



FÜÜSIKA PRAKTIKUMI

tööjuhendid

II

ARX

A-30602

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT

Füüsika kateeder

FÜÜSIKA PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID

II

ARHIIVKOGU

Tallinn

1970

ТАЛЛИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

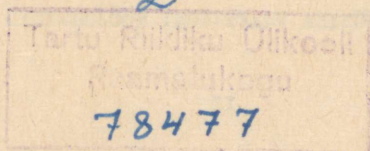
Кафедра физики

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ФИЗИКЕ II

Составили М. Яагус, В. Бендер,
Т. Руус, Ю. Удер

На эстонском языке

2



ARHIIVKOGU

Koostajad: M. Jaagus

V. Bender

T. Ruus

Ü. Uder

Heaks kiidetud kateedri koosolekul

2. juulil 1970.a.

Vastutav toimetaja M. Jaagus

Trükkida antud 28. X 1970. Paber 60x84/16.
Trükipg. 11,75. Tingpg. 10,93. Tiraaž 1500.
TPI rotaprint, Tallinn, Koskla 2/9. Tell.535

Hind 33 kop.

TÖÖKORD FÜÜSIKA PRAKTIKUMIDES

1. Töö praktikumis toimub tunniplaanil alusel. Konkreetseid tööd üliõpilastele planeerib praktikumi juhendaja. Üliõpilane on kohustatud juhendaja juures hiljemalt eelmises praktikumis välja selgitama järgmise töö ja selle vastavalt ette valmistama. Ettenähtud ajal tegemata jäänud töö sooritatakse semestri lõpul.

2. Tööle lubatakse üliõpilased, kes on vastavaks laboratoorseks tööks teoreetiliselt ette valmistunud ning esitavad alustatava töö protokollid.

3. Laboratoorse töö protokoll koosneb järgmistest osadest:

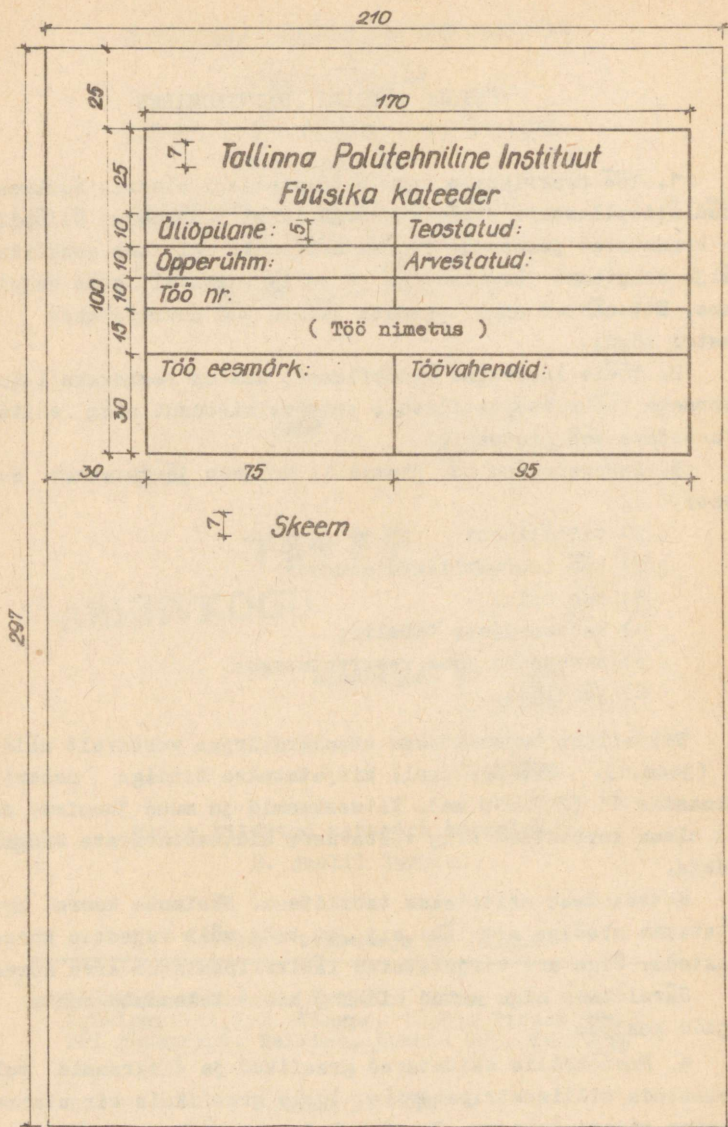
- 1) tiitelleht;
- 2) töö teoreetilised alused;
- 3) töö käik;
- 4) katseandmete tabelid;
- 5) arvutused koos veaarvutusega;
- 6) järeldus.

Tiitelleht kujundatakse standardkirjas vastavalt näidisele (joon.1). Töö protokoll kirjutatakse tindiga paberile formaadis 11 (297x210 mm). Katseskeemid ja muud joonised peavad olema korrektsed ning vastavuses üldkasutatavate tingmärkidega.

Katseandmed esitatakse tabelitena. Eksimuse korral kriipsutatakse ebaõige arv läbi nii, et teda võib vajaduse korral taastada. Õige arv kirjutatakse läbikriipsutatud arvu kõrvale.

Järelduses olgu antud hinnang katse tulemuste kohta ja vigade analüüs.

4. Protokollis esitatavad graafikud ja diagrammid tuleb joonestada millimeetripaberile. Igale graafikule kirjutatakse nimetus standardkirjas. Graafikud joonestatakse tušiga või hästi nähtavalt pliiatsiga lekaali või joonlaua abil.



Joonis 1

Graafikute joonestamisel kasutatakse sellist mastaapi, mille puhul kõvera kuju iseloomustab katse tulemusi kõige ilmekamalt. Graafiku teljele kantakse suuruse tähis koos mõõtühikuga ning arväärtuste skaala.

Katsepunktid märgitakse graafikule ringikestena või erinevate mõõteseeriatega puhul mitut tüüpi märkidega (ruudukesed, kolmnurgad jne.). Kõver tõmmatakse üldjuhtumil katsepunktide vahelt läbi sujuva joonena kooskõlas funktsiooni sisulise kulgemisega.

5. Üliõpilasi, kes ei ole laboratoorseks tööks ette valmistunud, ei lubata tööd alustada.

6. Koostatud skeemi ja aparatuuri võib tööle rakendada ainult juhendaja loaga. Kuni selle loa saamiseni peavad elektriseadmed olema vooluallikaga ühendamata.

7. Aparatuuri rikkumisel kannab vastutust täies ulatuses üliõpilane.

8. Praktikumi vältel teeb üliõpilane mõõtmisi ning kannab tabelisse arvutusteks vajalikud katseandmed, mis kontrollitakse juhendaja poolt enne katse skeemi (aparatuuri) lahutamist ja kinnitatakse juhendaja allkirjaga. Allkirjata katseandmed loetakse järgnevateks praktikumi tundideks kehtetuks.

9. Pärast eelmise punkti nõuete täitmist seab üliõpilane töökohta ja skeemi lähteseisukorda.

10. Laboratoorne töö loetakse arvestatuks, kui üliõpilane on teinud kõik vajalikud arvutused, graafikud, sõnastanud järeldused ning vastab teoreetilisele osale. Töö tuleb vastata järgmisel praktikumil. Vastamata tööde arv ei tohi olla suurem kui kaks.

11. Arvestuse saamiseks (eksamile pääsemiseks) peab üliõpilane sooritama nõutavad kontroll- ning laboratoorsed tööd, samuti esitama kodused ülesanded. Peab tundma aparatuuri ning laboratoorsete tööde teooriat ja oskama kursuse ulatuses lahendada ülesandeid.

OHUTUSTEHNICA EESKIRJAD FÜÜSIKA PRAKTIKUMIS

1. Praktikumides on lubatud teha ainult õppeplaamilisi töid. Muude tööde tegemine on kategooriliselt keelatud.
2. Elektriseadmeid ja skeeme võib pingestada ainult praktikumi juhendaja eriloal.
3. Töötamisel elektriseadmetega on keelatud keerata antud töö otseseks tegemiseks mittevajalikke nuppe, püüda ükskõik mil viisil ligi pääseda elektriseadmete varjatud osadele, rikkuda juhtmete isolatsiooni jne.
4. Elektrisoojendusriistade (kannude jt.) veega täitmine on lubatud ainult pärast riista eraldamist elektrivõrgust.
5. Vältida elavhõbeda mahapillamist. Laiali pääsenud elavhõbe tuleb hoolsalt kokku koguda.
6. Elektriseadmete süttimisel tuleb elektrivool välja lülitada ja vajaduse korral kasutada ainult süsihappegaaskustutit.
7. Töö lõpetamisel kontrollida, kas kõik elektriseadmed on eraldatud elektrivõrgust, vee- ja gaasikraanid suletud, ning korrastada töökoht.
8. Tutvunud käesolevate ohutustehnika eeskirjadega, kohustub üliõpilane neid täitma ja fikseerib seda oma allkirjaga vastavas päevikus.

MÕÕTMISVIGADE ARVUTAMINE

1. Füüsikaliste suuruste mõõtmine

Füüsikalise eksperimendi põhiülesandeks on ühtede või teiste füüsikaliste suuruste mõõtmine. Mõõtmiseks nimetatakse antud füüsikalise suuruse võrdlemist teise sama liiki suurusega, mis on võetud mõõtühikuks. Mõõtühikud realiseeritakse vastavate etalonidena ja seepärast kujutab mõõtmine antud füüsikalise suuruse võrdlemist tema etaloniga. Kuna aga mõõt-

mise käigus etalon kulub või allub teistele muudatustele, siis kasutatakse mõõtmisel mõõteinstrumenti, mida on eelnevalt võrreldud (kas otseselt või kaudselt) etaloniga.

Mõõtmistulemust nimetatakse mõõtarvuks. Mõõtmine võib olla otsene või kaudne. Otsesel mõõtmisel leitakse mõõtarv mõõteinstrumenti skaalal kindla punkti asukoha määramise tulemusena. Kaudsel mõõtmisel aga leitakse mõõtarv arvutamise teel (valemi abil) otseselt mõõdetud suurustest. Näiteks vedeliku ruumala määramine mensuuri abil on otsene mõõtmine, kuid keha ruumala määramine tema mõõtmete abil – kaudne.

Kogemused näitavad, et sama suuruse isegi võimalikult täpsel korduval mõõtmisel saame üksteisest erinevad tulemused. Seega ühtki mõõtmist ei saa teha täiesti täpselt ja iga mõõtmine on alati seotud teatud veaga. Mõõta absoluutselt täpselt näiteks joonlaua pikkus tähendaks saada mõõtarv

25,7246850017...cm,

milles esineksid numbrid mistahes kohas peale koma (lõpmatult palju kümnendkohti). On selge, et selline mõõtmine on teostatamatu nii praktiliselt (ei ole nii täpselt mõõteriista) kui ka põhimõtteliselt – ühegi joonlaua (ja mitte ainult joonlaua) otspunktid ei ole nii täpselt määratletud.

Absoluutselt täpse tulemuse võime saada ainult loendamisel.

Ükski mõõtarv ei ole väärtuslik, kui ei ole teada selle viga. Seega mõõtmise ülesandeks ei ole mitte ainult mõõtarvu leidmine, vaid ka täpsuse (vea) hindamine, millega antud tulemus on saadud.

2. Mõõtmisvead

Mõõtmisvead liigituvad:

1) jämedad vead ehk eksed, 2) süstemaatilised vead, 3) juhuslikud vead.

Jämedad vead ehk eksed on tingitud valest lugemi võtmisest mõõteriista skaalalt, tulemuse valest üleskirjutamisest jne. Et neid vältida, on tarvis töötada väga tähelepanelikult ja protokollida mõõtmistulemused maksimaalse korralikkusega. Eksed on tavaliselt hästi tähelepandivad, sest nendele vasta-

vad mõõtarvud on järsult erinevad teistest mõõtarvudest, mis on saadud antud eksperimendis.

Süsteemaatilisteks nimetatakse vigu, mis on tingitud mõõteriista mittekorrasolekust, mitteõigetest mõõtmisvõtetest, eksperimentaatori vilumatusest jne. Süsteemaatilised vead tekitab näiteks siis, kui mõõteriista skaala on nihutatud, osuti on paindunud, skaala mastaap on vigane või jaotiste väärtus ei ole õieti määratud; kui elektrilistel mõõtmistel jätame arvestamata ühendusjuhtmete takistuse, rõhu mõõtmisel ei arvesta baromeetri näidu olenevust temperatuurist jne.

Süsteemaatilised vead võib jaotada kolme gruppi: 1) vead, mille olemus on meile tuntud ja mille suurused võivad olla küllaldase täpsusega määratavad. Selliseid vigu nimetatakse parandusteks (näiteks temperatuurist olenevad parandused metallmõõtelindile); 2) tuntud päritoluga vead, kuid tundmatute suurustega (näiteks mõõteriista vead, mis antakse mõõteriista täpsusklassiga - vea suurus ei ole teada, täpsusklass määrab ära ainult vea ülemmäära); 3) vead, mille olemusest me ei ole teadlikud, kuigi nad võivad olla üpris suured (näiteks materjali tiheduse määramine eksemplari järgi, milles esineb tühimikke).

Süsteemaatilistele vigadele on iseloomulik see, et nad on kindla märgiga, s.t. nad mõjustavad mõõtmise tulemust ühes kindlas suunas, seda suurendades või vähendades. Mõõtmiste kordamisel jäävad need vead muutumatuteks või muutuvad kindla seaduspärasuse järgi.

Süsteemaatilisi vigu võib avastada või vähendada erinevaid mõõteriistu või mõõtmismeetodeid kasutades. Sellisel viisil on mõnikord võimalik muuta süsteemaatilisi vigu juhuslikeks. Kui näiteks mõõta antud voolu tugevust kümne samasse täpsusklassi kuuluva ampermeetriga, siis üksikmõõtmiste vead ei ole enam sama suuruse ja märgiga.

Juhuslikeks nimetatakse vigu, mille tekkimiseks on palju erinevaid põhjusi. Need vead on aga sellised, mis eksperimendis ei avaldu nii selgelt, et neid võiks märgata ja arvestada. Iga üksikmõõtmise juures mõjuvad need põhjused erine-

valt ja seepärast on nendest tingitud vead ühe ja sama füüsikalise suuruse mitmekordsel mõõtmisel (samal meetodil) nii märgilt kui ka suuruselt erinevad. Näiteks kaalumisel on juhuslike vigade põhjuseks õhu liikumine, kaalukausile langev tolmukübe, kaalukangi ebaühtlane soojenemine kää lähendamisel sellele, muutuv hõõrdumine toetuspunktides jne.

Juhuslike vigade põhjusi ei ole võimalik kõrvaldada ja seepärast esinevad igasuguste mõõtmiste juures juhuslikud vead. Neid võib ainult vähendada, kasutades täiuslikumaid mõõteriistu, täpsemaid mõõtmismeetodeid või parandades mõõtmistingimusi.

Juhuslikud vead on tingitud põhjustest, mida ei saa täpselt ette näha. Järelikult ei saa ka ette näha antud üksikmõõtmises tekkinud viga. Ühe või teise juhusliku vea ilmumine on nn. juhuslikuks sündmuseks. Sellised juhuslikud sündmused on käsitletavad ainult tõenäosusteooria seisukohtadelt lähtudes. Seepärast tuleb juhuslike vigade hindamisel ka vastavaid seisukohti arvestada.

3. Mõõtarvu absoluutne ja relatiivne (suhteline) viga

Mõõdetava suuruse tõelise väärtuse x ja mõõtmisel saadud mõõtarvu A vahet nimetatakse mõõtarvu absoluutseks tõeliseks veaks α :

$$x - A = \alpha.$$

Kuna mõõdetava suuruse tõeline väärtus on tundmata, siis ei ole võimalik leida ka tõelise vea α suurust. Üksikmõõtmiste analüüs, mõõteriista kohta teada olev täpsus või rea mõõtmisseeriade tulemuste kriitiline läbitöötamine võimaldavad leida määra, milleni ülimalt võib küündida absoluutne tõeline viga. Absoluutsete tõeliste vigade ülemmäära nimetame mõõtarvu absoluutseks veaks. Mõõtarvu absoluutse vea tähistame ΔA . See tähendab, et mõõdetava suuruse tõeline väärtus x asub vahemikus

$$A - \Delta A \leq x \leq A + \Delta A.$$

Seda kirjutatakse lühidalt nii:

$$x = A \pm \Delta A.$$

Näiteks $x = (2,74 \pm 0,07) \text{ cm}$.

Eespool antud absoluutse vea mõiste määratlust tuleb võtta järgmise reservatsiooniga. Kui on tegemist mõõtmistega, milles juhuslik viga on kaduvväike, võrreldes süstemaatilise veaga (mõõteriista viga jne.), s.t. kui esineb ainult süstemaatiline viga, siis on võimalik leida absoluutsele tõelisele veale (selle annab näiteks mõõteriista täpsusklass) ülemmäär, millest ta suurem olla ei saa. Kui aga juhuslikud vead on ülekaalus või nad on suuruselt võrreldavad süstemaatiliste vigadega, siis sellise täpse ülemmäära leidmine ei ole võimalik. See selgub järgnevast.

Olgu füüsikalist suurust x mõõdetud n korda ja saadud n mõõtarvu:

$$x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n.$$

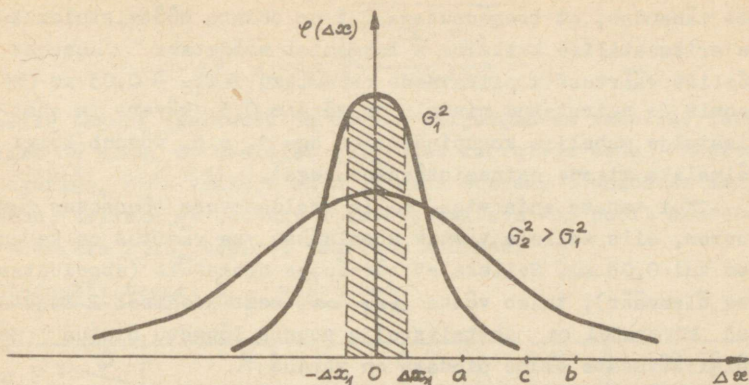
Kui süstemaatilised vead praktiliselt puuduvad, siis suurus

$$\Delta x_i = x - x_i$$

kujutab endast mõõtmisseeria i -nda mõõtmise juhuslikku viga. Ühe või teise vea tekkimine on juhuslik nähtus. Suuruselt erinevatel juhuslikel vigadel on erinevad esinemistõenäosused. Mistahes mõõtmisseerias esineb ühtesid vigu rohkem kui teisi. Enamikus füüsikalistes eksperimentides alluvad juhuslikud vead Gaussi normaalsele vigade jaotusseadusele:

$$\varphi(\Delta x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x}{\sigma} \right)^2},$$

kus $\varphi(\Delta x)$ on juhuslike vigade jaotusfunktsioon, mis iseloomustab vea Δx esinemistõenäosust, ja σ^2 on mõõtmistulemuste dispersioon, mis iseloomustab mõõtmistulemuste hajuvust. Viimane on näha jooniselt 2. Mida väiksem on σ^2 , seda väiksem on suurte vigade esinemistõenäosus. Mida suurem on dispersioon, seda rohkem on mõõtmistulemused hajutatud.



Joonis 2

Toodud juhuslike vigade jaotusseadusest tuleb teha järgmine järeldus. Kui mõõtmiste arv n on väike suurus (5 - 10), siis mõõtmistulemuste aritmeetiline keskmine

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (1)$$

mis loetakse tavaliselt mõõtmiste lõppresultaadiks (tõenäolisim väärtus), ei pea isegi ligilähedaselt kokku langema mõõdetava suuruse tõelise väärtusega, mida kujutab joonise 2 abstsissiteljel (kui arvoteljel) punkt 0. Tõenäosusteooria ei eita niisugust võimalust, kus kõik n lugemit on langenud vahemikku (a, b) ja keskvaartust $\bar{x}$ kujutab mingi punkt c selles vahemikus. Muidugi on iseküsimus, kui suur on sellise võimaluse tõenäosus. Aritmeetiline keskmine läheneb tõelisele väärtusele seda enam, mida suurem on n .

Järelikult on põhimõtteliselt võimalik kuitahes suure vea tekkimine ja seepärast ei ole mõtet rääkida ka juhuslike vigade ülemmäärast selle sõna otseses tähenduses. Seetõttu juhuslike vigade korral antakse absoluutne viga koos vastava tõenäosusega. Selle selgitamiseks vaatleme arvulist näidet:

$$\bar{x} = (0,72 \pm 0,03) \text{ mm, usaldatavuse tõenäosusega } 0,5.$$

See tähendab, et tõenäosusega 0,5 on oodata mõõtmistulemuste aritmeetilise keskmise $\bar{x}$ langemist mõõdetava suuruse tõelist väärtust x piiravasse vahemikku $\Delta x_1 = \pm 0,03$ mm (vt. joonis 2: viirutatud pindala on võrdne 0,5, kõvera ja abstsissitelje vaheline kogupindala on aga 1, s.o. võrdub kõigi võimalike vigade esinemistõenäosusega).

Kui tahame anda viga, mille usaldatavuse tõenäosus oleks suurem, siis sellele vastav absoluutse vea väärtus on ka suurem kui 0,03 mm. Selleks et tõenäosus oleks üks (absoluutse vea ülemmäär), tuleb võtta $\Delta x_1 \rightarrow \infty$, sest joonisel 2 kujutatud kõveratel on abstsissitelje suunas lõpmatu ulatus ja kõigi kõverate alune pindala on võrdne 1.

Mõõtmisvigade teoorias, mis toetub tõenäosusteooriale, on leitud valemid, mis võimaldavad määrata mistahes usaldatavaid tõenäosusi omavaid absoluutse vea väärtusi. Väga suure arvuga n mõõtmisseeria korral nimetatakse absoluutset viga, mille usaldatavuse tõenäosus on 0,683, ruutkeskmiseks veaks. Ruutkeskmine viga arvutatakse järgmiselt

$$\Delta x_r = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}. \quad (2)$$

See on aritmeetilise keskmise $\bar{x}$ ruutkeskmine viga. Mõõtmisseeria üksiktulemuse x_1 ruutkeskmiseks veaks on

$$\Delta x_r' = \sqrt{n} \cdot \Delta x_r$$

ja selle kaudu on defineeritud ka dispersioon

$$\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} (\Delta x_r')^2.$$

Kui mõõtmiste arv n ei ole suur (teoreetiliselt peaks $n \rightarrow \infty$), siis valemi (2) abil arvutatava vea usaldatavuse tõenäosus on ka väiksem kui 0,683. Et väikese n väärtuse korral valem (2) annaks vea endise usaldatavuse tõenäosusega, siis tuuakse valemisse parandustegur $t_{n\beta}$. Seda tegurit nimetatakse Student'i teguriks. $t_{n\beta}$ oleneb üksikmõõtmiste arvust n ja usaldatavuse tõenäosusest β , millega tahame esitada arvutatava vea Δx_r :

$$\Delta x_r = \pm t_{n\beta} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}.$$

Selle teguri väärtused on toodud alljärgnevas tabelis. Tabelist on näha, et avaldist (2) tuleb korrutada seda suurema teguriga, mida väiksem on n ja mida suurema tõenäosuse esitame, selleks et mõõtarv $\bar{x}$ satuks leitava vea poolt määratud vahemikku $2 \Delta x_r$ tõelise väärtuse x ümber.

Student'i teguri $t_{n\beta}$ väärtused

$n \backslash \beta$	0,3	0,5	0,7	0,99
2	0,51	1,00	2,0	63,7
3	0,45	0,82	1,3	9,9
4	0,42	0,77	1,3	5,8
5	0,41	0,74	1,2	4,6
6	0,41	0,73	1,2	4,0
7	0,40	0,72	1,1	3,7
8	0,40	0,71	1,1	3,5
9	0,40	0,71	1,1	3,4
10	0,40	0,70	1,1	3,3

Absoluutse vea iseloomustamiseks kasutatakse ka aritmeetilist keskmist viga:

$$\Delta x_k = \pm \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{x} - x_i|}{n}, \quad (3)$$

mis on küll lihtsamini arvutatav kui ruutkeskmise viga (2), kuid selle usaldatavuse tõenäosust β ei ole praktiliselt võimalik määrata ja seepärast saadaval tulemusel ei ole väärtust. Avaldist (3) võib kasutada ainult suurte n väärtuste korral ($n > 30$) ruutkeskmise vea arvutamise lihtsustamise eesmärgil

$$\Delta x_r = \frac{1,25}{\sqrt{n}} \Delta x_k. \quad (4)$$

Tulemusele (4) vastab siis usaldatavuse tõenäosus 0,683. Kui tahame leida suurema usaldatavuse tõenäosusega viga, tuleb avaldis (4) korrutada Student'i teguriga (siis peab olema käepäraselt tabel $t_{n\beta}$ jaoks, milles on antud ka suuremad n väärtused).

Lisaks eespoolmainitule kasutatakse absoluutse vea iseloomustamiseks tõenäolist viga, mille usaldatavuse tõenäosus on 0,5. Tõenäoline viga arvutatakse ruutkeskmise vea (mille arvutamisel on arvestatud tegurit $t_{n\beta}$, $\beta = 0,683$) kaudu järgmiselt:

$$\Delta x_t = 0,683 \Delta x_r.$$

Kasutades tabelit lk.13 on siiski võimalik leida juhuslikule veale ülemmäära teatud mottes. Kuna me loeme näiteks tõenäosuse 0,99 praktiliselt võrdseks ühega, siis võime valemi (2) abil koos parandusteguriga $t_{n\beta}$ ($\beta = 0,99$) leitud vea lugeda mõõtarvu $\bar{x}$ absoluutse vea ülemmääraks. Tulemusel on mõtet muidugi ainult siis, kui see ei osutu liialt suureks (mõõtarvu endaga võrreldes), mis võib juhtuda, kui mõõtmistulemuste seerial on suur dispersioon σ^2 .

Absoluutne viga ei iseloomusta mõõtmistäpsust täielikult. Oletame, et oleme mõõtnud pliiatsi pikkust ja töölaua serva pikkust ühe ja sama absoluutse veaga $\Delta x = 1$ cm. On selge, et mõõtmised ei ole tehtud ühe ja sama täpsusega, kuigi absoluutsed vead on võrdsed. Kaks või enam mõõtmistulemust on saadud ühesuguse täpsusega, kui nende relatiivsed (suhtelised) vead on võrdsed.

Relatiivseks veaks nimetatakse mõõtarvu ühiku kohta tulevat absoluutset viga. Seda väljendatakse tavaliselt protsentides:

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (5)$$

4. Süsteemaatilise vea arvutamine otsesel mõõtmisel

Siin vaatleme ainult juhtu, kus ainsa süsteemaatilise vea na esineb mõõteriista- ehk instrumendiviga. Juhuslikud vead olgu kaduvväikesed - korduvatel mõõtmistel saame praktiliselt ühesugused tulemused või mõõtmistulemused kõiguvad riistavea piires. Sellisel juhul piisab ainult ühekordsest mõõtmisest. Mõõtmistulemuse vea saame siis mõõteriista täpsusklassi arvestades.

Elektrimõõteriistadele märgitakse täpsusklass numbriga, mis teatud juhtudel ümbritsetakse ringjoonega (vt. lk. 45). Näiteks number 1,0 voltmeetril näitab, et mõõteriista lugemi absoluutne viga ei ületa 1% skaala lugemi maksimaalväärtusest. Kui viimane on näiteks 150 V, siis mõõteriista lugemi absoluutne viga on $0,01 \cdot 150 = 1,5 \approx 2$ V. Kui osuti jääb pidama lugemile 141 V, siis $x = (141 \pm 2)$ V.

Mõõtejoonlaudade, nihkkaliibrite, kruvikaliibrite, kaaluvihtide, mensuuride, termomeetrite, ajamõõtjate jne. maksimaalsed vead on mõnikord kantud mõõteriistadele endile, tavaliselt aga antakse riista passis. Kui pass puudub ega ole ka vastavat viidet vea kohta mõõteriista skaalal, mõõteriist aga on tehniliselt korras (on kontrollitud ja kasutamisel ning hoidmisel on kinni peetud vastavatest ekspluateerimisreeglitest), siis absoluutse vea ülemmääraks loetakse nn. mõõteriista standardviga, mis võrdub poolega mõõteriista skaala vähima jaotuse väärtusest. Näiteks millimeeterskaala abil saab mõõta standardveaga $\pm 0,5$ mm, $0,5^\circ$ jaotistega termomeetriga $0,25 \approx 0,3^\circ$ täpsusega jne.

Kui mõõtarv võetakse mõõteskaala kahele punktile vastavate näitude vahena, siis tuleb ka vastav viga võtta kahekordsena (näiteks pikkuse mõõtmisel joonlaua abil).

Nooniusega varustatud mõõteriistade standardveaks on tavaliselt nooniusse täpsus, s.o. mõõteriista vastava jaotise (või jaotiste) ja nooniusse jaotise pikkuste vahe.

Laboratoosetes töödes esineb sageli varem mõõdetud suurus, millele viga ei ole juurde kirjutatud. Sellisel juhul loetakse absoluutseks veaks pool viimase koha ühikust. Näiteks valgusallika tugevus $I = 1,2$ cd tuleb lugeda $I = (1,2 \pm 0,05)$ cd.

5. Süstemaatilise vea arvutamine kaudsel mõõtmisel

Enamikul juhtudel ei saa otseselt mõõta füüsikalist suurust. Tegelikult mõõdetakse rida abisuurusi $A, B, C, \dots$, mis on seotud otsitava suurusega x vastava matemaatilise seose kaudu:

$$x = f(A, B, C, \dots). \quad (6)$$

Kaudse mõõtmistulemuse viga sõltub mitte ainult otseste mõõtmistulemuste vigadest $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$, vaid ka abisuurustega sooritatavatest matemaatilistest tehetest (6).

