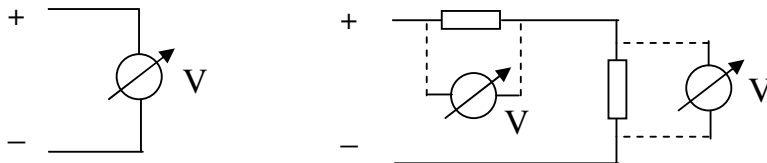


2 PINGE MÕÕTMINE

2.1 ALALISPINGE VOLTMEETRID

Voltmeetri sisendtakistus on ideaaljuhul väga suur: $R_{\text{sis}} \rightarrow \infty$

Voltmeedit võib lülitada pinge mõõtmiseks paralleelselt mistahes vooluringi osaga.



Ampermeetri sisendtakistus on ideaaljuhul väga väike: $R_{\text{sis}} \rightarrow 0$.

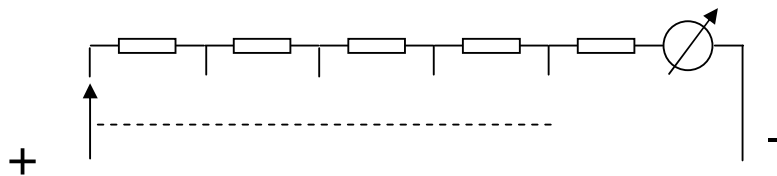
Ampermeedit võib lülitada voolu mõõtmiseks järjestikku mistahes vooluringi.

A. Osutindikaatoriga voltmeeter

kasutab mõõtesüsteemina magnetoelektrilist alalisvoolu mikroampermeedit.

Tundlikkus – täishälbele vastav vool on $10 \mu\text{A} \dots 200 \mu\text{A}$, takistus $R \cong < 1000 \Omega$.

Lülitatavate mõõtepiirkondadega voltmeeter:



100 V 10 V 1 V 0,1 V 0,01 V - mõõtepiirkond

100 M Ω 10 M Ω 1M Ω 100 k Ω 10 k Ω - voltmeetri sisendtakistus

B. Elektroonne analoogtoimega voltmeeter

kasutab alalispinge võimendit.

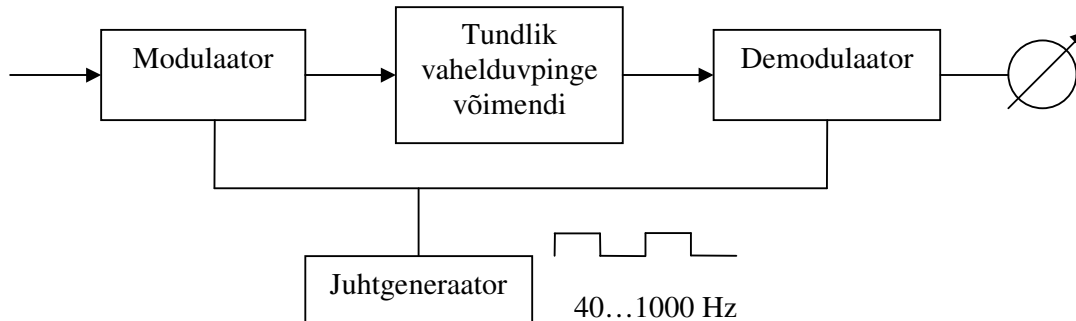
Omadused:

- sisendtakistus tunduvalt suurem ($>10 \text{ M}\Omega$);
- tundlikkus on ligikaudu sama kui võimendita voltmeetril.

Tundlikkuse suurendamist piirab [nulli triivi](#) nähtus.

Ideaalsel võimendil peaks lühistatud sisendi korral ($U_1 = 0$) olema ka väljundpinge $U_2 = 0$, mis reaalses seadmetes tegelikult nii ei ole. Väljundis tekkivat signaali nimetatakse nulli triiviks. Selle suurusega on piiratud minimaalne mõõdetav pinge.

