

SISSEJUHATUS

Sidesüsteemides ja -seadmetes tehtavad mõõtmised on klassikalise mõõtetehnika rakendamine uues ja kiiresti arenevas valdkonnas, milleks on telekommunikatsiooni-tehnika. On terve [rida mõõteülesandeid](#), mida telekommunikatsiooniseadmete arendamisel ja kasutamisel on vaja läbi teha, näiteks:

- signaalide analüüs,
- spektri analüüs,
- signaali sagedusriba ja võimsuse mõõtmine,
- signaali moonutused edastusel,
- digitaaledastuse bitiviga (BER),
- kõrgsagedusseadmete parameetrite mõõtmine, sobitamine koormusega jne.

Viimastel aastakümnetel on toimunud [olulised muutused ja arengud](#) mõõtetehnikas, millest tuleb märkida järgmisi:

- on toimunud peaaegu täielik [üleminek](#) analoogtoimega mõõteseadmetelt [digitaalsetele mõõteseadmetele](#) ja -süsteemidele; analoogtehnikalaahendusi kohtab vaid kõrg- ja ülikõrgsagedusseadmes (sagedusmuundurid, pinge ja võimsuse mõõtjad jne);
- lihtsamad mõõteriistad ja -seadmed on asendunud [keerukamate ning väga täiuslike seadmetega](#), mis lahendavad kompleksseid mõõteülesandeid ning sooritavad vajadusel keerukaid arvutusprotseduure (signaalide ja spektri analüsaatorid, ahelate analüsaatorid, ahelaparametrite mõõtjad, sidesüsteemide analüsaatorid jne);
- paljud mõõteseadmed on [varustatud liidestega](#), mis võimaldavad nende koostööd kas arvuti või suurema mõõtesüsteemiga; enamuse seadmeid kasutatakse selleks kas järjestikliideseid RS-232 või USB (*Universal Serial Bus*), suuremad seadmed ka paralleelliidest GPIB (*General Purpose Interface Bus*).

Mõõteseadmete ja -süsteemide [tootmine](#) on koondunud rea tuntud suurtootjate kätte, nagu Hewlett-Packard, Tektronix ja Agilent USAs, Keithley Inglismaal, Rohde-Schwarz Saksamaal jt.

Kursuse sisu põhiosad on:

- mõõtmiste üldküsimumused (mõõtevead)
- signaalide mõõtmine ja analüüs, sh
 - pingemõõtmine, digitaalvoltmeetrid, vahelduvpinge voltmeetrid
 - signaali kuju ja spektri analüsaatorid
- signaalide genereerimine, DDS-generaatorid
- ahelaparametrite mõõtmine, sh
 - mõõtmine alalisvoolul ja madalsageduslikul vahelduvvoolul
 - kõrgsagedusahelate parameetrid
 - ahelaanalüsaatorid

- sidesüsteemides tehtavad mõõtmised, sh
 - sidesüsteemide testrid
 - sidesüsteemide analüsaatorid.

1. MÕÕTMISTE ÜLDKÜSIMUSED

1.1 MÕÕTMINE JA MÕÕTÜHIKUD

Mõõtmine on füüsilise suuruse väärtuse määramine tema jaoks kehtestatud mõõtühikutes ja selleks ette nähtud mõõtevahenditega.

Mõõtevahendid:

- mõõteriistad annavad lugemi:
 - analoogmõõteriistad – osuti näit näidiku skaalal
 - digitaalmõõteriistad – lugem arvindikaatoril
- mõõtesüsteemid (palju mõõteriistu ja juhtarvuti – kontrolleri)
- mõõtemuundurid (annavad elektrilise väljundsuuruse)

Rahvusvaheline mõõtühikute süsteem SI (*Système International d'Unités*) tugineb seitsmele põhiühikule.

Tabel 1. SI põhiühikud

Suurus	Ühiku nimetus	Ühiku tähis
Pikkus	meeter	m
Mass	kilogramm	kg
Aeg	sekund	s
Elektrivoolu tugevus	amper	A
Termodünaamiline temperatuur	kelvin	K
Ainehulk	mool	mol
Valgustugevus	kandela	cd

Põhiühikute määratlused on toodud Eesti standardis EVS 733:1997: Füüsiliste suuruste mõõtühikud, nende nimetused ja tähised. Põhiühikutest on saadud suur hulk tuletatud ühikuid.

Põhiühikute määratlused :

...