Antud punktis vaatleme juhtu, kus iga suurus $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$ kujutab instrumendi vea ülemmäära. Siis tuleb ka suurusele x leida nendest vigadest tingitud vea ülemmäär Δx . Matemaatilises mõttes tähendab see seda, et tuleb summeerida kõik funktsiooni x väärtuste muutused, mis on tingitud argumentide $A, B, C, \dots$ väärtuste muutustest $\Delta A, \Delta B, \Delta C, \dots$. Kui suuruse A suhteline viga $\frac{\Delta A}{A}$ ei ole suur (kuni mõni protsent), siis võib argumenti A muutusest ΔA tingitud funktsiooni x muutuse arvutada osatuletise kaudu järgmiselt:

$$\Delta x_A = \frac{\partial f}{\partial A} \cdot \Delta A.$$

Kõigi argumentide muutustest tingitud funktsiooni muutuse ülemmäära saame, kui leiame summa

$$\Delta x = \left| \frac{\partial f}{\partial A} \right| \Delta A + \left| \frac{\partial f}{\partial B} \right| \Delta B + \left| \frac{\partial f}{\partial C} \right| \Delta C + \dots \quad (7)$$

Summa või vahe korral

$$x = A \pm B \pm C \pm \dots$$

saame valemit (7) kasutades

$$\Delta x = \Delta A + \Delta B + \Delta C + \dots \quad (8)$$

Kui valem (6) näeb ette ainult korrutamise ja jagamise tehted, kaasa arvatud ka astendamine ja juurimine, siis on kasulikum leida esmalt avaldis relatiivse vea jaoks. Kui näiteks

$$x = \frac{A \cdot B^2 \cdot \sqrt[3]{C}}{D \cdot E^3 \cdot \sqrt{F}},$$

siis arvutuseeskirja (7) kasutades saame:

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \frac{\Delta A}{A} + 2 \frac{\Delta B}{B} + \frac{1}{3} \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta D}{D} + 3 \frac{\Delta E}{E} + \frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F}. \quad (9)$$

Absoluutse vea arvutame siis seosest

$$\Delta x = \bar{x} \cdot E_x.$$

N ä i d e 1

Pooli induktiivsuse ja vahelduvvoolu võimsusteguri

mäaramine (vt. lk. 161).

Mõõtmistulemused olgu esitatud järgmises tabelis:

Mõõdetud suuruse tähis	Väärtus	Mõõtmistäpsus
Efektiivpinge U_e	220 V	Kasutati voltmeeterit mõõtepiirkonnaga 300 V ja täpsusklassiga 1,0. $\Delta U_e = 3 \text{ V}$
Voolu tugevuse efektiivvaartus I_e	2,52 A	Kasutati ampermeeterit mõõtepiirkonnaga 3 A ja täpsusklassiga 1,5. $\Delta I_e = 0,045 \text{ A}$
Vahelduvvoolu sagedus f	50,5 Hz	Sagedusmõõtja võimaldas mõõta sageduse diskreetseid vaartusi, mis erinesid üksteisest 0,5 Hz võrra. $\Delta f = 0,25 \text{ Hz}$
Pooli aktiivtakistus R	40,2 Ω	Mõõdeti oommeetri abil mõõtepiirkonnaga 100 Ω ja täpsusklassiga 0,5. $\Delta R = 0,5 \Omega$

Pooli induktiivsus arvutatakse järgmiselt (mahtuvus $C \rightarrow \infty$):

$$L = \frac{1}{2\pi f I_e} \sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2};$$

$$L = \frac{1}{2.3, 14.50, 5.2, 52} \cdot \sqrt{(220)^2 - (2.52 \cdot 40.2)^2} = 0.2442.$$

Kuigi valemis esineb suurus $\overline{II}$, mille väärtust ei mõõdetud, tuleb selle ligikaudse väärtuse kasutamisest tingitud viga arvutada. Seda viga pole tarvis arvestada, juhul kui väärtus on võetud ühe suurusjärgu võrra täpsemalt kui mõõdetud suuruste väärtused (nii on toimitud ka antud näites). Vea arvutamiseks vajaliku avaldise leidmisel kasutame reeglist (7) tulenevat järeldust, mille järgi korrutamisel ja jagamisel liituvad suhtelised vead:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta(\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2})}{\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}}.$$

On tarvis leida veel avaldis juurega tähistatud teguri veale. Kasutades osatuletiste meetodit (7) funktsiooni muutuste leidmiseks, saame:

$$\Delta(\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}) = \frac{1}{2\sqrt{U_e^2 - (I_e R)^2}} (2U_e \Delta U_e + 2I_e R^2 \Delta I_e + 2I_e^2 R \Delta I_e).$$

Asendades saadud avaldise eelmises valemis, saame:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{U_e \Delta U_e + I_e R(R \Delta I_e + I_e \Delta R)}{U_e^2 - (I_e R)^2};$$

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{0.25}{50.5} + \frac{0.045}{2.52} + \frac{220 \cdot 3 + 2.52 \cdot 40.2(40.2 \cdot 0.045 + 2.52 \cdot 0.5)}{220^2 - (2.52 \cdot 40.2)^2} =$$

$$= 0.0482 \approx 4.8\%;$$

$$\Delta L = 0.244 \cdot 0.0482 = 0.0117.$$

Vastus:

$$L = (0.244 \pm 0.012) \text{ H, usaldatavuse tõenäosusega } 1.$$

Vahelduvvoolu võimsustegur $\cos \varphi$ avaldub mõõdetud suuruste kaudu järgmiselt:

$$\cos \varphi = R \frac{I_e}{U_e};$$

$$\cos \varphi = 40,2 \cdot \frac{2,52}{220} = 0,461;$$

$$\frac{\Delta(\cos \varphi)}{\cos \varphi} = \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta I_e}{I_e} + \frac{\Delta U_e}{U_e};$$

$$\frac{\Delta(\cos \varphi)}{\cos \varphi} = \frac{0,5}{40,2} + \frac{0,045}{2,52} + \frac{3}{220} = 0,044 = 4,4\%,$$

$$\Delta(\cos \varphi) = 0,461 \cdot 0,044 \approx 0,0203.$$

Vastus:

$$\cos \varphi = 0,461 \pm 0,021, \text{ usaldatavuse tõenäosusega } 1.$$

=====

6. Juhusliku vea arvutamine otsesel mõõtmisel

Olgu nüüd tegemist juhuga, millal juhuslikud vead ületavad tunduvalt mõõteriista vigu. Mõõtmiste kordamisel saame tulemusi, mis erinevad üksteisest rohkem kui mõõteriista täpsusklassi järgi määratav riistaviga.

Sellisel juhul tuleb mõõtmisi korrata n korda (füüsika praktikumis on soovitatav võtta 5...10 lugemit) ja arvutada absoluutne viga, kasutades valemit (2) koos parandusteguriga t_{np} .

N ä i d e 2.

Plaadi paksuse määramine (vt. "Füüsika praktikumi tööjuhendid" I, lk. 37).

Mõõdeti metallplaadi paksust d seitsmest eri kohast nihkaliibri abil, mille noonluse täpsus on 0,1 mm.

Jrk. nr.	d(cm)	$ \bar{d} - d_i \cdot 10^2$	$(\bar{d} - d_i)^2 \cdot 10^4$
1.	9,25	3	9
2.	9,30	2	4
3.	9,27	1	1
4.	9,31	3	9
5.	9,26	2	4
6.	9,29	1	1
7.	9,27	1	1

$$\bar{d} = 9,27 + \frac{-2 + 3 + 0 + 4 - 1 + 2 + 0}{7} \cdot 10^{-2} = 9,28 \text{ (cm)},$$

$$\Delta d_r = \pm \sqrt{\frac{9 + 4 + 1 + 9 + 4 + 1 + 1}{7 \cdot 6} \cdot 10^{-4}} = \pm 0,0083 \text{ (cm)}.$$

Tabelist lk.13 leiame $n = 7$ korral usaldatavuse tõenäosusele 0,99 vastava teguri väärtuse $t_{n\beta} = 3,7$. Järelikult mõõtmistulemuse absoluutse vea ülemmääraks p.3 antud mõttes saame:

$$\Delta d = \pm 3,7 \cdot 0,0083 = \pm 0,03 \text{ (cm)},$$

$$d = (9,28 \pm 0,03) \text{ cm, usaldatavuse tõenäosusega 0,99.}$$

7. Juhusliku vea arvutamine kaudsel mõõtmisel

Olgu valemis (6) esinevad suurused A, B, C,... mõõdetud nii, nagu on näidatud punktis 6. Asetades valemisse (6) mõõdetud suuruste keskvväärtused $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{C}$,... leiame mõõtmistulemuse x. Saadud tulemuse absoluutne viga arvutatakse erinevalt p.5 toodud eeskirjast (7). Sel korral arvutame mõõdetud suuruste A, B,... vigadest ΔA , ΔB ,... kui funktsiooni x argumentide muutustest tingitud funktsiooni x muutused ikkagi valemit (7a) kasutades, kuid erinevate argumentide vigadest tingitud funktsiooni väärtuse muutused tuleb summeerida erinevalt eeskirjaga (7) antust. Eeskiri (7) annab maksimaalse

vea, arvestades kõiki argumendi vigadest tingitud funktsiooni väärtuste muutusi ühemärgilistena. Kuid mõõtmisel esineva juhusliku vea korral ei ole juhuslik mitte ainult vea arvuline väärtus, vaid ka selle märk. Tõenäosusteooriale tuginedes on võimalik näidata, et kui puudub korrelatsioon funktsiooni erinevate argumentide vigade vahel, siis summeeruvad neist tingitud funktsiooni vigade ruudud:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A} \Delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B} \Delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial C} \Delta C\right)^2 + \dots} \quad (10)$$

Valemit (10) kasutades tuleb näidetes lk. 16 ja 17 valemite (8) ja (9) asemel kirjutada avaldised:

$$\Delta x = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2 + (\Delta C)^2 + \dots} ; \quad (8')$$

$$E_x = \frac{\Delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(2 \frac{\Delta B}{B}\right)^2 + \left(\frac{1}{3} \frac{\Delta C}{C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(3 \frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\Delta F}{F}\right)^2} . \quad (9')$$

Järelikult summa või vahe absoluutse vea ruut on võrdne liidetavate suuruste absoluutsete vigade ruutude summaga. Korutamisel ja jagamisel liituvad suhteliste vigade ruudud.

Juhul kui suurused $\Delta A, \Delta B, \dots$ on arvutatud vigade ülemmääradena p.3 lõpus antud mõttes (vt. näide p.6 lõpus), siis võib samas mõttes võetud vea ülemmäära leida juhuslike vigade korral ka eeskirja (7) kasutades. Tulemuse usaldatavuse tõenäosus on siis suurem kui 0,99, kuid milline, see jääb teadmatuks.

N ä i d e 3.

Vooluallika elektromotoorse jõu määramine kompensatsioonimeetodil (vt. lk. 83).

Normaalelemendi elektromotoorne jõud on ette antud:
 $E_n = 1,018 \text{ V}.$

Katseandmed ja arvutused olgu esitatud järgmise tabeli kujul:

Jrk. nr.	Normaalelement (E_n)			Mõõdetav vooluallikas (E_m)		
	l_1 (cm)	$ l_1 - \bar{l}_1 $ (cm)	$(l_1 - \bar{l}_1)^2 \cdot 10^2$ (cm ²)	l_2 (cm)	$ l_2 - \bar{l}_2 $ (cm)	$(l_2 - \bar{l}_2)^2 \cdot 10^2$ (cm ²)
1.	42,4	0,16	2,56	68,1	0,1	1
2.	42,6	0,04	0,16	68,0	0,2	4
3.	42,5	0,06	0,36	68,6	0,6	36
4.	42,7	0,14	1,96	68,2	0,0	0
5.	42,6	0,04	0,16	68,1	0,1	1
Kesk- mine	42,56			68,20		

Valemi (2) abil leiame:

$$\Delta l_1 = \pm t_{n\beta} \cdot \sqrt{\frac{(2,56+0,16+0,36+1,96+0,16) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 4}} = \pm 0,051 t_{n\beta};$$

$$\Delta l_2 = \pm t_{n\beta} \cdot \sqrt{\frac{(1+4+36+0+1) \cdot 10^{-2}}{5 \cdot 4}} = \pm 0,15 t_{n\beta}.$$

Nõuame, et otsitaval veal oleks usaldatavuse tõenäosus 0,99. Siis, kuna $n = 5$, leiame tabelist lk. 13

$$t_{n\beta} = 4,6.$$

Järelikult

$$l_1 = (42,56 \pm 0,23) \text{ cm};$$

$$l_2 = (68,20 \pm 0,67) \text{ cm}.$$

Järgnevalt arvutame vooluallika elektromotoorse jõu valemist

$$E_m = E_n \cdot \frac{l_2}{l_1},$$

millest saame

$$E_m = 1,018 \cdot \frac{68,20}{42,56} = 1,632 \text{ (V)}.$$

Vea arvutamisel arvestame, et normaalelemendi elektromotoorne jõud on antud ~ 10 korda täpsemalt kui mõõtmistel saadud pikkused l_1 ja l_2 (ümardusreeglitele toetudes võime väita, et E_n on antud täpsusega $\pm 0,0005$ V) ja sellepärast võib sel-

le vea võtta praktiliselt võrdseks nulliga. Vea arvutame eeskirja (10) kasutades:

$$\Delta E_m = E_m \sqrt{\left(\frac{\Delta 1_1}{1_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta 1_2}{1_2}\right)^2}.$$

Siit saame

$$\Delta E_m = 1,632 \cdot \sqrt{\left(\frac{0,23}{42,6}\right)^2 + \left(\frac{0,67}{68,2}\right)^2} = 0,0182.$$

Vastuse kirjutame kujul (vt. punkt 9.):

$$E_m = (1,632 \pm 0,019) \text{ V, usaldatavuse tõenäosusega } 0,99.$$

=====

8. Tulemuse vea arvutus juhul kui võrdväärsena esinevad mõlemad - juhuslik ja süstemaatiline viga

Kui ruutkeskmine viga (vt. p.3) on võrreldav mõõteriista veaga, siis on tarvis arvestada mõlemaid. Niisugusel juhul on kõige lihtsam määrata juhusliku vea ülemmäär p.3 antud mõttes (vt. näide p.6 lõpus) ja liita sellele mõõteriista viga. Edaspidised arvutused saadud tulemustega (kaudne mõõtmine) tehakse maksimaalse vea arvutamise reeglite järgi (vt. p.5).

Võib osutada, et eelneva reegli rakendamisel juhusliku vea ülemmääraks p.3 antud mõttes saame liiga suure arvu (20 ...100%). Sellisel juhul oleme lihtsalt olukorda valesti hinnanud ja tegemist on juhuga, kus juhuslik viga on domineeriv (vt. p.6).

Laboratoorsete tööde juures, mis viiakse läbi füüsika praktikumides, võib esineda veel selline juht, et osa suuruste mõõtmise juures antud eksperimendis on ülekaalus juhuslik viga, teistel aga süstemaatiline. Kuidas arvutada kaudselt mõõdetava suuruse viga?

Sellisel juhul leiame jällegi juhuslikele vigadele ülemmäära p.3 antud mõttes ja arvutame kaudselt mõõdetava suuruse

se maksimaalse vea p.5 antud viisil. Kui siinjuures osutuvad jällegi ühe või mitme suuruse juhusliku vea ülemmäärad liiga suureks, siis tuleb ülejäänud suuruste vead võtta praktiliselt võrdseks nulliga ja arvutada kaudse mõõtmise viga p.7 esitatud viisil.

Et selgitada, millised vead antud mõõtmise juures on domineerivad, on enne mõõtmisele asumist tarvis määrata riistaviga ja seejärel teha mõned mõõtmised, et veenduda, kas juhuslikud vead ületavad riistaviga või mitte. Seejärel, asudes mõõtmistele, tuleb mõõta neid suurusi, kus domineerivad juhuslikud vead, mitu korda (5...10). Teiste suuruste mõõtmisel piisab ühest korrast. (Tavaliselt on juba laboratoorse töö juhendis antud, milliseid mõõtmisi on tarvis korrata ja milliseid mitte.)

9. Aritmeetilised tehked ligikaudsete arvudega.

Lõppresultaadi esitusviis. Ümardusreeglid

Eespooltoodust järeldub, et iga mõõtmise tulemusena saadud arv on ligikaudne. Seepärast on mõõtarv täisväärtuslik ainult siis, kui on teada selle viga. Vea suurust ei ole aga omakorda võimalik täpselt määrata – see on samuti ligikaudne arv. Sellest tuleneb järeldus, et aritmeetilisi tehkeid mõõtarvude ja nende vigadega ei ole mõtet arvutada absoluutselt täpselt – kümnendkohtade suure arvuga.

9.1. Tehked mõõtarvudega

Tehetel mõõtarvudega tuleb kinni pidada järgmisest reeglist:

kõigi aritmeetiliste tehete resultaadid leiame ühe võrra suurema kümnendkohtade arvuga, kui on mõõtarvudel kümnendkohti.

Näiteks takistuse arvutamisel Ohmi seadust kasutades leiame:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6,45}{0,0273} = 236,3 \text{ } (\Omega). \quad (11)$$

Kui kõik mõõtarvud ei ole antud ühesuguste kümnendkohtade arvuga, siis tuleb eespool antud reegli rakendamisel silmas pidada mõõtarvu, millel on väiksem arv kümnendkohti. Siinjuures on tähtis veel see, et suuremate kümnendkohtadega mõõtarvud on otstarbekas eelnevalt ümardada kümnendkohtade arvuni (incl.), mis on ühe võrra suurem väikseima arvu kümnendkohtadega mõõtarvu omast. Kui näiteks eelnevas näites voolu tugevuse väärtus on 0,02 A, siis

$$R = \frac{6,45}{0,02} = \frac{6,5}{0,02} = 320 \text{ } (\Omega) \quad (12)$$

(vt. reegel I käesoleva punkti lõpus). Kuna arvus 320 ei ole null kehtivaks numbriks, vaid näitab tulemuse järku, siis tuleb viimane tulemus tegelikult kirjutada nii:

$$R = 3,2 \cdot 10^2 \Omega. \quad (13)$$

9.2. Mõõtarvu vea arvutamine

Mõõtarvu vea arvutamisel tuleb kinni pidada järgmisest reeglist, mis on vigade teoorias täpselt põhjendatud (kehtib juhul kui $n \leq 10$):

mõõtarvu viga tuleb anda ühe kehtiva numbriga, kui see on 3-st suurem, ja kahe kehtiva numbriga, kui esimene neist on väiksem kui 4.

Kui näiteks arvutuse tulemusena oleme saanud vead 1,4; 0,39; 0,041; 4,7, siis kirjutame need lõppkujul järgmiselt: 1,4; 0,39; 0,04; 5.

Järelikult on kõik aritmeetilised tehted, mis on seotud vea arvutamisega, tarvis sooritada ainult kolme kümnendkoha täpsusega (arvutame lükatiga).

Kehtivateks numbriteks nimetatakse kõik numbrid 1,2,3... 9 ja null, kui ta asub numbrit 1...9 vahel või täisarvu ja kümnendmurru lõpus. Nulle kümnendmurru numbritest vasakul ei loeta kehtivateks numbriteks ja neid ei tule ka kümnendkohtade arvu määramisel arvestada reeglis 9.1. Kui nullid

asuvad arvu lõpus ega ole kehtivad[näide (12)], siis kirjutatakse tulemus kujul (13).

9.3. Lõpptulemuse esitusviis

Kui mõõtarv ja selle viga on eelmiste reeglite kohaselt leitud, siis ümardatakse mõõtarv kuni absoluutse vea paremalt esimese kehtiva numbrini. Näiteks: $(15,19 \pm 0,03)$ cm, $(127 \pm 2) \cdot 10^2$ m. Ei ole lubatud kirjutada $(15,1947 \pm 0,03)$ cm, (12715 ± 200) m, (12700 ± 200) m. Kui näites (11) on absoluutseks veaks saadud arv 6, siis kirjutatakse resultaat

$$(236 \pm 6) \Omega;$$

kui absoluutseks veaks on näiteks 2,3, siis

$$(236,3 \pm 2,3) \Omega$$

(vt. reegel 9.2).

9.4. Ümardusreeglid

I. Viimane säilitatav number suurendatakse ühe võrra, kui temale järgnev ärajäetud number on 5 või üle selle, või jäetakse muutmatus, kui ärajäetav number on väiksem kui 5. Erandiks on juhtum, kus ärajäetav number 5 on saadud ümardamise teel. Sellisel korral jäetakse eelnev number muutmatus. Näiteks 0,6345 ümardatakse 0,635; 0,63 (mitte 0,64).

II. Absoluutse ja relatiivse vea ülemmäära leidmisel ümardatakse alati nii, et viga suureneks. Vastasel juhul võib ülemmäär osutuda väiksemaks tõelisest veast. Näiteks $\Delta A = 0,024 \approx 0,03$;

$$E_B = \frac{0,06}{12,9} \approx \frac{0,06}{12} = 0,5\%.$$

10. Mõõtmisvigade graafiline esitamine

N ä i d e 4.

Keedukannu kasuteguri olenevus vee temperatuurist (vt. lk. 88).

Mõõtmistulemused olgu järgmised.

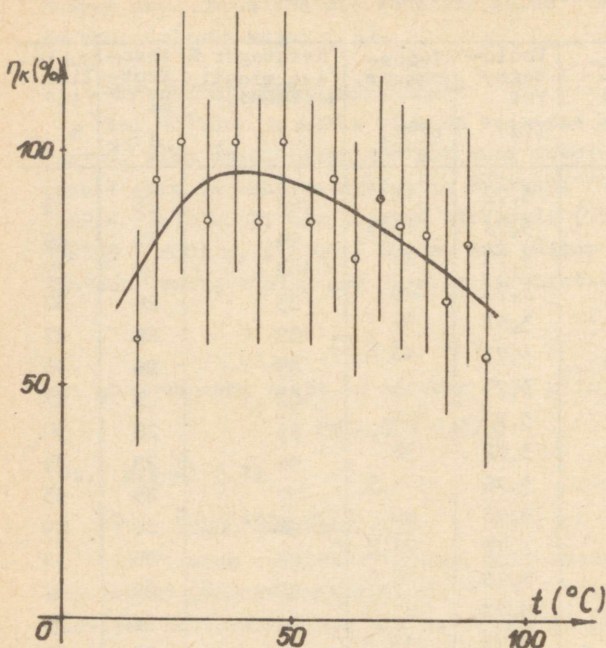
Keedukannus oleva vee mass $m = 2000$ g.

Aeg (min) τ	Keedukan- nule ra- kendatud pinge $U(V)$	Voolu- tuge- vus $I(A)$	Tempe- ratuur $t(^{\circ}C)$	Kasutegur % (iga minuti keskmise) η_k	Abso- luut- ne vi- ga $\Delta \eta_k$	Suhte- line viga %
0	219	3,72	14	60	23	39
1	220	3,73	17,5	94	27	29
2	220	3,73	23	102	28	27
3	220	3,73	29	85	26	30
4	220	3,73	34	102	28	27
5	220	3,73	40	85	26	30
6	220	3,73	45	102	28	27
7	220	3,73	51	85	26	30
8	219	3,72	56	94	28	29
9	221	3,76	61,5	77	25	33
10	221	3,76	66	90	26	29
11	221	3,76	71,3	84	26	31
12	221	3,76	76,2	82	25	31
13	220	3,73	81	68	24	35
14	220	3,73	85	80	25	32
15	220	3,73	89,7	56	23	41
16	220	3,73	93			

Tabeli 5. veerus on antud kasuteguri keskmised väärtused, mis on arvutatud katse iga minuti jaoks, kasutades järgmist valemit:

$$\eta_k = \frac{c m (t_2 - t_1)}{0,239 I U \tau}.$$

Kuna arvutatud kasutegurid kujutavad endast katse esimese, teise, kolmanda jne. minuti keskmisi kasutegureid, siis nende väärtuste graafilisel esitamisel (vt. joon.3) on punktide abstsissideks võetud ka vastavate ajavahemike keskmi- sed temperatuurid.



Joonis 3

mõõtmise täpsuseks 0,2 s, sest kolme suuruse I , U ja t väärtuse määramine momentaanselt ei ole võimalik. Arvestades seda, et voolu tugevus ja pinge katse käigus vähe muutusid, võis hinnata aja mõõtmise täpsust $\pm 2,5$ s. Kuid τ on võrdne 1 minutiga ja ta kujutab ajavahemikku kahe lugemi vahel. Nii selle ajavahemiku alguses kui ka lõpus eksime $\pm 2,5$ s - järelikult 1 minut mõõdetakse täpsusega ± 5 s.

Vee hulga määramisel kasutati mensuuri, mille jaotise väärtus oli 5 cm^3 ja maht 500 cm^3 . Et 2000 g veehulga saamiseks oli tarvis mensuuri kasutada 4 korda ja igal mõõtmisel esines võimalik viga 2,5 g, siis tuleb veehulga mõõtmise veaks võtta ± 10 g.

Kuigi saadud punktid asuvad graafikul üsna ebakorrapäraselt, ei või siit teha järeldust, nagu oleneks kasutegur ebakorrapäraselt temperatuurist. Punktide ebakorrapärase asetuse põhjus saab selgeks pärast seda, kui oleme arvutanud katsevead ja esitanud need ka graafiliselt.

Aega mõõdeti stopperi abil, mille täpsus oli 0,2 s. Kuid antud katses ei saa võtta aja

Temperatuuri mõõtmisel kasutati termomeetrit skaalajao-
tiseaga 1°C . Mõõtmisviga $0,5^{\circ}\text{C}$.

Vee erisoojus oleneb temperatuurist, muutudes tempera-
tuuri vahemikus 0°C kuni 100°C maksimaalselt $0,01$ võrra. (mi-
nimaalse ja maksimaalse väärtuse vahe). Arvutustes võeti
väärtuseks $c = 1,00 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$; $\Delta c = \pm 0,005 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{deg}}$;

$\Delta U = 1,5 \text{ V}$; $\Delta I = 0,025 \text{ A}$; Joule'i-Lenzi tegur on võetud
täpsusega $\pm 0,0005$ (ümardusreeglitest).

Kasuteguri vea arvutame valemist (vt.p.5)

$$\frac{\Delta \eta_k}{\eta_k} = \frac{\Delta c}{c} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta(t_2 - t_1)}{t_2 - t_1} + \frac{\Delta \tau}{\tau}.$$

Kuus esimest liidetavat on kõigi η_k väärtuste korral samad.
Asendades viimased vastavate arvudega ja arvestades, et
 $\Delta(t_2 - t_1) = 2 \Delta t = 1 \text{ deg}$, saame

$$\frac{\Delta \eta_k}{\eta_k} = 0,11 + \frac{1}{t_2 - t_1}.$$

Tulemused on esitatud tabeli 6. ja 7. veerus ja on näidatud
graafiliselt joonisel 3 ordinaatteljega paralleelsete sirge-
tena pikkusega $2\Delta \eta_k$ vastava punkti juures. On selge, et η_k
väärtuste ebakorrapärane muutumine (ja see, et mõni neist
ületab 100% piiri) on tingitud mõõtmisvigadest ja seetõttu
pole mõtet punkte ühendada omavahel murdjoonega, vaid kõver-
joonega, mis jälgib üldist kasuteguri muutumist (vt. joon.3).

Antud näide demonstreerib ühtlasi ka kasutatud vigade
arvutamise meetodi puudust, mille järgi kõigi suuruste vead
summeeritakse. See nähtub arvutatud vigade liialt suurtest
väärtustest. Selleks et kõigi suuruste mõõtmisvead muudaksid
lõpptulemust ühes suunas, on tõenäosus ilmselt palju väiksem
ühest ja seepärast kõigi vigade summeerimine näib liialduse-
na.

N ä i d e 5

Fotoelemendi kaliibrimine

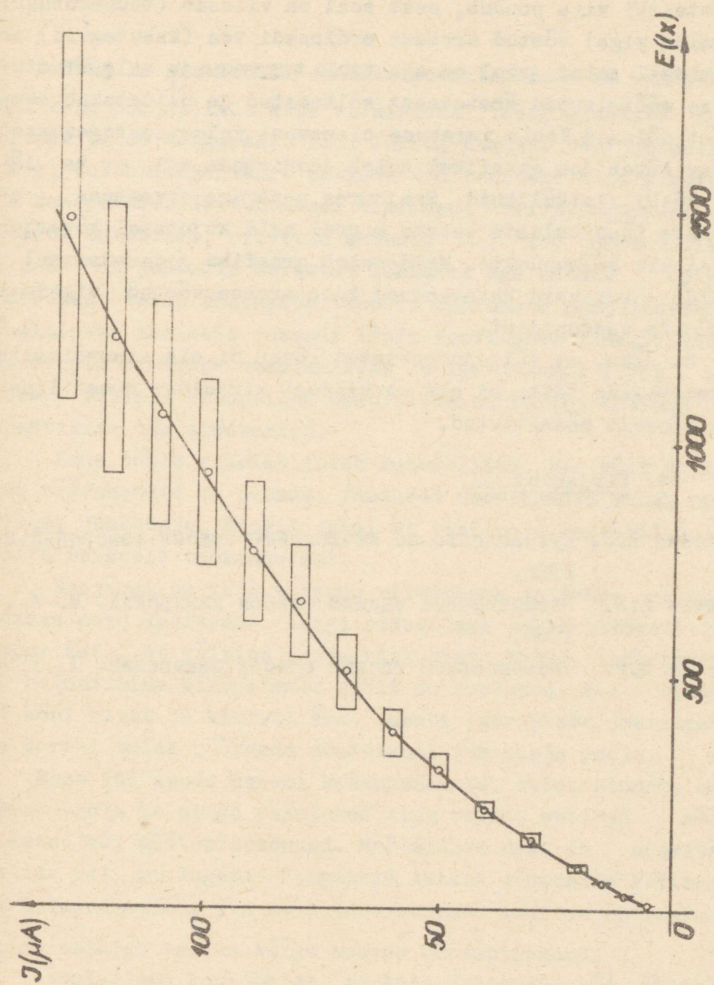
Valgusallika valgustugevus oli ette antud: $I = 2,15$ cd. Mõõdeti fotovoolu tugevust ja valgusallika kaugust fotoelemendist. Tulemused on antud järgmises tabelis:

Kaugus $r(\text{cm})$	Fotovool $J (\mu A)$	Valgustustugevus $E = \frac{I}{r^2} (lx)$	Absoluutne viga $\Delta E = E(\frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta r}{r})$	Suhteline viga (%)
3,8	130	1480	390	27
4,2	120	1220	290	24
4,5	110	1060	138	22
4,8	100	935	200	21
5,3	90	765	150	19
5,7	80	662	120	18
6,5	70	508	80	16
7,5	60	383	50	14
8,5	50	298	36	12
10	40	215	22	10
12	30	149	13	9
15,7	20	88	6	7
19,3	15	58	3	5
25,5	10	33	1	3
40,5	5	13	0,4	3

Kuna valgusallika tugevuse väärtuse viga ei ole antud, siis tähendab see seda, et vigased kümnendkohad on ümardatud. Ümardusreeglitele tuginedes võime väita, et viga ei ületa väärtust $\Delta I = \pm 0,005$ cd.

Fotovoolu tugevust mõõdeti täpsusega $\Delta J = \pm 2 \mu A$ ja valgusallika kaugust fotoelemendist täpsusega $\Delta r = \pm 0,5$ cm. Kauguse mõõtmisel kasutati millimeeterjaotusega joonlauda, kuid valgusallika mõõtmised ulatusid mitme millimeetrini ja seepärast ei olnud võimalik tema asukohta millimeetrilise täpsusega määrata.

