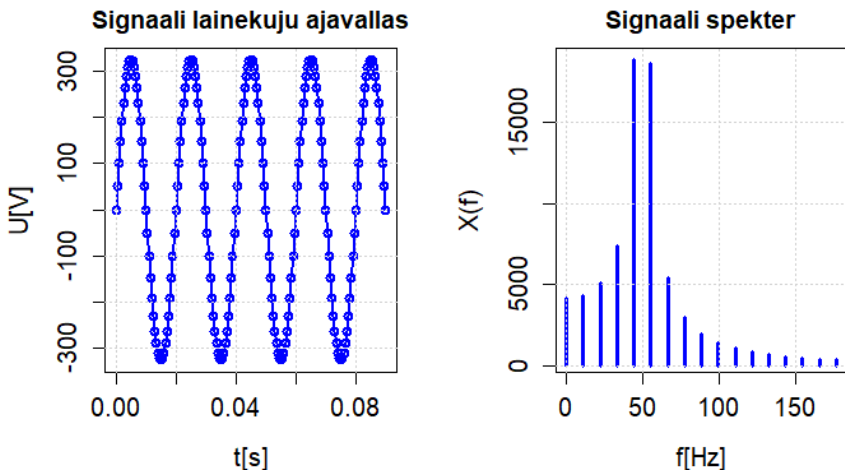
Aga kui analüüsiaknasse võtta mitte täisarv perioode, näiteks 3,7 või 4,5 perioodi, näitab spektrianalüüs (DFT tulemus) suurt arvu spektrijooni, nagu näidatud joonistel 9.8 ja 9.9. Sellist nähtust nimetatakse spektri lekkeks (*spectral leakage*).

Probleemi (spektri vale esitus) lahendamiseks on järgmised võimalused:

- **eelistatuim** variant on tagada mõõtmisel **sünkroonsus** ehk olukord, kus analüüsiaknas on **täpselt täisarv** signaali perioode, vajaduse korral selleks võendamissagedust adaptiivselt järelhäälestades mõõdetava signaali sageduse järgi;
- kuna probleem tekib, kui lisaks täisperioodidele on analüüsiaknas ka murdosa perioodist, siis sellest tingitud suhtelist viga saab vähendada, kasutades võimalikku pikka analüüsiakent võimalikult suure arvu mõõdetava signaali täisperioodidega;
- teatud abi on aknafunktsioonide kasutamisest, rakendatuna analüüsiaknas olevale signaalile, nagu näidatud allpool.



Joonis 9.8. Fourier' teisendus üle signaali 3,7 perioodi



Joonis 9.9. Fourier' teisendus üle signaali 4,5 perioodi

Näiteks elektrivõrgu kvaliteedi mõõtmise standardis (EVS-EN 50160:2010) on eelistatult elektrivõrgu tunnussuuruste mõõtmine ette nähtud sünkroonses režiimis ning kui sünkroniseerimine 50 Hz võrgusagedusega ei õnnestu, kasutatakse aknaga mõõtmist. Vastavat sünkroonses mõõtmisega lahenduse näidet on kirjeldatud artiklis [61].

### 9.3.1 Aknafunktsioonide kasutamine

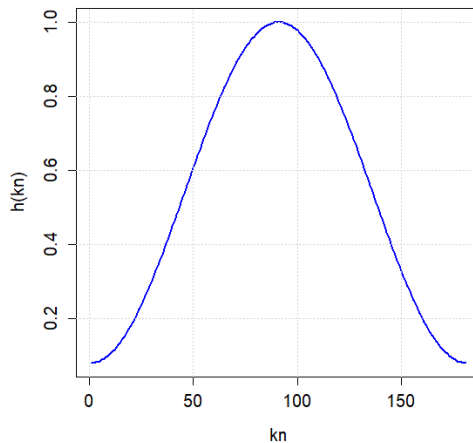
Signaalitöötluses, ka Fourier' analüüsis, kasutatakse tihti analüüsitava signaali korrutamist ajas teatud aknafunktsiooniga [59], mis kannavad nimesid Hanning, Hamming, Blackman, Kaiser-Bessel jpt. Samuti on võimalik ise sünteesida mõne kriteeriumi mõttes optimaalseid aknafunktsioone. Aknafunktsioone iseloomustab asjaolu, et nad omavad ühikulist maksimumväärtust akna keskel ning edasi (ja tagasi) kaalufunktsiooni väärtus kahaneb sümmeetriliselt mõlemale poole, kuni jõuab nulli lähedale akna piiril.

Näiteks võib tuua *Blackmani* akna, mis on antud funktsiooniga

$$h = 0.54 + 0.46 \cdot (\cos(n - N_2) \cdot 2 \cdot \pi / N). \quad (9.16)$$

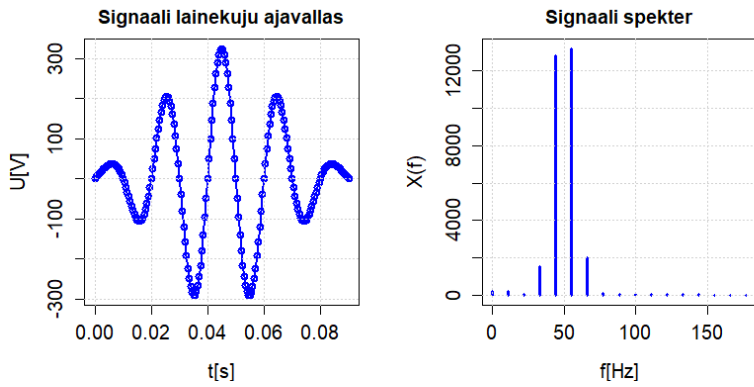
Siin  $n = 0, 1, 2, 3, \dots, (N - 1)$ , kus  $N$  on analüüsiaknas olevate võendite arv ja  $N_2 = (N - 1)/2$  paaritu arvulise  $N$  korral.

Näide: Fourier' analüüs üle 4,5 perioodi 50 Hz signaali, kasutades Blackmani akent (joonis 9.10), annab oluliselt õigema spektri tulemuse (joonis 9.11) võrreldes eespool toodud ilma aknata analüüsi juhuga (joonis 9.9).



Joonis 9.10. Blackmani aknafunktsioon üle andmehõive akna





Joonis 9.11. Fourier' teisendus üle signaali 4,5 perioodi, aknafunktsiooni kasutamisega

## Kordamisküsimused

1. Milliste mõõtesignaalide puhul on mõistlik nende spektraalne (sagedusvallas) esitus?
2. Millisel eeldusel põhineb Fourier' analüüsi ja Fourier' ridade kasutamine?
3. Mis variandid on Fourier' teisendusest ja pöördteisendusest?
4. Mis erinevus on Fourier' teisendusel ja diskreetsel Fourier' teisendusel?
5. Mis võib juhtuda ajavallas lõpliku pikkusega signaali analüüsiakna kasutamisel Fourier' analüüsil? Kuidas seda nähtust nimetatakse? Mis selle vastu aitab?
6. Miks kasutatakse Fourier' analüüsil vahel ajavalla aknafunktsiooni?
7. Võrreldes Fourier' teisenduse ja pöördteisenduse (või vastavate diskreetsete teisenduste) matemaatilist esitust, milline sarnasus ja milline erinevus hakkab silma vastavate otse- ja pöördteisenduste vahel?

# 10. SÜNKROONMÕÕTMISED JA IMPEDANTS

## 10.1 Sissejuhatus

Elektriline impedants (EI) on (sarnaselt Ohmi seadusega alalisvoolu puhul takistuse jaoks) määratletud kui kompleksse vahelduvpinge ja -voolu suhe:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}}. \quad (10.1)$$

Elektriline impedants iseloomustab bioobjektide, füsioloogiliste protsesside, mitmesuguste materjalide (mh metallide ja nende sulamite) ning elektrokeemiliste objektide (nt patareide) omadusi, tüüpi, iseärasusi ja struktuuri (ehitust).

Mõõtmist võib teostada otse elektrodide või kontaktide abil või kaudselt (kontaktivabalt), induktiivselt (pöörivoolu) või elektromehaanilise või ka elektroakustilise sidestuse abil, näiteks piesoanduritega.

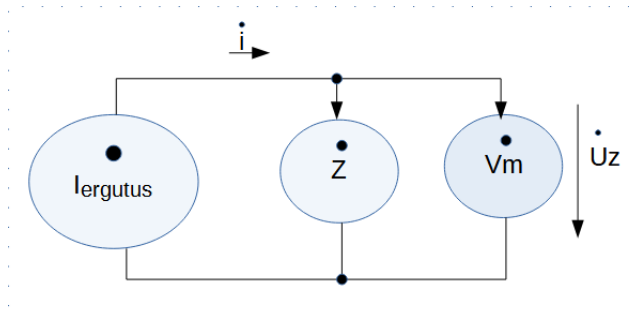
Veelgi enam – elektriline impedantstomograafia (EIT) ja magnetinduksioontomograafia (MIT) on paljutöötavad rakendused, mis võimaldavad rekonstrueerida mahulisi pilte, kuid vajavad samal ajal kiiret suure eraldusvõimega impedantsi mõõtmist tomograafiliste lahenduste teostamiseks.

Kui impedantsi iseloomustatakse antud sagedusel kompleksväärtusena, siis impedantsi mõõtmine mitmel sagedusel viib elektrilise impedantsi spektroskoopia (EIS), iseloomustades testitavaid materjale või objekte (OuT) konkreetsemalt ja laiemalt. Näiteks pöörivooluga mõõtmistel, kus elektromagnetväljade sissetungimissügavus sõltub otseselt mõõtesagedusest, saab metallkonstruktsioonide sügavusprofiilid rekonstrueerida impedantsspektroskoopia abil.

Tüüpilised impedantsi mõõtmise seadmete lahendused, mida nimetatakse impedantsi- või elektriahelate (vektor)analüsaatoriteks, LCR-meetriteks jne, näiteks Wayne-Kerr 6500B, Keysight E4990A, Zürich Instrumendi MFLI „lock-in” seadmed on suured, kallid ja aeglased.