- sekund on ^{133}Cs aatomi põhiseisundi kahe ülipeen(struktuuri)nivoo vahelisele üleminekule vastava kiirguse 9 192 631 770 perioodi kestus;

- amper on sellise elektrivoolu tugevus, mis kahes sirges paralleelselt asetsevas lõpmata pikas ja lõpmata peenes juhtmes tekitab vaakumis juhtmete vahel külgetõmbejõu $2 \cdot 10^{-7}$ njuutonit meetri kohta;

...

Mõned tuletatud ühikud (elektro- ja raadiotehnika osas):

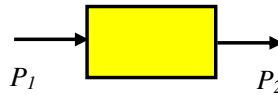
Suurus	Ühiku nimetus	Ühiku tähis	Seos teiste SI ühikutega
Sagedus	herts	Hz	s^{-1}
Võimsus	vatt	W	$J \cdot s^{-1}$
Potentsiaal, pinge	volt	V	$W \cdot A^{-1}$
Elektritakistus	oom	Ω	$V \cdot A^{-1}$
Elektrimahtuvus	farad	F	$C \cdot V^{-1}$
Induktiivsus	henri	H	$Wb \cdot A^{-1}$

Metroloogiateenistus

Etalonid, töö- ja sekundaaretalonid; täppismõõteriistad
Mõõtevahendite kontrollmõõtmine (taatlemine)

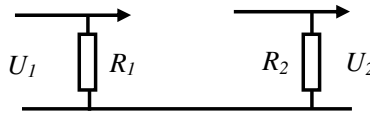
Logaritmilised ühikud – detsibell

Määratlus: $T_{dB} = 10 \lg (P_2/P_1)$.



Takistuste R_1 ja R_2 kaudu:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2^2 / R_2}{U_1^2 / R_1} = \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1}$$



Võrdsete takistuste $R_1 = R_2$ korral:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2^2}{U_1^2} = \frac{I_2^2}{I_1^2} \quad \text{ja} \quad T_{dB} = 20 \lg (U_2/U_1) = 20 \lg (I_2/I_1).$$

Viimaseid vahekordi kasutatakse ka mistahes pingete ja voolude suhte väljendamiseks detsibellides.

Näiteks võimendustegur $K_U = 1 \Rightarrow K_{UdB} = 0 \text{ dB}$
 $K_U = 10 \Rightarrow K_{UdB} = 20 \text{ dB}$
 $K_U = 0,7 \Rightarrow K_{UdB} = -3 \text{ dB}$

Absoluutsed logaritmilised ühikud määratakse fikseeritud võimsuse P_I jaoks:

Kui $P_I = 1 \text{ mW}$, siis ühik on dBm

$$P_{dBm} = 10 \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \quad P / 1 \text{ mW} = 10^{0,1 P_{dBm}}$$

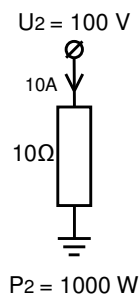
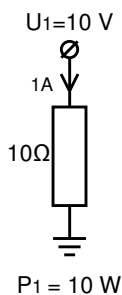
Ühikutes dBm väljendatud võimsuse seos pingega:

$$P_{dBm} = 10 \lg \frac{U_2^2 / R}{1 \text{ mW}}$$

U	P (R = 50 Ω)	P (R = 75 Ω)
1 V	+ 13 dBm	+ 11,2 dBm
1 mV	- 47 dBm	- 48,7 dBm
1 μV	- 107 dBm	- 108,7 dBm

Logaritmiliste ühikute tabel

Suurus	Definitsioon	Ühik	Lühend
Absoluutne võimsustase	$10 \lg(P / 1 \text{ mW})$	dB(mW) dB(W)	dBm dBW
Absoluutne pingetase	$20 \lg(U[V] / 775 \text{ mV})$	dB(775 mV) dB(V)	dB dBV
Võimsuse spektraaltihedus	$10 \lg \left(\frac{P / \Delta f}{1 \text{ W} / \text{ Hz}} \right)$	dB(W/Hz)	-
Võimsuse tihedus antenni pinnale	$10 \lg \left(\frac{P / A}{1 \text{ W} / \text{ m}^2} \right)$	dB(W/m ²)	-
Väljatugevus	$20 \lg \left(\frac{ E }{1 \mu\text{V} / \text{ m}} \right)$	dB(μV/m)	-



$$n_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{100 \text{ V}}{10 \text{ V}} = 10 [\text{korda}] \Rightarrow 20 \lg 10 = 20 \cdot 1 = 20 \text{ dB}$$

$$n_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1000 \text{ W}}{10 \text{ W}} = 100 [\text{korda}] \Rightarrow 10 \lg 100 = 10 \cdot 2 = 20 \text{ dB}$$

1.2 MÕÕTEVEAD

Mõõtetulemus = mõõtevahendi näit * skaalategur * mõõtemuunduri ülekanne

enamasti aga: mõõtetulemus = näit

Ükski mõõtevahend ei anna ideaalselt täpset mõõtetulemust. Mõõteseadme näit ja sellele vastav mõõtetulemus on alati ligikaudne!