Joonisel 4 on mõõtmistulemused kujutatud graafiliselt. Iga punkti juures on näidatud tema asukohta määravate suu-



ruste J ja E vead. Erinevalt joonisest 3 on antud joonisel punktide määramatuse piirkondadel ristküliku kuju. Joonisel 3 abstsissi viga puudub, sest seal on viimane (temperatuuri mõõtmise viga) võetud arvesse ordinaadi vea (kasuteguri) arvutamisel. Antud juhul on aga voolu tugevuse ja valgustustugevuse mõõtmisvead üksteisest sõltumatud ja näidatakse seejärel mõlemad. Voolu tugevuse olenevust valgustustugevusest näitav kõverjoon graafikul tuleb joonistada nii, et ta läbiks kõiki ristkülikuid. Seejuures peab aga arvestama, et lihtsate füüsikaliste seoste korral neid kujutaval kõverjoonel ei ole käänupunkte. Neid tuleb graafiku joonestamisel vältida - kui vaid katseandmed koos arvessevõetud vigadega ei tõesta vastupidist.

On näha, et väljajoonestatud kõver ei ole ainuvõimalik. Mõõtmisvigade tõttu ei ole ka seadust kirjeldav graafiline joon täpselt määratletud.

11. Kirjandus

- Ромченко И.С. Руководство по вычислению ошибок измерений. М., 1966.
- Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. М.-Л., 1965.
- Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л., 1968.

METOODILISI NÄPUNÄITEID

Füüsika praktikumi edukaks sooritamiseks on üliõpilastel vaja põhjalikult ette valmistuda. Tööst ülevaate saamiseks tuleb kõigepealt läbi lugeda vastava töö juhend. Seejärel tuleb põhjalikult tutvuda töö teoreetiliste alustega ja konspekteerida tähtsamad küsimused – definitsioonid, valemite tuletused, riistade skeemid jne. "Töö teoreetilised alused" on juhendis esitatud lühidalt ega asenda õpikut. Seepärast tuleb mõningate teooria küsimuste põhjalikumaks õppimiseks kasutada juhendi lõpus soovitatud lisakirjandust. Materjali paremaks omandamiseks on iga juhendi lõpus küsimused, millele üliõpilane peab olema suuteline vastama enne praktilise töö alustamist.

Enne tööle asumist tuleb kontrollida, kas kõik vajalikud töövahendid on olemas. Puuduvad töövahendid annab praktikumi juhendaja. Mingil juhul ei tohi neid omavoliliselt võtta teistelt töökohtadelt.

Seejärel on vaja tutvuda riistadega ja teha selgeks, kuidas neid käsitseda. Kõigi riistadega tuleb ettevaatlikult ümber käia, et vältida nende rikkumist. Nende lahtivõtmine ja remontimine üliõpilaste poolt on keelatud. Kui selgub, et mõni riist on korrast ära, samuti igasuguste arusaamatuste korral tuleb pöörduda praktikumi juhendaja poole.

Enne kui asuda skeemi kokkupanekule, tuleb hinnata oodatavad voolu ja pinge väärtused ning valida sobivad mõõteriistad või mõõtepiirkonnad. Mõõtepiirkonnad on soovitatav valida nii, et lugemid langeksid skaala lõpuosale (viimasele kolmandikule). Kui mõõdetava suuruse väärtus on teadmata, tuleb esialgu valida kõige suurem mõõtepiirkond.

Vooluringi koostamisel on vaja juhinduda töö põhimõtte-
lisest skeemist, töövahendite ratsionaalsest paigutusest ja mõõteriistadel olevatest tingmärkidest nende tööasendi kohta (vt. tabel lk.57). Mõõteriistad tuleb paigutada nii, et nen-

de skaalad oleksid üheaegselt jälgitavad. Lauale tuleb jätta ka koht protokollis täitmiseks. Hästi läbimõeldud töövahendite paigutus kergendab skeemi koostamist ja teeb töötamise mugavamaks.

Skeemi koostamist on soovitatav alustada vooluallika ühe klemmiga ühendatavast juhtmest ja koostada vooluring kuni teise klemmiga ühendatava juhtmeni. Seejärel teha aga eelmistega paralleelsed ühendused. Ühenduste tegemisel meelevaldselt järjekorras kaob keerukamate skeemide korral ülevaade ja see viib sageli valeühendustele. Tuleb meeles pidada, et vooluallikat ei tohi ühendada seni, kuni praktikumi juhendaja pole kontrollinud vooluringi õigsust ega andnud vastavat luba.

Ühenduste tegemiseks võib kasutada ainult terve isolatsiooniga juhtmeid. Kui juhtmetel puuduvad kaablikingad või pistikud, siis painutatakse isolatsioonist puhastatud juhe klemmi alla mutri kinnikeeramise suunas. Mutrid tuleb kinni keerata nii, et juhtmed ei tuleks mõõteriistade liigutamisel lahti. Seejuures ei ole vaja kasutada jõudu, et mitte rikuda klemmide vinti või juhtmete otsi. Jälgige, et ühendusjuhtmed ei varjaks mõõteriistade skaalasid.

Enne mõõtmiste juurde asumist on vaja kontrollida, kas mõõteriistade osutid on nulljaotisel. Vajaduse korral seada osuti nullikorrektori abil õigesse asendisse. Samuti tuleb teha kindlaks ja märkida protokollis mõõteriistade nimetused, tüübid, inventari- või tehasenumbrid, vooluliik, mõõtepiirkonnad ja skaalajaotiste arv (või jaotiste väärtused), täpsusklassid.

Võimalike arvutusvigade vältimiseks tuleb mõõtmistel alati protokollida mõõteriistade otsesed näidud. Lugemite võtmisel hoiduge paralleelilisest veast. Täpsemates mõõteriistades kasutage selle vea vältimiseks peegelskaalasid. Lugemite võtmisel peegelskaalalt tuleb vaadata osutile ja skaalale nii, et osuti kataks oma kujutise peeglis.

Andmete üleskirjutamiseks ei tohi kasutada mustandeid. Kõik mõõtmistulemused tuleb kohe kirjutada protokollis (s.e. puhtandisse) tindiga või pastapliiatsiga. Andmete kustutamine või ülekirjutamine ei ole lubatud. Kui on vaja teha pro-

tokollis parandusi, siis kriipsutatakse vale arv maha nii, et ta oleks siiski loetav. Uus arv kirjutatakse endise kohale või kõrvale.

Enne voolu sisselülitamist tuleb asetada autotrafode ja potentsiomeetrite liugkontaktid sellisesse asendisse, et nendest saadav pinge oleks minimaalne. Reostaatide liugkontaktid tuleb asetada nii, et reostaadi takistus oleks maksimaalne. Galvanomeetrid peavad olema voolu sisselülitamisel šunditud.

Kui voolu sisselülitamisel mõne mõõteriista osuti "lööb skaalast välja" või esineb vooluahela mõnede osade ülemäärane kuumenemine (ilmub kõrbelõhn või suits), siis tuleb kohe vool välja lülitada ja teatada sellest praktikumi juhendajale.

Kui töö iseloom ei nõua katkestamatut voolu, siis lülitatakse vool ahelasse ainult mõõteriistadelt lugemite võtmise ajaks. Sellega väldime mittevajaliku elektrienergia kulu ning juhtmete ja mõõteriistade soojenemist. See nõue on eriti oluline siis, kui vooluallikana kasutatakse galvaanielemente. Pikaajalisel töötamisel viimased polariseeruvad ja muudavad oma emj. väärtust, mis mõnel juhul mõjutab mõõtmistulemusi.

Kui vooluahel on ühendatud vooluallikaga, siis ei tohi skeemis olevaid ühendusi muuta ega puudutada vooluahela isoleerimata osi. Pingestatud skeemi ei tohi jätta järelevalveta.

Skeemi lahtivõtmist tuleb alati alustada vooluallika lahtiühendamisega. Kui vooluahelas on kondensaatorid, siis tuleb need laengu mahavõtmiseks lühistada. Enne skeemi lahtivõtmist aga esitage katseandmed praktikumi juhendajale kontrollimiseks.

Katselises uurimistöös on tähtis esitada mõõtmistulemused võimalikult näitlikul kujul, et neid oleks mugav kasutada ja töödelda. Tavaliselt esitatakse tulemused tabelina või graafikuna. Katseandmete esitamine tabeli kujul kergendab nende kontrollimist ja töötlemist. Seepärast tuleb juba

praktikumiks ettevalmistumisel mõelda, millise kujuga tabelid on otstarbekamad antud töös, ning joonestada nad protokollis.

Füüsikaliste suuruste vahelise sõltuvuse leidmiseks joonestatakse graafikud. Sealt on kergem määrata funktsionaalse sõltuvuse iseloomu, samuti on katse tulemused näitlikumad.

Graafikute joonestamisel tuleb kinni pidada järgmistest nõuetest.

Graafik joonestatakse millimeetripaberile või spetsiaalsele paberile (näit. logaritmilisele jt.). Koordinaattelgede joonestamisel valitakse sõltumatu muutuja jaoks abstsissitelg.

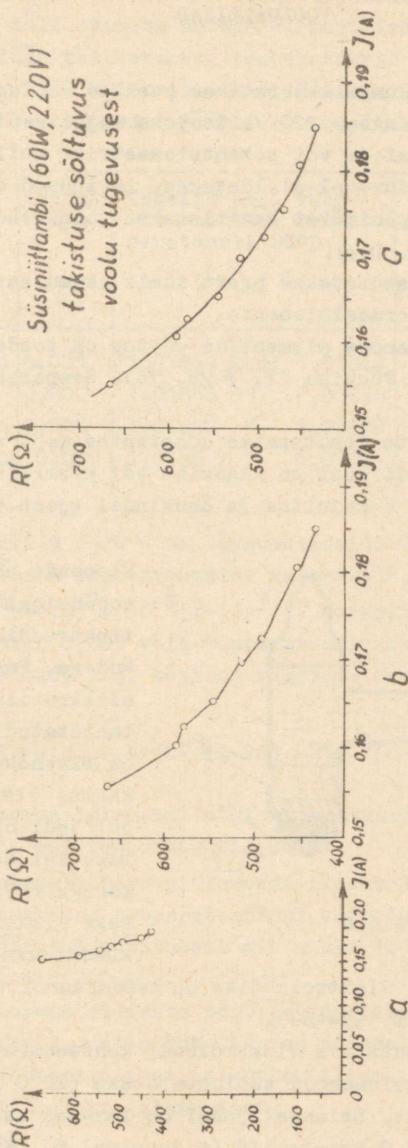
Väga oluline on graafikute joonestamisel mastaabi õige valik. Mastaap kantakse teljele nii, et jaotustevahelised kaugused oleksid 1, 2 või 5 ühikut (lubatav on ka 2,5 või 4) või samad arvud korrutatud teguriga $10^{\pm n}$ (n on täisarv). Tavaliselt on kummalgi teljel 4...10 numbritega märgitud jaotust. Telje lõpus näidatakse ära teljele kantud suurus ja tema ühik. Siia märgitakse tavaliselt ka suurusjärg (10^{±n}). Mastaap tuleb valida nii, et kõver haaraks kogu koordinaattelgedega piiratud pinda, telgedele kantavate suuruste absoluutsed vead aga vastaksid ühele-kahle graafiku väikseimale jaotisele. Seejuures ei ole vajalik, et koordinaatide alguspunkti oleks valitud nullpunkt.

Andmete töötlemine on mugav, kui graafikuks on sirge. Seepärast kantakse sageli telgedele mitte mõõdetavad suurused ise, vaid nende sobivad funktsioonid (näit. logaritm, pöördväärtus).

Punktid tuleb graafikule kanda võimalikult täpselt ja ümbritseda väikeste ringidega, kolmnurkadega jms. Kui on teada suuruste absoluutsed vead, siis kantakse ka need graafikule (joonised 3 ja 4). Punktide vahele joonestatakse sujuv, ilma järskude käänakuteta kõver, mis mööduks kõigist punktidest võimalikult lähedalt. Graafiku kõigis osades peavad punktid jaotuma ligikaudu võrdselt mõlemale poole kõverat.

Kõik graafikud tuleb varustada pealdistega, kus seletatakse lühidalt ja täpselt, mis on graafikul kujutatud.

Joonisel 5 on toodud näited graafikute ebaõigest (a ning b) ja õigest (c) joonestamisest.



Joonis 5

VOOLUALLIKAD

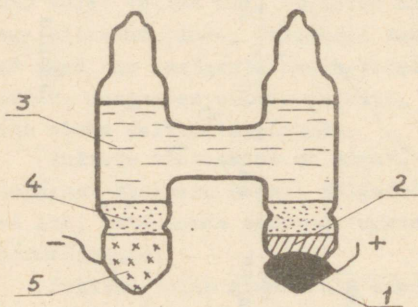
Elektripraktikumis kasutatakse peamise vooluallikana vahelduvvooluvõrku pingega 220 V. Töödeks vajalik pinge saadakse trafode, autotrafode või potentsiomeetrite abil. Alalisvoolu saamiseks vahelduvvool alaldatakse. Levinumad on pooljuhtalaldid. Nende tööpõhimõtet käsitletakse tööjuhendis "Pooljuhtalaldi" (vt.lk. 109).

Mõnel juhul kasutatakse praktikumis akumulaatoreid, elemente ja Westoni normaalelemente.

Akude ja Leclanché elementide ehitus on teada keskkoolist (vt. ka J.A.Štrauf. Füüsika II, § 75, 76). Seepärast me neid siin ei vaatle.

Normaalelemente kasutatakse konstantse emj. saamiseks.

Normaalelemendi kest on klaasist või keemiliselt püsivast plastmassist, H-kujuline ja õhukindel (joon.6).



Joonis 6

Elemendi ühendamine vooluringi toimub plaatinatraadist läbiviikudega. Positiivseks elektroodiks (joonisel tähistatud numbriga 1) on elavhõbe, mis on kaetud elavhõbeda(I)-sulfaadi Hg_2SO_4 pastaga kui depolarisatoriga (2). Negatiivseks elektroodiks on kaadmiumamalgaam (5)

(10% Cd + 90% Hg). Elektrolüüdiks on kaadmiumsulfaadi CdSO_4 vesilahus (3) (GOST 1954-64).

Olenevalt kasutatava elektrolüüdi kontsentratsioonist jaotatakse normaalelemendid küllastatuteks (20°C juures) ja mitte küllastatuteks. Esimesel juhul on lahuses kaadmiumsulfaadi $\text{CdSO}_4 \cdot \frac{8}{3} \text{H}_2\text{O}$ kristallid (4 joonisel 6). Küllastatud

normaalelemendid jaotatakse kolme täpsusklassi (0,001; 0,002 ja 0,005). Küllastamata normaalelementides (täpsusklass 0,02) on elektrolüüt küllastamata temperatuuril üle 4°C (s.t. ei sisalda $\text{CdSO}_4 \cdot 8/3 \text{H}_2\text{O}$ kristalle). Mõningad andmed nende elementide kohta on toodud järgmises tabelis:

Normaalelemendi tüüp	Täpsusklass	Tegelik emj. väärtus voltides temperatuuril 20°C	Suurim lubatav voolu tugevus 1 min. kestel (μA)	Kasutamise temperatuur (°C)
Küllastatud	0,001	1,01859 kuni 1,01863	1	$20 \pm 0,5$
"	0,002	1,01856 " 1,01866	1	$20 \pm 2,0$
"	0,005	1,01850 " 1,01870	1	10...40
Küllastamata	0,02	1,0186 " 1,0194	10	5...55

Temperatuuril $t \neq 20^\circ\text{C}$ on täpsusklasside 0,001 ja 0,002 puhul normaalelemendi emj. arvutatav valemist $E_t = E_{20} - 4,06 \cdot 10^{-5}(t-20) - 0,95 \cdot 10^{-6}(t-20)^2 + 10^{-8}(t-20)^3$ V. Normaalelementide puhul täpsusklassiga 0,005 võib temperatuurivahemikus 10-st kuni 30°C-ni kasutada emj. tõelise väärtuse arvutamiseks lühendatud valemit:

$$E_t = E_{20} - 4 \cdot 10^{-5}(t-20) - 10^{-6}(t-20)^2 \text{ V,}$$

kus E_t on normaalelemendi emj. temperatuuril $t^\circ\text{C}$ ja E_{20} - normaalelemendi emj. temperatuuril 20°C .

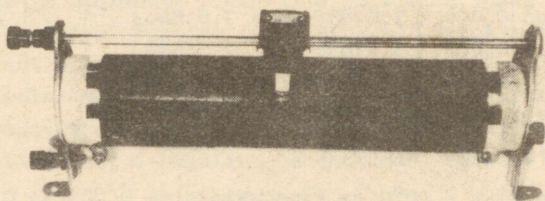
Küllastamata normaalelemendi (klass 0,02) emj. ei või 20°C -st erinevatel temperatuuridel erineda normaalsel temperatuuril määratud väärtusest mitte üle 100 μV . Aastane emj. muutus ei ületa 200 μV .

Kuna normaalelemente võib läbida ainult väga nõrk vool (vt. tabel ülal), siis kasutatakse normaalelemente peamiselt kompensatsiooniskeemides, mis praktiliselt ei tarbi energiat mõõdetavast ahelast (elemendist).

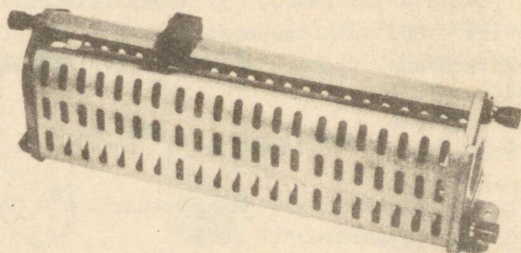
Normaalelemendid nõuavad ettevaatlikku käsitlemist. Vedela elektrolüüdiga normaalelemendi tööasend on vertikaalne, millest ei tohi teda üle 5° välja viia. Vedela elektrolüüdita normaalelemente võib paigutada mistahes asendisse. Seejuures tekkinud muutus tuleb leida vastavast kasutamissuhtendist.

VOOLU- JA PINGEREGULAATORID

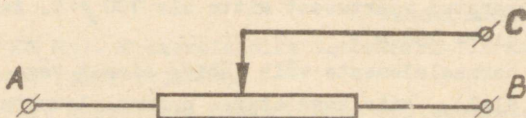
Praktikumis kasutatakse voolu reguleerimiseks lükatreostaiti ja takistusregulaatorit.



a



b



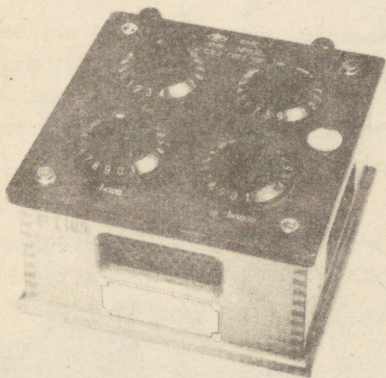
c

Joonis 7

Lükatreostaadi (joon.7a ja b) põhiliseks osaks on isoleermaterjalist silindrile keritud takistustraatus. Piki silindrit liigub liugkontakt, mille nihutamise saad muuta reostaadi takistust.

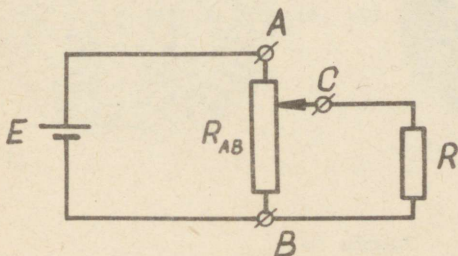
Reostaat lülitatakse vooluahelasse klemmide A ja C või B ja C abil (joon.7c). Maksimaalne takistus ja suurim lubatav voolu tugevus on märgitud reostaadi korpusel.

Takistusmagasin (joon.8) koosneb reast täpse takistusega poolidest. Neid on võimalik pistikute pesast eemaldamisega või lülitate pööramisega lülitada järjestikku vooluahelasse. Lüliti iga asendi juurde on märgitud ahesse lülitatud takistuse oomides. Takistusmagasini ei tohi koormata tugeva vooluga. Takistusmagasini ülesandeks pole niivõrd voolu tugevuse reguleerimine kui just kindla suurusega takistuse saamine.



Joonis 8

Pinge muutumiseks pidevalt nullist kuni teatud väärtuseni U kasutatakse potentsiomeetreid ja autotrafosid.



Joonis 9

Potentsiomeetritena töötab kolme klemmiga reostaat joonisel 9 näidatud lülituses. Vooluallikas ühendatakse reostaadi otstes asuvate klemmidega A ja B. Soovitava suurusega pinge U saadakse ühe otsklemmi ja liug-

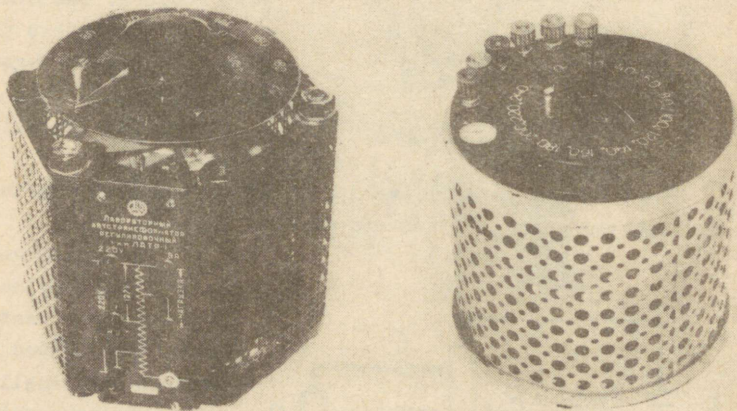
kontakti C vahelt. Kui vooluallika sisetakistus on palju väiksem reostaadi takistusest R_{AB} , siis potentsiomeetrilt saadav pinge

$$U = \frac{E \cdot R \cdot R_{AC}}{R \cdot R_{AB} + R_{AB} \cdot R_{AC} - R_{AC}^2},$$

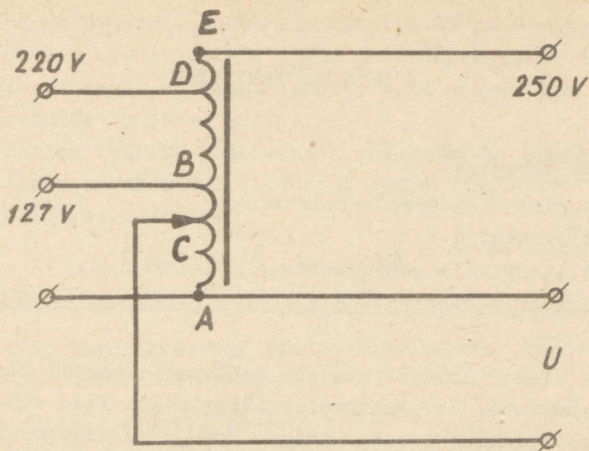
kus R on välisahela (koormise) takistus ja E - vooluallika emf.

Kui $R \gg R_{AB}$, siis $U = \frac{E \cdot R_{AC}}{R_{AB}}$, s.o. potentsiomeetrilt saadav

pinge on võrdeline potentsiomeetri sisselülitatud osa takistusega. Vahelduvvoolu korral on otstarbekas potentsiomeetrid asendada autotrafodega (joon.10), sest nende energiakaod on tunduvalt väiksemad kui potentsiomeetritel. Autotrafo on selline trafo (joon.11), kus osa mahisest on nii primaar- kui



Joonis 10



Joonis 11

ka sekundaarmähis. Primaarmähise moodustab mähis punktide A ja B või A ja D vahel. Sekundaarmähiseks on mähis punkti A ja liugkontakti C vahel. Maksimaalne saadav pinge on autotrafodel tavaliselt 250 V.

Enne trafo vooluvõrku lülitamist on vaja jõuda selgusele klemmide otstarbes. Selleks on klemmilauale joonestatud trafo skeem või klemmide juurde kirjutatud nende otstarve.

Autotrafode (samuti potentsiomeetrite) puuduseks on asjaolu, et nende sekundaarmähis on alaliselt ühenduses vooluallikaga. Seepärast on autotrafo isoleerimata sekundaarosa puudutamine ohtlik ka siis, kui võetav pinge on madal.

ELEKTRIMÕÕTERIISTAD

1. Tööülesanne

Tutvumine elektrimõõteriistadega.

2. Töövahendid

Laboratooriumis asuvad elektrimõõteriistad.

3. Elektrimõõteriistade ehitus ja neid iseloomustavad suurused

Kõik elektrimõõteriistadele esitatavad nõuded täpsuse, näitude püsivuse, ekspluatatsioonitingimuste jne. suhtes fikseeritakse riiklike standarditega. Praegu on kasutusel GOCT 1845-59, mis hakkas kehtima 1. jaanuarist 1961.a. Mõõteriistade vastavus GOCT-i normidele tagatakse perioodilise riikliku kontrolliga, millele alluvad kõik kalibreeritud mõõteriistad. Kontrolli sagedus oleneb mõõteriista otstarbest ja täpsusest. Osutamõõteriistu kontrollitakse mitte harvemini kui üks kord kahe aasta jooksul. Kontrolli aeg märgitakse pitsatile, millega pitseeritakse mõõteriista korpuse sulgemise kruvid. Mõõteriistu, mille kontrollimisest on möödunud üle kahe aasta, ei tohi kasutada mõõtmisteks. Erandina on nende kasutamine lubatud demonstratsiooniks või õppeotstarbeks.

Peamisteks elektrimõõteriistadele esitatavateks nõueteks on 1) väike energiatarbimine, 2) mõõteriist ei tohi oluliselt muuta elektrilise ahela töörežiimi.

Tähtsamad mõõteriistu iseloomustavad andmed, mis kantakse ka nende skaalale, on mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond (galvanomeetritel tundlikkus).

Sõltuvalt töötamise aluseks olevast füüsikalisest nähtusest jaotatakse elektrimõõteriistad mitmesse süsteemi: magnetilised, elektromagnetilised, elektro- ja ferrodünaamilised, elektrostaatilised, vibratsioonsüsteemilised, termoelektrilised jne.

3.1. Täpsusklass

Mõõteriistu iseloomustab täpsusklass, mis võib olla

määratud absoluutse, suhtelise või taandatud veaga, või teatud jaotiste arvuga (ГОСТ 13600-68). Täpsusklass ei iseloomusta otseselt mõõtmistulemust, vaid määrab ära ainult mõõtmisvigade lubatava piiri.

Enamiku füüsika praktikumis kasutatavate mõõteriistade täpsusklass on määratud taandatud veaga. Taandatud viga γ defineeritakse valemiga

$$\gamma = \pm \frac{100 \Delta X}{X_N},$$

kus ΔX on absoluutse vea maksimaalne lubatav väärtus,
 X_N - normeeriv väärtus.

Normeeriv väärtus võrdub

a) võrdelise või astmelise skaalaga riistadel, mille nulljaotis asub skaala serval või väljaspool seda, skaala tööpiirkonna lõppnäiduga;

b) võrdelise või astmelise skaalaga riistadel, mille nulljaotis asub skaala sees, skaala mõlema poole tööpiirkonna lõppnäitude aritmeetilise summaga (märki arvestamata);

c) logaritmilise või hüperboolse skaalaga riistadel skaala kogupikkusega.

Täpsusklassi tähis kantakse alati mõõteriista skaalale. Olgu näiteks taandatud viga $\gamma = \pm 1,5\%$. Punktides a ja b märgitud juhul on täpsusklassi tähiseks skaalal 1,5, punktis c märgitud juhul aga 1,5.

Mõõteriista täpsusklass võib olla ГОСТ 13600-68 järgi määratud ka suhtelise veaga

$$\delta = \pm \frac{100 \Delta X}{X},$$

kus X on mõõteriista näit.

Kui näiteks $\delta = \pm 1,5\%$, siis tähistatakse täpsusklassi mõõteriista skaalal 1,5. Siinjuures meenutame, et sama tähistust kasutati kuni 1960. aastani taandatud veaga määratud täpsusklassi tähistamiseks.

Juhul kui mõõteriistadel esineb siin mittekirjeldatud

täpsusklassi tähistusi, tuleb nende tähendus leida mõõteriista passiat, tööjuhendist või ГОСТ-ist 13600-68.

N ä i d e. Mõõtmiseks kasutati ühepoolse skaalaga voltmeetrit skaalapiirkonnaga 150 V ja täpsusklassiga 1,0. See tähendab, et pinge mõõtmisel vahemikus 0...150 V on absoluutne viga $\Delta U = \frac{150 \cdot 1,0}{100} = 1,5$ V. Kui mõõdetav pinge on näiteks 100 V, siis mõõtmise suhteline viga

$$E = \frac{1,5}{100} \cdot 100\% = 1,5\%.$$

3.2. Mõõtepiirkond

Mõõtepiirkonnaks nimetatakse mõõdetava suuruse väärtust, mis vastab osuti täishälbele (skaala lõppnäidule). Elektrimõõteriistadel võib olla mitu mõõtepiirkonda. Üleminekul ühelt mõõtepiirkonnalt teisele muutub ka mõõteriista skaalajaotuse väärtus. Seepärast on vaja osata seda määrata.

N ä i d e. Voltmeetril on kaks mõõtepiirkonda: 15 V ja 30 V. Skaalal on 150 jaotist. Skaalajaotuse väärtus on siis vastavalt $0,1 \frac{V}{\text{jaotis}}$ ja $0,2 \frac{V}{\text{jaotis}}$.

3.3. Tundlikkus

Mõõteriista tundlikkuseks S nimetatakse osuti joon- või nurknihke ja seda nihet esilekutsuva mõõdetava suuruse suhet

$$S = \frac{n}{X},$$

kus n on osuti joon- või nurknihe, X - mõõdetav suurus.

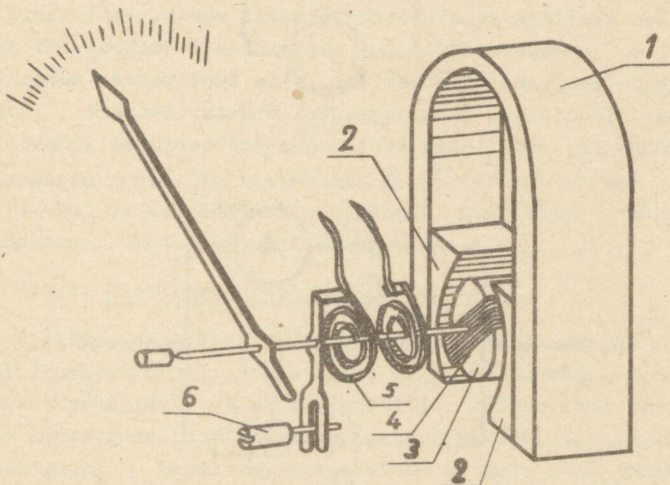
N ä i d e. Galvanomeetri osuti kaldus voolu $4 \mu A$ mõjul nullasendist kõrvale 80 jaotise võrra. Seega galvanomeetri tundlikkus voolule on $20 \frac{\mu A}{\text{jaotis}}$.