## Peatükk 10. SÜNKROONMÕÕTMISED JA IMPEDANTS

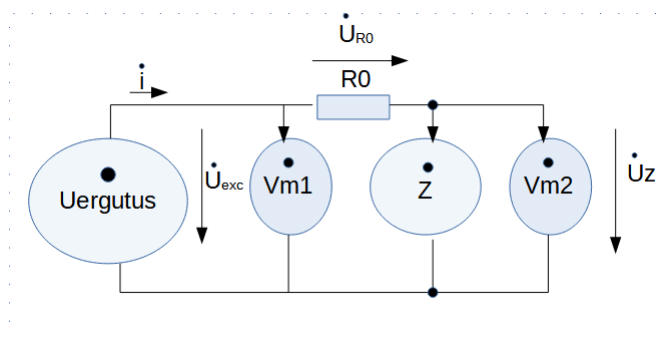
Seega on väljakutseks luua odavamaid, väikese võimsustarbega, kiiremaid ja täpsemaid impedantsi ja selle spektri mõõtmise seadmeid.



Joonis 10.1. Impedantsi mõõtmine definitsiooni järgi

Intuitiivne viis impedantsi mõõtmiseks on kasutada vahelduvvoolu allikat, kõige lihtsamal juhul ühe kindla sagedusega, nt 1 kHz, biorakendustes vooluga näiteks 0,1 mA (või vähem) mõõteahela ergutuseks ning impedantsil  $\dot{Z}$  tekkiva pingelangu  $\dot{U}_z$  mõõtmise vahendit. Viimaseks võib olla virtuaalne (arvutil põhinev) või füüsiline vektorvoltmeeter, nagu on kujutatud joonisel 10.1. Ergutusvoolu  $\dot{i}$  kompleksväärtus (suurus ja faas) peab olema selles lahenduses enne kindlaks määratud ja täpne. Teise võimalusena saab seda voolu mõõta samaaegselt  $\dot{U}_z$ -ga. Võrrand 10.1 annab  $\dot{Z}$  väärtuse ka siin  $\dot{U}_z$  ja  $\dot{I}$  suhtena.

Saab kasutada ka pingeaallikaga ergutamist (voolugeneraatori asemel). Impedants  $\dot{U}_z$  on sellisel juhul endiselt määratud  $\dot{U}_z$  ja  $\dot{I}$  suhtena. Selline lahendus ilma mõõtevoolu  $\dot{I}$  piiramiseta võib aga olla ohtlik nii mõõdetavale objektile kui ka mõõteahelale endale.



Joonis 10.2. Impedantsi mõõtmine fikseeritud jadatakistiga

Veel üks laialt levinud lahendus, kasutades pingega ergutamist,

## 10.2. Ergutussignaali lainekujud impedantsi mõõtmiseks

on näidatud joonisel 10.2. Võrreldes eelmise lahendusega kasutatakse vahelduvpinge allikat  $\dot{U}_{ergutus}$ , kust antakse fikseeritud takisti  $R_0$  kaudu ergutusvoolu  $\dot{i}$  ja sellel takistil tekib pingelang  $\dot{U}_{R_0}$ . Seda pingelangu  $\dot{U}_{R_0}$  saab mõõta otse diferentsiaalse mõõtmisega või määrata mõõdetud pingete kompleksse vahena:

$$\dot{U}_{R_0} = \dot{V}_{m1} - \dot{V}_{m2}, \quad (10.2)$$

kust saab leida ergutusvoolu:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_{R_0}}{R_0}, \quad (10.3)$$

kusjuures  $\dot{Z}$  on endiselt  $\dot{U}_z$  ja  $\dot{I}$  suhe.

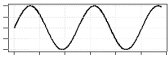
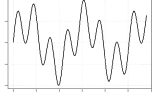


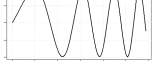

Kuna bio- ja enamiku muude objektide elektriline impedants on tavaliselt lineaarne suurus, võib teostada mitme ergutussignaali superpositsiooni, kasutades mitme sagedusega ergutust ja eraldades iga sageduse pingeid ja voolusid eraldi, näiteks matemaatiliselt, Fourier' teisendusega.

## 10.2 Ergutussignaali lainekujud impedantsi mõõtmiseks

Kuna impedants (sh bioimpedants) on määratletud kui „(näiv)takistus vahelduvvoolule“, on mõõtmiseks vajalik vahelduvvoolu ergutus (vool või pinge). Lihtsaim ja kõige loomulikum vahelduvvoolu lainekuju on siinuslaine (ühel sagedusel), kuigi seda pole alati lihtne genereerida suure täpsuse ja stabiilsusega, eriti laias sagedusvahemikus – nagu EIS-i puhul eeldatakse. Kasutada saab keerukamaid mitmesageduslikke lainekujusid, näiteks mitme siinuse summat, sirinat (*chirp*), binaarseid järjestusi jne.

Enamik kasutatavamaid lainekujusid on näidatud ja lühidalt kirjeldatud tabelis 10.1. Lisaks võib kaaluda ka lairiba müra ja pseudojuhuslikku signaali ning mitmesuguste binaarsete (impulss)järjestuste kasutamist.

Tabel 10.1. Impedantsi mõõtmisel kasutatavad ergutussignaali lainekujud

<p>Puhas siinus</p>		<p>Eelistatav, kuid ideaalse siinuslaine genereerimine on analoogelektronika jaoks nõudlik ülesanne, ent seda on lihtne teostada digitaalsete vahenditega, kasutades otsese digitaalse sünteesi tehnoloogiat (DDS)</p>
<p>Multi-siinus</p>		<p>Mitme erineva sagedusega siinuslaine summa, saab rakendada nt suvalise lainekuju generaatori (AWG) lahenduse abil</p>
<p>Ristkülikukujuline lainekuju (meander)</p>		<p>Lihtne teostada nii analoog- kui ka digitaalelektronikas, puuduseks on see, et lainekuju sisaldab 3., 5., 7. jne paaritud harmoonilisi, mis võib tekitada lisa-mõõtevea</p>
<p>Trepplainekuju</p>		<p>Võimaldab siinuslaine tunduvalt paremat lähendamist kui ristkülikukujuline lainekuju, saab hõlpsasti teostada segalülitustega (analoog-digitaalelektronikas)</p>
<p>Sirin (<i>Chirp</i>)</p>		<p>Sirin (näiteks lineaarne sinusoidaalne sirin, siinuslaine sagedus muutub ajas linearselt) võib olla tõhus lahendus nii ergutus- kui ka tugisignaali jaoks [62]</p>
<p>Binaarne mitme sagedusega lainekuju</p>		<p>Binaarne mitme sagedusega lainekuju [63]</p>

## 10.3 Sünkroondetektorid impedantsi mõõtmiseks

### 10.3.1 Sünkroonne või asünkroonne mõõtmine?

Kuna elektriline impedants  $Z$  on kompleksväärtus [64], mis on määratletud kompleksse pinge ja voolu kaudu, tuleb neid väärtusi (pinget ja voolu) mõõta (otseselt või kaudselt) kompleksväärtusena ristkoordinaatides (reaal- ja imaginaarosana) või polaarsituses (mooduli ja faasina).

Üks mõistlik ja loomulik lahendus on ergutus- ja vastussignaali mõõtmine sünkroondetektorite (SD) paariga, millest üks mõõdab reaalselt (ehk samafaasilist ehk  $I$ , *in-phase*) ja teine imaginaarset (ehk kvadratuurset,  $Q$ ) osa vastavast signaalist.

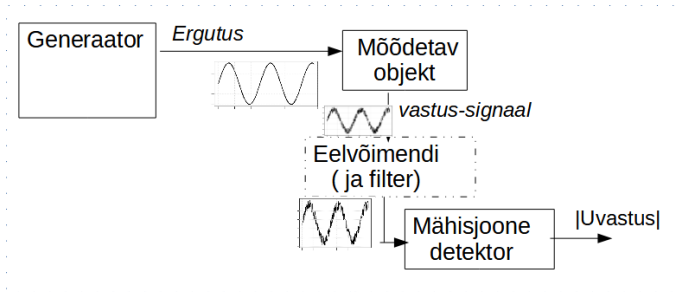
Kui ergutussignaal genereeritakse teadaoleva faasi ja amplituudiga, ei ole selle signaali (kompleksne) mõõtmine vajalik ja vastussignaali mõõtmisest piisab. Sellegipoolest võib ergutussignaali mõõtmine SD-de teise  $I$  ja  $Q$  paariga olla kasulik, leevendades ergutussignaali genereerimise faasi ja amplituudi täpsuse säilitamise nõudeid ning parendades üldist süsteemi täpsust.

### Impedantssignaali asünkroonne mõõtmine

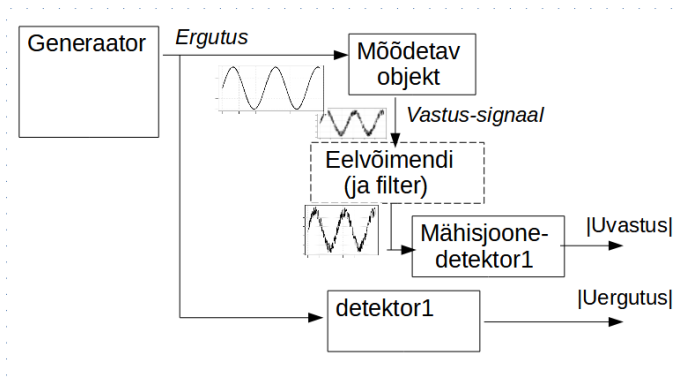
Kui huvi pakub ainult impedantsi moodul (suurus, mitte faas), piisab selle mõõtmiseks ergutuse suuruse (nt amplituudi) mõõtmisest (või täpselt teada oleva amplituudiga ergutussignaali genereerimisest) ning vastussignaali (vooluga ergutuse puhul tekkiva pinge ja vastupidi) amplituudi mõõtmisest, et saaks arvutada nende suhte. Sel juhul saab kasutada asünkroonseid vahelduvvoolu detektoreid, mis on realiseeritud näiteks mähisjoone detektoritena (*envelope detector*). Vastavad plokk skeemid (teostatuna ühe või kahe asünkroonse detektoriga) on kujutatud joonistel 10.3 ja 10.4.