Modulatsioon-demodulatsioon-(MDM)võimendis saab tundlikkust oluliselt suurendada, kuna võimendi nulli triiv on väga väike. Sel juhul ulatub voltmeetrite madalaim mõõtepiirkond suuruseni 0...1 μ V ja isegi alla selle.



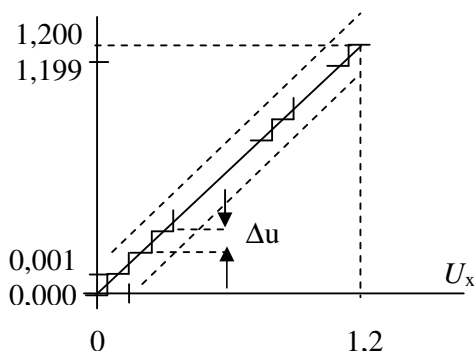
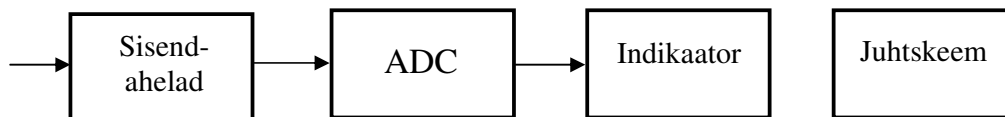
2.2 DIGITAALVOLTMEETRID

2.2.1 Üldised omadused

Digitaalvoltmeetri koostisse kuuluvad:

- sisendahelad (pingejagur, eelvõimendi, piirkondade valikut tagav seade),
- analoog-digitaalmuundur ADC,
- indikaatorseade ning juhtskeem.

Tavaliselt on digitaalvoltmeetrid alalispinge voltmeetrid. Kui nad võimaldavad lisaks sellele mõõta ka vahelduvpinget (ka voolutugevust ning takistust), nimetatakse neid [multimeetriteks](#).



Omadused:

- lahutusvõime = ADC samm Δu
- dekaadide arv $4\frac{1}{2}$, $5\frac{1}{2}$... $7\frac{1}{2}$
- täpsus 0,1 ... 0,002%

$$\text{Viga } \Delta_{\max} = (\text{adit. viga} + c \cdot U_x)$$

väljendatud kas V, mV, μ V, % või ppm.

Vea oluline osa on diskreetsusviga, mille suurus on $\Delta u/2$... $2 \cdot \Delta u$

2.2.2 Kahekordse integreerimisega voltmeeter

Kahekordse integreerimisega voltmeetris on kasutusel [integreeriv AD-muundur](#). Selle tööpõhimõte on järgmine.

Sisendpinget U_x integreeritakse fikseeritud integreerimisaja T_i vältel. Selle lõpuks on integraatori väljundisse tekkinud sisendpingega võrdeline pinge. See mõõdetakse seadme sees oleva tugipinge integreerimise teel.

Kui integraatori sisendis on pinge $u_1(t)$, on tema väljundpinge võrdne

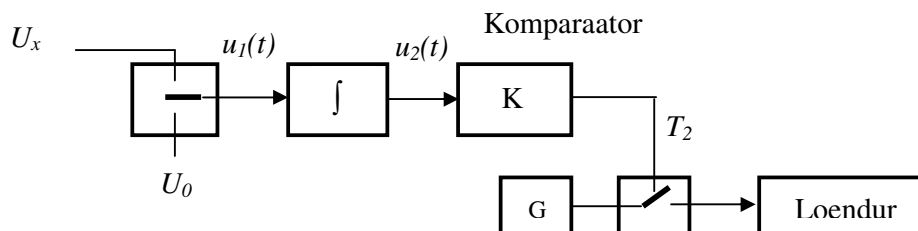
$$u_2(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t u_1(t) dt; \text{ kui } t = T_i \text{ ja } u_1(t) = U_x, \text{ siis } u_2(T_i) = \frac{1}{RC} \int_0^{T_i} U_x dt = \frac{U_x T_i}{RC}.$$