3.4. Mõõteriistade süsteemid

3.4.1. Magnetelektrilised mõõteriistad

Nende mõõteriistade ehitus põhineb magnetvälja mõjul vooluga juhisse. Magnetelektrilisi mõõteriistu toodetakse kolme erineva konstruktsiooniga: välise püsivmagnetiga, seesmise püsivmagnetiga ja pöörduva püsivmagnetiga.

Levinumad on välise püsivmagnetiga magnetelektrilised mõõteriistad. Sellise mõõtesüsteemi üks võimalik konstruktsioon on näidatud joonisel 12. Mõõtesüsteem koosneb püsivmagnetist 1, mille magnetpooluste 2 vahel asub võllile kinnitatud alumiiniumist raam koos mähisega 4. Mähisesse voolu



Joonis 12

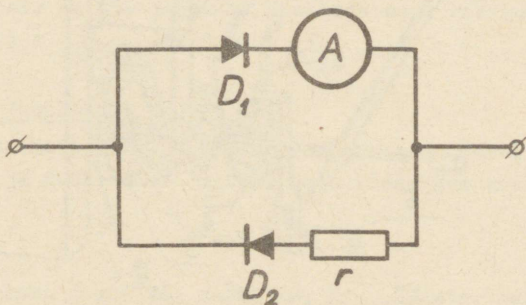
juhtimiseks ja vastupöördemomendi tekitamiseks on spiraalvedrud 5. Osuti seadmiseks nulljoonele enne mõõtmiste algust on nullikorrektor 6. Raammähise sees asub pehmeterasest silinder 3, mis jaotab magnetvälja nii, et väljatugevus on pooluskingade ja silindri vahelises pilus igal pool ühesugune ja risti silindri pinnaga. Riista sellise ehituse kor-

ral on raamile mõjuv jõumoment võrdeline raami läbiva vooluga. Järelikult on ka mõõteriista skaala ühtlaste jaotustega.

Magnetelektrilist süsteemi mõõteriistad on väga tundlikud ja täpsed (täpsusklass kuni 0,05). Neid saab kasutada ainult alalisvoolu ja pinge mõõtmiseks. Kui mõõteriista nullpunkt ei ole skaala keskel, siis tuleb riist lülitada vooluringi nii, et vooluallika positiivne poolus oleks ühendatud mõõteriista plussklemmiga (plussiga tähistatud klemmiga) ja negatiivne poolus - miinusklemmiga.

3.4.2. Alaldiga mõõteriistad

Alaldiga mõõteriistaks nimetatakse magnetelektrilist süsteemi kokkuehitatult pooljuhtalaldiga. Joonisel 13 on toodud alaldiga ampermeetri võimalik skeem. Vool läbib dioodi D_1 ja ampermeetrit ühe poolperioodi jooksul. Et mitte rikkuda vooluahela töörežiimi, siis šunditakse mõõteriist teise dioodiga D_2 ja ampermeetri sisetakistusega võrdse takistigar, mida läbib vool teise poolperioodi jooksul.



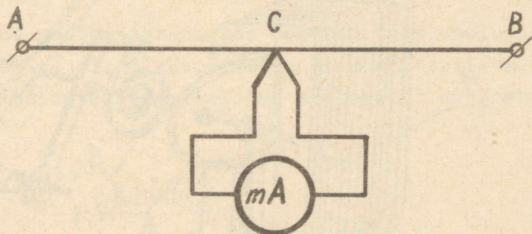
Joonis 13

Alaldiga mõõteriistade täpsusklass ei ületa pooljuhtdiodide parameetrite ebapüsivuse tõttu 1,5...2,5. Skaalajao-tised on skaala alguses kokku surutud, kuid ülejäänud osas võrdlemisi ühtlased.

Alaldiga mõõtesüsteemi kasutatakse mitme mõõtepiirkonnaga universaalmõõteriistades. Nendega saab mõõta siinuselisi voole (pingeid) sagedusega 0...10 kHz.

3.4.3. Termoelektrilised mõõteriistad

Termoelektriline mõõteriist koosneb magnetelektrilisest süsteemist ja termoelemendist (joon.14). Mõõdetav vool läbib traati AB ja kuumutab termopaari joote kohta C, tekitades

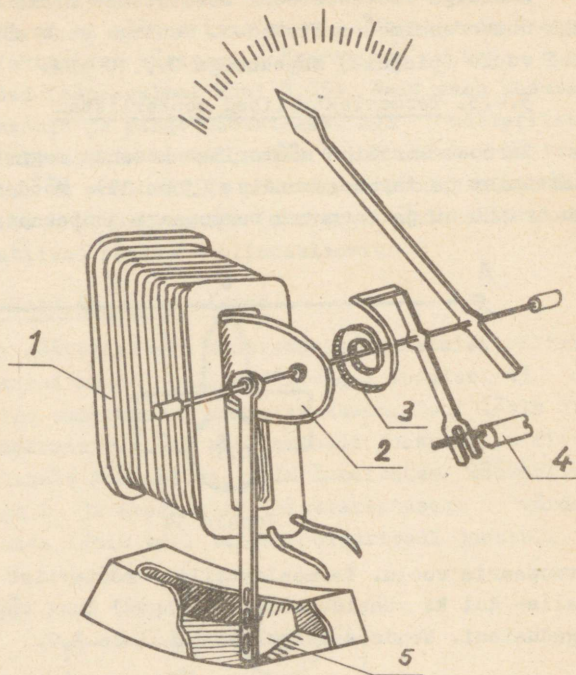


Joonis 14

termopaaris voolu. Termoelektriline mõõteriist mõõdab nii alalis- kui ka vahelduvvoolu (-pinget) kuni väga kõrgete sagedusteni. Nende täpsusklass ei ületa 1,0.

3.4.4. Elektromagnetilised mõõteriistad

Elektromagnetilise süsteemi mõõteriistade ehitus põhineb liikumatut pooli läbiva voolu magnetvälja mõjul pehmeterasest südamikul. Elektromagnetilisi mõõteriistu toodetakse kahesuguse konstruktsiooniga - lapikmähisega ja silindermähisega. Lapikmähisega süsteem on kujutatud joonisel 15. Kui pooli 1 läbib vool, siis pooli magnetväli magnetiseerib induktsiooni teel pehmeterasest südamiku 2, mistõttu viimane tõmbub pooli sisse ja pöörab telge ning sellele kinnitatud osutit. Südamik liigub pooli sisse seni, kuni vedru 3 tasakaalustab magnetvälja poolt südamikule mõjuva jõu. Korrektoriga 4 seatakse osuti voolu puudumisel skaala nulljaotisele. Osuti sujuvaks liikumiseks on mõõteriist varustatud summutiga 5.



Joonis 15

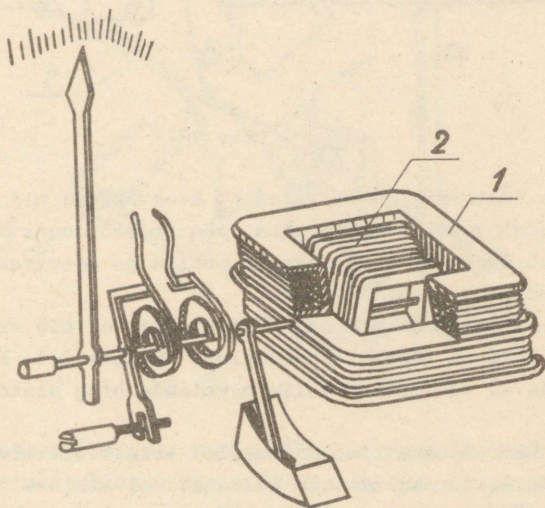
Kuna südamikule mõjuva jõu suund ei sõltu voolu suunast poolis, siis on elektromagnetilised mõõteriistad kasutatavad nii alalis- kui ka vahelduvvoolu (-pinge) mõõtmiseks. Nende skaala ei ole lineaarne, sest südamiku pöördenurk on võrdeline pooli läbiva voolu tugevuse ruuduga. Elektromagnetilised mõõteriistad on vähemtäpsed kui magnetelektirilised. Nende täpsusklass ei ületa 0,5.

Elektromagnetiliste riistade peamiseks puuduseks on nende suhteliselt suur mõjustatavus väliste magnetväljade poolt. Selle vältimiseks kasutatakse magnetilist varjestamist ja astaseerimist. Esimesel juhul valmistatakse mõõteriista kast rauast, mis kaitseb mõõteriista väliste väljade eest.

Astaatiliselid m  teristad on varustatud kahe ühel tel-
jel oleva südamikuga ja kahe pooliga, millede magnetväljad
on suunatud vastupidiselt. Sel juhul väline magnetväli, mis
tugevdab ühe pooli välja, nõrgestab samal ajal teise pooli
oma. Seepärast jäab südamikule mõjuvate jõudude summa muutu-
matuks. Elektromagnetilise süsteemi m  teristad on suhteli-
selt lihtsa ehitusega ega karda l  hiaajalisi   lekoormusi.

3.4.5. Elektro-ferrod  naamilised m  teristad

Nende m  teristade töö põhineb kahe vooluga juhi vas-
tastikusel mõjul. Elektrod  naamilise m  terista konstrukt-
sioon on näidatud joonisel 16. M  terist koosneb tavaliselt

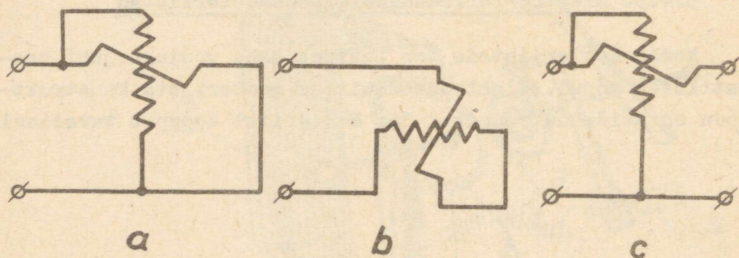


Joonis 16

j  medasttraadist ja väikese keerdude arvuga liikumatust
poolist 1 ning peenest traadist ja suure keerdude arvuga
liikuvast poolist 2. Liikuva pooli pöördenurk on võrdeline

mõlemat pooli läbivate voolude korrutisega. Seega mõõteriista skaala ei ole lineaarne. Kasutades sobiva kujuga poole, võib saada peaaegu ühtlaste jaotustega skaala.

Sõltuvalt poolide omavahelisest lülitusest (joon. 17) saab elektrodünaamilist mõõteriista kasutada ampermeetrina (a), voltmeetrina (b) ja vattmeetrina (c).



Joonis 17

Selle süsteemi mõõteriistad on kasutatavad nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks, sest voolu suuna muutumisel muutub suund korraga mõlemas poolis ja seepärast jääb hääle endiseks.

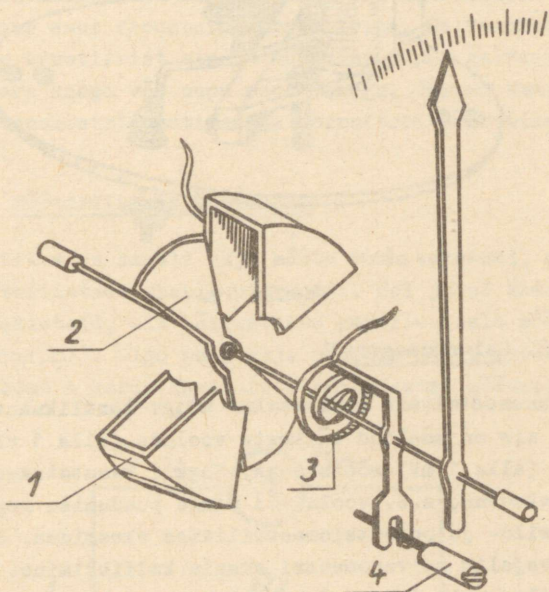
Elektrodünaamilised mõõteriistad ei ole eriti tundlikud, kuid on täpsed. Täpsusklass on kuni 0,1. Nende puuduseks on tundlikkus väliste väljade ning ülekoormuste suhtes.

Ferrodünaamiline mõõteriist erineb elektrodünaamilisest ainult selle poolest, et liikumatutel mähistel on pehmeterasest südamikud. See tõstab mõõteriistade tundlikkust, kuid vähendab täpsust.

3.4.6. Elektrostaatilised mõõteriistad

Elektrostaatilise mõõteriista (joon. 18) töö põhineb erinimeliselt laetud liikumatu elektroodi 1 ja liikuva elektroodi 2 vastastikusel tõmbumisel. Mõõteriista osuti jääb paigale, kui vedru 3 tasakaalustab liikuvale elektroodile

mõjuva elektrostaatilise tõmbejõu. Korrektoriga 4 seatakse osuti laadimata plaatide korral nulljaotisele. Elektrostaatilise mõõteriista sisetakistus on praktiliselt lõpmata suur. Seepärast kasutatakse neid peamiselt voltmeetritena

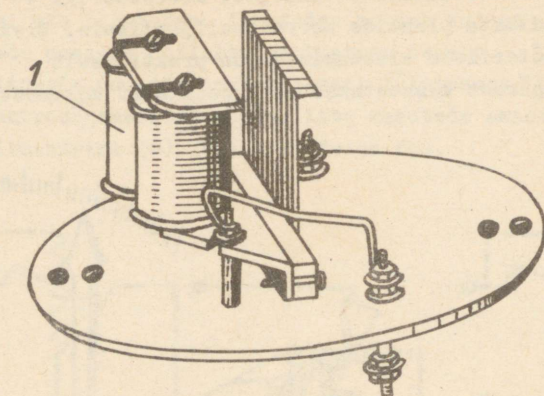


Joonis 18

kõrgete pingete mõõtmisel. Nad sobivad nii alalis- kui ka vahelduvpinge mõõtmiseks. Nende skaala on mittelineaarne.

3.4.7. Vibratsioonmõõteriistad

Vibratsioonmõõteriistadest on levinumad vibratsioonsaagedusmõõtjad (joon.19). Elektromagneti 1 ette on asetatud ühest otsast kinnitatud teraslehekesed. Neil on erinev omavõnkesagedus, mis on kantud mõõteriista maa-alale. Elektromagneti toitmisel vahelduvvooluga hakkab see terasleheke, mille omavõnkesagedus on kõige lähemal toitevoolu sagedusele, võnkuma suurema amplituudiga (resonantsi nähtus).



Joonis 19.

3.5. Galvanomeetrid

Galvanomeetriteks nimetatakse kõige tundlikumaid mõõteriistu, mis on mõeldud väikeste voolude (alla 1 mA) ja pingete (alla 1 mV) mõõtmiseks. Sageli kasutatakse neid nullriistadena, s.o. voolu või pinge puudumise registreerimiseks sild- ja potentsiomeetrilistes skeemides. Sel juhul ei ole vajalik galvanomeetri skaala kaliibrimine.

Alalisvoolu (-pinge) korral kasutatakse peaaegu eranditult magnetelektrilise süsteemi mõõteriistu: osut- ja peegelgalvanomeetreid. Neil on väga tugev püsivmagnet ja kerge liikuv süsteem. Osutgalvanomeetri jaotise väärtus võib olla kuni 10^{-8} A, peegelgalvanomeetritel - 10^{-11} A. Lühiajalistes vooluimpulssides kasutatakse elektrilaengu mõõtmiseks ballistilisi galvanomeetreid, s.o. galvanomeetreid suure omavõnkumiste perioodiga. Kui vooluimpulsi kestus on palju väiksem magnetelektrilise mõõteriista liikuva süsteemi omavõnkumiste perioodist, siis tema esimese kõrvalekalde amplituud on võrdeline raami läbinud elektrilaenguga. Omavõnkumiste perioodi suurendamiseks suurendatakse liikuva süsteemi inertsimomenti.

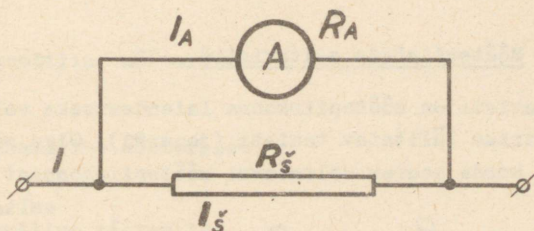
Vahelduvvoolu korral kasutatakse galvanomeetritena vibratsioonmõõteriistu.

Viimasel ajal on hakatud väikeste voolude ja pingete mõõtmiseks kasutama elektroonseid elektromeetreid. Nendega on võimalik mõõta voolusid kuni $10^{-15} \dots 10^{-17}$ A.

Galvanomeetrid on liikuva süsteemi kaitsmiseks juhuslike põrütuste eest varustatud arretiiriga. Galvanomeeter vabastatakse arretiirist ainult mõõtmiste ajaks galvanomeetri kaanel oleva kangi või nupu pööramisega. Pärast vabastamist tuleb galvanomeetri osuti seada korrektori pööramisega nulljaotisele.

3.6. Mõõteriistade šuntimine

Praktikas on sageli vaja mõõta voolu tugevusi, mis ületavad mõõteriistade skaala piirkondi. Sel juhul kasutatakse šunte - takisteid, mis lülitatakse paralleelselt mõõteriistadega (joon.20). Olgu meil vaja näiteks mõõta ahelas voolu I , mis ületab n korda kasutatava ampermeetri mõõtepiirkonna.



Joonis 20

Leiame vajaliku šundi takistuse R_s , mis suurendab ampermeetri mõõtepiirkonda n korda.

Olgu ampermeetri sisetakistus R_A . Juhtide paralleelse lülituse korral kehtib seos

$$\frac{I_A}{I_s} = \frac{R_s}{R_A},$$

kus I_A on ampermeetri läbiv vool, I_s - šunti läbiv vool.

Kuna $I_{\hat{S}} = I - I_A$ ja $I = n I_A$, siis saame

$$\frac{I_A}{nI_A - I_A} = \frac{R_{\hat{S}}}{R_A}.$$

Taandades võrduse vasaku poole I_A -ga, saame

$$\frac{1}{n - 1} = \frac{R_{\hat{S}}}{R_A},$$

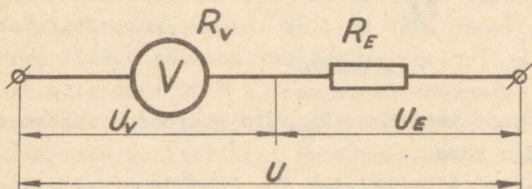
millest otsitav takistus

$$R_{\hat{S}} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

Seega ampermeetri mõõtepiirkonna suurendamiseks n korda on vaja kasutada šunti, mille takistus on $n - 1$ korda väiksem ampermeetri sisetakistusest. Šuntide takistused on väga väikesed ($10^{-1} \dots 10^{-3}$ oomi). Kontaktide takistuse vältimiseks valmistatakse šundid kahe paari kontaktidega. Üks paar, nn. voolukontaktid, on šundi ühendamiseks vooluahelasse, teine paar, nn. potentsiaalikontaktid on mõõteriista ühendamiseks.

3.7. Mõõteriistade eeltakistid

Eeltakisti on mõõtepiirkonna laiendamiseks voltmeetri-ga järjestikku lülitatav takisti (joon.21). Olgu mõõdetav pinge U n korda suurem voltmeetri mõõtepiirkonnast U_V . Leiame



Joonis 21

eeltakisti R_E väärtuse voltmeetri mõõtepiirkonna n -kordseks suurendamiseks. Juhtide järjestikuse lülitamise korral kehtib seos

$$\frac{U_V}{R_V} = \frac{U}{R_V + R_E},$$

kus R_V on voltmeetri sisetakistus.

Kuna $U = nU_V$, siis saame pärast teisendusi

$$R_E = R_V(n - 1).$$

Seega voltmeetri mõõtepiirkonna suurendamiseks n korda on vaja, et kasutatav eeltakisti oleks $n - 1$ korda suurem voltmeetri sisetakistusest. Kuna voltmeetrite sisetakistus on tavaliselt suur, siis ka eeltakistite väärtused on suured.

3.8. Mõõteriista skaalal esinevaid tingmärke

Nimetus	Tingmärk
<u>Mõõteriistade süsteemide tingmärgid</u>	
Magnetelektriline mõõteriist pöörduva raamiga	
Magnetelektriline mõõteriist pöörduva magnetiga	
Elektromagnetiline mõõteriist	
Elektrodünaamiline mõõteriist	
Ferrodünaamiline mõõteriist	
Elektrostaatiline mõõteriist	
Vibratsioonüsteemiline mõõteriist	
Magnetelektriline mõõteriist sisseehitatud alaldiga	

Otseselt kuumendatav termoelement



Kaudselt kuumendatav termoelement



Vooluliikide tingmärgid

Alalisvool



Vahelduvvool



Alalis- ja vahelduvvool



Helisageduslik vool

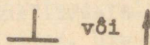


Kolmefaasiline vool

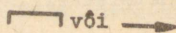


Mõõteriistade asendite tingmärgid

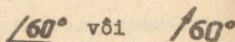
Vertikaalasend



Horisontaalasend

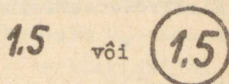


Kaldasend, näiteks 60°

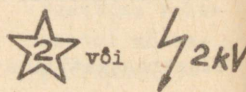


Muid tingmärke

Täpsusklass, näiteks 1,5



Mõõteahel on korpusest isoleeritud ja proovitud pingega, näiteks 2 kV



Elektrostaatiline varje



Elektromagnetiline varje



Maandusklemm



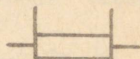
Nullikorrektor



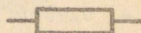
Tähelepanu! Vaata täiendavaid juhiseid
passist ja kasutamise juhendist!



Mõõteriista šunt



Mõõteriista eeltakisti



Mõõteriistade süsteemide tähised

Magnetelektriline

M

Elektromagnetiline

Э

Elektrodünaamiline

D

Laboratoorne elektrodünaamiline

П või *D*

Astaatiline, elektromagnetiline

ACT

Magnetelektriline, alaldiga

Ц

Fotoelektriline

Φ

Termoelektriline

T

4. Töö käik

Tutvuge 3...5 erinevat liiki elektrimõõteriistaga (mõõteriistad uurimiseks määrab praktikumi juhendaja). Andmed vaadeldavate mõõteriistade kohta kandke järgnevasse tabelisse (mitme mõõtepiirkonna olemasolul kanda tabelisse andmed kõigi mõõtepiirkondade kohta).

Jrk. nr.	Mõõteriista nimetus	Tehase- või inventari- number	Süsteem	Täpsus- klass	Mõõte- piir- kond	Abso- luut- ne viga	Jaoti- se vaar- tus (või tundlik- kus)

5. Küsimused

1. Mida tuleb jälgida
 - a) elektriliste skeemide koostamisel,
 - b) voolu sisselülitamisel ahelasse,
 - c) töötamisel voolu all oleva skeemiga?
2. Galvaanielemendi ja aku ehitus ning tööpõhimõte.
3. Pinge- ja vooluregulaatorid: reostaat, takistusmagasin, potentsiomeeter, autotrafo. Nende ehitus ja tööpõhimõte.
4. Tuletage Kirchhoffi seaduste alusel potentsiomeetrilt saadava pinge valem.
5. Mida näitab mõõteriista täpsusklass?
6. Mis on mõõteriista tundlikkus?
7. Tähtsamad mõõteriistade süsteemid, nende ehitus ja tööpõhimõte.
8. Missugust elektrimõõteriista nimetatakse galvanomeetriks? Tema iseärasused.
9. Kuidas on võimalik suurendada ampermeetri ja voltmeetri mõõtepiirkonda?
10. Kuidas on ehitatud mitme mõõtepiirkonnaga mõõteriistad?
11. Milliseid tingmärke kasutatakse mõõteriistade süsteemide tähistamiseks?
12. Millised tingmärgid esinevad mõõteriistade skaalal? Nende tähendus.

6. Kirjandus

Elgas, J. Elektrimõõtmiste käsiraamat. Tln., 1963.

Алукер Ш.М. Электроизмерительные приборы. М., 1962.

Пустовалов Г.Е. и Талалаева Е.В. Простейшие физические измерения и их обработка. М., 1967.

ELEKTROSTAATILINE VÄLI

1. Tööülesanne

Elektrivälja uurimine elektrolüüdivanni meetodil tasapinnalisel juhul.

2. Töövahendid

Koordinaatvõrguga elektrolüüdivann, mudелеlektroodid, vahelduvpingeallikas, lampvoltmeeter, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Rea praktiliste ülesannete korral on vaja teada, kuidas hakkavad laetud osakesed liikuma mitmesuguste elektrootide elektriväljas, näiteks millised on elektronide trajektoorid raadiolampides, elektronkiiretorudes, fotokordistites jne. Seda ülesannet lahendatakse tavaliselt kahes osas. Esmalt, teades elektrootide potentsiaale (laengut), määratakse elektrivälja tugevus E , ja seega ka laetud osakestele mõjuv jõud F ($F = qE$) igas ruumpunktis eeldusel, et liikuva laengud oma suuruse ja kontsentratsiooniga ei moonuta elektrootide elektrivälja. Seejärel aga, kasutades mehaanikaseadusi, määratakse laengukandjate liikumise trajektoor ja kiirus teadaolevate jõudude ning algtingimuste järgi.

Komplitseeritud kujuga elektrootide elektrivälja kuju leidmine osutub aga tihti liialt keerukaks ülesandeks, mis paljudel juhtudel ei olegi matemaatiliselt lahendatav. Siis kasutatakse modelleerimist. Modelleerimisel asendatakse antud nähtuse uurimine tegelikkuses selle nähtuse mitmesuguste mudelite uurimisega spetsiaalselt valitud tingimustes. Seejuures asendatakse kehade mõõtmete ja materjalide muutmise kõrval uuritav protsess sageli teisega, mis sõltub samuti antud nähtuse jaoks kõige tähtsamatest füüsikalistest suurus-test või omab siis täiesti teistsugust iseloomu, kuid sarnaneb uuritava protsessiga matemaatiliselt kirjelduselt (näiteks mehaaniliste võnkumiste uurimise asemel uuritakse elektrilisi võnkumisi).

Elektrostaatilist välja vaakuumis või dielektrikus modelleeritakse sageli elektrolüüdivannis. Selleks asetatakse elektrolüüti sisaldavasse anumasse - elektrolüüdivanni - metallist mudелеlektroodid. Elektroodide pingestamisel tekib vool ja potentsiaalilangus nii elektrolüüdis kui ka mudel-elektroodides. Kui nüüd elektrolüüt on valitud nii, et tema elektrijuhtivus on palju väiksem metallelektroodide juhtivusest, siis on potentsiaalilangus elektroodide ulatuses kaduv-väike ja elektroodide pinnad on, nagu vastavate elektroodide pinnad vaakuumiski, ekvipotentsiaalpindadeks. See tingimus on täidetud seda paremini, mida väiksem on elektrolüüdi juhtivus. Samal ajal ei tohi aga elektrolüüdi juhtivus olla ka liiga väike (lähedane destilleeritud veele), kuna siis sarnaneks juhtivuse kaotanud elektrolüüt isolaatorile ja temasse välja uurimiseks (mõõtmiseks) viidud mõõtesond muudaks oluliselt esialgset elektrivälja kuju. (Juhtivuse kaotanud elektrolüüti viidud mõõtesond annab paigutamispunktile selle elektroodi potentsiaali, mille suhtes me tahtsime mõõtmisi teostada. Elektrolüüdist suurema juhtivusega mõõteahel lühistaks paigutamispunkti elektroodiga, muutes nii mõõtmised mõtetuks.) Samasugune olukord kujuneks ka siis, kui püüaksime son-di abil mõõta välja vahetult dielektrikus või vaakuumis. Nii-siis, selleks et oleks välditud välja moonutamine, peab elektrolüüdi juhtivus mõõdetavate punktide vahel olema palju suurem mõõteahela juhtivusest. Siis on mõõteahelasse hargnenud vool tühine võrreldes elektrolüüti läbiva vooluga ja mõõtesond välja moonutusi ei tekita. Ilmneb, et sobiva juhtivusega elektrolüüdiks, mille korral vaskielektroodide pinnad on praktiliselt ekvipotentsiaalpindadeks ja kus lampvoltmeetriga mõõtmised ei riku oluliselt elektrivälja kuju, on tavaline kraanivesi.

Elektroodide pingestamise momendil, kui elektrolüüdis olevad vabad laengukandjad - ioonid - pole jõudnud inertsitõttu veel liikuma hakata, kujutab elektrolüüt endast dielektrikut, ja temas tekib elektrostaatiline väli. Välja mõjul hakkavad ioonid liikuma väljatugevuse vektori sihis. Mitte-

homogeenses elektriväljas muutub aga väljatugevuse suund ruumis pidevalt ja jõujooned, millele väljatugevuse vektor on igas ruumpunktis puutujaks, kõverduvad. Kõverduvad ka laengukandjate trajektoolid. Inertsit tõttu püüab küll liikuv ioon lahkuda sellelt jõujoonelt, mida mööda ta alustas liikumist, kuid elektrolüüdis põrkab ta kokku teiste osakestega, kaotab omandatud kiiruse, jõudmata seejuures kahe põrke lähikese vahemaa tõttu märgatavalt eemalduda jõujoonest. Edasi liigub ioon jällegi väljatugevuse vektori sihis, toimuvad uued põrked jne. Seega liigub ioon elektrolüüdis praktiliselt piki jõujoont. Kuna laengukandjate trajektoolid elektrolüüdis ühtivad jõujoontega, siis ühtivad ka ekvipotentsiaalpinnad elektrolüüdis ja vaakuumis samade elektrootide korral. Täheleb elektriväli on küllalt väikese juhtivusega elektrolüüdis sarnane elektriväljaga vaakuumis või dielektrikus sarnaste elektrootide juures, kuivõrd metallektrootide pinnad on ekvipotentsiaalpindadeks, väljatugevuse ja potentsiaali jaotus aga ühtivad. See sarnasus lubabki elektrostaatiliselt välja modelleerida elektrolüüdivannis.

Raskem on modelleerida elektrostaatiliselt välja, milles asetseb mõnesugune dielektrik, sest dielektriku asetamisel elektrivälja tekib elektriväli ka dielektriku sees. Jõujooned dielektriku pinnal murduvad, tungides tema sisse. Kui nüüd modelleerimisel elektrolüüdivannis asetada ka mudelektrootide vahele samasugune dielektrik, siis elektrostaatilise välja jõujoontega ühtivat voolujoonte pilti ei teki. Elektrolüüdis liikuva ioonid ei saa tungida dielektrikusse ja nad mööduvad temast, liikudes piki dielektriku pinda. Mõõtmised näitavad siis, et ekvipotentsiaalpinnad on elektrolüüti viidud dielektriku pinnaga risti, jõujooned on aga suunatud paralleelselt pinnaga. Seega on jõujoonte kulg dielektriku lähedal elektrolüüdis sootuks teine kui dielektriku lähedal elektrostaatilises väljas ja otsene modelleerimine siin sihile ei vii.