Vahelduvvoolu amplituud- või mõne muu väärtuse mõõtmise võimalikud põhimõtted, nagu näidatud raamatu eelnevas osas, on vahelduvpinge mõõtemuundurite korral järgmised:

- alaldatud keskväärtusega detektorid;
- tipp- (või tipust tippu) väärtuse detektorid;
- ruutkeskmise (*efektiivväärtuse*, RMS) detektorid.



Joonis 10.3. Impedantsi mõõtmine ühe asünkroonse detektoriga



Joonis 10.4. Impedantsi mõõtmine kahe asünkroonse detektoriga

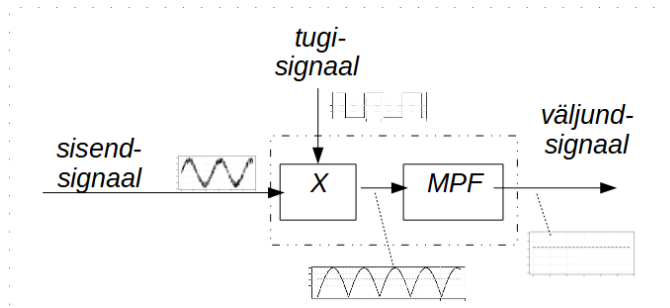
### 10.3.2 Sünkroondetektorite tööpõhimõtted

Tüüpilise SD plokk skeem on toodud joonisel 10.5 [65]. SD põhiosa on korruti (võib teostada analoog-, digitaal- või segaskeemi lahendusena), mis korrutab sisendsignaali tugilainekujuga, mis on sünkroonne (mh fikseeritud faasiga) mõõtesignaali suhtes. Korruti on mõistliku täpsuse saavutamiseks kõige olulisem osa, eriti kui kasutatakse analoogkomponente (sageli kasutatakse selleks väikese võimsustarbega odavat lahendust).

#### Korruti sõlme teostuse variandid

Sünkroondetektor (vt joonis 10.5) koosneb korrutist sõlme sisendis, kus sisendsignaali korrutatakse tugisignaali lainekujuga (tüüpiliselt siinusega I-kanalis ja koosinusega Q-kanalis), ning madalpääsfiltrist (keskmistajast) selle väljundis. Sisendsignaali (ideaalis siinuseline lainekuju) ja tugisignaali (sama sagedusega siinus või koosinus) korrutamisel tekib esiteks soovitud tulemusena alaliskomponent, mis on proportsionaalne





Joonis 10.5. Sünkroondetektori plokkiagramm

sisendsignaali siinus- (I-) komponendi amplituudiga ega sõltu koosinus- (Q-) komponendist. Teiseks tekib kahe sama sagedusega siinuse või koosinuse korrutamisel kahekordse sagedusega pulsatsioon, mis surutakse maha (lisaks muudele häiretele ja mürale) skeemis oleva madalpääsfiltriga.

Sünkroondetektori põhifunktsiooni – korrutamise – teostamiseks kasutatakse ühte järgmistest lahendustest:

- täisanaloog korruti;
- täisdigitaalne korruti;
- mitmesugused seguskeemidel (näiteks analoogkommutaatoritel) põhinevad lahendused.

Tänapäeval on levinud pigem täisdigitaalsed signaalitöötlemise lahendused, aga ka seguskeemidega teostusel on omad eelised – väiksem võimsustarve ja lihtsam skeemitehnika –, mis võivad olla olulised taoliste lahenduste kiibis teostusel. Samuti võib seguskeemidega, kasutades sünkroonse analoogintegraatori vmt lähenemist, saavutada märksa suurema dünaamilise ulatuse signaalide detekteerimisel, nagu on kirjeldatud allpool [66].

### Sünkroonse mõõtmise eelised

Kui asünkroonset (mittefaasitundlikku) mõõtmist on lihtsam rakendada, eriti analoogelektronika puhul, siis impedantsisignaali sünkroonsel mõõtmisel on hulk eeliseid:

- impedantsi mõõtmise signaalidest saab eraldada nii reaali- kui ka imaginaarosa mõõdetava objekti täpselt iseloomustamiseks;
- tagatakse müra ja häirete tõhus mahasurumine;

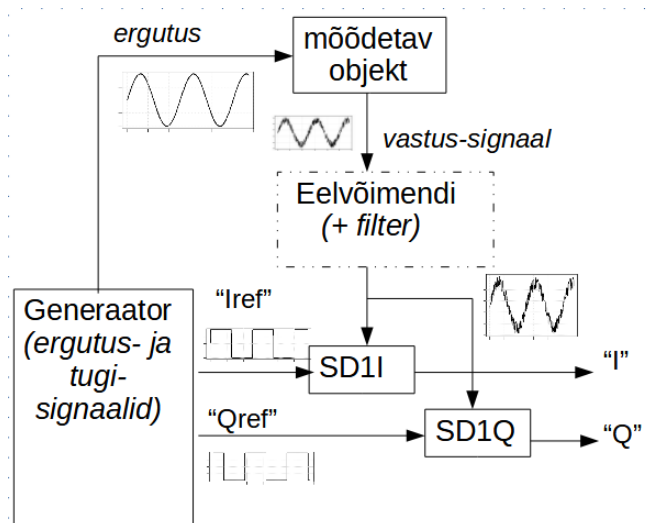
## Peatükk 10. SÜNKROONMÕÕTMISED JA IMPEDANTS

- tagatakse mõõtmiste dünaamilise ulatuse oluline parendamine;
- on võimalik tõhusalt asendada või vähemalt leevendada vastussignaali eeltötluse (võimendamise ja filtreerimise) nõudeid.

### Impedantsimõõtmise lahendused sünkroondetektoritega

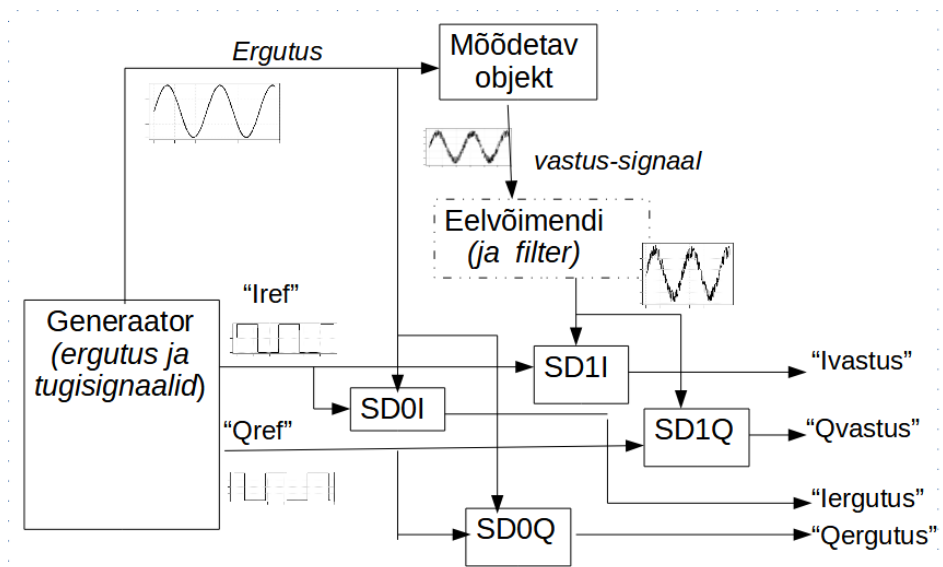
Juhul, kui ergutussignaali amplituud ja faas on fikseeritud ja teada, piisab mõõdetava objekti impedantsi hindamiseks vastussignaali reaali- ja imaginaarosade mõõtmisest (joonis 10.6).

Reaalsetes lahendustes on tüüpiliselt kasutusel siiski kaks sünkroondetektorite paari (joonis 10.7), kusjuures üks paar sünkroondetektoreid mõõdab ergutussignaali reaali- ja imaginaarosade ning teine vastussignaali reaali- ning imaginaar komponente. Vastussignaali ja ergutussignaali komplekssest suhtest saab omakorda arvutada impedantsi väärtuse töösagedusel.



Joonis 10.6. Impedantsi mõõtmine ühe sünkroondetektorite paari abil

### 10.3. Sünkroondetektorid impedantsi mõõtmiseks

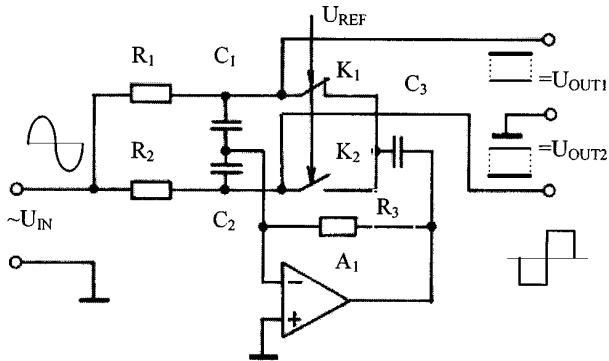


Joonis 10.7. Impedantsi mõõtmine kahe sünkroondetektorite paari abil

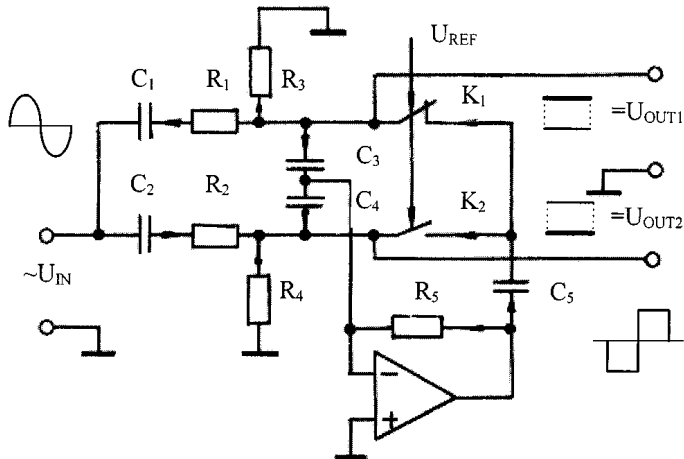
### 10.3.3 Suure dünaamikaga täppisünkroondetektorid

Kuigi tänapäeval eelistatakse digitaalseid lahendusi (teostatuna riist- või tarkvaras), on ka analoog- ja seguskeemidel omad eelised.