Täpsemalt väljendudes – mõõtetulemus on mõõdetava suuruse hinnang.

Teoreetiline vea määratlus:

1) Absoluutne viga $\Delta = A - X$

Absoluutne viga = [mõõtetulemus – täpne väärtus]

väljendatakse mõõdetava suuruse ühikutes (märgiga suurusena !)

Näide: $\Delta U = \pm (C \% \text{ lugemist} + D \% \text{ mõõtepiirkonnast}) [V]$

2) Suhteline viga $\delta = \Delta/X$

Suhteline viga on absoluutse vea ja mõõdetava suuruse suhe väljendatud

suhtarvuna, ühikutes ppm (miljondikes *part per million*), või protsentides %.

Näide: $\delta U = \pm [C + D (U_{max}/U - 1)]$, %

Vigade tekkepõhjused mõõteseadmetes:

- mõõtemetodi ligikaudsus, meetodiline viga, diskreetsuse viga digitaalmõõteriistas;
- kõrvalmõjud (sisendsignaali mitteinformatiivsed parameetrid, toitepinge ja -sagedus, keskkonna temperatuur, õhurõhk, -niiskus jne);
- subjektiivsed vead (lugemi määramise viga, eksimise vead).

Formatted: Bullets and Numbering

Kui mõõtevea täpne väärtus ei ole teada, kasutatakse võimaliku vea hindamiseks maksimaalset võimalikku viga ehk mõõtemääramatust (kujul $\pm c$).

Sageli nimetatakse ka mõõtemääramatust mõõteveaks.

Maksimaalne võimalik viga ehk mõõtemääramatus antakse:

- ülempiirina (maksimaalväärtusena – **ilma märgita**);
- statistiliste parameetrite kaudu (näit ruutkeskmine viga).

1.3 Vea statistiline kirjeldus

Nii absoluutne viga $\Delta = A - X$ kui suhteline viga $\delta = \Delta/X$ võivad koosneda kahte tüüpi liidetavatest:

- süsteemiline viga Δ_s , mis on tingitud kas püsivatest või teadaolevatest mõjutegurist nagu välistemperatuur, toitepinge ja -sagedus, õhurõhk jne
- juhuslik viga Δ_j , mis on tingitud paljudest muutuvatest ja mitte teada olevaist faktoreist (mehaaniline hõõrdumine, mürade mõju jne)

Mõõtmiste kordamisel on süsteemiline viga lihtsamal juhul püsiva suurusega või siis muutub, kuid teadaoleval viisil. Põhimõtteliselt saab seda vea komponenti parandustega kõrvaldada. Juhuslik viga muutub katsete kordamisel teadmata viisil ja on teadmata märgiga (\pm) juhuslik suurus, mida ei saa parandusega kõrvaldada.

Kogu mõõteviga on $\Delta = A - X = \Delta_s + \Delta_j$, kus esimene liidetav on süsteemilise vea kõrvaldamata jääk. Täpsemates mõõteseadmetes

$$\Delta_s \approx 0 \text{ ja } \Delta \approx \Delta_j$$

Mõõteviga Δ on juhuslik suurus, mille tõenäosuse tihedus $f(x)$ (nn diferentsiaalne jaotusseadus) on

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx},$$

kus $f(x)dx$ on tõenäosus, et suurus x paikneb vahemikus $x + dx$. $F(x)$ määratlus:

Integraalne jaotusseadus $F(x)$ on tõenäosus, et juhuslik suurus x on alla mingi väärtuse x_1 (vahemikus $-\infty$ kuni x_1):

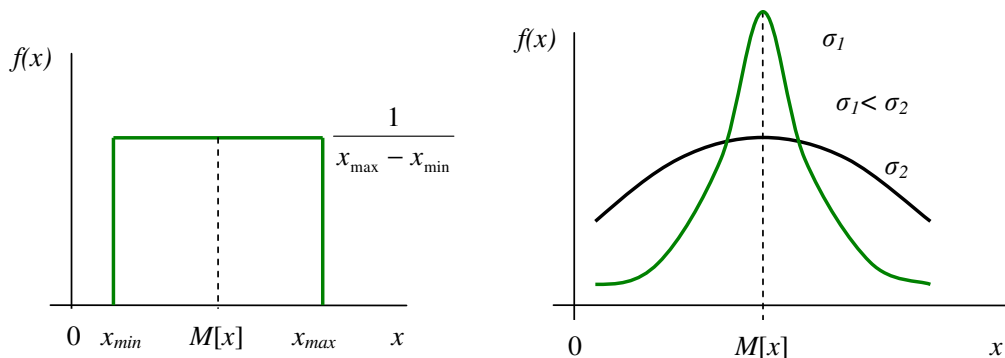
$$F(x_1) = \int_{-\infty}^{x_1} f(x) dx.$$