Elektrostaatilise välja modelleerimisel elektrolüüdivannis alalisvoolu elektriväljaga on keskkonna dielektrilise läbitavusega ϵ analoogiliseks suuruseks elektrolüüdi elektri-

juhtivus σ . Järelikult murduksid kahe elektrolüüdi, millede juhtivused on vastavalt σ_1 ja σ_2 , lahutuspinnal voolujooned samuti nagu elektrostaatiliselt välja jõujooned kahe keskkonna lahutuspinnal, millede dielektrilised läbitavused on ϵ_1 ja ϵ_2 , ning kehtib seos

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2}.$$

Seda asjaolu kasutataksegi dielektrikuid sisaldava elektrostaatiliselt välja kvalitatatiivsel modelleerimisel. Praktiliselt ei ole küll võimalik tekitada püsivat eralduspinda kahe erineva juhtivusega elektrolüüdi vahele, kuid elektrolüüdi juhtivust elektrolüüdivanni ulatuses võib siiski muuta, muutes vanni sügavust teatud kohtades. Vanni sügavuse muutmine muudab nimelt elektrolüüdikihi ristlõikepindala, seega aga ka üldist juhtivust antud kohas. Samal otstarbel võib kasutada ka poorseid isoleerivast materjalist valmistatud kehasid.

Arvestada tuleb ka elektrolüüdivanni seinte mõju. Kui vanni seinad valmistada isoleerivast materjalist, siis on vanni seinte läheduses ekvipotentsiaalpinna ristid, voolu- ja jõujooned aga pralleelsed seintega. Seega erineb elektrivälja seinte lähedal väljast, mis oleks samas kohas piiramata keskkonna korral. Sellise vanni seinte välja moonutava mõju vähendamiseks tuleb kasutada modelleerimisel vanni, mille mõõtmed on palju suuremad elektroodide mõõtmetest. Vanni seinad teha aga metallist ja anda neile potentsiaal, mis on reaalses väljas niisama kaugel.

Kui rakendada elektrolüüti asetatud elektroodidele alalispinge, siis hakkavad neil eralduma elektrolüüdis dissotsieerunud soolade, hapete ja aluste ioonid. Seepärast osutuvad elektroodid isegi siis, kui nad on valmistatud samast aineist, mõninga aja möödudes erinevateks neist, milledega alustati katset. Kahe erinevast materjalist elektroodi viimisel elektrolüüti tekib nende vahele potentsiaalide erinevus, mis on tingitud erinevatest potentsiaalihüpetest elektroodide pinnal (s.o. tekib galvaanielement). Seega muutub elektrolüüsil pea-

le elektroodide kuju ka elektroodidevaheline potentsiaal (muutub potentsiaalihüpe elektroodi pinnal). Seda potentsiaalihüppe muutust elektroodi pinnal erinevate ainete eraldumise tulemusena nimetatakse elektroodi polarisatsiooniks. Elektroodide polarisatsiooni tulemusena võib potentsiaali jaotumise pilt elektrolüüdivannis katse jooksul tunduvalt muutuda. Seejuures võivad elektroodidel eralduda niisugused ained, millel on võrreldes elektrolüüdiga väike elektrijuhtivus. Siis kaob ka elektroodide pinna ekvipotentsiaalsus. See oli aga peamiseks tingimuseks, mis lubas modelleerimisel asendada elektrostaatiliselt välja voolu elektriväljaga elektrolüüdis.

Elektroodide polarisatsiooni kahjuliku mõju kõrvaldamiseks kasutatakse modelleerimisel alalisvoolu asemel vahelduvvoolu. Vahelduvvoolu ühe poolperioodi jooksul ei jõua polarisatsioon saavutada märkimisväärset suurust. Järgmise poolperioodi jooksul elektroodide osad vahetuvad ja eraldunud ained lähevad tavaliselt elektrolüüti tagasi.

Elektrolüüdivannis tehtud mõõtmiste kaudu on võimalik leida laengukandja trajektoori. Üheks võrdlemisi täpseks ja lihtsaks trajektoori leidmise meetodiks on kõverusraadiuste meetod. Seda meetodit on sobiv kasutada laengute tasapinnalise liikumise korral, kui eelnevalt on määratud ekvipotentsiaaljooned. Mittehomogeenses väljas liiguvad laengud kõverjoonelisi trajektoore mööda. Küllalt väikesel teelõigul võib aga mistahes kõverjoone asendada sobiva raadiusega ϱ ringjoone kaarega. Mööda ringjoont võib laengukandja massiga m ja kiirusega v liikuda vaid siis, kui talle mõjub kesktõmbejõud

$$F = \frac{m v^2}{\varrho} . \quad (1)$$

Laengukandja liikumisel elektriväljas on kesktõmbejõuks laengule elektrivälja poolt mõjuva jõu projektsioon raadiuse suunale, s.t. jõu see komponent, mis on risti trajektooriga. Kui E on elektrivälja tugevus selles kohas, kus asub vaadeldav väike trajektoori osa, ning α nurk trajektoori normaali ning elektrivälja tugevuse vektori vahel, siis on laengule q mõjuv kesktõmbejõud leitav valemiga

$$F = F_n = q E \cos \alpha . \quad (2)$$

Olgu φ_1 elektrivälja potentsiaal vaadeldava trajektooriosas asukohas ning φ_0 selle punkti potentsiaal, kus iooni kiirus oli null. Elektrivälja jõudude töö laengu q ümberpaigutamiseks nimetatud punktide vahel

$$A_{01} = q U_{01} = q (\varphi_0 - \varphi_1). \quad (3)$$

Vastavalt energia jäävuse seadusele omandab laengukandja kiineetilise energia:

$$\frac{m v^2}{2} = q (\varphi_0 - \varphi_1). \quad (4)$$

Korrutades avaldise (4) mõlemaid pooli kahega ja jagades raadiusega ρ , saame:

$$\frac{m v^2}{\rho} = \frac{2 q}{\rho} (\varphi_0 - \varphi_1). \quad (5)$$

Valemitest (1), (2) ja (5) leiame:

$$\rho = \frac{2 (\varphi_0 - \varphi_1)}{E \cos \varphi}. \quad (6)$$

Kui on teada potentsiaali jaotus meie poolt vaadeldavas trajektoori osas, siis saab leida elektrivälja tugevuse absoluutväärtuse

$$E = \left| \frac{\Delta \varphi}{\Delta l} \right|, \quad (7)$$

kus $\Delta \varphi$ on potentsiaali juurdekasv vaadeldaval lõigul Δl .

Δl on suunatud piki jõujoont ja on risti ekvipotentsiaaljoonega. Valemi (7) abil leiame lõpliku avaldise trajektooriosas kõverusraadiuse jaoks:

$$\rho = \frac{2 (\varphi_0 - \varphi_1) \Delta l}{\Delta \varphi \cos \alpha}. \quad (8)$$

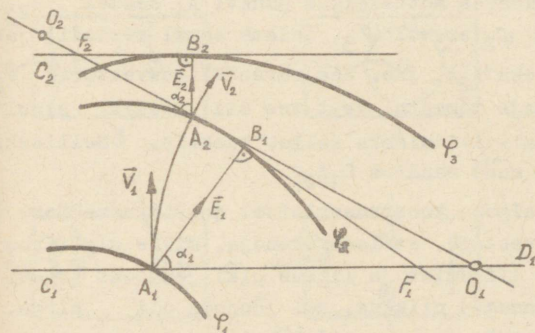
Joonisel 22 on näidatud, kuidas praktiliselt leida laengukandja trajektoori. Selleks olgu antud:

- 1) ekvipotentsiaaljoonte paigutus,
- 2) laengukandja kiiruse v_1 suund tema jõudmisel ekvipotentsiaaljoonel φ_1 asuvasse punkti A_1 ;

3) potentsiaal φ_0 , mille juurest laengukandja alustas liikumist kiirusega $v = 0$.

Laengu liikumistee konstrueerimine kahe lähedase ekvipotentsiaaljoone vahel toimub siis sirkli ja joonlauaga järgmiselt.

1. Joonestame välja jõujoone ekvipotentsiaaljoonte φ_1 ja φ_2 vahel. Selleks võib lugeda sirglõiku A_1B_1 , mis on risti mõlema ekvipotentsiaaljoonega. Kui ekvipotentsiaaljooned ei ole paralleelsed, siis tuleb lõik A_1B_1 joonestada nii, et ta moodustaks võimalikult väiksed nurgad mõlema ekvipotentsiaaljoone normaallidega.



Joonis 22

2. Tõmbame

sirge $C_1A_1D_1$, mis on risti vektoriga $\vec{V}_1$. See sirge on trajektoori normaalliks. Nurk $B_1A_1D_1$ ongi α . Lõigu A_1B_1 pikkus on arvutusvalemis (8) tähistatud Δl -ga ja $\varphi_1 - \varphi_2 = \Delta\varphi$.

3. Selleks et nurka α mitte mõõta, tõmbame lõigule A_1B_1 punktist B_1 normaali kuni lõikumiseni sirgega $C_1A_1D_1$ punktis F_1 . Tähistame A_1F_1 $\Delta l'$ -ga. Täisnurksest kolmnurgast $A_1B_1F_1$ on kerge leida, et

$$\Delta l' = \frac{\Delta l}{\cos \alpha}. \quad (9)$$

Kasutades avaldist (9), võib valemile (8) anda kuju:

$$\varphi = \frac{2(\varphi_0 - \varphi_1)\Delta l'}{|\varphi_1 - \varphi_2|}. \quad (10)$$

4. Mõõtes joonisel lõigu $\Delta l'$, arvutame kõverusraadiuse valemi (10) järgi.

5. Kandes punktist A_1 sirgele $C_1A_1D_1$ lõigu pikkusega φ , leiame kõveruskeskpunkti O_1 asukoha. Seejuures arvestame, et kõveruskeskpunkt asetseb sirgel $C_1A_1D_1$ punktist A_1 samas suunas, kus lõigu A_1B_1 projektsioongi sellele sirgele, kui

a) vaadatakse positiivse laengu liikumist,

b) $\varphi_1 > \varphi_2$.

Kõveruskeskpunkt asub teisel pool punkti A_1 , kui üks neist tingimustest on asendatud vastupidisega.

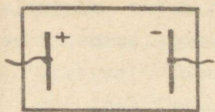
6. Tõmbame sirkliga kaare A_1A_2 , mille raadius on φ ning keskpunkt punktis O_1 . Kaar A_1A_2 ongi otsitavaks laengukandja trajektooriaks ekvipotentsiaaljoonte φ_1 ja φ_2 vahel.

7. Võttes eelnevas mõttekäigus punkti A_1 asemel A_2 , φ_1 asemel φ_2 ja φ_2 asemel φ_3 , leiame samal meetodil järgmise trajektoori osa A_2A_3 jne. Seejuures kiirusvektorit $\vec{v}_2$ punktis A_2 pole vaja tõmmata, sest see oli vajalik ainult trajektoori normaali leidmiseks selles punktis. Selliseks normaaliiks on aga nüüd raadius O_1A_2 .

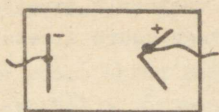
Trajektoori algosa konstrueerimisel ja kiirusvektori $\vec{v}_1$ pealekandmisel arvestame, et laengukandja, mille algkiirus oli null, alustas liikumist ja liikus piki jõujoont (risti ekvipotentsiaalpinnaga) niikaua, kui jõujoon oli sirge. (Seega tuleks alustada elektroodidelähedastest ekvipotentsiaaljoontest.)

4. Töö käik

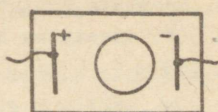
1. Tutvuge töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehasenumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
2. Valage koordinaatvõrguga varustatud elektrolüüdivanni 3...5 cm sügavune vee kiht.
3. Kinnitage elektroodid vastavalt juhendaja poolt näidatud skeemile (vt. joonis 23) elektrolüüdivanni. (Koordinaatvõrgus on selleks vastavad augud.)



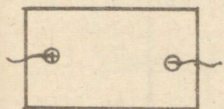
1



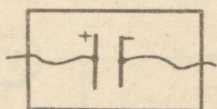
7



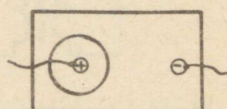
13



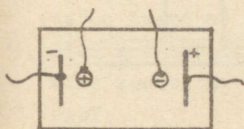
2



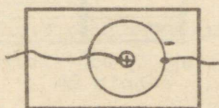
8



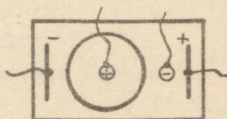
14



3



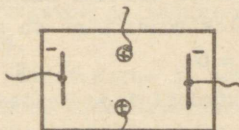
9



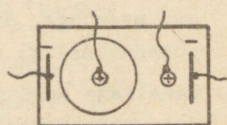
15



4



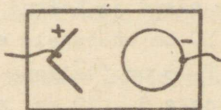
10



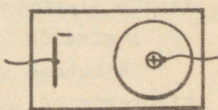
16



5



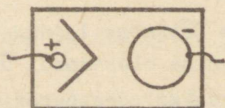
11



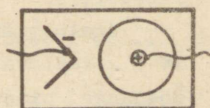
17



6



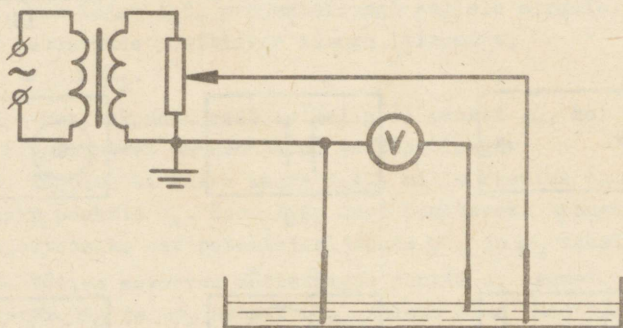
12



18

Joonis 23

4. Koostage vooluring vastavalt joonisel 24 antud skeemile . (voltmeetrina kasutage suure sisetakistusega lampvoltmeetrit).



Joonis 24

5. Pärast ühenduste kontrollimist juhendaja poolt lülitage sisse trafo. Puudutades sondiga maandatud elektroodi pinda, veenduge, et elektroodi pind on ekvipotentsiaalpinnaks potentsiaaliga $\varphi_0 = 0$.
6. Eemaldage sond elektroodist ja leidke vannis punkt, mille potentsiaal vastab esimesele ekvipotentsiaalpinnale (milliste ekvipotentsiaaljoonte asukoht tuleb leida, selle määrab juhendaja).
7. Kandke elektroodide asend ja leitud punkt potentsiaaliga φ_1 ligikaudu 25 x 30 cm suurusele millimeetripaberile.

Nihutage sond 2...3 cm (väikese kõverusraadiusega ekvipotentsiaaljoone osas 5...10 mm) eelmisest asendist kõrvale ja leidke uus samale potentsiaaljoonele φ_1 vastav punkt. Arvestades koordinaatvõrku, kandke punkt millimeetripaberile.

Analoogiliselt jätkates leidke üha uusi potentsiaalile φ_1 vastavaid punkte elektroodi ümber. Saadud punktid ühendage pideva joonega. Seejuures arvestage, et ekvipotentsiaaljooned on elektroodi lähedal peaaegu paralleelsed elektroodi pinnaga, vanni seintele lähenevad nad aga risti.

8. Leidke vastavalt punktidele 6 ja 7 ka ülejäänud ekvipotentsiaaljooned.
9. Vastavalt juhendaja poolt antud tööülesandele kandke saadud graafikule elektrivälja jõujooned ja arvutage väljatugevus reas punktides, või konstrueerige laengukandja liikumise trajektoor, mis algab mingist punktist ühel elektroodidest.

5. Küsimused

1. Milliseid tingimusi tuleb täita elektrostaatilise välja modelleerimisel elektrolüüdivanni meetodil?
2. Kuidas saab modelleerida elektrostaatilist välja, millesse on asetatud dielektrik?
3. Miks kasutatakse antud töös vahelduvvoolu?
4. Miks kasutatakse antud töös pinge mõõtmiseks lampvoltmeetrit?
5. Milles seisneb peegelkujutise meetod elektrostaatikas?
6. Sõnastage väljade superpositsiooni printsiip.
7. Defineerige väljatugevus ja induksioon (nihe).
Andke nende ühikud.
8. Kuidas on seotud väljatugevus ja potentsiaal?
9. Sõnastage Ohmi seadus diferentsiaalkujul.
10. Mida mõistetakse dielektrikute polarisatsiooni all?
11. Mida mõistetakse elektroodi polarisatsiooni all?
12. Millised jõud mõjuvad elektriväljas olevale dielektrikule?
13. Kuidas kulgevad elektrivälja jõujooned isolaatori ja juhi läheduses?
14. Millist välja nimetatakse potentsiaalseks?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 7,8,10...12, 16...18, 20, 27, 28, 30, 31.

Савельев И.В. Курс общей физики, т. II. М., 1966, § 2...13, 18, 21, 22.

Фриш С.Э. и Тиморева А.В. Курс общей физики, т. II, М., 1958, § 123...126, 129...134, 141, 142, 145.

HÕÕGLAMBI TUNNUSKÕVERAD

1. Tööülesanne

Tutvumine juhi^{*} takistuse olenevusega temperatuurist. Süsiniit- ja volframniitlambi tunnuskõverate ülesvõtmine.

2. Töövahendid

Autotransformaator, ampermeeter, voltmeeter, ühendusjuhtmed ning uuritav süsiniit- ja volframniitlamp.

3. Töö teoreetilised alused

Juhti läbiva voolu tugevuse I sõltuvust juhi otstele rakendatud pingest $U - I = f(U)$ nimetatakse juhi voltamperkarakteristikuks ehk tunnuskõveraks.

Kui juhi takistus voolu läbiminekul ei muutu, siis on tema tunnuskõver antud Ohmi seadusega:

$$I = \frac{U}{R},$$

kus R on juhi takistus. Sellise juhi tunnusjoon on sirge.

Juhtis läheb voolu töö enamasti täielikult üle soojuseks, sest juhtis liikuva vabad laengukandjad annavad põrgetel elektriväljalt omandatud kineetilise energia üle ruumvõre ioonidele-aatomitele. Kui seejuures juhilt ümbritsevale keskkonnale antud soojushulk on väiksem voolu tööst, siis kasvab juhi siseenergia, s.o. tõuseb tema temperatuur. Sel juhul muutub ka juhi takistus ning tema voltamperkarakteristik ei ole sirge.

Antud töö eesmärgiks ongi katseliselt uurida erinevatest materjalidest (süsi ja volfram) hõõgniitide tunnuskõveraid ning takistuse ja temperatuuri vahelise sõltuvuse iseloomu.

* Antud töös mõistame "juhi" all igat elektrit juhtivat keskkonda.

Juhis tekkiva voolu tihedus j on määratud vabade laengukandjate arvuga ruumalaühikus n ja nende suunatud liikumise keskmise kiirusega v :

$$j = n e v,$$

kus e on laengukandja laeng.

Kiirus v on omakorda võrdeline voolu põhjustava elektrivälja tugevusega E :

$$v = u E.$$

Suurust u nimetatakse liikuvuseks ning ta on arvuliselt võrdne laengukandjate suunatud liikumise keskmise kiirusega ühikulise tugevusega elektriväljas.

Kokkuvõttes

$$j = n e u E.$$

Lähtudes aga Ohmi seadusest diferentsiaalkujul on voolu tihedus arvutatav valemist:

$$j = \sigma E.$$

Seega on juhi erijuhtivus

$$\sigma = n e u.$$

Tähendab juhi erijuhtivuse ja järelikult ka tema takistuse määrab vabade laengukandjate kontsentratsioon ja liikuvus.

Metallides on vabadeks laengukandjateks metalli aatomitega nõrgalt seotud nn. kollektiivsed elektronid. Nende kontsentratsioon ei muutu kuumutamisel kuni väga kõrgete temperatuurideni (kuni ei ole tekkinud ionisatsiooni sisemistelt elektronkatetelt). Seepärast on metalli takistuse muutus seotud eelkõige elektronide liikuvuse muutusega.

Temperatuuri tõustes intensiivistub ionide-aatomite võnkliikumine (kasvab võnkeamplituud) ning seepärast väheneb elektronide keskmine vaba tee pikkus. Samas suureneb aga elektronide soojusliikumise keskmine kiirus. Nii kasvab elektronide põrgete sagedus, mille tulemusena väheneb liikuvus. Järelikult suurenevad metallide takistused temperatuuri tõusuga.

Katsed näitavad, et tavaliste, s.o. mitte eriti madalate temperatuuride piirkonnas sõltub metalli takistus temperatuurist lineaarselt:

$$R = R_0 (1 + \alpha t),$$

kus R on metalljuhi takistus temperatuuril $t^{\circ}\text{C}$, R_0 - sama juhi takistus 0°C juures ja α - takistuse temperatuurikoefitsient. Puhaste metallide jaoks, kus $\alpha \approx \frac{1}{273}$, võib selle valemi anda ka kujul

$$R = R_0 \propto T \quad \text{või} \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

kus T on temperatuur Kelvini skaala järgi.

Teistsugune on takistuse sõltuvus temperatuurist pooljuhtmaterjalides. Pooljuhtides ei ole madalatel temperatuuridel, s.o. absoluutse nulli lähedal, vabu laengukandjaid (kollektiivseid elektrone) nagu metallides. Erinevalt aga dielektrikutest on nende valentselektronid siiski võrdlemisi nõrgalt seotud ruumvõre aatomitega. Seepärast võib juba suhteliselt väike mõjutus, näiteks soojendamisest tingitud võnkliikumise energia kasv, nad vabastada. Selliseks aatomi ioniseerimiseks materjali sees tuleb talle anda kindel lisaenergia ΔE , mida nimetatakse aktivatsioonienergiaks. Katsed näitavad, et temperatuuri tõustes suureneb pooljuhtides kiiresti vabade laengukandjate kontsentratsioon:

$$n = A e^{-\frac{\Delta E}{kT}}, \quad (1)$$

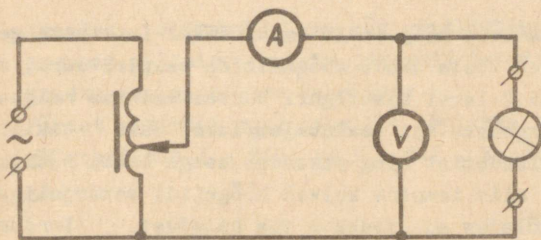
kus A on temperatuurist vähe olenev koefitsient, k - Boltzmanni konstant ja T - absoluutne temperatuur. Selline vabade laengukandjate kontsentratsiooni sõltuvus temperatuurist ületab kaugelt liikuvuse temperatuurilise muutuse. Järelikult on pooljuhtide takistuse temperatuurilised muutused määratud eelkõige vabade laengukandjate kontsentratsiooni temperatuu-

riliste muutustega. Seega võib anda pooljuhi takituse sõltuvuse temperatuurist valemiga

$$R = R_{\infty} e^{\frac{\Delta E}{2 k T}}, \quad (2)$$

kus R_{∞} on pooljuhi omadustega määratud konstant. Valemist (2) on näha, et temperatuuri tõusuga pooljuhtide takistused vähenevad.

Uuritavate süsi- ja volframniitlampide tunnuskõverate ülesvõtmiseks kasutame joonisel 25 esitatud ühendusskeemi.



Joonis 25

Hõõglambi kütteniidi temperatuuri mõõtmine on mõnevõrra keerukas. Seepärast ei määrata me antud töös otseselt hõõgniidi takistuse sõltuvust temperatuurist, vaid

piirdume hõõgniidi takistuse ja teda läbiva voolu tugevuse vahelise sõltuvuse $R = f(I)$ graafilise uurimisega. Takistuse temperatuurilise sõltuvuse iseloomu selline katse siiski annab, kuivõrd muutumatute soojusülekannete tingimuste korral kaasneb küttevoolu tugevuse tõusule ka temperatuuri tõus.

Voolu tugevus I_L , mis läbib lampi, on leitav ampermeetrit läbinud voolu tugevuse I ja voltmeetrisse hargnenud voolu tugevuse I_V kaudu vastavalt Kirchhoffi seadusele:

$$I_L = I - I_V.$$

Voolu tugevuse voltmeetris arvutame Ohmi seadusest:

$$I_V = \frac{U}{R_V},$$

kus R_V on voltmeetri sisetakistus ja U - pinge lambil ning voltmeetril.

Seega

$$I_L = I - \frac{U}{R_V}.$$

Hõõglambi takistuse kindla küttevoolu tugevuse I_L ja pinge U juures saame seega valemist

$$R_L = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}.$$

Töös kasutatavad hõõglambid on täidetud inertsete gaasidega. See lubab tõsta nende hõõgniitide temperatuuri, mis on eeskätt vajalik lambi kasuteguri suurendamiseks valgustamisel, palju kõrgemaks kui vaakuumlampides. Gaas takistab hõõgniidi aine lendumist ning pikendab seega lambi tööiga. Samuti ei kattu siis lampide kolvid hõõgniidi materjaliga ega kaota nii põledes aja jooksul oma heledust. Lendumise vähendamiseks valmistatakse hõõgniidid spiraalsetena.

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade jaseadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventaari või tehase number, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond, jaotuste arv ja sisetakistus.
2. Tehke vajalikud ühendused vastavalt joonisel 25 esitatud skeemile. Esimesena lülitage skeemi volframniidiga lamp.
3. Paluge juhendajal skeemi kontrollida.
4. Suurendades autotransformaatorist lambile antavat pinget vastavalt juhendaja poolt esitatud nõuetele, fikseerige kümnele pingele vastavad ampermeetri näidud (I_L). Pärast suurimale pingele vastava näidu registreerimist korrake voolu tugevuse mõõtmisi, pinget lambil järjest vähendades.

Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Jrk. nr.	U (näit)	U (V)	I ₁ (näit)	I ₂ (näit)	I _k (A)	$\frac{U}{R_V}$	I _L	R	$\frac{\Delta R}{R}$	ΔR
1.										
.										
.										
.										
.										
10.										

- Asendage volframniitlamp süsiniitlambiga ning tehke samasugused mõõtmised nagu volframniitlambigagi. Mõõtmistulekandke analoogilisse tabelisse.
- Pärast arvutusi ning tabelite lõplikku täitmist joonestage graafikud $I = f(U)$ ja $R = f(I)$. Kandke graafikutele viiga.

5. Küsimused

- Millest on tingitud elektritakistus?
- Mis on elektroni vaba tee pikkus?
- Mis määrab laengukandjate liikuvuse metallis?
- Milliste seaduspärasuste järgi muutuvad pooljuhtide ja metallide eritakistused sõltuvalt temperatuurist?
- Mida nimetatakse takistuse temperatuurikoefitsiendiks? Milline on selle dimensioon?
- Kas metallniitlambi sisselülitamisel on voolu tugevus suurem või väiksem kui pideval põlemisel?
- Millised peavad olema teoreetiliselt $I = f(U)$ graafikud kasutatud lampide jaoks?
- Miks täidetakse hõõglambid inertsete gaasidega?
- Miks peab hõõgniit olema valmistatud ühtlase läbimõõduga traadist?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 51...54, 61.
 Mihelson, V.A. Füüsika II. Tartu, 1948, VII pkt, § 9...10.

JOULE'i-LENZI KOEFITSIENT

1. Tööülesanne

Joule'i-Lenzi soojusvalemi koefitsiendi määramine.

2. Töövahendid

Pingeallikas, küttekeha, voltmeeter, ampermeeter, kalorimeeter, termomeeter, kell ja ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Lähtudes potentsiaali mõistest võib arvutada töö A , mida teeb elektrivälja laengu q ümberpaigutamisel ühest väljapunktist potentsiaaliga φ_1 teise väljapunkti potentsiaaliga φ_2 .

$$A = q (\varphi_1 - \varphi_2) = q U. \quad (1)$$

Kui laengud liiguksid seejuures vaakuumis, läheks kogu elektrivälja töö laengukandjate kineetilise energia tõstmiseks. Laengukandjate liikumisel juhis on olukord keerulisem. Metalljuhis toimuvad pidevalt põrked liikuvate elektronide ja ruumvõre sõlmedes asuvate ioonide-aatomite vahel. Sellise põrke kestel annavad elektronid vaba tee ulatuses elektriväljalt omandatud kineetilise energia kas täielikult või osaliselt üle ruumvõrele. Nii suureneb ruumvõre siseenergia ja tõuseb juhi temperatuur.

Kui vooluga juht ei asu magnetväljas ja temas ei toimu keemilisi protsesse (voolu mehaaniline ja keemiline töö võrdub nulliga), siis läheb kogu voolu töö siseenergia muutmiseks. Siseenergia muutusi juhis võib hinnata vabaneva soojushulgaga. Lähtudes energia jäävuse seadusest peab juhisis vabanev soojushulk olema võrdne voolu tööga.

$$Q = A = q U.$$

Kui temperatuuri muutused ei ole suured ja me võime lugeda voolu tugevuse ajas jäävaks, siis $q = I \tau$, ning

$$Q = U I \tau.$$

Selle võrrandi järgi arvutades saame soojushulga džaulides, kui voolu tugevus on mõõdetud amprites, pingelt voltides ja aeg sekundites. Kui tahame leida soojushulka kalorites, peame korrutama saadud tulemust töö termilise ekvivalendiga k , s.o. suurusega, mis näitab, mitu kalorit on ekvivalentne ühe džauliga. Nii on juhul voolu läbimineku eraldunud soojushulka kalorites leitav valemi järgi

$$Q = k U I \tau. \quad (1)$$

Oomilise takistuse korral on pingelang U arvutatav voolu tugevuse I ja juhi takistuse R kaudu:

$$U = I R.$$

Valem (1) saab siis kuju

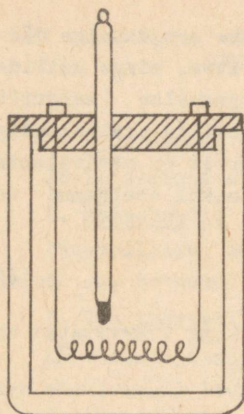
$$Q = k I^2 R \tau.$$

Selline avaldis oli eksperimentaalselt leitud nii Joule'i kui ka Lenzi poolt ning kannab seepärast Joule'i-Lenzi seaduse nime.

Antud töö ülesandeks on Joule'i-Lenzi soojusvalemi teguri k , s.o. töö termilise ekvivalendi katseline määramine. Selleks juhime juhtmes vabaneva soojushulga kalorimeetris olevasse vette (vt. joon.26) ning mõõdame vee ning kalorimeetri poolt saadud soojushulga:

$$Q = (cm + s)(t_2 - t_1),$$

kus c on vee erisoojus, m - kalorimeetris oleva vee mass, s - kalorimeetri soojusmahtuvus, t_1 - vee algtemperatuur ja t_2 - vee lõpptemperatuur.



Joonis 26

Voolu töö määramiseks mõõdame voolu tugevuse I kalorimeetrisse asetatud küttekehas ja tema otstele rakendatud pinget U ning saame

$$A = I U \tau,$$

kus τ on voolu kestus.