Üheks näiteks on õpiku autori pakutud suure dünaamilise ulatusega sünkroondetektorid, mida on kirjeldatud artiklis [66]. Joonisel 10.8 on toodud ühikulise ülekanedega (siin  $R_1 = R_2$ ) lahenduse skeem ja joonisel 10.9 takistite suhtega ( $R_3/R_1$  ning  $R_4/R_2$ , tüüpiliselt  $R_1 = R_2$  ning  $R_3 = R_4$ ) seatava võimendusega sünkroondetektorid skeem.



Joonis 10.8. Ühikulise ülekanedega sünkroondetektorid skeem



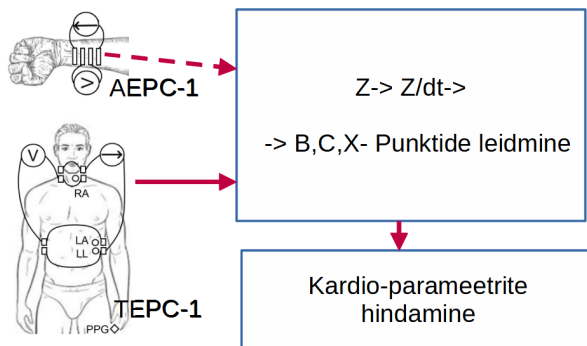
Joonis 10.9. Võimendusega sünkroondetektorid skeem

## 10.4 Impedantskardiograafia näide

Oluline aspekt tervise jälgimisel on südame töö seire ja analüüs, eelistatult teostatuna pidevalt ja reaajas. On levinud elektrokardiograafia (EKG) mõõteseadmed, mis jälgivad südamest tulevaid elektrilisi signaale ja millega võetakse üles südame töö elektrilisi lainekujusid, nn elektrokardiogramme. EKG-seadmed võivad olla teostatud portatiivse seadmena perearstikeskuste või haiglate jaoks, aga kasutatakse ka nn Holteri seadmeid patsiendi südametöö jälgimiseks ühe või mitme ööpäeva jooksul. Samuti võivad moodsad nutikellad toetada lisaks optilisele, fotopletüsmograafial (PPG) põhineva südametöö andurile ka EKG sensorikat [67]. Nutiseadmetele on olemas kiibid, mis toetavad peale EKG ja PPG mõõtmise ka elektrilise bioimpedantsi mõõtmist – nt MAX30009 [68].

Üks olulisi sünkroonmõõtmiste ja konkreetselt elektrilise bioimpedantsi rakendusi ongi südame töö jälgimine – impedantskardiograafia (IKG) – ja üldisemalt verevoolu – hemodünaamika – jälgimine. IKG ajalugu ulatub 1960-ndatesse [69].

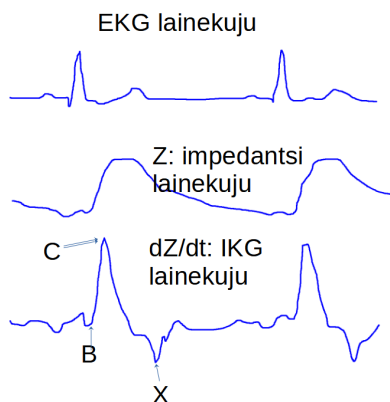
IKG põhineb elektrilise bioimpedantsi mõõtmisel, tüüpiliselt sagedustel 10–500 kHz. Elektroodid südame signaali saamiseks saab asetada nii rindkerele kui ka randmele (joonis 10.10).



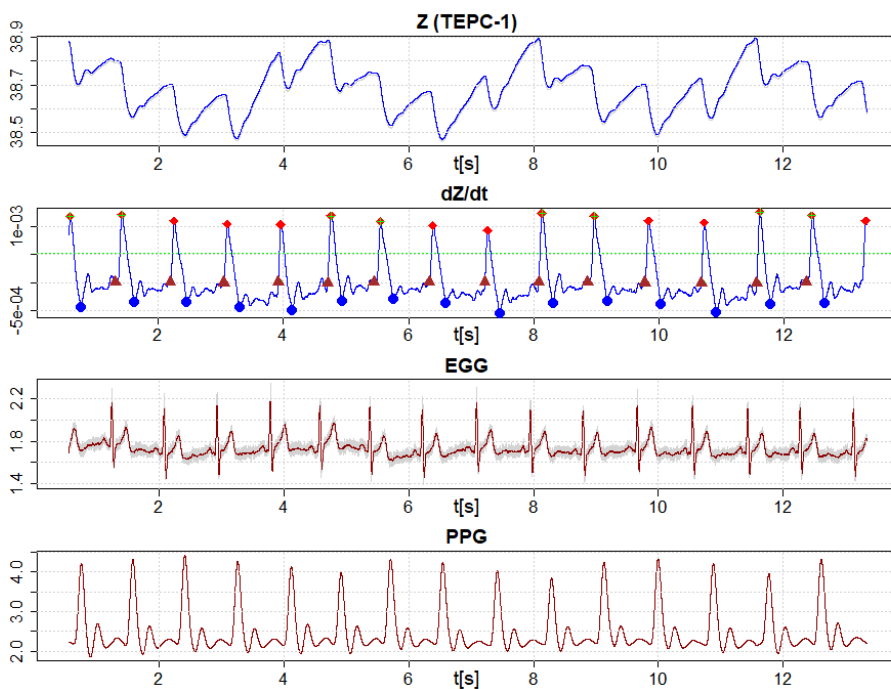
Joonis 10.10. Impedantskardiograafia signaalihõive

Mõõdetavast elektrilisest impedantsist  $Z$  leitakse esimene tuletis  $dZ/dt$ . Südame klappide avanemist ja sulgemist näitavad iseloomulikud punktid B, C, X joonisel 10.11 [70]. Ajavahemik B–X näitab vasaku vatsakese väljutusaega (*left ventricular ejection time*) ja selle ajavahemiku kõver (mh selle amplituud punktis C) iseloomustab südame löögimahtu iga löögi kohta, millest saab omakorda arvutada südame jõudluse minutis.

IKG signaali näide (koos EKG ja PPG lainekujudega) on toodud joonisel 10.12.



Joonis 10.11. Impedantskardiograafia lainekuju



Joonis 10.12. Impedantskardiograafia lainekuju näide

## Kordamisküsimused

1. Mis on (elektriline) impedants?
2. Millised on võimalikud impedantsi mõõteskeemid?
3. Millised on võimalikud asünkroonsed impedantsi mõõtelahendused?
4. Millised on võimalikud sünkroonsed (nn *lock-in*) impedantsi mõõtelahendused?
5. Milline on lihtsaim ergutussignaal imepdantsi mõõtmisel?
6. Milliseid keerukamaid ergutussignaale kasutatakse impedantsi mõõtmisel?
7. Milleks kasutatakse elektrilist impedantskardiograafiat (IKG)?

# 11. ASJADE INTERNET JA KAUGMÕÕTMISED

## 11.1 Mõõtmised ja asjade internet

Asjade interneti võrk (*internet-of-things*, IoT, ka värvõrk) võimaldab koguda ja töödelda väga suuri mõõteandmete hulki [71] suhteliselt reaalsajas. Asjade interneti tehnoloogia kasutamine mõõtetehnikas pakub ka muid eeliseid ja uusi võimalusi:

- mõõteandurite lisamine võrku on üldjuhul lihtne;
- mõõtesõlmed on sisuliselt nutikad andurid;
- IoT mõõteandurid on enamasti väikesed, energiatõhusad, hinnalt taskukohased;
- IoT mõõteandurite võrgud võivad sisaldada väga (või isegi üliväga) suurt arvu mõõtesõlmi;
- IoT seadmed töötavad tihti raadioühendusega (nt ZigBee ja IEEE 802.15.4, aga ka teisi standardeid kasutades), võimaldades arendada juhtmevabu mõõtesüsteeme;
- IoT võrk võib olla üleilmne, nii nagu internetki;
- mõõtesõlmede IoT võrgud võivad kujutada endast tihti hajutatud võrgu struktuure, kus ühe sõlme väljalangemine häirib terve mõõtevõrgu tööd minimaalselt.

Mõõteandurite võrku lisamisel ja nende asendamisel on võimalik kasutada eelkonfigureeritud mõõtesõlmi. Samuti võivad olla mõistlikud lahendused, kus iga mõõtesõlme konfiguratsioon on koopia olemas keskses serveri andmebaasis ja mõõtesõlme vahetamisel taaslaetakse konfiguratsioon automaatselt. Näiteks on taolisi lahendusi pakutud võrku ühendatud valvekaamerate jaoks (USA patendid 9787947 ja 9853862).

Samal ajal on IoT-põhiste mõõtevõrkude puhul ka probleeme:

- juhtmevabade raadioühenduste puhul võib raadiolevi sõltuda paljudest keskkonna asjaoludest, eriti siseruumides;



- oluliseks küsimuseks on infoturve, mh delikaatsete andmete kaitse;
- juhtmevabade võrkude puhul on keeruline mõõtesõlmedele toite korraldamine kas kohaliku patareiga või energialõikusega (*energy harvesting*) keskkonnast;
- kontroll ajaliste viidete üle mõõtevõrgus võib olla tõsine probleem;
- mõõteandmete ajaline sünkroonimine võib olla keeruline;
- probleemiks võib olla eri mõõteseadmete koostoimimine võrgus (*interoperability*), kui mõõdetavaid suurusi on erinevalt kodeeritud (näiteks kas ujuvkoma- või püsikomaarvudena, temperatuuri puhul kas kümnendikes või täiskraadides).