Üks mõõtetsükkel koosneb kahest osast:

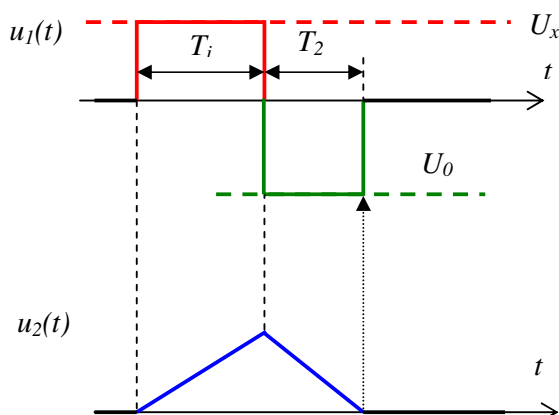
- fikseeritud kestusega integreerimisaeg T_i , mille vältel integreeritakse sisendpinget;
- vastupidise märgiga tugipinge integreerimise aeg, mis kestab seni, kuni integraatori väljundpinge jõuab tagasi nulli (selle hetke määrab komparaator K).

Vahetulemuseks on mõõtetsükli teise osa kestus T_2 .

AD-muunduri struktuurskeem



Pinge kujud integraatori sisendis ja väljundis



Kuna ajavahemiku T_i ja T_2 vältel määratud integraalid on ühesuursed, saame:

$$\frac{U_x T_i}{RC} = \frac{U_0 T_2}{RC}; \text{ siit } T_2 = \frac{U_x T_i}{U_0}.$$

Tsükli teise osa pikkus T_2 on võrdeline sisendpingega U_x .

Mõõtetulemuse saamiseks täidetakse T_2 loendusimpulssidega.

Alalispingele lisanduva [vahelduvhäire korral](#) on sisendpinge $u_I(t) = U_x + u_h(t)$ ja

$$u_2(T_i) = \frac{U_x T_i}{RC} + \frac{1}{RC} \int_0^{T_i} u_h(t) dt = k(U_x + \Delta u).$$

Siin Δu on vahelduvhäirest tingitud viga. Kui siinuselise häirepinge amplituud on U_h ja sagedus f_h , on maksimaalne vea väärtus

$$\max|\Delta u| = U_h |\text{sinc}(x)|, \text{ kus } x = f_h T_i \text{ ja funktsioon } \text{sinc}(x) = \sin(\pi x) / (\pi x).$$

Kui häirepinge sagedus $f_h = 1/T_i, 2/T_i$ jne, siis viga on null. Kui vahelduvhäire sagedus on teada, valitakse integreerimisaeg T_i nii, et ta sisaldab täisarvu häirepinge perioode.

Kahekordse integreerimisega digitaalvoltmeetrise omadused:

- kõrge täpsus (kuni 0,002%) ja vahelduvhäire väike mõju,
- suhteliselt aeglane – kasutatav integreerimisaeg 0,1 ... 1 s.

Integreeriv voltmeeter töötab suhteliselt aeglaselt ja toimib ise filtrina. Kiiretoimeline digitaalvoltmeeter on aga tundlik vahelduvhäirele. Selle vähendamiseks tuleb kasutada filtrit, mis aga aeglustab seadme tööd.

2.3 VAHELDUVPINGE VOLTMEETRID

Vahelduvpinge voltmeetrises kasutatakse kahte põhilist varianti:

- võimendussisendiga voltmeeter;
- detektorsisendiga voltmeeter.



Võimendussisendiga voltmeeter võimaldab mõõta väikesi pingeid. Seetõttu on tundlikes voltmeetrite (millivoltmeetrites, mikrovoltmeetrites) kasutusel see variant.