Eelneva mõttekäigu kohaselt

$$Q = A$$

ning

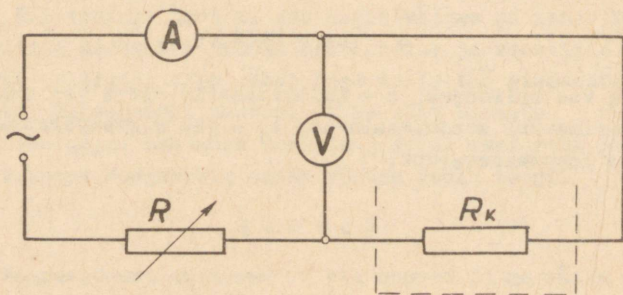
$$(c m + s)(t_2 - t_1) = k I U (\tau_2 - \tau_1).$$

Siit arvutame k :

$$k = \frac{(c m + s)(t_2 - t_1)}{I U (\tau_2 - \tau_1)}. \quad (2)$$

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile mõõteriista nimetus, inventarivõi tehase number ning tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem ja täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv.
2. Koostage vooluring joonisel 27 näidatud skeemi kohaselt.



Joonis 27

3. Täitke kalorimeeter veega, jättes kaane ja veepinna vahele ruumi ≈ 1 cm ulatuses.
4. Määrake vee algtemperatuur t_1 . Soovitav on see võtta 3...4 kraadi toatemperatuurist madalam.
5. Lülitage vool ahelasse ja alustage aja mõõtmist. Katse kestel segage hoollega vett kalorimeetris.
6. Registreerige ampermeetri ja voltmeetri näidud võrdsete ajavahemike tagant (määrab juhendaja) seni, kuni vee temperatuur tõuseb 3...4 kraadi üle toatemperatuuri.
7. Lülitage vool ahelast välja ja fikseerige voolu kestus τ .
8. Jätke vee segamist kalorimeetris ja määrake selle temperatuuri maksimaalväärus t_2 .
9. Kallake vesi kalorimeetrist mensuuri ja määrake võimalikult täpselt selle hulk (m).

Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Aeg	Lugem voltmeet- rilt	Lugem ampermeet- rilt	Toatemperatuur
1.			Termomeetri täpsus, skaala vähima jaotise väärus
.			Vee algtemperatuur t_1
.			Vee lõpptemperatuur t_2
.			Mensuuri täpsus, väiksema jaotise väärus
.			Vee mass m
.			Ajamõõtja täpsus
.			Voltmeetri mõõtepiirkond, jaotiste arv skaalal, täpsusklass
Keskmine lugem			Ampermeetri mõõtepiirkond, jaotiste arv skaalal, täpsusklass
Pinge U =		Voolu tugevus I =	

10. Arvutage valemi (4) abil Joule'i-Lenzi koefitsiendi väärtus ja hinnake tulemuse viga. Kalorimeetri soojusmahtuvuse väärtuse teatab juhendaja.

5. Küsimused

1. Mis on soojuse mehaaniline ekvivalent ja kuidas ta on seotud töö termilise ekvivalendiga?
2. Millised energia kaod võivad esineda antud laboratoorse töö juures?
3. Kas antud töös on tähtsust sellel, kas voltmeeter on lülitatud enne või pärast ampermeetrit?
4. Kuidas mõjutab mõõtmistulemust mõõteriistade sisetakistuste mitteamistamine?
5. Milline on Joule'i-Lenzi koefitsiendi väärtus ja dimensioon SI-süsteemis?
6. Kuidas tuleb lülitada vooluahelasse ampermeeter ja kuidas voltmeeter ning mispärast?
7. Milline on elektrivoolu juhtivuse mehhanism juhtides?
8. Mis on soojusliikumine tahketes kehtes?
9. Kuidas tekib vooluga juhis soojus ja millisel viisil see kandub üle kalorimeetris olevale veele ja ümbritsevasse keskkonda?

6. Kirjandus

- Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 39, 41, 51...56 , lk. 113...120, 141...160.
- Фриш С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики П. М., 1957, § 157, 160...162, стр. 127...131, 137...147.

KOMPENSATSIOONIMEETOD

1. Tööülesanne

Galvaanielemendi elektromotoorse jõu mõõtmine.

2. Töövahendid

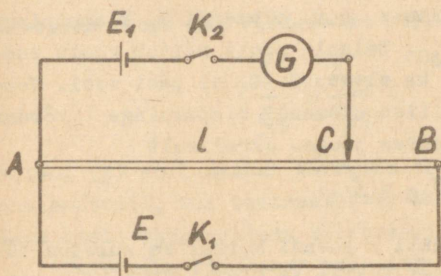
Reohord, galvanomeeter, aku või alaldi, normaalelement, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Kompensatsioonimeetodit kasutatakse laialdaselt väikes- te potentsiaalierinevuste ja emj. täpsaks mõõtmiseks.

Vaatame järgnevalt, kuidas kompensatsioonimeetodil mõõ- detakse galvaanielemendi emj.

Kasutatava seadme skeem on esitatud joonisel 28.



Joonis 28

Lüliti K_1 sulgemi- sel läbib vooluahelat EABE vool tugevusega I . Et seejuures voolualli- ka E pinge langeks põ- hiliselt takistil AB, valitakse selletakis- tus palju suurem ühen- dusjuhtmete takistus- test. Takistiks AB on kalibreeritud (ühesugu- se ristlõikepindalaga) takistustraat, nn. reo- hord.

Nihutades liugkontakti C piki takistustraat AB, saame kontaktide A ja C vahelt pingeid alates nullist kuni pingeni

$$U = \mathcal{E} - Ir,$$

kus $\mathcal{E}$ on elemendi E emj., r - elemendi E sisetakistuse ja ühendusjuhtmete takistuste summa.

Emj. allikas E_1 lülitatakse skeemi nii, et kontakt A oleks

ühendatud mõlema elemendi E ja E_1 samanimeliste poolustega (pluss - pluss või miinus - miinus). Kui elemendi E_1 emj. $\mathcal{E}_1$ on väiksem kui U, siis peab takistustraadil AB leidma sel line liugkontakti C asend, mille korral pingelang kontaktide A ja C vahel IR_{AC} võrdub elemendi E_1 emj. $\mathcal{E}_1$ -ga:

$$IR_{AC} = \mathcal{E}_1,$$

kus R_{AC} on takistustraadi AB takistus lõigul AC.

Liugkontakti C sellise asendi leidmiseks on ahelasse AE_1C ühendatud galvanomeeter. Kui sulgeme nüüd ka lüliti K_2 , siis läbib ahelat AE_1C vool, mille suund oleneb sellest, kumb on suurem, kas pingelang IR_{AC} või elemendi E_1 klemmipinge. Nihutades järgnevalt liugkontakti C, nii et voolu tugevus galvanomeetri ahelas väheneks, jõuame liugkontakti sellise asendini, mil vool enam galvanomeetrit ei läbi. Voolu puudumine galvanomeetris näitab, et galvanomeeter on ühendatud sama potentsiaaliga punktide vahele, s.t. elemendi E_1 klemmipinge on võrdne pingelanguga IR_{AC} . Teiselt poolt näitab voolu puudumine galvanomeetris, et ka elementi E_1 ei läbi vool. Voolu puudumisel on aga keemilise elemendi klemmipinge võrdne selle elemendi elektromotoorse jõuga. Järelikult

$$U_{AC} = \mathcal{E}_1.$$

Kuna leitud liugkontakti C asendi korral ka suletud lüliti K_2 juures galvanomeetri ahelat AE_1C vool ei läbi, siis on takistustraati AB läbiva voolu tugevus nagu avatudki K_2 puhul võrdne I-ga. Seega

$$U_{AC} = IR_{AC} = \mathcal{E}_1.$$

Ülaltoodust järeldub, et antud katsekorralduse juures saab elemendi emj. mõõtmise asendada seda emj. tasakaalustava ehk kompenseeriva pingelangu mõõtmisega. Seepärast ongi sellise mõõtmismeetodi nimetuseks kompensatsioonimeetod.

Asendades elemendi E_1 mingi teise emj. allikaga E_2 , võime ka selle jaoks leida liugkontakti sellise asendi, mil vool galvanomeetri ahelas puudub (seda muidugi juhul, kui $\mathcal{E}_1 < U$). Analoogiliselt eelnevaga võime siis kirjutada

$$U_{AC'} = IR_{AC'} = \mathcal{E}_2.$$

Võrreldes esimese elemendi emj. $\mathcal{E}_1$ teise elemendi emj.-ga $\mathcal{E}_2$, saame:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{IR_{AC}}{IR_{AC'}}. \quad (1)$$

Et takistustraat AB oli ühesuguse ristlõikepindalaga S , võime lõikude AC ja AC' takistused arvutada seosest

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2)$$

Asetades seose (2) võrdusesse (1), saame:

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{l_{AC}}{l_{AC'}}. \quad (3)$$

Valemi (3) abil saabki võrrelda elementide emj. kompensatsioonimeetodil, kui tasakaalustav pingelang on tekitatud ühtlase ristlõikepindalaga kalibreeritud takistustraadil.

Nagu näha viimasest valemist (3) ei ole emj. $\mathcal{E}_1$ ja $\mathcal{E}_2$ võrdlemisel vaja teada tööelemendi E emj. $\mathcal{E}$ ning tema poolt tekitatud töövoolu väärtusi. Elemendilt E tuleb nõuda vaid küllaldase konstantsusega töövoolu I ning tema klemmipinge U peab ületama mõlema võrreldava elemendi emj.

Emj. võrdlemine kompensatsioonimeetodil on teostatav suure täpsusega, sest kompenseeriva pingelangu takistamiseks nõutavad takistid on väga täpselt valmistatavad ja valitavad. Samuti saab voolu puudumist galvanomeetri ahelas kontrollida täpsusega $10^{-9} \dots 10^{-10}$ A (peegelgalvanomeetrid), kusjuures ei ole vaja galvanomeetrit eelnevalt kalibreerida, vaid piisab ainult nullnäidu fikseerimisest.

4. Töö kõik

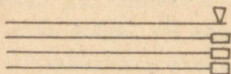
1. Tutvuge töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem ja täpsusklass.
2. Tehke ühendused vastavalt joonisele 28. Enne emj. allikate ühendamist laske juhendajal ühendusi kontrollida.
3. Lülitage vool skeemi ja jälgige galvanomeetri osuti väljalöögi suunda. Voolu lülitamisel sulgege esmalt lüliti K_1 ja seejärel alles lüliti K_2 . Tavaliselt kasutatakse kahekordset lülitit, kus ühele nupule vajutamiselega suletakse vooluahelad vajalikus järjekorras (vt. joon. 29).
Lüliteid võib sulgeda ainult hetkeks, sest vastasel korral

a) toimub reohordi ja ühendusjuhtmete kuumenemine, mis muudab nende takistuste suhet;

b) toimub galvaanielementide polarisatsioon, mille tulemusena muutub nende emj. väärtus;

c) tugev vool võib rikkuda galvanomeetri.

4. Lüliteid ainult hetkeks sulgedes püüdke leida liugkontakti C selline asend, mille juures vool galvanomeetri ahelas puuduks. Siin on olenevalt galvanomeetri tundlikkusest kaks võimalust:



Joonis 29

a) traadil AB saab leida pikema lõigu, mille piires liugkontakti nihutamisel galvanomeeter voolu ei näita. Sel juhul määrake selle lõigu vasak ja parem otspunkt, kust alates vool läbi galvanomeetri on juba märgatav ning tasakaaluasendiks lugege lõigu keskpunkt;

b) traadil AB ei ole võimalik leida liugkontakti C sellist asendit, mille korral vool galvanomeetri ahelas täielikult puuduks. Liuguri teatud asendi korral aga muutub tema vähimalgi nihutamisel ühes või teises suunas galvanomeetrit läbiva voolu suund. Sel juhul mõõtke võimalikult väike lõik (näiteks 0,5 mm), mille otstel galvanomeeter annab erisuunalisi hälbeid, ning lugege tasakaaluasendiks jällegi lõigu keskpunkt. Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Jrk. nr.	Mõõdetav element (E_1)			Normaalelement (E_2)		
	Liuguri asend		Tasakaalu- punkt	Liuguri asend		Tasakaalu- punkt
	vasak	parem		vasak	parem	
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

Keskmine $l_{AC} = \dots$

Keskmine $l_{AC} = \dots$

- Jälgides polaarsust, asendage element E_1 elemendiga E_2 ja mõõtku nagu ennegi.
- Asetades kordamööda skeemi uuritava elemendi E_1 ja normaal-
elemendi E_2 , mõõtku kumbagi 5 korda.
Saadud tulemustest võtke aritmeetiline keskmine ning arvuta-
tage valemi (3) abil uuritava elemendi emj. väärtus. Hin-
nake tulemuse viga.

5. Küsimused

- Mis on vooluallika emj.?
- Defineerige emj. ühik SI-s.
- Mis on klemmipinge?
- Millega võrdub klemmipinge lühise korral?
- Lühisvoolu tugevus.
- Vooluallika kasutegur.
- Selgitage antud töö põhimõtet.
- Kompensatsioonimeetodi eelised voltmeetriga mõõtmistega
võrreldes.
- Kuidas tekib potentsiaali erinevus keemilise vooluallika
klemmidel?
- Milles seisneb vooluallika polarisatsioon?
- Kirchhoffi esimene seadus.
- Kirchhoffi teine seadus.
- Arvutage vooluallikate järjestikusel ja paralleelsel ühen-
damisel
 - patarei emj.,
 - voolu tugevus takistis R, millega patarei on koormatud.

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 43...50, 120...133.

Савельев И.В. Курс общей физики II. М., 1964, § 32, 37, 54, 55.

KEEDUKANNU KASUTEGUR

1. Tööülesanne

Keedukannu kasuteguri ja kannus oleva vee temperatuuri vahelise sõltuvuse määramine.

2. Töövahendid

Keedukann, mensuur, termomeeter, stopper, voltmeeter, ampermeeter, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Elektrikeedukannu soojendavas küttekehas on voolu toimel eralduv soojushulk võrdne voolu tööga (antud juhul vool keemilist ega mehaanilist tööd ei tee) ning ajavahemiku $\Delta\tau$ jooksul muutumatu voolu I ja pinge U korral arvutatav valemiga

$$\Delta Q = \Delta A = I U \Delta\tau. \quad (1)$$

Vabanenud soojus antakse edasi keedukannule, temas olevale veele ning teda ümbritsevale keskkonnale. Põhiliselt kandub soojus küttekehast edasi soojusjuhtivuse teel, mida iseloomustab Fourier' seadus

$$dQ = -k \frac{dt}{dx} dS d\tau,$$

kus dQ on ajavahemiku $d\tau$ jooksul läbi soojusvooga risti asetseva pinna dS kandunud soojushulk, k - soojusjuhtivuse koefitsient ja $\frac{dt}{dx}$ - temperatuuri gradient, s.o. temperatuuri muutus pikkusühiku kohta. Seega oleneb nii veele kui ka kannule ja keskkonnale antav soojushulk keedukannu ehitusest (kannu kujust, suurusest, kasutatud materjalist, küttekeha asukohast jne.), soojendaja temperatuurist, soojendamise kestusest, ümbritsevast keskkonnast jms. Toimub ka vastastikune soojusvahetus vee, kannu ja keskkonna vahel. Nii ei kuulu näiteks kogu veele antav soojus mitte ainult tema temperatuuri tõstmiseks, vaid suur osa sellest kandub edasi keskkonnale või siis kulub aurustamiseks. Keedukannu ja kannus

oleva vee temperatuuri muutudes muutub ka veele, kannule ja keskkonnale antavate soojushulkade vahed, nende soojendamiseks minev osa kogu küttekehas vabanevast soojushulgast. Keedukannus oleva vee temperatuuri tõstmiseks kulunud soojushulk (kasulik soojus) on arvutatav valemiga

$$\Delta Q_v = c m \Delta t, \quad (2)$$

kus c on vee erisoojus, m - vee mass ja Δt - temperatuuri muutus. Kasuliku soojushulga ΔQ_v osa kogu küttekehas eralduvast soojushulgast ΔQ nimetatakse keedukannu kasuteguriks

$$\eta = \frac{\Delta Q_v}{\Delta Q}. \quad (3)$$

Kasutegur oleneb temperatuurist. Selleks et määrata kasutegurit mingi temperatuuri juures, tuleb leida ta võimalikult kitsa temperatuurivahemiku $d\tau$ (lühikese soojendusaja vahemiku $d\tau$) jaoks, s.t. leida nn. diferentsiaalne kasutegur:

$$\eta_{\text{dif}} = \frac{c m dt}{I U d\tau}, \quad (4)$$

kus $d\tau$ [vt. valemeid (1), (2) ja (3)] on ajavahemik, mille jooksul vee temperatuur muutus dt võrra. Selliselt arvutatud diferentsiaalse kasuteguri väärtus omistatakse temperatuurile t' , mis on lõigu $[t, t + dt]$ keskvaartuseks:

$$t' = \frac{2 t + dt}{2} = t + \frac{dt}{2}. \quad (5)$$

Arvutades vee soojendamisel keedukannus diferentsiaalsed kasutegurid paljude erinevate temperatuuride juures, saame leida keedukannu kasuteguri sõltuvuse temperatuurist $\eta = f(t)$.

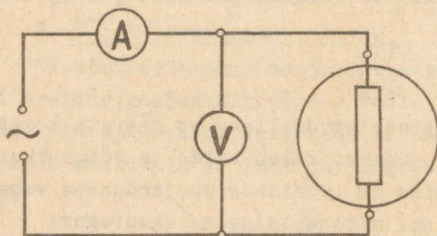
Sageli iseloomustatakse keedukannu ka keskmise kasuteguriga

$$\eta_k = \frac{c m (t_2 - t_1)}{I U \Delta\tau}, \quad (6)$$

kus $\Delta\tau$ on ajavahemik, mille jooksul vee temperatuur muutus algtemperatuurist t_1 lõpptemperatuurini t_2 .

4. Töö kõik

1. Küsige juhendajalt konkreetne tööülesanne.
2. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolli iga mõõteriista nimetus, tehase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
3. Koostage vooluring joonisel 30 toodud skeemi kohaselt.



Joonis 30

4. Pärast ühenduste kontrollimist juhendaja poolt valage keedukannu tööülesandes näidatud kogus vett.
5. Mõõtke vee algtemperatuur.
6. Sulgege vooluring ning fikseerige sisselülitamise aeg

7. Registreerige iga minuti järel pärast vooluringi sulgemist voolutugevus ja pinge ahelas ning vee temperatuur keedukannus. Tulemused kandke tabelisse:

Aeg τ	Temperatuur $t^{\circ}\text{C}$	Pinge U		Vool I		Δt	ΔQ_v	ΔQ	$\eta \%$
		näit	V	näit	A				

8. Kui vee temperatuur kannus on tõusnud $93...95^{\circ}\text{C}$, lõpetage soojendamine. Lülitage kann võrgust välja ja jahutage ta uuesti toatemperatuurini.
9. Korrake katset, muutes vastavalt tööülesandele kas vee hulka kannus või pinget küttekehal. Mõõtmistulemused kandke eelnevaga analoogilisse tabelisse.

10. Arvutage diferentsiaalne kasutegur η_{dif} iga minuti kohta.
11. Joonestage mõlema katse jaoks ühes ja samas teljestikus graafikud $\eta_{\text{dif}} = f(t)$.
12. Arvutage mõlema katse jaoks keskmine kasutegur η_k .
13. Määrake mõõdetud suuruste maksimaalsed vead ja arvutage diferentsiaalse kasuteguri viga. Kandke saadud tulemused graafikule.

5. Küsimused

1. Millist mõju avaldavad mõõtmistulemusele mõõteriistade sisetakistused? Kuidas seda mõju võib kõrvaldada?
2. Mida näitab keedukannu keskmine ja diferentsiaalne kasutegur?
3. Miks oleneb kasutegur vee hulgast kannus?
4. Miks on keedukannu kasutegur madalatel ja kõrgetel temperatuuridel väiksem?
5. Kui suur on diferentsiaalne kasutegur vee keetmisel?
6. Millised võimalused on elektrisoojendajate kasuteguri suurendamiseks?
7. Miks elektrikeedukann on nikeldatud?
8. Defineerige mõisted: amper, ampersekund, ampertund.
9. Missuguste mõistetega on üheväärsed mõisted ampersekund ja vattsekund?
10. Missugune on kasuteguri dimensioon?
11. Elektripliite on lahtiste spiraalidega ja plaatidega (kiniste spiraalidega); kumma tüübi kasutegur on suurem? Mis on lahtise spiraaliga elektripliidi paremuseks?
12. Arvutage tehtud katse puhul äratarvitatud elektrienergia hind, kui 1 kWh maksab 4 kop. Kui palju maksaks selle tariifi järgi 1 kGm energiat; 1 J energiat?
13. Vibratsioonpesumasin võimsusega 100 W töötab 2 tundi. Kui palju maksab äratarvitatud energia?

6. Kirjandus

Putilov, K.A. Füüsika I. Tln., 1964, § 90, 91, 92.

Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 39.

Савельев И.В. Курс общей физики т. 2. М., 1963, § 31, 33, 34.

VOOLUALLIKA KASUTEGUR

1. Tööülesanne

Määrata vooluallika kasuliku võimsuse ja kasuteguri sõltuvus voolu tugevusest ning välis- ja sisetakistuse suhtest.

2. Toövahendid

Voltmeeter, ampermeeter, kaks või enam akupatarei elementi, kolm reostaati, lülitid ja ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Igat vooluringi võib vaadata koosnevana kolmest osast: vooluallikast, ühendusjuhtmetest ja tarbijast (koormusest). Vooluringis tekkiva voolu tugevus on aga vastavalt Ohmi seadusele määratud vooluallika elektromotoorse jõu $\mathcal{E}$ ja vooluringi kogutakistusega. Kuna ühendusjuhtmed valitakse tavaliselt nii, et nende takistus oleks tühiselt väike võrreldes teiste vooluringi elementide takistustega, siis võib edaspidises arutluses neid mitte arvestada, lugedes nende takistuse võrdseks nulliga. Seega on voolu tugevus vooluringis leitav valemiga:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}, \quad (1)$$

kus R on tarbija takistus ja r - vooluallika sisetakistus.

Pinge tarbijal (meie arutluse järgi ühtlasi ka pinge vooluallika klemmidel)

$$U = I R = \mathcal{E} \frac{R}{R + r} \quad (2)$$

on alati väiksem vooluallika elektromotoorsest jõust, kui võrd $R < R + r$. Ainult juhtudel, kui $R \rightarrow \infty$ (vooluring on avatud) või $R \gg r$ on $U = \mathcal{E}$ või siis $U \approx \mathcal{E}$. Seega vooluallika klemmipinge on ainult avatud vooluringi korral võrdne elektromotoorse jõuga. Kasutades suure sisetakistusega voltmeetrit ($R \gg r$), võime vooluallika elektromotoorset jõudu väikese veaga vahetult mõõta.

Töötava vooluallika energia kasutamise intensiivsusst hinnatakse võimsuse kaudu. Seepärast leiame järgnevalt nii kasuliku kui ka koguvõimsuse. Elektromotoorse jõu määramisel on teada, et laengu q läbiviimisel kogu vooluringist tehakse töö

$$A = \mathcal{E} q.$$

Järelikult vooluallika koguvõimsus

$$N = \frac{A}{t} = \mathcal{E} \frac{q}{t} = \mathcal{E} I = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r}. \quad (3)$$

Samal ajal tarbijal eraldunud võimsus ehk nn. kasulik võimsus

$$N_1 = I U = I^2 R = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R + r)^2}. \quad (4)$$

Saadud valemeist on näha, et vooluallika koguvõimsus N on konstantse emf. $\mathcal{E}$ ja sisetakistuse r juures maksimaalne lühise korral ($R = 0$). Kuid siis eraldub kogu võimsus sisetakistusel ja kasulik võimsus N_1 on null.

Välistakistuse R kasvades koguvõimsus N väheneb ning $N \rightarrow 0$ kui $R \rightarrow \infty$. Kasulik võimsus N_1 seevastu on võrdne nulliga kahel juhul: juba vaadeldud lühise ($R = 0$) korral, aga ka avatud ahela ($R \rightarrow \infty$) juures. Järelikult peab kasulik võimsus koormustakistuse R kasvades läbima maksimumi. Sellise takistuse R_m leidmiseks, mille juures kasulik võimsus N_1 oleks maksimaalne, diferentseerime võrrandit (4) takistuse R järgi ning võrdsustame tulemuse nulliga:

$$\frac{dN_1}{dR} = \mathcal{E}^2 \frac{r^2 - R_m^2}{(r + R_m)^4} = 0.$$

Siit $R_m = r$.

Seega tarbijal eralduv võimsus on maksimaalne siis, kui tarbija takistus R ja vooluallika sisetakistus r on võrdsed. Maksimaalne võimsus on aga arvutatav valemist

$$N_{1m} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}.$$

Vooluallikate praktilisel kasutamisel ei ole tähtis mitte ainult võimsus, vaid ka kasutegur. Kasutegur, s.o. kasulikuks otstarbeks kulutatud võimsuse osa koguvõimsusest on leitav valemiga

$$\eta = \frac{N_1}{N} = \frac{I U}{I \mathcal{E}} = \frac{U}{\mathcal{E}} \quad (5)$$

või vastavalt seostele (1) ja (2) valemiga

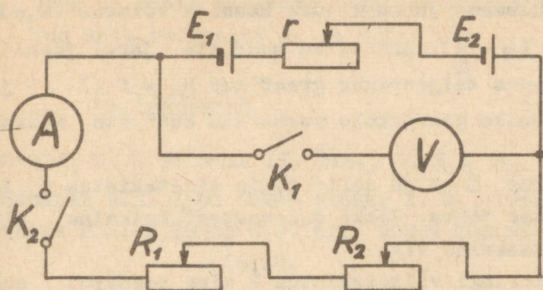
$$\eta = \frac{I R}{I (R + r)} = \frac{R}{R + r} \quad (6)$$

Kasutegur $\eta \leq 1$, kuivõrd $U \leq \mathcal{E}$ [vt. valem (5)]. Valemist (6) on näha, et lühise ($R = 0$) korral $\eta = 0$. Takistuse R suurenedes kasutegur suureneb ning kui $R \rightarrow \infty$, siis $\eta \rightarrow 1$, s.t. avatud ahela kasutegur on suurim.

Eespooltoodust on näha, et tingimused suurima kasuliku võimsuse ja suurima kasuteguri saamiseks ei lange kokku. Kui kasulik võimsus on maksimaalne ($N_{1m} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$), siis kasutegur on kõigest 0,5. Kasuteguri η lähenemisel ühele moodustab aga kasulik võimsus N_1 ainult väikese osa oma maksimaalväärtusest N_{1m} . Valemite (4) ja (6) analüüs näitab siiski, et sama välis-ahela takistuse R ja vooluallika emj. $\mathcal{E}$ korral on nii kasutegur kui ka kasulik võimsus suuremad neil vooluallikail, millede sisetakistused r on väiksemad. Seepärast püütaksegi vooluallikate sisetakistused viia võimalikult väikesteks.

4. Töö kõik

1. Kõsige juhendajalt konkreetne tööülesanne.
2. Tutvuge töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, tehase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
3. Koostage vooluring joonisel 31 toodud skeemi kohaselt. Reostaatide liugkontaktid asetage nii, et r oleks maksimaalne ning R_1 ja R_2 minimaalsed.



Joonis 31

Elementide E_1 ja E_2 vahele on lülitatud reostaat r , et kunstlikult suurendada akupatarei sisetakistust ja vältida nii liialt tugevat lühisvoolu.

Kaks reostaati R_1 ja R_2 välises vooluahelas on ette nähtud voolu tugevuse sujuvaks muutmiseks laias piirkonnas.

4. Pärast ühenduste kontrollimist juhendaja poolt sulgege lülid K_1 ja K_2 ning reguleerige reostaadi r abil lühisvoolu tugevus ahelas juhendaja poolt antud väärtusele. Edasise katse käigus aga jätke reostaadi r liugkontakti asend muutumatuks.

5. Kandke voltmeetri ja ampermeetri näidud alljärgnevasse tabelisse:

Voolu tugevus I		Pinge U		Kasulik võimsus N_1 (W)	Kasutegur %	$\mathcal{E} - U$	Vooluallika sisetakistus r (Ω)	Välis- takistus R (Ω)	$\frac{R}{r}$
näit	väärtus A	näit	väärtus V						

6. Vähendage reostaatide R_1 ja R_2 abil voolu tugevust ahelas vastavalt juhendaja poolt antud väärtustele, registreerides iga kord volt- ja ampermeetri näidud. Tulemused kandke tabelisse. (Tabelis peaks olema ruumi keskmiselt kümne erineva välisahela takistuse juures tehtud mõõtmise jaoks.)

7. Avage lüliti K_2 ning mõõtkte pinge vooluallika klemmidel. Antud juhul on vooluallika klemmipinge lähedane tema elektromotoorsele jõule, kuivõrd voltmeetri sisetakistus $R_v \gg r$.

8. Iga mõõtmistulemuse jaoks leidke kasulik võimsus ($N_1 = IU$) ja kasutegur ($\eta = \frac{U}{\mathcal{E}}$). Arvutatud suuruste järgi joonestage ühes ja samas teljestikus graafikud $N_1 = f(I)$ ja $\eta = f(I)$. Kandke graafikule vastavate suuruste mõõtmisvead.
9. Arvutage suurus $\mathcal{E} - U$ ja selle kaudu sisetakistus r iga mõõtmistulemuse jaoks. Võtke tulemustest keskmine ning määrake ruutkeskmine viga.
10. Arvutage vooluringi välistakistus R ning seejärel suhe $\frac{R}{r}$ iga katse jaoks. Joonestage ühes ja samas teljestikus graafikud $N_1 = f(\frac{R}{r})$ ja $\eta = f(\frac{R}{r})$.

5. Küsimused

1. Mida nimetatakse elektromotoorseks jõuks ja pingeks (pingelanguks)?
2. Mille võrra erineb vooluallika emj. vooluallika klemmidele ühendatud voltmeetri näidust?
3. Milline peab olema antud töös voltmeetri sisetakistus?
4. Mispärast voolu tugevuse vähenemisel vooluringis vooluallika klemmipinge kasvab?
5. Defineerige voolu tugevus.
6. Sõnastage Ohmi seadus.
7. Kuidas arvutatakse vooluallika koguvõimsust ja kasulikku võimsust?
8. Defineerige vooluallika kasutegur.
9. Kuidas sõltub vooluallika kasulik võimsus ja kasutegur välistakistusest?
10. Millal on vooluallika kasutegur maksimaalne, millal minimaalne?
11. Millal on vooluallika kasulik võimsus maksimaalne? Tõestage?
12. Milleks on vooluringi lülitatud reostaat r ?