## 11.2 Mõõtenäitude kauglugemisest

Asjade internetiga sarnane teema on mitmesuguste mõõtmiste läbiviimine kaugelt või eemalt, kasutades tarku kaugloetavaid mõõteseadmeid (näiteks elektri-, vee- ja gaasikulu mõõtmiseks kodumajapidamistes).

Ühelt poolt on tegu mugavusteenusega, mis teeb mõõtenäitude võtmise mugavamaks, kiiremaks ja täpsemaks, aga ka pettusekindlamaks. Taolised lahendused võimaldavad võtta mõõtenäitusid tihedalt ja reaalajas, näiteks 15-minutilise eraldusvõimega. Elektritarbimise mõõtmisel võimaldab see kasutada tarbimise eest tasumisel dünaamilist hinnastust sõltuvalt elektrivõrgu koormusest ja niimoodi juhtida elektrivõrgu koormust optimaalses suunas, luues eeldused elektrijaotuse tarkvõrgu loomiseks.

Elektri- ja muude kulumõõtjate ühendamiseks keskserveritega on võimalik kasutada erinevaid ühenduvuslahendusi:

- side üle elektriliini (*power line communication, PLC*);
- optiline (fiiber) kaabel;
- mobiilside (2G/3G/4G/LTE), tänapäeval ka kitsaribaline 5G (ehk NB-IoT);
- pikamaa (LoRa) raadioside.

Kui võrrelda LoRa ja kitsaribalise 5G raadiosidet, siis esimene neist toimib Euroopas vabas 868 MHz ribas, mis on nii plussiks kui miinuseks – selle riba kasutamine on tasuta ja vaba, kuid samas ribas toimib ka teisi raadioseadmeid ning võimsused on piiratud. Siiski, ideaaljuhul tagab LoRa-tehnoloogia töö kuni 10 km kaugusele.

Kitsaribaline 5G tagab kontrollitud viited ja side tõhususe, aga eeldab telekomioperaatori teenuse ning ka asjakohaste terminaalseadmete kasutamist.

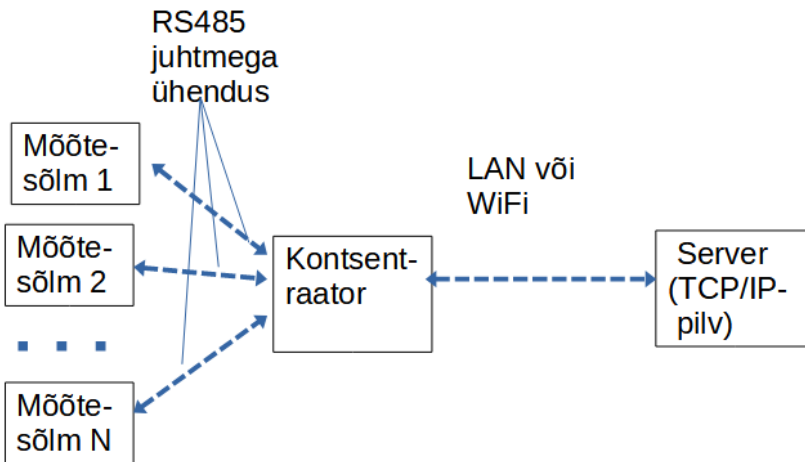
### 11.3 IoT mõõtevõrkude teostusest

Mõõtesõlmede ühendamisel internetivõrku on võimalik kasutada erinevaid lähenemisi või nende kombinatsioone.

Üks võimalus on mõõtesõlmed ühendata otse või läbi vastava liidesõlme juhtmega interneti (LAN) või WiFi võrku.

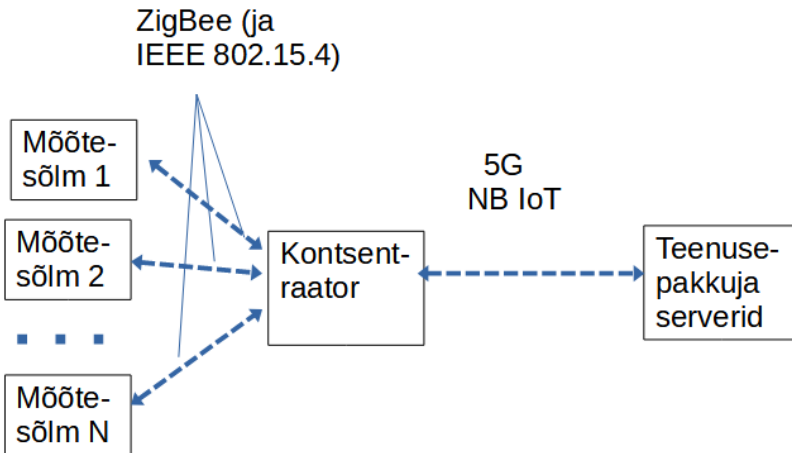
Teine võimalus on koostada hierarhiline (mitmeastmeline) mõõtevõrk. Lähestikku asuvad mõõtesõlmed ühenduksid esmalt andmete kontsentraatoriga, mis oleks ühtlasi ka lüüsiks (*gateway*), kasutades kohalikku sideprotokollit. Siin on võimalikud näiteks juhtmega RS485 asünkroonne side (kasutades Modbusi, Profibusi vmt protokollit) või Zigbee (põhineb IEEE 802.15.4 juhtmeta raadioprotokollil või Bluetoothi energiatõhusal sidel). Kontsentraator omakorda suhtleks mõõteseadmetega ühe mainitud protokollit abil, aga teistpidi oleks ühendatud internetti juhtmega (LAN), juhtmeta (WiFi) või mobiilse sidega (nt 5G). Kontsentraatori (ja mõõteandmete andmekogujana) võib toimida ka arvuti või mobiilne terminaaliseade (nt nutitelefoni).

Joonisel 11.1 on kujutatud lahendus, kus mõõtesõlmed on ühendatud juhtmega, kasutades RS485 füüsilist liidest, ja mõõteandmete kontsentraator (milleks võib olla ka näiteks arvuti) on ühendatud internetti juhtmega (LAN) või ilma (WiFi).



Joonis 11.1. Internetivõrgus oleva kontsentraatoriga mõõtesüsteem

Joonisel 11.2 on kujutatud lahendus, kus mõõtesõlmed on ühendatud Zigbee raadioühendusega ja mõõteandmete kontsentraator (milleks võib olla näiteks mobiiltelefon vmt mobiilne terminaaliseade) on ühendatud internetti mobiilivõrgu kaudu.



Joonis 11.2. Zigbee ja NB IoT kasutamisega mõõtesüsteem

## 11.4 Mõõteandmete serva- ja pilvetötlusest

Tänapäeval kasutatakse üha rohkem andmete (ka mõõteandmete) esmast töötlust võimalikult nende tekkimise koha (mõõteanduri või mõõtemuunduri) lähedal, sarnaselt signaalide servatötlusega (*edge computing*). Näiteks võib olla mõistlik tööpinkide, turbiinide jm masinate vibratsiooni jälgimisel teostada spektrianalüüs anduri sõlmes kohapeal ja kanda üle ainult olulised spektrikomponendid või nende muutused või kõrvalekaldumised normist. See võimaldab kasutada väiksema ribalaiusega ja ökonoomsemaid infovoogude ülekande ja salvestamise seadmeid ja vahendeid.

Selline lähenemine on vastandiks samuti kiirelt levivale andmete (ka mõõteandmete) pilve kogumisele ja seal töötlemisele. Pilvedes mõõteandmete töötlemise eeliseks võib olla suurema pildi nägemine, nii üle väga paljude mõõteandurite kui ka üle pika aja. Samuti on suurandmete (*big data*) olemasolu puhul lihtsam kasutada moodsaid masinõppemeetodeid ja -algoritme. Mõõtetehnika kontekstis annab masinõppe ja tehisintellekti elementide kasutamine võimaluse suurendada mõõtetäpsust, kuna võimaldab paremini mudeldada ning seeläbi kompenseerida mitmesuguseid mõõtemääramatusi.

## 11.5 Mõõteandmete aja- ja kohainfo lisamine

Tänapäeval võivad mõõtesensorid, eriti IoT kontekstis (aga mitte ainult) olla väga mobiilsed ja dünaamilised. Tihti on vajalik mõõteandmete lisada märgendid (aja- ja kohatemplid), kus täpselt ja millal need on võetud. Eriti raadiovõrgus võib täpse aja ja koha määramine aga keeruline olla.

Üheks võimaluseks on kasutada mõõteseadmes GPS-i, mis annab nii seadme asukoha (koordinaadid) kui ka täpse aja (kuni mõnekümne nanosekundi täpsusega). GPS-seadmete puuduseks on asjaolud, et seade ei toimi siseruumides ning on suurte mõõtmetega ja võtab palju energiat.

Raadiolahendustel (nt Zigbeel) põhinevate sõlmede puhul kasutatakse nende omavahelise kauguse mõõtmiseks kas raadiosignaali tugevuse indikaatorit (*received signal strength indicator*, RSSI) või raadiosignaali leviaega (*time-of-flight*) ning kasutades osa sõlmi nn ankrutena, saab asukohad täpselt arvutada.

Ajaliste viidete hindamisel raadiosõlmede puhul saab hinnata aega, mis kulub andmepakettide edasi-tagasi saatmiseks, ja selle järgi korrigeerida ajalisi sõltuvusi.