Detektorsisendiga voltmeetril on lai sagedusala (kuni 1 GHz), kuid voltmeeter vajab sisendpinget üle 0,1 V. On kasutusel kõrgsagedus- ja impulssvoltmeetrites.

2.3.1 Mida näitab vahelduvpinge voltmeeter?

Ajas muutuva pinge $u(t)$ hetkväärtuse mõõtmine suhteliselt aeglase toimega voltmeetri abil võimaldab mõõta vaid selle pinge mitmesuguseid keskmistatud väärtusi.

Kui pinge sisaldab alaliskomponenti, on selle mõõtmine võimalik alalispinge voltmeetri abil, eeldusel, et vahelduvkomponent ei häiri voltmeetri normaalset tööd. Alalispinge voltmeeter mõõdab pinget [keskväärtust e. alaliskomponenti](#)

$$\overline{u(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt .$$

NB! Integreerimisaeg T olgu võrdne või täisarv kordne vahelduvkomponendi kordusperioodiga.

[Alaldatud pinget keskväärtus](#) (mooduli keskväärtus, sageli nimetatud ka lihtsalt keskväärtuseks) on eelmisest erinev:

$$U_k = |\overline{u(t)}| = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt .$$

[Efektiivväärtus](#) (pinge ruutkeskmine väärtus, *root-mean-square RMS*) on

$$U = \sqrt{\overline{u(t)^2}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} .$$

Pinge efektiivväärtus on seotud signaali keskmise võimsusega: $P = U^2/R$.

[Tippväärtus](#) (ka nn amplituudväärtus) on pinget maksimaalne väärtus teatud aja jooksul:

$$U_{\max} = \max[|u(t)|] .$$

Tippväärtuse mõõtmine on vajalik impulssstehtnikas ja kõrgsagedustehtnikas.

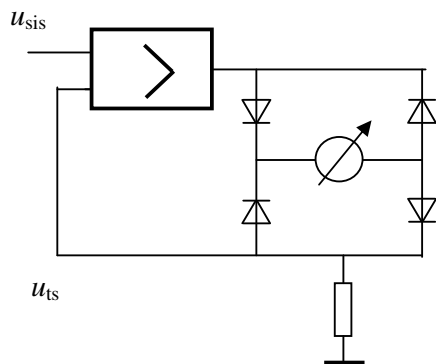
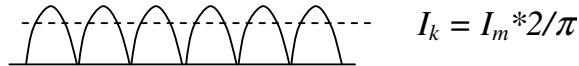
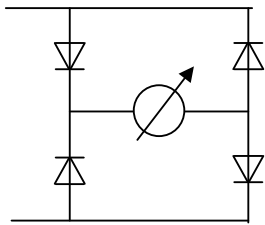
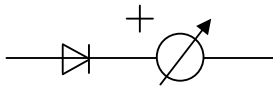
2.3.2 Keskvärtusvoltmeeter

Keskvärtusvoltmeeter on tavaliselt võimendussisendiga voltmeeter. Tema oluline osa on täpne võimendi, millel on:

- stabiilne (astmeliselt muudetav) võimendustegur,
- võimalikult lai sagedusala (alates sagedusest umbes 10 Hz kuni 10...100 MHz),
- väike omamüra.

Suurema pinge mõõtmisel kasutatakse võimendi ees olevat pingejagurit (atenuaator), mille ülekanne on astmeliselt muudetav .

Detektor muundab sisend-vahelduvpinge alaldatud ühepolaarseks pingeks (vooluks). Selle keskvärtus vastab alaldatud pinge (mooduli) keskvärtusele. Lülitus töötab suhteliselt suure pinge juures (üle 1 V), mistõttu ta on küllalt lineaarne.