13. Miks on voolu tugevuse reguleerimiseks vooluringi lülita-
tud kaks reostaati R_1 ja R_2 ?

6. Kirjandus

Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 39, 43...45, 49.

Савельев И.В. Курс общей физики 2, М., 1968, § 31...33, 35, 37.

Зисман Г.А. и Тодес О.М. Курс общей физики II. М., 1969, § 14...
...16, 18.

WHEATSTONE'i SILD

1. Tööulesanne

Sildskeemi ehituse ja tööpõhimõttega tutvumine. Takistu-
se mõõtmine Wheatstone'i sillaga.

2. Töövahendid

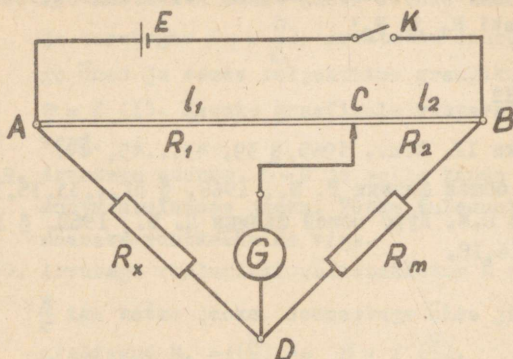
Reohord, takistusmagasin, nullgalvanomeeter, alalisvoo-
luallikas, lüliti, ühendusjuhtmed ja mõõdetavad takistid.

3. Töö teoreetilised alused

Enamkasutatavaks viisiks takistuse mõõtmisel on silla-
meetod. Sageli kasutatakse seejuures ühekordset alalisvoolu-
silda, mida lühidalt nimetatakse Wheatstone'i sillaks. Selline
sild (vt. joon. 32) koosneb alalisvooluallikaga E ühendatud
kahest paralleelsest vooluharust ACB ja ADB ning neid harusid
ühendavast ahelast CD.

Paralleelse ühenduse tõttu on mõlemas vooluharus ACB ja ADB
ühesugune potentsiaalilangus potentsiaalilt φ_A kuni potent-
siaalini φ_B . Järelikult, kui valida harus ADB mingi punkt D,
millel on otsa A suhtes pinge $U_{AD} = \varphi_A - \varphi_D$ (see moodustab
ainult mingi osa kogu pingest $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$), siis leidub
samal ajal harus ACB ka niisugune punkt C, mille pinge $U_{AC} =$
 $= \varphi_A - \varphi_C$ on niisama suur, nii et

$$U_{AC} = U_{AD} \quad (1)$$



Joonis 32

Kui skeemil (vt. joon.32) näidatud punktid C ja D on nii valitud, et $U_{AC} = U_{AD}$ siis on võrdsed ka nende punktide potentsiaalid φ_C ja φ_D . Neid ühendav ahel CD on siis ekvipotentsiaalne ja temas voolu ei teki. See tähendab,

et nii haru ACB kui ka haru ADB kogu ulatuses on voolu tugevus jääv.

Tähistades harusid ACB ja ADB läbivate voolude tugevused vastavalt I_1 ja I_2 , ning vooluringi osade AC, CB, AD ja DA takistused vastavalt R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 , võib võrduse (1) alusel kirjutada:

$$U_{AC} = I_1 R_1 = U_{AD} = I_2 R_3. \quad (2)$$

Samal ajal on siis võrdsed ka pinged U_{CB} ja U_{DB} ning

$$U_{CB} = I_1 R_2 = U_{DB} = I_2 R_4. \quad (3)$$

Võrduste (2) ja (3) põhjal saab aga välja kirjutada võrdsed suhted:

$$\frac{I_1 R_1}{I_1 R_2} = \frac{I_2 R_3}{I_2 R_4}$$

ning

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}. \quad (4)$$

Viimase avaldise (4) kaudu võib arvutada ükskõik millise takistuse neljast, kui ülejäänud kolm on teada. Veelgi enam: kui otsitavaks on näiteks R_3 , siis pärast tema avaldamist võrdusest (4)

$$R_3 = \frac{R_1}{R_2} R_4$$

selgub, et arvutusteks ei ole vaja teada takistuste R_1 ja R_2 absoluutväärtusi, vaid piisab ainult nende suhte tundmisest. See lubab mõõtmisi lihtsustada. Vooluharuna ACB kasutatakse ühtlase ristlõikepindalaga kalibreeritud takistustraati, nn. reohordi. Mõõda traati libisev liugkontakt jagab haru kogutakistuse R_{ACB} kaheks osaks ükskõik millises suhtes. Suhte väärtus leitakse traadi osade pikkuste kaudu. Ühtlase ristlõikepindalaga S takistustraadi korral on traadi osade AC ja CB takistused R_1 ja R_2 võrdelised vastavate traadi osade pikkustega l_1 ja l_2 , sest

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S} \quad \text{ja} \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{S}.$$

Siit

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2}.$$

Reohordi omava mõõtesüsteemi korral on otsitav takistus R_3 leitav võrrandist

$$R_3 = \frac{l_1}{l_2} R_4. \quad (5)$$

Seega on mõõtmistel täpselt vaja teada ainult R_4 väärtust ja osade l_1 ja l_2 pikkuste suhet.

Meenutame, et võrrandi (5) kehtivuseks on vajalik punktide C ja D potentsiaalide võrdsus. Selleks et praktilistel mõõtmistel sellist olukorda saavutada, on ahelasse CD lülitatud galvanomeeter. Kui punktide C ja D potentsiaalid on erinevad, läbib galvanomeetrit vool, ja selleks et galvanomeetri osuti kõrvalekalle väheneks kuni nullini, tuleb muuta

kas punkti D potentsiaali takistuse R_4 muutmisega või punkti C potentsiaali liugkontakti nihutamisega piki traati (muutub suhe $\frac{1}{12}$).

Skeemil sarnaneb ahel CD kaht vooluharu ACB ja ADB ühendava sillaga ja teda nimetatakse sillaks. Kuivõrd aga kogu mõõtmisprotsess silda omava skeemiga taandub harude takistustele R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 niisugusele valikule, et vool sillas puuduks, siis laienes silla kui mõõtmistulemuse fikseerija nimetus üle kogu sildskeemile. Takistusi R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 hakati nimetama silla õlgadeks. Mõõtmistel reguleeritakse silla õlgade suurusi, püüdes neid n.ö. "tasakaalustada". Seejärel öeldakse olukorra kohta, kui vool ei läbi silda CD, et sildskeem ehk lihtsalt sild on tasakaalus.

Sellise lihtsa ühekordse alalisvoolusillaga, nagu on näidatud joonisel 32, saab mõõta takistusi täpsusega 0,1%. Mõõtmistäpsust piirab ühendusjuhtmete ja kontaktide kontrollimatute suurustega takistuste otsene liitumine sillä õlgade takistustega.

Mõõtesüsteemi tundlikkus on suurim, kui $R_1=R_2=R_3=R_4$. Kõrvalekaldumine sellest võrdusest viib tundlikkuse ja seega ka täpsuse kiirele langemisele. Antud töös on seepärast soovitatav valida R_4 nii, et tasakaalustatud silla korral asuks liugkontakt reohordi keskel, s.t. et suhe $\frac{1}{12}$ oleks lähedane ühele.

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolli mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ning jaotiste arv.
2. Tehke vajalikud ühendused vastavalt joonisel 32 esitatud skeemile, kasutades vooluharus ACB reohordi, takistina R_3 juhendaja poolt antud takisteid. Seejuures hoolitsege, et ühendused oleksid võimalikult väikese takistusega, s.t. kontaktpinnad võimalikult puhtad, kinnitused tihedad ning

juhtmed terved. (Lahtiste juhtmeotste korral tuleb need enne ühendamist korralikult puhastada.)

NB! Ärge lülitage voolu skeemi enne, kui juhendaja on ühendusi kontrollinud!

3. Asetage liugkontakt reohordi keskele ($l_1 = l_2$).
4. Sulgege hetkeks lüliti K abil vooluring ning jälgige galvanomeetri väljalöögi suunda.

Voolu lülitamine pikemaks ajaks vooluringi võib rikuda galvanomeetri, kui sild ei ole tasakaalus. Samuti kutsub pikemaajaline vool esile kõikide juhtmete soojenemise, mistõttu muutub nende takistus ja väheneb mõõtmiste täpsus.

5. Reguleerige takistusmagasini takistuse suurust nii, et vool sillas väheneks. Korduvalt vooluringi hetkeks sulgedes ja takistusmagasini takistust muutes, saavutage galvanomeetri osuti minimaalne kõrvalekalle nullnäidust.
6. Kui takistusmagasini väiksemgi takistuse muutus, näiteks takistuse suurendamine-vähendamine 1Ω võrra, viib galvanomeetri osuti kord ühele, kord teisele poole nullnäidust, siis tasakaalustage sild lõplikult liugkontakti nihutamisega. Märkige üles tasakaalustatud silla reohordi õlgade pikkused l_1 ja l_2 ning takistusmagasini takistuse R_m suurus.
7. Muutke takistusmagasini takistust ja tehke veel 4 mõõtmist (kaks suurema ja kaks väiksema takistuse juures). Jälgige, et valitud takistusmagasini takistuse väärtused ei erineks esialgu leitud üle 10%.

Tasakaalustage sild liugkontakti nihutamisega piki takistustraati.

Mõõtmistulemused kandke alljärgnevasse tabelisse:

Katse nr.	R_m	l_1	l_2	R_x	$ R_x - \bar{R}_x $	$ R_x - \bar{R}_x ^2$

Keskmine $\bar{R}_x =$

$\Delta R_x =$

8. Tehke samasugused mõõtmised ka teiste juhendaja poolt antud takistustega. Mõõtmistulemused kandke eelnevaga analoogilistesse tabelitesse.
9. Leidke iga takisti korral viie mõõtmise aritmeetiline keskmine. Arvutage ruutkeskmine viga usaldatavuse tõenäosusega 0,99.

5. Küsimused

1. Sõnastage Kirchhoffi seadused vooluahela kohta.
2. Millest oleneb juhtme takistus?
3. Defineerige takistuse ja eritakistuse ühikud (oom; $\Omega \cdot m$; $\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$).
4. Andke reegel juhtide kogutakistuse määramiseks nende järjestikusel ja paralleelsel ühendamisel.
5. Kui täpselt on võimalik määrata takistusi Wheatstone'i silla abil?
6. Kaks juhet, üks vasest ja teine alumiiniumist, on võrdse pikkusega ning võrdse takistusega. Kumb neist juhtmeist on raskem ja mitu korda?
7. Selgitage Wheatstone'i silla ehituse ja töö põhimõtet.
8. Mida nimetatakse Wheatstone'i silla tasakaalustamiseks?
9. Selgitage reohordi ehitust.
10. Selgitage takistusmagasini ehitust.
11. Kas Wheatstone'i sillaga saab mõõta väikesi takistusi, mille suurusjärg läheneb ühendusjuhtmete takistusele?
12. Miks saavutame mõõtmistulemuse suurema täpsuse, kui liugkontakt asetseb enam-vähem takistustraadi keskosas?
13. Miks ei tohi galvanomeetrit sisse lülitada pikemaks ajaks?
14. Kirjutage välja antud Wheatstone'i silla skeemi jaoks Kirchhoffi seadused.

6. Kirjandus

- Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 39, lk.113, § 47, lk. 134.
- Schults, K. Mõõtühikud füüsikaliste suuruste mõõtmiseks. Tln., 1965, IX ptk.

THOMSONI SILD

1. Tooulesanne

Traadi eritakistuse määramine.

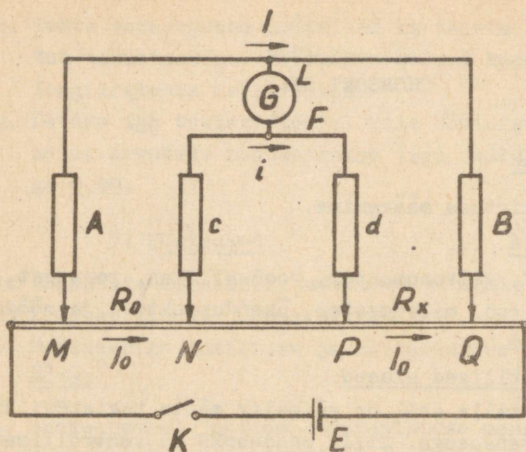
2. Toövahendid

Thomsoni sild, galvanomeeter, vooluallikas, reostaat, ampermeeter, joonlaud, mikromeeter, ühendusjuhtmed ja mõõdetavad traattakistid.

3. Töö teoreetilised alused

Wheatstone'i silla abil on võimalik mõõta takistusi ainult kuni $0,1 \Omega$ täpsusega. Silla puuduseks on kontrollimatu suurusega ühendusjuhtmete takistuste otsene liitumine nii mõõdetavale takistusele kui ka teistele silla õlgade takistustele. Mõõdetava takistuse vähenemisel tuleks vähendada ka teiste silla õlgade takistusi, sest silla tundlikkus ja täpsus on suurimad, kui silla kõikide õlgade takistused on ligikaudu võrdsed ($R_1 \cong R_2 \cong R_3 \cong R_4$). Seega mõõtmistel Wheatstone'i sillaga on viga seda suurem, mida rohkem mõõdetavate takistuste väärtused lähenevad ühendusjuhtmete takistustele. Ühendusjuhtmete soovimatu mõju vähendamiseks ning silla tundlikkuse ja täpsuse tõstmiseks väikeste takistuste mõõtmisel kasutatakse seepärast lisaahelaga varustatud nn. kahekordset mõõtesilda (Thomsoni silda). Viimase põhimõtteline skeem on näidatud joonisel 33.

Kahekordne sildskeem erineb tavalisest Wheatstone'i sildskeemist selle poolest, et silla üks ots (galvanomeeter G) on ühendatud lisaahelaga NFP, milles takistused c ja d on suured võrreldes mõõdetava takistusega R_x ja etaloni takistusega R_0 . Samuti valitakse takistused A ja B palju suuremad takistustest R_0 ja R_x . Sellise skeemi korral on ühendusjuhtmete ja konstantide takistuste mõju viidud miinimumini. Tõepoolest, suurte takistuste tõttu ahelates MALBQ ja NcFdP on voolu tugevused, mis hargnevad nendesse ahelatesse, väikesed võrreldes voolu tugevusega ahela MNPQ takistustes R_0 ja R_x .



Joonis 33

Seetõttu on ka pingelang kõiki del ühendusjuhtmetel ahelate osades MN, LQ, NF ja FP väike võrreldes pingelanguga takistustel R_x ja R_0 . Ka takistustel A, B, c, d on pingelang palju suurem kui ühendusjuhtmetel, kui võrd nende takistused on palju suuremad ühendus-

juhtmete takistustest. Seega peavad ühendusjuhtmete takistused kahekordses sillas olema tühised, võrreldes ainult takistustega A, B, c, d, mitte aga takistustega R_x ja R_0 , nagu see oli nõutav Wheatstone'i silla juures.

Muutes takistusi A, B, c, d ja R_0 on võimalik sild tasakaalustada, s.t. muuta vool galvanomeetri ahelas võrdseks nulliga. Sel juhul on voolud takistustes A ja B, c ja d, R_0 ja R_x paarikaupa võrdsed. Tähistame nad vastavalt I, i ja I_0 -ga. Kirchhoffi teise seaduse põhjal võib siis kinniste vooluringide MLFNM ja PFLQP kohta kirjutada:

$$R_0 I_0 + c i - AI = 0,$$

$$R_x I_0 + d i - BI = 0.$$

Siit

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{A}{B} \cdot \frac{I - \frac{c}{A} \cdot i}{I - \frac{d}{B} \cdot i}. \quad (1)$$

Kui valida takistused A, B, c, d nii, et

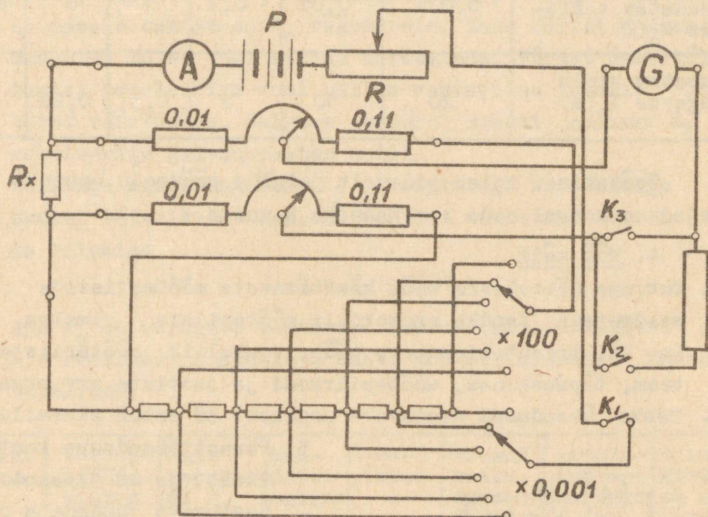
$$\frac{c}{A} = \frac{d}{B} \quad \text{ehk} \quad \frac{B}{A} = \frac{d}{c}, \quad (2)$$

siis lihtsustub võrrand (1) tundvalt:

$$R_x = R_0 \frac{B}{A}. \quad (3)$$

See ongi kahekordse alalisvoolusilla tasakaalutingimuseks. Tundmatu takistuse väärtuse saab leida etalontakistuse R_0 ja suhte $\frac{B}{A}$ kaudu, kui on täidetud tingimus (2).

Antud töös kasutatakse mõõtmistel tööstuslikku kahekordset silda MT-5. See riist on määratud väikeste oomiliste takistuste (juhtmed, mähised jne.) mõõtmiseks suurusjärgus $10^{-5} \dots 10$ oomi. Silla põhimõtteline skeem on antud joonisel 34.



Joonis 34

Sillas MT-5 on võrreldava takistuse R_0 väärtused $0,001\Omega$, $0,01\Omega$, $0,1\Omega$, 1Ω , 10Ω ja 100Ω valitavad lüliti 1 abil. Suhte $\frac{B}{A} = \frac{d}{c}$ väärtus on aga vahemikus $0,01$ kuni $0,11$ pidevalt muudetav reostaadiga 2 (vt. joon.35).

Olenevalt mõõdetava takistuse suurusest tuleb muuta ka silda läbiva voolu tugevust $I_s = I + I_0$. Nimelt väheneb takistuste R_x ja R_0 vähenemisel ka ahelasse MLQ hargnenud voolu tugevus I . See raskendab silla tasakaaluoleku fikseeri-

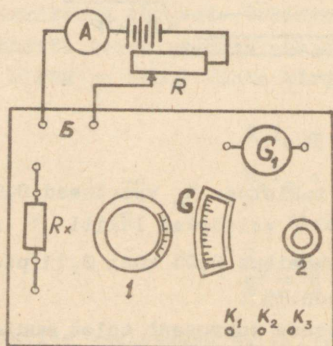
mist, vähendades mõõtmiste täpsust. Endise täpsuse saamiseks tulebki mõõdetava takistuse vähenemisel suurendada silda läbiva voolu tugevust I_s . Et vältida seejuures antud sillale maksimaalselt lubatava voolu tugevuse ületamist, mis viiks silla riknemisele, on järgnevas tabelis toodud igale mõõtepiirkonnale vastav maksimaalselt lubatud voolu tugevus I_s .

Lüliti 1 abil muudetav takistus $R_0 (\Omega)$	0,001	0,01	0,1	1	10	100
Lubatud voolu tugevus $I_s (A)$	20	10	2	0,5	0,25	0,1

Töötamisel tuleb pidevalt jälgida töövoolu suurust ja vajaduse korral seda reostaadiga R muuta.

4. Töö käik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile mõõteriista nimetus, tehase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
2. Tehke ühendused vastavalt joonisel 35 antud skeemile.



Joonis 35

3. Pärast ühenduste kontrollimist ja tööülesande täpsustamist juhendaja poolt valige vastavalt mõõdetava takistuse oletatavale suurusjärgule lüliti 1 abil võrdleva takistuse R_0 suurus.
4. Lülitage sisse kontakt K_1 ning reguleerige reostaadiga R vool paterei ahelas tabelis lubatud väärtusele.

5. Lülitage sisse kontakt K_2 ja reguleerige reostaadiga 2 vool galvanomeetri ahelas nulliks.

NB! Kui kontakti K_2 sisselülitamisel tekkis galvanomeetri ahelas liiga tugev vool, siis ei olnud voolu tugevuse I_s ja R_0 väärtused õigesti valitud. Kontakti K_2 võib sisse lülitada ainult hetkeks!

6. Kui galvanomeetri näit väheneb reostaadi 2 skaala S näidule $0,01$ lähenedes, kuid tasakaalu siiski ei saabu, siis tuleb ümberlülitati 1 viia lähimale väiksemale võrdleva takistuse R_0 väärtusele. Kui sama nähtus esineb lähenemisel skaala näidule $0,11$, siis tuleb lüliti 1 viia lähimale suuremale takistuse R_0 väärtusele. Enne lüliti 1 asendi muutmist tuleb vool sillas katkestada. Pärast ümberlülitamist reguleerige vool sillas vastavusse tabelis lubatud väärtusega. Sulgege seejärel uuesti kontakt K_2 ja reguleerige galvanomeeter nulli.
7. Lülitage sisse kontakt K_3 ja saavutage reostaadiga 2 skeemi täielik tasakaal. Mõõdetava takistuse suuruse saame valemiga

$$R = R_0 \cdot m (\Omega),$$

kus R_0 on võrdleva takistuse suurus (loetud lülitilt 1) ja m - reostaadi 2 skaala S näit. Mõõtmistulemused kanname tabelisse:

Jrk. nr.	Võrreldav takistus R_0	Näit reostaadi 2 skaalal m	Mõõdetav takist R	Traadi pikkus l	Traadi keskm. diameeter d	Arvutatud eritakistus ρ	Eritakistuse abs. viga $\Delta \rho$

8. Eritakistuse määramiseks mõõtke joonlauaga uuritava traadi pikkus (selle osa pikkus, mis oli ühendatud silla mõõtekontaktide vahele) ja mikromeetri abil selle diameeter traadi mitmes erinevas kohas. Mõõtmistulemustest võtke keskmine ning kandke tabelisse.
9. Arvutage eritakistus ja selle mõõtmisviga. Võrrelge saadud tulemusi tabeli omadega.

5. Küsimused

1. Millest oleneb juhi takistus?
2. Defineerige takistuse ja eritakistuse ühikud (R , $\rho \cdot m$, $\frac{\rho \text{ mm}^2}{m}$),
3. Kuidas oleneb eritakistus temperatuurist?
4. Sõnastage Kirchhoffi seadused haruvoolude kohta.
5. Andke reegel juhtmete kogutakistuse määramiseks nende järjestikusel ja paralleelsel ühendamisel.
6. Selgitage Thomsoni silla ehituse põhimõtet. Miks väikeste takistuste mõõtmised Thomsoni sillaga on täpsemad kui Wheatstone'i sillaga?
7. Kirjutage välja Kirchhoffi seadused Thomsoni silla suletud vooluringide jaoks (vt. joon.33).
8. Näidake takistused R_0 , A , B , c , d (joon.33) silla MT-5 põhimõttelisel skeemil (joon. 34).
9. Selgitage silla MT-5 lülitite 1, K_1 , K_2 , K_3 ja reostaadi 2 tegevust joonisel 34 esitatud skeemil.

6. Kirjandus

Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, §.39, 47, 51.

POOLJUHTALALDI

1. Tööülesanne

Pooljuhtalaldi kasuteguri sõltuvuse uurimine alaldatava vahelduvvoolu võimsusest konstantse koormustakistuse ja konstantse sisendpinge korral.

2. Töövahendid

Seleenalaldi, autotransformaator, vahelduvvoolu volt- ja ampermeeter, reostaat, alalisvoolu volt- ja ampermeeter, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Praktikas tuleb sageli muuta vahelduvvool ühesuunaliseks pulseerivaks vooluks, s.t. alaldada. Selleks kasutatakse mitmesuguseid suunajaid, s.o. vooluahela elemente, millede takistus oleneb oluliselt neid läbiva voolu suunast ja suuruselt. Enam levinud on vaakuum-, gaaslahendus- ja pooljuhtsuunajad. Viimastest aga seleen-, kuproks-, räni- ja germaaniumsuunajad.

Elektrilistes skeemides tähistatakse pooljuhtsuunajaid joonisel 36 esitatud sümboliga. Nool selles tähistuses näitab voolu suunda, mille korral suunaja takistus on oluliselt väiksem kui vastupidise suunaga voolu korral. (Nool näitab päriveru suunda.)



Joonis 36

Pooljuhtsuunajate suunavad (alaldavad) omadused määrab kas mõnesuguse metalli ja pooljuhi või kahe erineva juhtivustüübiga (p- ja n-tüüpi) pooljuhi kontaktpiirkond. Seepärast vaatame järgnevalt lähemalt füüsikalisi protsesse, mis põhjustavad ühepoolse juhtivuse kahe erineva juhtivusmehhanismiga pooljuhi kontakti korral.

Pooljuhtmaterjalides tekib elektrivool kahe protsessi tulemusena. Üheks on vabade juhtivuselektronide liikumine pooljuhis, teiseks vabade valentssidemete järkjärguline

täitumine naaberaatomite valentselektronidega, mistõttu näib, nagu liiguks pooljuhis täitmata valentsside, s.o. auk. Sellise augu liikumine on analoogiline positiivse laengukandja liikumisega. Tavaliselt esinevad mõlemad protsessid üheaegselt ning puhta, korrapärase pooljuhtmaterjali nn. omapooljuhi korral on liikuvate aukude ja elektronide arv võrdne. Lisandite, kuid ka muude defektide korral selline võrdväärsus rikutakse ning pooljuhtmaterjali juhtivuse võib määrata põhiliselt ainult üks kirjeldatud mehhanismidest, kuna teise osa on tühine. Vabu laengukandjaid, millele kontsentratsioon antud aines on palju suurem teistest, nimetatakse põhilisteks laengukandjateks, ülejäänuid aga mittepõhilisteks laengukandjateks. Vastavalt põhilistele laengukandjatele, s.t. vastavalt domineerivale juhtivusmehhanismile, jaotatakse pooljuhid kahte tüüpi: elektroonse juhtivusega ehk nn. n-tüüpi ja aukjuhtivusega ehk p-tüüpi pooljuhtideks.

Pooljuhtide kontakti viimisel saab võimalikuks laengukandjate difusioon läbi kontaktpinna ühest pooljuhist teise. Seejuures on tänu suuremale kontsentratsioonile pooljuhist lahkuvate põhiliste laengukandjate arv palju suurem mittepõhiliste laengukandjate arvust. Seega lahkub auk- ja elektroonse juhtivusega pooljuhtide kontakti viimisel p-tüüpi pooljuhist ajaühikus rohkem auke kui elektrone, n-tüüpi pooljuhist aga vastupidi rohkem elektrone kui auke. n-tüüpi pooljuhist p-tüüpi pooljuhti difundeerunud elektronid ei suurenda aga seal vabade elektronide kontsentratsiooni, vaid, vastupidi, täites osa auke kontaktpinna lähedases piirkonnas, jäävad seetuiks. Täpselt samuti rekombineeruvad p-tüüpi pooljuhist n-tüüpi pooljuhti difundeerunud augud seal vabade elektronidega. Difusiooni tulemusena kaotab n-tüüpi pooljuht elektrone ja laadub seetõttu positiivselt, p-tüüpi pooljuht aga negatiivselt. Kahe pooljuhi piirkonna lähedases, väikese sügavusega kihis tekib kontaktpotentsiaalide vahe ja elektriväli, mis on suunatud n-tüüpi pooljuhist p-tüüpi pooljuhti. Sellise suunaga elektriväli takistab põhiliste laengukandjate difusiooni, soodustab aga piirikihti sattunud või seal tekkinud (genereeritud) mittepõhiliste

laengukandjate üleminekut ühest pooljuhist teise. Kontakti piirkonnas saabub peagi dünaamiline tasakaal, kus ajaühikus vastu välja suunda liikuvate põhiliste laengukandjate arv saab võrdseks piki välja suunda liikuvate mittepõhiliste laengukandjate arvuga. Seega oleneb kahe pooljuhi lahuspinna ümbruses tekkinud elektrilise kaksikkihi potentsiaalbarjääri kõrgus elektronide soojusliikumisest ja on nende keskmise soojusliikumise energia ($\frac{3}{2} kT$) suurusjärgus.

Kahe pooljuhi kontaktpinna lähedases ruumilaenguga piirkonnas suunab elektriväli kõik sinna sattuvad elektronid n-tüüpi pooljuhti, augud aga p-tüüpi pooljuhti. Sellise protsessi tulemusena muutub vaadeldav piirkond vähejuhtivaks, suure takistusega piirkonnaks. Sellist erinevate materjalide kontaktpinna läheduses tekkivat suure takistusega kihti nimetatakse tõkkekihiks.

Kui ühendada vaadeldavad pooljuhid välise pingeallikaga, siis läbi kontaktpinna difundeeruvate põhiliste ja mittepõhiliste laengukandjate vahel väljakujunenud tasakaal rikutakse. Juhul kui välise pingeallika plusspoolus (+) on ühendatud n-tüüpi, miinuspoolus (-) aga p-tüüpi pooljuhiga (välise välja suund ühtib kontaktvälja suunaga), takistab ka väline väli põhiliste laengukandjate liikumist läbi kontaktpinna: selline väli püüab elektrone n-tüüpi pooljuhis ja auke p-tüüpi pooljuhis viia kontaktpinnast kaugemale. Selle tulemusena laieneb tõkkekiht ja kasvab tugevalt pooljuhtide takistus. Voolu tugevuse läbi pooljuhtide määrab väikese kontsentratsiooniga mittepõhiliste laengukandjate liikumine. Nendest põhjustatud tühine vool saavutab pinge tõustes kiiresti küllastuse ega sõltu edasisel pinge suurendamisel enam praktiliselt pinge väärtusest. Ainult väga suurte pingete korral, kui laengukandjate arv hakkab juba suure väljatugevuse tõttu kasvama (näiteks kui algab tõukeionisatsioon), väheneb pooljuhi takistus järskult ja suureneb teda läbiva voolu tugevus. Sellise suure pinge juures toimub peagi ka läbilööks, mis rikub pooljuhi.

Vaadeldud tõkkekihi paksust suurendavat pinget nimetatakse vastupingeks. Temast tingitud voolu aga vastuvooluks.

Läbilöögi vältimiseks iseloomustatakse igat konkreetset alaldavat kontakti maksimaalselt lubatava vastupinge amplituudväärtusega.