## Kordamisküsimused

1. Tooge näiteid võimalikest mõõtevõrkude konfiguratsioonidest.
2. Mis on IoT sensoritega mõõtevõrgu eelised?
3. Milliseid sideprotokolle kasutatakse IoT võrkudes?
4. Kuidas saab (ka mobiilsetele) mõõtetulemustele lisada aja- ja kohatemplid?

## Tänu kaasteelistele mõõtetehnika arendamise teelt

Täna kõiki häid kunagisi ja praeguseid kolleege mõõteelektronika lahenduste arendamise teekonnalt:

- 1979–1982 – Tallinna Polütehnilise Instituudi automaatika kateeder – Halli anduriga mõõteseadmete arendus (T. Uutma, G. Väljamäe jt);
- 1982–1991 – Tallinna Raadio-elektronika Konstrueerimise Büroo – vahelduvpinge mõõtelahenduste arendus (T. Pungas, H. Trampärk, R. Kipper, K. Märten, O. Pehlak jt);
- 1991–1994 – väikefirmad Pares ja Enari – mh 20-bitise eraldusvõimega (6,5 kümnendkohta) analoog-digitaalmuunduri arendus ja tootmine (L. Pulk, H. Trampärk jt);
- 1996–1999 – AS Cybernetica – mh Echelon LONi tehnoloogia baasil mõõte- ja juhtsüsteemide arendus (H. Tani, R.-V. Rebane jt);
- 1994–2010 – M&T Elektronika OÜ – testseadmete arendus (H. Trampärk) elektroonikaettevõtetele (nt Berifors AB – A. Vasserman, S. Mogard jt), mõõte- ja juhtkontrollerite arendus koostöös AS Martemiga (P. Nobel, R.-H. Põllu, A. Veskimeister, A. Järvalt, Ü. Proodes, A. Liimets jt);
- alates 2005 – Tallinna Tehnikaülikooli Thomas Johann Seebeiki elektroonikainstituut – elektrilise impedantsipõhiste lahenduste uurimine, arendus ja leiutamine (prof. M. Min, dr. T. Parve, dr R. Land, dr P. Annus, dr A. Krivošei, dr M. Metshein, dr M. Rist, dr J. Ojarand ja väga paljud teised).

## Tänuõnad abilistele ja toetajatele

Suurimad tänuõnad **Haridus- ja Teadusministeeriumile ning Eesti Keele Instituudile** õpiku projekti toetamise eest.

Täna väga Tallinna Tehnikaülikooli kirjastust (Tõnis Liibek, Mirjam Piik ja Tiia Eikholm) ning keeleteimetajat (Eva Saul).

Kujunduse eest tänan lisaks Tiia Eikholmile (kaanefoto ja hulk teisi fotosid, palju väärtuslikke nõuandeid vormistuse kohta) ka Gerda Märtenit – huvitavate kommentaaride eest.

Samuti tänan väga väärtusliku tagasiside eest retsensente – kaasprofessorit Indrek Musta Tartu Ülikoolist ja abiprofessorit tenuuris Anton Rassõlkinit – ning positiivse ja asjaliku tagasiside eest kolleege Tartu Ülikoolist – dr Heiki Kasemägit ja prof Toomas Planki.

Lisaks toetasid õpiku projekti nõu ja jõuga lähedased kolleegid Tallinna Tehnikaülikooli Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituudist: Andres Eek, Margus Metshein, Raul Land, Mart Min, Eva Keerov, Laur Lemendik ja teised.

Ja loomulikult on suureks abiks olnud kõigi lähedaste ja abivalmis inimeste – nii kodus kui ka väljaspool – mõistev ja toetav suhtumine.

## Joonised

1.1	Rooma basaltkaaluvihht, 1. sajand, kerakujuline, lameda üla- ja alaosaga, väärtus 3 Rooma <i>libra</i> -t (naela), umbes 1 kg (© <i>sciencemuseumgroup, UK</i> ). . . . .	13
1.2	Rooma tüüpi margapuu (valmistaja George Adams, 1762), (© <i>sciencemuseumgroup, UK</i> ) . . . . .	14
1.3	Kaaluvihhtide komplekt 20. sajandist (foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . .	15
1.4	Hewlett-Packardi HP 200A sisemus (CC BY-SA 2.0 / <i>Wikimedia Commons</i> ). . . . .	19
1.5	Dotsent Paul Plakk TPI elektroonikakateedris transistor-lairibavõimenditega töötamas, 1982 (© <i>Tallinna Tehnikaülikooli fotokogu</i> ). . . . .	20
1.6	TPI leiutajad Toomas Parve ja Mart Min enda projekteeritud vektorvoltmeetriga, 1980–1981 (© <i>Tallinna Tehnikaülikooli fotokogu</i> ). . . . .	21
3.1	Mõõtetäpsuse määratlus – hea kordustäpsus, aga vilets absoluutne täpsus . . . . .	29
3.2	Mõõtetäpsuse määratlus – täpne, aga hajuv tulemus . . . . .	29
3.3	Mõõtetäpsuse määratlus – nii kõrge täpsus kui hea korduvus . . . . .	30
3.4	Mõõtetäpsuse määratlus ISO 5725 [14] järgi . . . . .	30
3.5	Masinõppes kasutatav segaduse maatriks . . . . .	33
3.6	Kalibreerimise konfiguratsiooni näide 1 . . . . .	35
3.7	Kalibreerimise konfiguratsiooni näide 2 . . . . .	36
3.8	Kalibreerimise jälgitavuse ahel . . . . .	39
3.9	Fluke 792A vahelduvpinge standardi mõõtemuundur [24] . . . . .	41
4.1	Varajane magneti ja pöörleva mähisega D’Arsonvali galvanomeeter (CC BY-SA 4.0 / <i>Wikimedia Commons</i> ) . . . . .	44
4.2	Kõrgsagedusvoltmeeter HP410A [28] . . . . .	46
4.3	Varajane VOLT-AMP-METER (CCO 1.0/ <i>Wikimedia Commons</i> ) . . . . .	47
4.4	Digitaalne multimeeter 34410A ( <i>Keysight</i> ), eestvaade (foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . . .	49
4.5	Digitaalne multimeeter 34411A ( <i>Keysight</i> ), tagapaneel (foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . . .	50
4.6	Digitaalne multimeeter 3458A ( <i>Keysight</i> , foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . . .	51
4.7	Ostsiloskoop MSOX2014A ( <i>Keysight</i> , foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . . .	51
4.8	Programmeeritav toiteplokk E3631A ( <i>Keysight</i> , foto – <i>T. Eikholm</i> ) . . . . .	53



4.9	Suvalise lainekuju generaator AFG32522 ( <i>Tektronix, foto – T. Eikholm</i> ) . . . . .	54
4.10	Wayne-Kerr 6500B impedantsi mõõtja ( <i>foto – T. Eikholm</i> ) . . . . .	55
4.11	( <i>Lock-in</i> ) impedantsi mõõtja MFIA (5 MHz) ( <i>Zürich Instruments, foto – T. Eikholm</i> ) . . . . .	55
5.1	Üldistatud tüüpiline mõõtelahendus . . . . .	57
5.2	Mõõtmine kahe referentspunkti alusel . . . . .	58
5.3	ADM-iga mõõteahela plokk skeem . . . . .	60
5.4	ADM – võendamine ja kvantimine . . . . .	61
5.5	Võendamislüli skeem . . . . .	61
5.6	Nulljärku võendamislüli sageduskarakteristik [36] . . . . .	62
5.7	Alias-sageduste tekkimine võendamisel . . . . .	63
5.8	Ühekordse integreerimisega ADM-i tööpõhimõte . . . . .	65
5.9	Kahekordse integreerimisega ADM-i tööpõhimõte . . . . .	66
5.10	Delta-sigma-ADM-i tööpõhimõte . . . . .	68
5.11	Progressseeruva lähenemisega ADM-i tööpõhimõte . . . . .	70
5.12	Välk-ADM-i tööpõhimõte . . . . .	71
5.13	ADM-i läbivkarakteristiku mitteideaalsused . . . . .	72
5.14	ADM – diferentsiaalne mittelineaarsus puudub . . . . .	74
5.15	ADM – olulise diferentsiaalse mittelineaarsusega . . . . .	74
5.16	Voolutoimeline DAM . . . . .	76
5.17	Impulss-laius-modulatsiooniga DAM . . . . .	77
6.1	Alalispinge eelvõimendi ja jagaja . . . . .	81
6.2	Voolu pingeks muundur . . . . .	82
6.3	Takistuslik mõõtesild . . . . .	82
6.4	Takistumagasini näide ( <i>foto – T. Eikholm</i> ) . . . . .	83
6.5	Takistuse pingeks muundur . . . . .	85
6.6	Takistuse mõõtmise skeem andmehõiveseadmega . . . . .	85
6.7	Amplituud-, efektiiv (RMS)- ja alaldatud keskmise väärtuste suhted siinuspinge korral . . . . .	86
6.8	Tippväärtuse mõõtemuundur . . . . .	87
6.9	Poolperiood-keskväärtuse detektor . . . . .	88
6.10	Vahelduvpinge täppismõõtemuundur [41] . . . . .	89
6.11	Vahelduvpinge efektiivväärtuse (RMS) mõõtemuundurid . . . . .	90
6.12	Suuruste mõõtmine LC ja sagedusmõõtja baasil . . . . .	91
7.1	Termopaari tööpõhimõte . . . . .	96
7.2	NTC-termistori näide . . . . .	96
7.3	10 k $\Omega$ nimitakistusega NTC-anduri temperatuurikõver . . . . .	97
7.4	Pt-100 anduri näide . . . . .	98
7.5	Bipolaartransistoridega temperatuuriandur . . . . .	98