Tõenäosus, et juhuslik suurus x on vahemikus x_1 kuni x_2 on

$$P(x_1 < x < x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx.$$

Mõõtetehnikas kasutatakse kõige enam kahte tüüpi jaotusi:

- a) ühtlane jaotus
- b) normaaljaotus (Gaussi jaotus).



Ühtlane jaotus kirjeldab vigu, mille kõik suurused on võrdtõenäosed. Jaotusel on selged piirid x_{min} ja x_{max} . Dispersioon $D = \sigma^2 = (x_{max} - x_{min})^2/12$. Selle jaotuse järgi käitub näiteks numbrinäiduga mõõteriistade kvantimisviga.

Normaaljaotus (Gaussi jaotus) kirjeldab vigasid, mille tekkepõhjuseid (liidetavaid) on palju. Mistahes jaotusega liidetavate summa jaotus läheneb normaaljaotusele

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}},$$

kus $m = M[x]$ on matemaatiline ootus (täpne keskvärtus) ja σ – ruutkeskmise viga.

Tavaliselt loetakse, et vea keskvärtus (matemaatiline ootus) $m = M[x]$ on mõõtevea süstemaatiline liidetav Δ_s . Mõõtevea juhuslikku liidetavat Δ_j aga iseloomustab jaotuse seaduse kuju ja tema parameetrid.

Normaaljaotuse korral esinevad suured juhuslikud vead harvemini kuid on põhimõtteliselt alati võimalikud. Juhusliku vea paiknemise tõenäosus sümmeetrilistes piirides $\pm \sigma$, $\pm 2\sigma$ ja $\pm 3\sigma$ on vastavalt 0,683, 0,954 ja 0,997.

Täpsem arvutus toimub Laplace'i funktsiooni (normaaljaotuse tõenäosusintegraali), sellega seotud veafunktsiooni $erf(x)$ või meile tuntud $Q(x)$ abil.

Korduvate mõõtmiste töötlemine

Kui on võimalik ühe sama suuruse määramiseks teha korduvaid mõõtmisi, siis saab nende töötlemise järel leida rea olulisi suurusi:

- mõõdetava suuruse kõige tõenäosem väärtus (parim hinnang) on saadud mõõtetulemuste $A_1 \dots A_N$ aritmeetiline keskmine

$$M[A_i] = \bar{A} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i ;$$

b) üksiktulemuse hajumist iseloomustava ruutkeskmise vea σ hinnang mõõtetulemustest (Besseli valem) on

$$\sigma^*(A) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [A_i - M(A_i)]^2} ;$$

c) aritmeetilise keskmise hajumist iseloomustava ruutkeskmise vea hinnang on \sqrt{N} korda väiksem kui $\sigma^*(A)$. See väljendab võitu täpsuses, mida annab korduvate mõõtmiste keskmise kasutamine võrreldes üksikmõõtmisega.

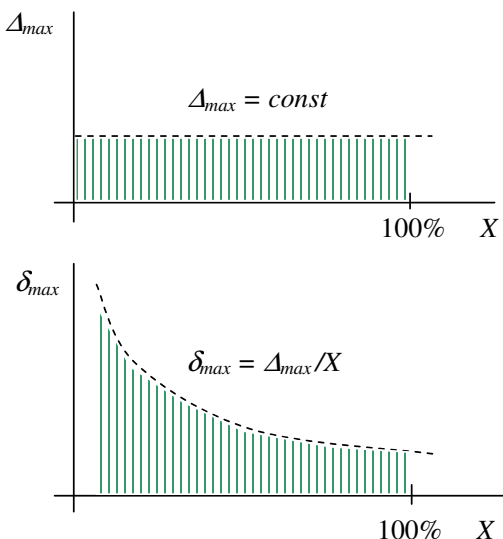
1.3 LUBATUD MÕÕTEVEA NORMEERIMINE

Lubatud viga normeeritakse kas absoluutse, suhtelise või mõne muu kujulise vea ülempiirina. Valitakse selline vea väljendusviis, mille arvvärtus võimalikult vähe või siis lihtsal viisil muutub mõõteriista kogu mõõtepiirkonna (skaala) ulatuses.