Detektorlülitusse kuulub tagasisidestatud võimendi, mille väljundis on alaldussild. Tagasiside pinge on võrdeline silda läbiva voolu hetkväärtusega:

$$u_{ts} = R \cdot i.$$

Tagasiside tõttu $u_{sis} - u_{ts} \approx 0$, seega $i \approx u_{sis}/R$. Et alaldatud vool on võrdeline sisendpingega, siis:

- paraneb silda lineaarsus väikesel pingel,
- väheneb diodi temperatuurisõltuvuse mõju.

Keskvärtusvoltmeetri gradueerimine:

- siinuspinge mõõtmisel peaks lugem vastama efektiivväärtusele.

Kuna siinussignaali efektiivväärtus on $U = 1,11 \cdot U_k$, siis voltmeetri gradueerimine arvestab kujutegurit $k_f = U/U_k = 1,11$.

Kui pinge erineb kuju poolest siinusest, tekkib kujust olenev mõõteviga. Tavaliselt on keskvärtusvoltage ette nähtud vaid siinuspinge mõõtmiseks.

2.3.3 Efektiivväärtusvoltage

Efektiivväärtusvoltage on võimendussisendiga vantage, mille detektor mõõdab pinge kujust olenemata alati efektiivväärtust.

Kasutusala:

- mittesiinuselise pinge mõõtmine,
- juhusliku signaali, näit mürapinge mõõtmine.

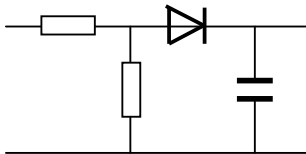
Kasutatav detektorlülitus on kas ligikaudse ruutskaalaga või tagasiside abil lineariseeritud keerukam lülitus.

Ruutskaalaga lülitused

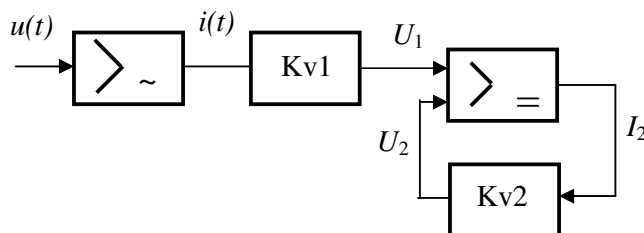
a) termoelektriline muundur



b) ÜKS-diod, mis töötab oma tunnusjoone ruutosas



Tagasisidega lineariseeritud lülitus



Lülitus kasutab kahte ühesugust kvadraatorit $Kv1$ ja $Kv2$. Nende väljundis on alalispinge U_1 ja U_2 kus:

$$U_1 = k \overline{i(t)^2} \sim \overline{u(t)^2} \sim U^2 \text{ on võrdeline sisendpinge efektiivväärtuse ruuduga}$$

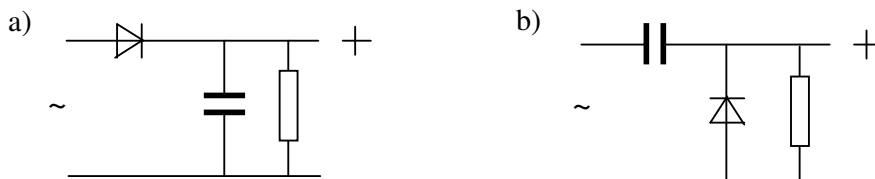
$$U_2 = k I_2^2 \text{ on võrdeline väljund(alalis)voolu ruuduga}$$

Tagasiside hoiab võimendi sisendpinged võrdsed: $U_1 = U_2$. Siis on ka $I_2^2 = \overline{i(t)^2}$. Väljundvool I_2 on võrdeline voolu $i(t)$ ja seega ka sisendpinge $u(t)$ efektiivväärtusega $U = \sqrt{\overline{u(t)^2}}$.

2.3.4 Tippväärtusvoltmeeter

Tippväärtusvoltmeeter on detektorsisendiga lülitus, kus sisendpinge läheb otse detektorile. Sellele järgneb võimendamine alalispingel. Suurema pinge mõõtmisel võib detektori ees olla ka pingejagur.