7.6	Lihtsaim kondensaator – kaks paralleelset metallplaati . . . .	101
7.7	Kolmebitise optilise enkoodri ketas ( <i>CC BY-SA 3.0 / Wikimedia Commons</i> ) . . . . .	103
7.8	Kolmebitine optiline enkooder . . . . .	104
7.9	Inkrementaalne optiline enkooder . . . . .	104
7.10	Fotodiodi pingevoolu-kõver . . . . .	105
7.11	Fotodiodi signaali pingeks muundurid (variandid) . . . . .	106
7.12	Piesoandur . . . . .	107
7.13	Halli andur . . . . .	108
7.14	Tensoanduri võimalik teostus . . . . .	108
7.15	Tensoanduri ühendamise veerandsildskeemi . . . . .	109
7.16	Tensoanduri ühendamise poolsildskeemi . . . . .	110
7.17	Painde mõõtmine tensoanduritega . . . . .	110
7.18	Ovaalsete hammasratastega kulumõõtja põhimõte . . . . .	112
7.19	Elektromagnetilise kulumõõtja tööpõhimõte . . . . .	113
7.20	Ultraheliandur . . . . .	114
7.21	Ühise ultrahelisaatja ja -vastuvõtjaga lahendus . . . . .	114
7.22	Ultraheli eraldi saatja ja vastuvõtjaga lahendus . . . . .	115
7.23	Suunatud ultrahelilaine saatmine otsesihis . . . . .	116
7.24	Suunatud ultrahelilaine saatmine kallutatud kiire sihis . . . . .	117
7.25	Suunatud ultrahelilaine saatmine fookuspunkti . . . . .	117
8.1	HP-IB ja IEEE-488 areng . . . . .	121
8.2	IEEE-488 kaabel . . . . .	122
8.3	IEEE-488 kaabli ühendus mõõteseadmega ( <i>foto – T. Eikholm</i> ) . . . . .	123
8.4	IEEE-488 kaablite tähtühendus . . . . .	124
8.5	LabView' esipaneeli (juhtnuppude ja näidikute) näide . . . . .	127
8.6	LabView' tagapaneeli (plokk skeemi) näide . . . . .	128
8.7	Labview' esipaneelil kasutatavate näidikute näiteid . . . . .	129
8.8	QT ja C/C++ näide . . . . .	131
8.9	Andmehõiveseadmete näiteid ( <i>fotod – T. Eikholm</i> ) . . . . .	134
9.1	Aeglaselt muutuva mõõtesignaali ajavallas esitamise näide . . . . .	136
9.2	Kodumajapidamises oleva 50 Hz 230 V efektiivväärtusega pingekuju ajavallas . . . . .	137
9.3	Signaali harmoonilise komponendi amplituudi ja faasi ning reaali ja imaginaarosa seos . . . . .	139
9.4	Fourier' rea näide . . . . .	140
9.5	Fourier' teisendus ja pöördteisendus . . . . .	142
9.6	Diskreetne Fourier' teisendus (näide) . . . . .	144
9.7	Fourier' teisendus üle signaali 4 perioodi . . . . .	145
9.8	Fourier' teisendus üle signaali 3,7 perioodi . . . . .	146

9.9	Fourier' teisendus üle signaali 4,5 perioodi . . . . .	146
9.10	Blackmani aknafunktsioon üle andmehõive akna . . . . .	147
9.11	Fourier' teisendus üle signaali 4,5 perioodi, aknafunktsiooni kasutamisega . . . . .	148
10.1	Impedantsi mõõtmine definitsiooni järgi . . . . .	151
10.2	Impedantsi mõõtmine fikseeritud jadatakistiga . . . . .	151
10.3	Impedantsi mõõtmine ühe asünkroonse detektoriga . . . . .	155
10.4	Impedantsi mõõtmine kahe asünkroonse detektoriga . . . . .	155
10.5	Sünkroondetektorite plokkdiagramm . . . . .	156
10.6	Impedantsi mõõtmine ühe sünkroondetektorite paari abil . . . . .	157
10.7	Impedantsi mõõtmine kahe sünkroondetektorite paari abil . . . . .	158
10.8	Ühikulise ülekanaliga sünkroondetektorite skeem . . . . .	159
10.9	Võimendusega sünkroondetektorite skeem . . . . .	159
10.10	Impedantskardiograafia signaalihõive . . . . .	160
10.11	Impedantskardiograafia lainekuju . . . . .	161
10.12	Impedantskardiograafia lainekuju näide . . . . .	161
11.1	Internetivõrgus oleva kontsentraatoriga mõõtesüsteem . . . . .	165
11.2	Zigbee ja NB IoT kasutamisega mõõtesüsteem . . . . .	166

## Tabelid

2.1	SI põhiühikud . . . . .	24
2.2	Põhiühikute SI lisaühikud [13] . . . . .	25
2.3	Tuletatud SI ühikud . . . . .	26
5.1	3-bitise ADM-i muundamise sammude näide . . . . .	69
8.1	Sidesiinide parameetrid . . . . .	124
10.1	Impedantsi mõõtmisel kasutatavad ergutussignaali lainekujud	153

## Kasutatud kirjandus

- [1] Rein Laaneots ja Olev Mathiesen. *Mõõtmise alused*. TTÜ kirjastus, 2002.
- [2] Rein Laaneots, Olev Mathiesen ja Jürgen Riim. *Metroloogia*. TTÜ kirjastus, 2012.
- [3] Uljas Tamm. *Elektrimõõtmiste alused : ülevaatekursus*. Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2003.
- [4] Aleksander Markson. *Elektri mõetmine*. Tallinn: Tallinna Rahvaülikool, 1921.
- [5] Helmuth Freymuth. *Elektrimõõtmised ja mõõteriistad : [loengukonspekt]*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 1940.
- [6] Tim Harford. *50 leiutist, mis vormisid tänapäeva majandust*. Äripäev, 2021.
- [7] Britannica encyclopedia [online]. "measurement system". URL: <https://www.britannica.com/science/measurement-system> (vaadatud 31.10.2021).
- [8] Metrosert AS. *Eestis-kasutatud-mõõtuhihud*. 2018. URL: <https://metrosert.ee/wp-content/uploads/2018/01/Eestis-kasutatud-mootuhikud.pdf> (vaadatud 03.10.2021).
- [9] *Metrosert 90 aastat (eessõna: Ain Noormägi)*. Metrosert, 2009.
- [10] Beat Jeckelmann. „The New International System of Units based on Fundamental Constants“. *SPG Mitteilungen* (jaanuar 2012), lk. 9–11.
- [11] Uljas Tamm. „Mõõtetehnika uurimuste ajaloost elektroonika kateedris“. *TTÜ Toimetised, Nr 678* (1988), lk. 76–83.
- [12] Tõravere opservatoorium. *Tõraveres valmistatud instrumendid kosmoses 1971-2001*. 2014. URL: [http://to50.to.ee/instrumendid\\_ ja \\_eksperimendid\\_.htm](http://to50.to.ee/instrumendid_ ja _eksperimendid_.htm) (vaadatud 25.10.2021).
- [13] EV valitsuse määrus. *Rahvusvahelise mõõtuhihikute süsteemi (SI) põhiühikud, nendest tuletatud ühikud, nende kord- ja osaiühikud ning rahvusvaheliselt kehtestatud lisaühikud ja nende kasutamise viis*. 2019.
- [14] „ISO 5725-2:2019, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method“ (2019).
- [15] „ISO/IEC 17025, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories“ (2017).
- [16] Andrei Pokatilov ja Toomas Kübarsepp. „Establishment of National Standard of Voltage Unit in Estonia“. Teoses: *2006 International Biennial Baltic Electronics Conference*. 2006, lk. 1–4. DOI: 10.1109/BEC.2006.311085.
- [17] Riho Vendt *et al.* „Traceability of temperature measurements in Estonia“. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences* 62 (jaanuar 2013), lk. 116. DOI: 10.3176/proc.2013.2.05.

- [18] Andrei Pokatilov *et al.* „Inhomogeneity correction in calibration of electrical conductivity standards“. *Measurement* 46 (mai 2013), lk. 1535–1540. doi: 10.1016/j.measurement.2012.12.007.
- [19] Martin Parker *et al.* „Accurate measurements of electrical conductivity of metals in the range from 2 MS/M to 14 MS/M“ (jaanuar 2012), lk. 700–704.
- [20] Barry D. Inglis. „Standards for AC-DC Transfer“. 29.2 (jaanuar 1992), lk. 191–199. doi: 10.1088/0026-1394/29/2/007.
- [21] Barry D. Inglis. „Standards for AC-DC transfer“. *Metrologia* 29 (jaanuar 2005), lk. 191. doi: 10.1088/0026-1394/29/2/007.
- [22] Manfred Klonz *et al.* „AC-DC current transfer step-up calibration and uncertainty calculation“. Teoses: *IMTC 2001. Proceedings of the 18th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. Rediscovering Measurement in the Age of Informatics (Cat. No.01CH 37188)*. Köide 3. 2001, 1435–1440 vol.3. doi: 10.1109/IMTC.2001.929441.
- [23] Hiroyuki Fujiki ja Yasutaka Amagai. „Extension of AC–DC Transfer Standards From 100 Down to 2 mV Using RVDs“. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 66.6 (2017), lk. 1364–1371. doi: 10.1109/TIM.2017.2653519.
- [24] From the Fluke Calibration Digital Library@ [www.flukecal.com/library](http://www.flukecal.com/library). "Design and Evaluation of the 792A AC/DC Transfer Standard". 2008. URL: [https://xdevs.com/doc/Fluke/792A/1268781\\_6203\\_ENG\\_D\\_W.PDF](https://xdevs.com/doc/Fluke/792A/1268781_6203_ENG_D_W.PDF) (vaadatud 31.10.2021).
- [25] Britannica encyclopedia [online]. "Voltmeter". URL: <https://www.britannica.com/science/voltmeter> (vaadatud 31.10.2021).
- [26] Eiju Matsumoto. *The History of Electric Measuring Instruments and Active Components*. URL: [http://idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electrical\\_engineering/History\\_Electrical\\_Measuring.pdf](http://idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/History_Electrical_Measuring.pdf) (vaadatud 31.10.2021).
- [27] John F Rider. *Vacuum-tube voltmeters (2-nd edition)*. New York: John F. Rider Pub Inc; 1951.
- [28] „Catalog 20-A: Laboratory instruments for speed and accuracy“. *Hewlett-Packard Company, Palo Alto, California* (1950). URL: <http://hparchive.com/Catalogs/HP-Catalog-1950.pdf> (vaadatud 25.10.2021).
- [29] Fluke. *The history of the multimeter*. URL: <https://www.fluke.com/en-us/learn/blog/digital-multimeters/multimeter-history> (vaadatud 31.10.2021).
- [30] Nihal Kularatna. *Digital and Analogue Instrumentation: Testing and Measurement*. EngineeringPro collection. Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [31] Alan S. Morris ja Reza Langari. *Measurement and Instrumentation: Theory and Application (3-rd Edition)*. Academic Press, 2020.
- [32] (Editors:) John G. Webster ja Halit Eren. *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: electromagnetic, optical, radiation, chemical, and biomedical measurement (2-nd Edition)*. CRC Press, 2014.