A. Absoluutne mõõtevig Δ – (ühikuga, teadmata märgiga!)

B. Suhteline mõõtevig $\delta = \frac{\Delta}{X} \approx \frac{\Delta}{A}$ (ühikuta arv, ka % ja ppm)

Oluline on lubatud mõõtevea muutumine mõõteriista mõõtepiirkonna ulatuses



Üldisem juhs:

$$\Delta_{max} = \text{adit. viga} + \text{mult.viga} = C + BX$$

$$\delta_{max} = \Delta_{max}/X = C/X + B$$

C. Taandatud mõõteviga

Määratakse kui absoluutse vea ja maksimaalnäidu A_{max} suhe:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{max}} 100\%$$

Vastab kogu mõõtepiirkonnas ühesuguse absoluutse vea suurusele.
NL-is toodetud mõõteriistades kannab nimetust täpsusklass.

Mingi näidu A juures $\delta = \gamma * (A_{max}/A)$

Näited: Voltmeetri lubatud vea arvutamine

1. Vahelduvpinge voltmeeter B3-38

Lubatud mõõtevea maksimaalväärtus on antud taandatud veana γ , mis määratakse kui absoluutse vea ΔU ja lugemi maksimaalväärtuse U_{max} suhe protsentides:

$$\gamma = \frac{\Delta U}{U_{max}} 100\% .$$

Absoluutne viga on sel juhul $\Delta U = \gamma U_{max}/100\%$, ja

suhteline viga on $\delta U = \gamma U_{max}/U$, %.

Sagedusalas 45 Hz ... 1 MHz ja mõõtepiirkondadel 1 mV ... 300 mV $\gamma = 2,5$
1 V ... 3000 V $\gamma = 4,0$

2. Vahelduvpinge voltmeeter B3-57

Lubatud mõõtevea maksimaalväärtus on antud taandatud veana γ .

Sagedusalas 45 Hz ... 200 kHz ja mõõtepiirkonnal 0,03 mV $\gamma = 4,0$
0,1 ... 0,3 mV ja 1 V ... 300 V $\gamma = 2,5$
1 mV ... 10 mV $\gamma = 1,5$

Põhivale liitub variatsioon 0,75 % piirkonnast

3. Vahelduvpinge voltmeeter B3-52/1

Lubatud mõõtevea maksimaalväärtus on antud suhtelise veana δU , mis avaldub valemiga

$$\delta U = \pm [C + D (U_{max}/U - 1)], \%$$

kus U_{max} on mõõtepiirkond, U mõõdetav pinge (näit)

Suurused C ja D on olevalt piirkonnast antud tabeliga

Piirkond	C	D	Lubatud mõõtevahemik	Sagedusala
10 mV	2,5	1,0	0,07 U_{max} ... U_{max}	10 kHz ... 1 GHz
100 mV	1,5	0,4	0,1 U_{max} ... U_{max}	10 kHz ... 1,5 GHz
1 V	1,5	0,25	0,1 U_{max} ... U_{max}	10 kHz ... 1,5 GHz
10 V	1,5	0,25	0,1 U_{max} ... U_{max}	10 kHz ... 1 GHz

4. Multimeeter HP34401A alalispinge mõõtmisel

Lubatud mõõtevea maksimaalväärtus on antud absoluutse veana, mis koosneb kahest liidetavast:

$$\Delta U = \pm (C \% \text{ lugemist} + D \% \text{ mõõtepiirkonnast}) [V]$$

Suurused C ja D olenevad:

- kontrollimisest möödunud ajavahemikust – kuni 1 aasta
- lahutusvõimest – 6 1/2 järku
- integreerimisajast – 100 PLC (100 võrgupinge perioodi)

ja on normaalse töötemperatuuri $+23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}$ korral järgmised:

Piirkond	100 mV	1 V	10 V	100 V
C	0,0050	0,0040	0,0035	0,0045
D	0,0035	0,0007	0,0005	0,0006

5. Multimeeter HP34401A vahelduvpinge mõõtmisel

Vahelduvpinge mõõtmisel näitab HP34401A ruutkeskmist (efektiiv)väärtust. Sagedusala on 10 Hz ... 20 kHz.

Lubatud mõõtevea maksimaalväärtus on antud absoluutse veana:

$$\Delta U = \pm (C \% \text{ lugemist} + D \% \text{ mõõtepiirkonnast}) [V]$$

Suurused C ja D on antud tabelis

Piirkond	100 mV	1 V ... 750 V
C	0,06	0,06
D	0,04	0,03