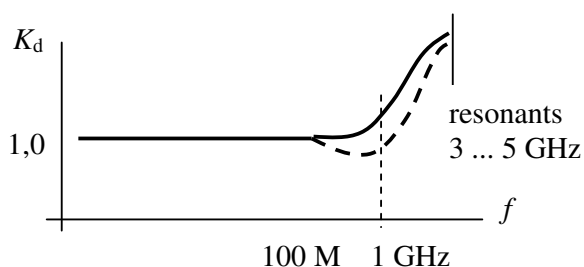
Kasutatakse avatud sisendiga (a) ja suletud sisendiga (b) detektorlülitust.



Nende lülituste väljundil olev alalispinge on ligikaudu võrdne sisendpinge tippväärtusega (eeldus: ajakonstant $\tau = RC \gg$ sisendpinge kordusperiood T).

Avatud sisendi korral on lülitus tundlik sisendpinges olevale alaliskomponendile, suletud sisendi korral aga mitte.

Detektorlülituse käitumine kõrgetel sagedustel oleneb peamiselt sisendjuhtmete ja diodi resonantsist (põhjustab detektori ülekande tõusu sagedustel >1000 MHz). Mõjub ka laengukandjate lõplik liikumisaeg diodis, mis vähendab ülekannet. Olenevalt lubatud veast ulatub voltmeetri normaalne tööpiirkond sagedusteni umbes 1 GHz.



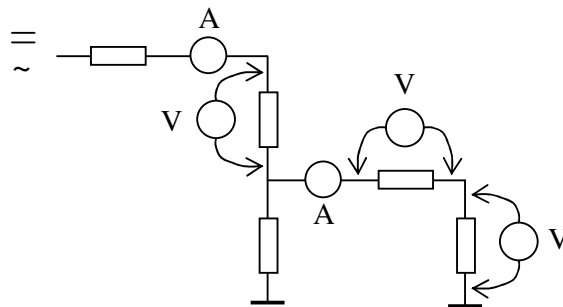
Detektorsisendiga voltmeeter reageerib sisendpinge tippväärtusele. See pakub huvi impulss-signaalide korral. Kõrgsagedusvoltmeetris on aga tavaline, et signaal kuju on siinus. Seetõttu gradueeritakse kõrgsagedusvoltmeeter nii, et tema näit vastab siinuse efektiivväärtusele $U = 0,707U_{\max}$.

2.4 PINGE JA VOOLU MÕÕTMISEST

Voolu mõõtmine on vajalik alalisvoolu ja madalsagedusliku vahelduvvoolu korral. Ampermeeter lülitatakse järjestikku mõõdetava voolu ahelasse. Seetõttu peab tema sisetakistus olema väga väike võrreldes ülejäänud elementide takistusega. Ideaalse ampermeetri sisetakistus on võrdne nulliga.

Kõrgemal sagedusel kohtab voolu mõõtmist üliharva. Seal püütakse läbi saada vaid pinge mõõtmisega, mis on mõõteriistade lülitamise seisukohast mugavam. Voltmeeter lülitatakse paralleelselt mõõdetava pinge ahelale. Seetõttu peab tema sisetakistus olema väga suur võrreldes ülejäänud elementide takistusega. Ideaalse voltmeetri sisetakistus on lõpmata suur.

Vaatleme tüüpilist lülitusviisi alalispingel ja madalsageduslikul vahelduvpingel.



Kõrgemal sagedusel on voltmeetri sisend tavaliselt ebasümmeetriline – üks sisenditest on nn kõrge-oomiline ja teine ühendatud elektrilise maaga. Seetõttu saab siin pingeid mõõta vaid maa suhtes. Enamus muud tüüpi raadiomõõteriistu, näit otsillograafid, signaali- ja spektrianalüsaatorid jms lülitatakse mõõtmistel samasugusel viisil.