- [33] (Editors:) John G. Webster ja Halit Eren. *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: spatial, mechanical, thermal, and radiation measurement (2nd Edition)*. CRC Press, 2014.
- [34] *Oscilloscope History and Milestones*. URL: <http://www.oscopes.info/background/2265-oscilloscope-milestones> (vaadatud 31.10.2021).
- [35] Johnnie Hancock. „What’s the Difference Between a DSO and DPO?“ *Electronic Design* (august 2016). URL: <https://www.electronicdesign.com/technologies/test-measurement/article/21801785/whats-the-difference-between-a-dso-and-dpo> (vaadatud 25.10.2021).
- [36] Julius T. Tou. *Digital and Sampled-data Control Systems*. McGraw-Hill; 1st Edition, 1959.
- [37] Walt Kester. *Data Conversion HandBook*. Jaanuar 2005. DOI: 10.1016/B978-0-7506-7841-4.X5000-3.
- [38] William G. Wong. „TI TMS320F28044 DSP Hits 150ps Accurately With PWM“. *Electronic Design* (oktoober 2006).
- [39] [online]. „Form factor (electronics)“. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Form\\_factor\\_\(electronics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Form_factor_(electronics)) (vaadatud 31.10.2021).
- [40] Ray Marston. „Op-amp Cookbook — Part 4“. *Nuts & Volts Magazine* (oktoober 2001).
- [41] Olev Martens ja Toom Pungas. „Precision average-sensing AC/DC converters“. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 42.1 (1993), lk. 71–73. DOI: 10.1109/19.206687.
- [42] Charles Kitchin & Lew Counts. *RMS-to-DC Application Guide*. Analog Devices; Second Edition, 1986.
- [43] Zbigniew Żurek ja Dominik Kukla. „LDC1000 converter for NDT material diagnostics and characterisation“. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring* 60 (juuli 2018), lk. 375–379. DOI: 10.1784/insi.2018.60.7.375.
- [44] Olev Martens, Siim Pille ja Marko Reidla. „Capacitance measurement with MSP430 microcontrollers“. Teoses: *2014 6th European Embedded Design in Education and Research Conference (EDERC)*. 2014, lk. 260–263. DOI: 10.1109/EDERC.2014.6924400.
- [45] Harry Tani ja Enn Velmr. *Pooljuhtseadised ja nende kasutamine*. Valgus, 1967.
- [46] Ethan Than. *Application report: Diode-Based Temperature Measurement*. SBOA277A. Smartec Sensors. 2019. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sboa277a/sboa277a.pdf> (vaadatud 31.10.2021).
- [47] *Datasheet*. SMT-172. (vers.14). Smartec Sensors. 2017. URL: <https://www.smartec-sensors.com/cms/media/Datasheets/Temperature/SMT172-datasheet.pdf> (vaadatud 31.10.2021).
- [48] *Datasheet: MP23ABS1. High performance MEMS audio sensor single ended analog bottom-port microphone*. (rev.6). ST. 2020. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/mp23abs1.pdf> (vaadatud 31.10.2021).

- [49] *Data Sheet: ADXL335. Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3$  g Accelerometer.* (rev.B). Analog Devices. 2020. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf> (vaadatud 31.10.2021).
- [50] Olev Martens *et al.* „Fast precise eddy current measurement of metals“. Teoses: *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2018, lk. 1–5. DOI: 10.1109/I2MTC.2018.8409781.
- [51] Ronald Liive. *TTÜ saavutus: elektromagnetilised kulumõõturid ehk veemõõtjad*. DigiGeenius, 06.07.2018. URL: <https://digi.geenius.ee/rubriik/teadus-ja-tulevik/ttu-saavutus-elektromagnetilised-kulumooturid-ehk-veemootjad> (vaadatud 11.03.2022).
- [52] Paavo Kangur. *Häda veemõõtjaga*. Eesti Ekspress, 22.01.2003. URL: <https://ekspress.delfi.ee/artikkel/69081537/hada-veemootjaga> (vaadatud 11.03.2022).
- [53] Libertario Demi. „Practical Guide to Ultrasound Beam Forming: Beam Pattern and Image Reconstruction Analysis“. *Applied Sciences* 8.9 (2018). ISSN: 2076-3417. DOI: 10.3390/app8091544. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/9/1544>.
- [54] Richard Jennings. *LabVIEW Graphical Programming*. McGraw-Hill, 2020.
- [55] Thomas E. Hulbert Robert B. Angus. *VEE Pro: Practical Graphical Programming*. London: Springer, 2005.
- [56] Predrag Pejovic. „Application of python programming language in measurements“. *Facta universitatis - series: Electronics and Energetics* 32 (jaanuar 2019), lk. 1–23.
- [57] Fabrizio Guerrieri. „How to automate measurements with Python“. *EDN* (märts 2016), lk. 1–8. URL: <https://www.edn.com/how-to-automate-measurements-with-python/> (vaadatud 25.10.2021).
- [58] Lee Atchison. *Object-Oriented Test and Measurement Software Development in C++: Bridging the Gap Between Object-Oriented Programming and Test Measurement*. Pearson, 1997.
- [59] Emmanuel C. Ifeachor ja Barrie W. Jervis. *Digital Signal Processing: A Practical Approach, 2-nd edition*. Electronic systems engineering series. Prentice Hall, 2002.
- [60] James W. Cooley ja John W. Tukey. „An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series“. *Mathematics of Computation* 19 (1965), lk. 297–301.
- [61] Olev Martens *et al.* „DSP-based Power-Quality Monitoring Device“. Teoses: *2007 IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing*. 2007, lk. 1–5. DOI: 10.1109/WISP.2007.4447591.
- [62] Olev Märten, Mart Min, Raul Land, Paul Annus, Tõnis Saar ja Marko Reidla. „Method and device for frequency response measurement“. USA patent 8854030. Oktoober 2014.



- [63] Raul Land, Paul Annus, Mart Min, Olev Märtens ja Jaan Ojarand. „Method and device for broadband analysis of systems and substances“. USA patent 10698023. Juuni 2020.
- [64] Evgenij Barsoukov ja J. Ross Macdonald. *Impedance Spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications*. Wiley, 2018.
- [65] Mike L. Meade. *Lock-in Amplifiers: Principles and Applications*. IEE electrical measurement series. P. Peregrinus, 1983.
- [66] Olev Martens. „Precise synchronous detectors with improved dynamic reserve“. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 49 (november 2000), lk. 1046–1049. doi: 10.1109/19.872928.
- [67] Nabeel Saghir *et al.* „A comparison of manual electrocardiographic interval and waveform analysis in lead 1 of 12-lead ECG and Apple Watch ECG: A validation study“. *Cardiovascular Digital Health Journal* 1.1 (2020), lk. 30–36. ISSN: 2666-6936. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cvdhj.2020.07.002>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666693620300062>.
- [68] MAX30009: *Low-Power, High-Performance Bioimpedance Analog Front-End*. 19-101213; Rev 1. Analog Devices. 2022. URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30009.pdf> (vaadatud 29.03.2022).
- [69] William G. Kubicek *et al.* „Development and evaluation of an impedance cardiac output system“. *Aerosp Med.* 37.12 (1966), lk. 1208–12. doi: 10.1109/TIM.2020.3011784.
- [70] S. Mohan Mahalakshmi Naidu, Prem C Pandey ja Vinod K Pandey. „Automatic detection of characteristic points in impedance cardiogram“. Teoses: *2011 Computing in Cardiology*. 2011, lk. 497–500.
- [71] Boon-Yaik Ooi ja Shervin Shirmohammadi. „The potential of IoT for instrumentation and measurement“. *IEEE Instrumentation Measurement Magazine* 23.3 (2020), lk. 21–26. doi: 10.1109/MIM.2020.9082794.

Õpik annab ülevaate elektroonsesest mõõtetehnikast, selle põhimõtetest, põhimõistetest ja rakendustest.

Õpik on mõeldud inseneeria- ja IT-alade bakalauruse-, aga mitme peatüki ulatuses ka magistri- ja doktoritaseme üliõpilastele ning teistelegi huvilistele.



Olev Märten (7.3.1960), Eesti tehnika-teadlane ja elektroonikainsener, on lõpetanud 1978. aastal Tallinna 21. Keskkooli ja 1983. aastal Tallinna Polütehnilise Instituudi elektroonikainsenerina (*cum laude*), doktorikraad aastast 2000.

1980-ndatel aastatel töötanud Tallinna Raadioelektronika KB-s mõõtetehnika (mh vahelduvpinge mõõtemuundurite ja numbriliste voltmeetrite) arendusinsenerina. Tallinna Tehnikaülikoolis töötanud

erinevatel akadeemilistel ametikohtadel ja olnud mitme (nii Euroopa Liidu kui ka kohaliku) mõõtetehnika-alase teadus- ja arendusprojekti juht.

Paljude leiutiste ja publikatsioonide autor mõõtetehnika vallas. IEEE IMS ühingu liige üle 20 aasta.



9 789949 839063 >