Vastupidise polaarsusega välise pinge korral, s.t. juhul kui välise pingeallika plusspoolus on ühendatud p-tüüpi, miinuspoolus aga n-tüüpi pooljuhiga, vähendab väline väli kontaktpotentsiaalide vahet, rikastades kontakti piirkonda põhiliste laengukandjatega. Nii väheneb tõkkekihi paksus ja takistus elektrivoolule. Kui väline pinge ületab kontaktpotentsiaalide vahe esialgse väärtuse, siis kaob tõkkekiht täielikult ja pooljuhtide takistus saab võrdseks ainult nende materjalist oleneva oomilise takistusega. Sellise polaarsusega pinge korral on voolu tugevus pooljuhtides määratud läbi kontaktpinna difundeeruvate põhiliste laengukandjatega. Kontaktvälja piirkonda sattuvate ja seal genereeritud mitte-põhiliste laengukandjate vastuvoolu osa koguvoolust muutub pinge tõustes järjest tühisemaks. Pinge ja voolu tugevuse vaheline sõltuvus ei ole vaadeldud juhul lineaarne, kuivõrd pinge suurenedes tõkkekihi takistus väheneb. Alles siis, kui pinge ületab kontaktpotentsiaalide vahe esialgse väärtuse ja tõkkekiht kahe pooljuhi vahelt kaob, läheb pinge ja voolu tugevuse vaheline sõltuvus üle lineaarseks, Ohmi seadusele alluvaks.

Sellise polaarsusega pinget pooljuhtidel, mille korral kontaktpiirkonna juhtivus suureneb (väheneb tõkkekihi paksus), nimetatakse päripingeks. Temale vastavat voolu pärivooluks.

Eespooltoodust järeldub, et kahe erineva juhtivustüübiga pooljuhi kontaktpiirkonnal on suunavad omadused just tänu tõkkekihile kahe pooljuhi vahel. Viimase tekke põhjustab antud juhul laengukandjate väike kontsentratsioon ja liikuvus. Näiteks kahe metalli, millede laengukandjate kontsentratsioon ja liikuvus on suur, kontakti korral paikneksid potentsiaalbarjääri tekitavad laengud metalli pinnal (ühekahe aatomtasandi sügavusel) ja tõkkekihti ei tekiks. Väikese laengukandjate kontsentratsiooni ja ruumlaengut põhjustavate laengute lokaliseerituse tõttu pooljuhtides haarab aga

põhiliste laengukandjate difusiooni pidurdamiseks vajalik laeng siin enda alla määrgatava sügavusega kihi. (Tõkkekihi paksus pooljuhtides võib olla mitu suurusjärku aatomitevahelisest kaugusest suurem.) Niisiis, mida väiksem on laengukandjate kontsentratsioon, seda sügavamale pooljuhtidesse tungib tõkkekiht.

Alaldav kontakt ei teki mitte ainult kahe erineva juhtivusmehhanismiga pooljuhi, vaid ka pooljuhi ja metalli kokkuviimisel. Tõkkekiht nende kontaktide piirkonnas moodustub analoogiliselt eespool kirjeldatud kahe pooljuhi vahelise tõkkekihiga. Erinevalt aga pooljuhtide omavahelisest kontaktist ei asetse pooljuhi ja metalli kontakti korral tõkkekiht mõlemas kokkupuutesse viidud materjalis, vaid ainult pooljuhis.

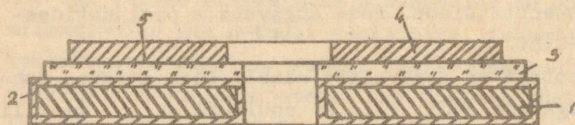
Kõik pooljuhtide ja metallide kontaktid ei ole siiski alaldavate omadustega. Kui ühendada näiteks metall ja elektroonse juhtivusega pooljuht, ning pooljuhi väljumistöö on seejuures suurem metalli väljumistööst, siis ületab metallist pooljuhti difundeeruvate elektronide arv vastupidi liikuvate elektronide arvu. Pooljuhis rikastub kontakti piirkond vabadest laengukandjatest ja tõkkekihti ei teki. Selles $10^{-5} \dots 10^{-6}$ cm paksune väikese takistusega kiht pooljuhi pinnal ei muuda aga praktiliselt tema kui terviku takistust.

Pooljuhtsuunajate valmistamisel paigutatakse pooljuhi-kiht enamasti kahe metallelektroodi vahele. Elektroodid valitakse aga niisugustest materjalidest, et ühega neist annaks pooljuht tugevalt alaldava kontakti, teisega aga oomilise või siis voolu suunast praktiliselt sõltumata takistusega kontakti. Nii on praktikas kasutatavate pooljuhtsuunajate omadused põhiliselt määratud ühe üleminekukihi omadustega.

Antud töös kasutame seleensuunajaid. Tema skemaatiline läbilõige on antud joonisel 37.

Suunaja aluseks ja kontaktelektroodiks, s.t. elektroodiks, millega pooljuht 3 ei anna oluliselt alaldavat kontakti, on niklikihiga 2 kaetud raudseib 1. Seleenikihiga 3

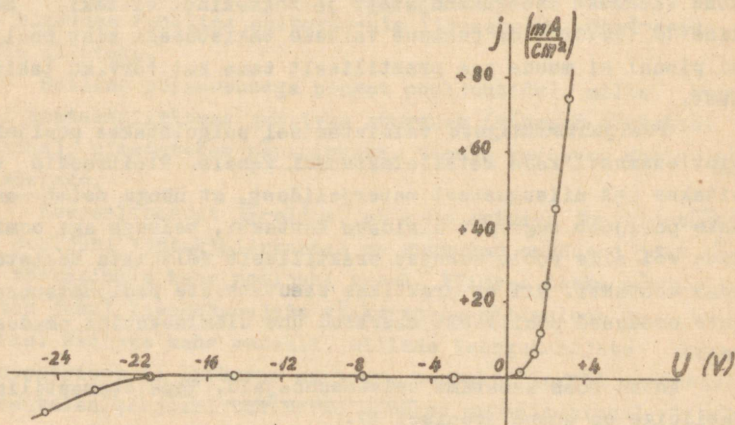
annab alaldava kontakti kaadmiumi, vismuti ja tina sulamist elektrood 4. Viimaste kontakti piirkonda tekibki tõkkekiht 5, mis määrab suunaja omadused.



Joonis 37

Seleensuunajate valmistamisel kasutatakse aukjuhtivusega seleeni, seepärast on päri- ning vastuvoolu suunatud kontakt-

elektroodilt läbi pooljuhi alaldava elektroodi poole. Päritakistus väheneb pinge tõustes kiiresti ning läheneb konstantsele väärtusele. Suunaja takistus vastuvoolule kasvab vastupinge suurenedes, saavutab siis maksimumi ning hakkab seejärel vähenema. Takistuse sõltuvus pingest suunajal määrab ta voltamperkarakteristiku. Joonisel 38 on esitatud tüüpiline seleensuunaja voltamperkarakteristik. See näitab selgelt voolu ja pinge vahelise sõltuvuse ebalineaarsust ja juhtivusomaduste erinevust päri- ning vastuvoolu puhul.

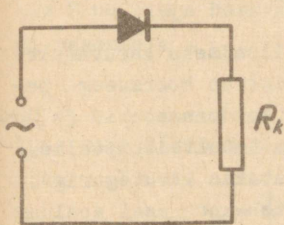


Joonis 38

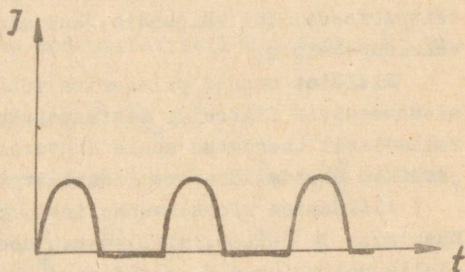
Seleenalaldi võib töötada temperatuuride vahemikus -40°C kuni $+70^{\circ}\text{C}$. Ühele elemendile tulev pingeamplituud ei tohi üle-

tada 20–25 V. Kui on vaja alaldada suurema pingega vahelduv-
 voolu, ühendatakse mitu elementi järjestikku nii, et ühele
 elemendile tulev pingeamplituud ei ületaks lubatud väärtust.
 Elementide mugavamaks ühendamiseks valmistatakse nende alu-
 sed seibikujulistena, ava keskel (vt. joon. 37). Loomuliku ja-
 hutuse korral võib seleensuunajat koormata vooluga, mille
 tihedus ei ületa $50 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$. Vastavalt alaldatava voolu tugevu-
 sele valitakse suunaja pindala. (Vajaduse korral ühendatak-
 se mitu elementi paralleelselt, nii et ühe elemendi kohta
 tulev voolu tihedus ei oleks lubatust suurem.)

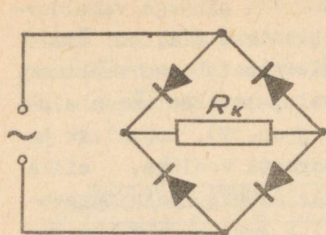
Vahelduvvoolu alaldamisel kasutatakse nii täis- kui ka
 poolperioodalaldeid. Poolperioodalaldis, mille põhimõtteli-
 ne skeem on antud joonisel 39, läbib päri vool koormustakis-
 tit R_k vaid ühe poolperioodi vältel. Teise poolperioodi jook-
 sul, mil suunaja takistus on suur, läbib teda vaid tühise
 suurusega vastuvool. Nii saame koormustakistis pulseeriva
 voolu, mille periood on võrdne alaldatava vahelduvvoolu pe-
 rioodiga. (Joonisel 40 on näidatud voolu tugevuse sõltuvus
 ajast poolperioodalaldi väljundis, kui alaldatakse sinusoi-
 daalset vahelduvvoolu.)



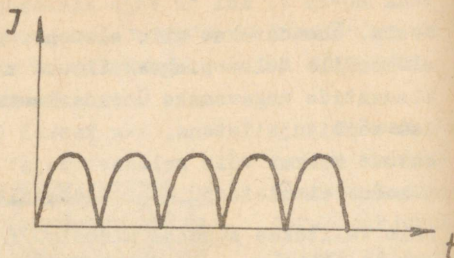
Joonis 39



Joonis 40



Joonis 41



Joonis 42

Täisperioodalaldis, mille üks võimalikke skeeme, nn. Graetzi sildskeem, on näidatud joonisel 41, läbib päri- ja vastuvoolu koormustakistit R_K mõlema poolperioodi jooksul. Selleks on täisperioodalaldis suunajad ühendatud nii, et ühe poolperioodi jooksul on ühtedel suunajatel (oletame, et A ja D) päripinge, teistel (B ja C) vastupinge; järgmise poolperioodi jooksul aga vastupidi: päripinge teistel (B ja C), vastupinge esimestel (A ja D). Nii on koormustakistis R_K kord ühesid, kord teisi suunajaid läbiv päri- ja vastuvool, kusjuures voolu suund koormustakistis ei muutu. Saadud pulseeriva voolu sagedus on kaks korda suurem alaldatava vahelduvvoolu sagedusest. (Joonisel 42 on näidatud voolu tugevuse sõltuvus ajast täisperioodalaldi väljundis, kui alaldatakse sinusoidaalset vahelduvvoolu.)

Alaldist saadud pulseeriva voolu silumiseks kasutatakse mitmesuguseid filtreid. Lihtsamateks neist on koormusega paralleelselt ühendatud suure mahtuvusega kondensaatorid ja järjestikku ühendatud suure induktiivsusega induktioonpoolid.

Alaldamise efektiivsust iseloomustatakse kasuteguriga. Kasutegur η näitab, millise osa moodustab koormusel eralduv alalisvooluvõimsus $N_{\sim}$ alaldamise käigus vahelduvvooluvõimsust tarbitud võimsusest $N_{\sim}$:

$$\eta = \frac{N_{\sim}}{N_{\sim}} \quad (1)$$

Filtrite puudumisel on vool alaldi väljundis pulseeriv ja teda saab esitada alalis- ja vahelduvkomponentide summana. Järelikult on alaldi koormustakistusel eralduv koguvõimsus N_k erinev alalisvooluvõimsusest N_{a} , mis vabaneb ainult ühe pulseeriva voolu komponendi mõjul. Seda asjaolu tuleb alaldi kasuteguri arvutamisel arvestada.

Koguvõimsuse ja alalisvooluvõimsuse erinevuse selgitamiseks arvutame järgnevalt need mõlemad võimsused poolperioodalaldi jaoks, kui temaga alaldatakse sinusoidaalset vahelduvvoolu. Sellisel juhul on voolu tugevus alaldi väljundis sõltuvana ajast kirjeldatav poolsinusoididena (vt. joon. 40). Matemaatiliselt saab sellele anda kuju:

$$I = I_m \sin \omega t, \quad \text{kui} \quad 0 \leq t \leq \frac{T}{2}$$

$$\text{ja} \quad I = 0, \quad \text{kui} \quad \frac{T}{2} \leq t \leq T,$$

kus I on voolu tugevus koormustakistis ajahetkel t , I_m - voolu tugevuse amplituudväärtus, ω - vahelduvvoolu ringsagedus, mille periood on T .

Perioodilise voolu koguvõimsus N_k on võrdne perioodi jooksul eralduva keskmise võimsusega, s.t.

$$N_k = \frac{1}{T} \int_0^T U I \, dt,$$

kus U on pinge hetkväärtus koormustakistil R_k . Vastavalt Ohmi seadusele

$$N_k = \frac{1}{T} \int_0^T I^2 R_k \, dt.$$

Kuna vool läbib takistust vaid poolperioodi $0 \leq t \leq \frac{T}{2}$ jooksul, siis

$$N_k = \frac{1}{T} R_k \int_0^{\frac{T}{2}} I_m^2 \sin^2 \omega t \, dt = \frac{R_k I_m^2}{4}. \quad (2)$$

Pulseeriva voolu I alaliskomponendi I_{a} annab voolu tugevuse keskvaartus perioodi jooksul. Seega

$$I_{\text{a}} = \frac{1}{T} \int_0^T I \, dt = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} I_m \sin \omega t \, dt = \frac{I_m}{\pi}. \quad (3)$$

Nii saame, et antud juhul on voolu alaliskomponendi väärtus I_m korda väiksem voolu tugevuse amplituudväärtusest I_m .

Alalisvooluvõimsus N_- , mis eraldub koormustakistil R_k , on siis

$$N_- = R_k I^2 = \frac{R_k I_m^2}{2} . \quad (4)$$

Valemite (2) ja (4) võrdlemisel näeme, et antud juhul on alalisvooluvõimsus $\frac{I_m^2}{4}$ korda väiksem takistusel eralduvast koguvõimsusest.

Valemiga (1) määratud kasutegur iseloomustab alaldis kui alalisvooluallikat, mille jaoks on kasulik ainult voolu alaliskomponent, harmoonilised vahelduvkomponendid aga kasutud. Selliselt tuleks kasutegur arvutada, kui alaldis kasutatakse alalisvooluallikana, näiteks aku laadimisel, galvanotehnikas, alalisvooluriistade toitmiseks jne. Nendel juhtudel aga, kui alaldis on koormatud ainult aktiivtakistusega, milles voolu töö läheb soojuseks, tuleb soojendamiseks kulunud võimsuse leidmiseks arvutada koguvõimsus N_k .

Alaldis kasutegur sõltub alaldis tüübist. On selge, et täisperioodalaldis kasutegur on suurem kui poolperioodalaldis kasutegur, kui võrd voolu alaliskomponent on esimesel juhul kaks korda suurem kui teisel. Alaldis kasutegur oleneb ka valitud töörežiimist (pingest suunajal, koormustakisti suurus jne.), temperatuurist jms., mille muutumisel muutub päri- ja vastuvoolu väärtus ning nende suhe.

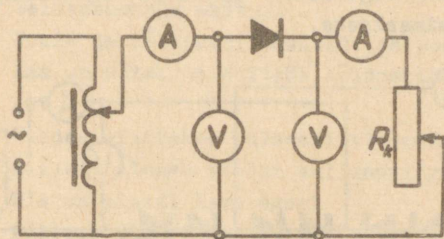
Alalisvooluvõimsuse saamiseks tuleb mõõta pinge ja voolu tugevuse alaliskomponentide väärtused. Selleks kasutame magnetelektrilisi mõõteriistu, mis mõõdavad vastavate suuruste keskmisi väärtusi, s.t. nende alaliskomponente. Koguvõimsuse, aga ka võrgust tarbitud vahelduvvooluvõimsuse mõõdamiseks elektromagnetiliste mõõteriistadega. Nende mõõteriistade näidud on võrdelised neid läbiva voolu ruuduga, s.t. nad mõõdavad efektiivväärtusi ja annavad seega keskmise võimsuse.

4. Töö käik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, te-

hase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.

- Koostage poolperioodalaldi vastavalt joonisel 43 esitatud skeemile. Asetage autotrafo pingeregulaatori orienteeruvat väljundpinget näitav nool nulli kohale, koormusreostaadi takistus reguleerige aga maksimaalseks.



Joonis 43

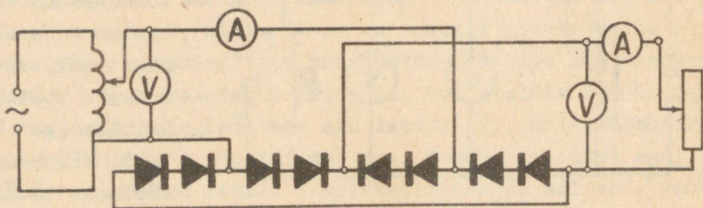
- Pärast ühenduste kontrollimist ja tööülesande täpsustamist juhendaja poolt lülitage autotrafo vooluvõrku.
- Reguleerige autotrafo väljundpinge võrdseks tööülesandes antud pingega.

- Koormusreostaadi R_k liugkontakti nihutamisega viige voolu tugevus ahelas etteantud väärtusele. Võtke mõõteriistadelt lugemid ja kandke need alljärgnevasse tabelisse.

Jrk. nr.	Alalisvool					Vahelduvvool					Kasu- tegur 7 %
	Pinge U ₋		Vool I ₋		Võim- sus N ₋	Pinge U _~		Vool I _~		Võim- sus N _~	
	näit	V	näit	A		näit	V	näit	A		
1											
.											
.											
.											
5											

- Muutke alaldi sisendpinget vastavalt tööülesandele, jättes reostaadi liugkontakti endisesse asendisse ($R_k = \text{const}$). Kandke tabelisse igale sisendpingele U_{-} vastavad mõõteriistade näidud.

7. Andke autotrafolt alaldile tööülesandes näidatud konstantne sisendpinge. Muutes koormistakistust R_k vastavalt juhendaja poolt antud režiimile, kandke eelneva tabeliga analoogilisse tabelisse kõikide vahelduv- ja alalisvoolu mõõteriistade näidud.
8. Lülitage autotrafo vooluvõrgust välja. Koostage täisperioodalaldi vastavalt joonisel 44 näidatud skeemile. Viige jällegi autotrafo pingeregulaator nulli ja reguleerige koormustakistus maksimaalseks.



Joonis 44

9. Pärast ühenduste kontrollimist juhendaja poolt lülitage autotrafo uuesti vooluvõrku. Tööülesandes antud pingete ja takistuste juures tehke samasugused mõõtmised nagu poolperioodalaldi korralgi (vt.punktid 4...7). Mõõtmistulemused kandke eespooltooduga analoogilisse tabelisse.
10. Saadud mõõtmistulemuste kaudu arvutage alalis- ja vahelduvvooluvõimsused, viimaste kaudu aga kasuteguridiga mõõtmise jaoks.
11. Joonestage graafikud $\eta = f(N_{\sim})$ iga erineva mõõtmisseeria jaoks. Kandke graafikule mõõtmisvead.
12. Põhjendage graafikute $\eta = f(N_{\sim})$ erinevat kulgu konstantse sisendpinge $U_{\sim}$ ja konstantse koormustakistuse R_k juures.

5. Küsimused

1. Milliseid materjale nimetatakse pooljuhtideks?
2. Kuidas liigitatakse pooljuhte nende juhtivusmehhanismi järgi?

3. Mis on kontaktpotentsiaalide vahe? Millest oleneb ta väär-
tus?
4. Mida nimetatakse tõkkekihiks? Millal ja miksta tekib?
5. Millest oleneb kontaktpiirkonna takistus? Mis on päri-,
mis vastuvool?
6. Millised kontaktid on alaldavad, millised oomilised?
7. Kas on võimalik tõkkekihi tekkimine n-tüüpi pooljuhi ja
metalli vahel?
8. Seleensuunaja ehitus.
9. Pool- ja täisperioodalaldi ehitus ja tööpõhimõte.
10. Kas on võimalik ehitada täisperioodalaldit kahe suunaja-
ga?
11. Kuidas silutakse pulseerivat voolu?
12. Millest oleneb alaldi väljundpinge sagedus?
13. Mis on alaldi kasutegur?
14. Milline vahe on alalisvooluvõimsuse ja koguvõimsuse vahel
alaldi väljundis? Millal tuleb arvestada alalisvooluvõim-
susega, millal koguvõimsusega?
15. Millest oleneb alaldi kasutegur?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 57, 58, 61.

Савельев И.В. Курс общей физики т.2. М., 1968, § 72, 74, 76,
78.

Калашников С.Г. Электричество. М., 1964, § 165...169, 226,
231...233.

TERMOEMISSION

1. Tööülesanne

Määrata vaakuumlambi katoodi temperatuur ja termoelektronide jagunemine kiiruste järgi pidurdava potentsiaali meetodil.

2. Töövahendid

Stend vaakuumlambiga, küttevooluallikas, ampermeeter, voltmeeter, mikroampermeeter, reostaat ja ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Vastavalt kvantteooriale võivad elektronidel igas kristallilises kehas (sealhulgas ka metallis) olla vaid diskreetseid energia väärtused. Energia spektris vaadeldakse neid diskreetseid väärtusi kui lubatud energianivoosid, mis on üksteisest eraldatud keelatud energianivoodega. Elektroni, millel on mingile energianivoole vastav energia, loetakse sellel nivool viibivaks. Vastavalt Pauli printsiibile ei või aga ühel ja samal energianivool olla korraga rohkem kui kaks elektroni, kusjuures nende elektronide spinnid peavad seejuures olema vastupidised.

Absoluutse nulli juures on kvantteooria kohaselt elektronide energia minimaalne: täidetud on vaid madalaimad lubatud energianivood. Kuid erinevalt klassikalisest elektrongaasi teooriast ei ole kvantteooria järgi 0°K juures elektronide energia null, vaid neil on ka siis tohutu kineetiline energia (keskmiselt 5 eV). Temperatuuri tõustes kasvab elektronide energia veelgi ning osa neist läheb madalamatelt energianivoodelt üle kõrgematele energianivoodele. Tõenäosus f selleks, et temperatuuril T oleks elektronil energia W , on antud Fermi-Dirac'i jaotusseadusega:

$$f = \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1}, \quad (1)$$

kus k on Boltzmanni konstant ja W_F - kvantsüsteemi parameeter,

mida nimetatakse Fermi energiaks. Vastavalt jaotusseadusele (1) tähendab Fermi nivoo 0°K juures elektronide suurimat võimalikku energiat, kõrgematel temperatuuridel ($T > 0$) aga energianivood, mille täitumise tõenäosus on 0,5 (sellel nivool asub keskmiselt üks elektron).

Kuigi metallis on palju suure kineetilise energiaga juhtivuselektrone, saab neist toatemperatuuril metallist lahkuda vaid tühine arv, mistõttu metall ka pikaajalisel seismisel ei omanda iseseisvalt positiivset laengut. Elektronide väljumist takistab metalli pinnal tekkiv elektriline kaksikkiht. Selle potentsiaalbarjääri ületamiseks tuleb elektronidel teha tööd, mis läheb nende potentsiaalse energia suurendamiseks. (Metallis asuvaid elektrone võib vaadelda potentsiaaliaukudes viibivatena, nende energia metallis on väiksem kui väljaspool metalli (vaakuumis) asetsevail elektronidel.) Järelikult selleks et väljuda metallist, peab elektron omandama kindla, antud ainele iseloomuliku potentsiaalse energia W_a .

Absoluutse nulli juures on vastavalt Fermi-Dirac'i jaotusseadusele kõige suurem energia Fermi nivool asetseval elektronil. Tema väljaviimiseks metallist tuleb kulutada kõige väiksem lisaenergia

$$W_a - W_F = q\varphi, \quad (2)$$

kus q on elektroni laeng ja φ - väljumispotentsiaal (potentsiaalbarjääri kõrgus). Seda valemiga (2) antud minimaalset lisaenergiat $q\varphi$, mida on vaja anda elektronile, et ta lahkuks tahkest või vedelast kehast vaakuumi, nimetatakse väljumistööks. Valem (2) oli saadud 0°K juures, kuid ka kõrgematel temperatuuridel määratakse väljumistöö samade energiatega W_a ja W_F vahena, kuigi see ei ole enam minimaalseks lisaenergiaks elektroni väljaviimisel aineist. Väljumistöö oleneb temperatuurist, kuna temperatuuri muutudes muutub nii Fermi energia kui ka potentsiaalbarjääri kõrgus. Samuti oleneb väljumistöö suuresti pinnatööstlusest ja puhtusest. Väiksema väljumistöö saamiseks kaetakse metallid tihti oksüüdi kihiga.

Eespooltoodust järeldub, et metallist väljuvate elektronide arv sõltub nende energiast ja väljumistööst. Toatemperatuuril

ril on elektronide soojusliikumise kineetilised energiad väikesed ja metallist lahkuvate elektronide arv tühine. Temperatuuri tõustes kasvab kiiresti elektronide kaootilise liikumise kiirus ning suureneb väljumiseks vajaliku energia omandamise tõenäosus [vt. valem (1)]. Elektronide eraldumist ainekst viimase kuumutamisel nimetatakse termoemissiooniks.

Leiame järgnevalt termoemissioonil ainekst eralduvate elektronide arvu, lähtudes energianivoode täitumise tõenäosusest (1).

Olgu energianivoode tihedus N (sõltub kvantsüsteemist ja energiast). Siis elektronide arv ruumalaühiku kohta dn , millele energia asub vahemikus W kuni $W + dW$, on arvutatav valemist

$$dn = Nf dW = \gamma \frac{W^{1/2}}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1} dW ,$$

kus γ on kvantsüsteemist sõltuv konstant. Arvestades, et kineetiline energia $W_k = \frac{mv^2}{2}$, saab siit üle minna elektronide jaotuvusele kiiruste järgi:

$$dn = \gamma' \frac{v^2}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1} dv . \quad (3)$$

Metallist saavad lahkuda vaid need elektronid, mille kiirus on küllaldane potentsiaalbarjääri ületamiseks. Seejuures ei ole niivõrd oluline elektroni resultantkiirus, kui just kiiruse metalli pinna poole suunatud komponent v_z . Tähendab tuleks üldiselt elektronide jaotuselt kiiruse järgi üle minna elektronide jaotuvusele kiiruse komponendi v_z järgi, kusjuures kiiruse teiste komponentide v_x ja v_y väärtused võivad olla suvalised:

$$dn_z = \gamma' dv_z \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1} dv_x dv_y .$$

Arvestades, et termoemissioonil väljuvate elektronide energia on suur ($W - W_F \gg kT$), saame:

$$dn_z = \gamma'' kT e^{\frac{W_F}{kT}} e^{-\frac{mv_z^2}{2kT}} dv_z.$$

Nagu juba eespool öeldud, saavad kõigist metalli pinna poole liikuvaist elektronidest metallist lahkuda vaid need, mis on suutelised ületama potentsiaalbarjääri kõrgusega φ , s.t. need, mille korral on täidetud tingimus

$$\frac{mv_z^2}{2} \geq q\varphi \quad \text{ehk} \quad v_z \geq \sqrt{\frac{2q\varphi}{m}}, \quad (4)$$

kus m on elektroni mass. Seejuures ajaühikus väljuvad ainult need tingimust (3) rahuldavad elektronid, mis ei asu sügavamal metalli sees, kui nende kiiruse komponendi v_z arvvaartus. Järelikult ajaühikus pindalaühiku kohta väljuvate elektronide arv

$$n = \int_{\sqrt{\frac{2q\varphi}{m}}}^{\infty} v_z \, dn_z. \quad (5)$$

Korrutades võrrandiga (5) antud elektronide arvu elektroni laenguga q , saame avaldise termoemissioonvoolu tiheduse (määrab elektronlampide küllastusvoolu) arvutamiseks:

$$j = qn = A T^2 e^{-\frac{q\varphi}{kT}}, \quad (6)$$

kus A on metallist ja temperatuurist sõltumatu konstant.

Termoemissioonil metallist väljunud elektronide kiirused on erinevad ja tõenäosus teatud energiaga elektroni leidmiseks on antud Fermi-Dirac'i jaotusseadusega (1). Kuid arvestades, et metallist said väljuda vaid suure energiaga elektronid, ja nende kontsentratsioon metalli kohal on seejuures $10^{10} \dots 10^{12}$ korda väiksem juhtivuselektronide kontsentratsioonist metalli sees, siis võib nende korral kasutada ka Maxwelli-Boltzmanni jaotusseadust

$$f = \text{const} \cdot e^{-\frac{W}{kT}}. \quad (7)$$

Tõepoolest, suurte energiatega korral, kui $W = W_F \gg kT$, on

$e^{\frac{W-W_F}{kT}} \gg 1$ ning valemist (1) saame:

$$f = \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1} \approx e^{-\frac{W-W_F}{kT}} = e^{\frac{W_F}{kT}} e^{-\frac{W}{kT}} = \text{const} \cdot e^{-\frac{W}{kT}}.$$

Analoogiliselt üleminekule valemilt (1) valemile (3) võib leida ka Maxwelli-Boltzmanni jaotusseadusele (7) vastava termoelektronide jagunemise kiiruste järgi. Nii saame, et termoelektronide arv ruumalaühiku kohta dn , millede kiiruse komponendid asuvad vahemikus $(v_z, v_z + dv_z)$; $(v_x, v_x + dv_x)$ ja

$(v_y, v_y + dv_y)$, on antav valemiga

$$dn = n \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{W}{kT}} dv_z dv_x dv_y, \quad (8)$$

kus n on metallist termoemissioonil väljunud elektronide kontsentratsioon.

Termoelektronide jagunemist kiiruste järgi saab praktikas uurida pidurdava potentsiaali meetodil. Selleks kasutatakse vaakuumdiodi, mille elektrodid (anood, katood) on teineteisele küllalt lähedaste raadiustega koaksiaalsed silindrid. (Selliseid elektroode võib väikese veaga vaadelda kui tasaparralleelseid plaate, mille jaoks rangelt võttes kehtib kogu järgnev arutelu.) Kui vaadeldavas vaakuumdiodis anoodi ja katoodi vahel väli puudub, siis jõuavad kõik katoodist väljuvad elektronid anoodini. Andes anoodile katoodi suhtes negatiivse potentsiaali, tekib lambis elektriväli, mis takistab elektronide liikumist katoodilt anoodile. Nüüd jõuavad anoodini vaid need elektronid, mille katoodi-anoodisuunaline kiiruse komponent v_z on nii suur, et nad on võimelised ületama elektrivälja pidurdavat mõju, s.t.

$$\frac{m v_z^2}{2} \geq q U, \quad (9)$$

kus U on anoodi-katoodivaheline pinge. Suurendades pidurdavat potentsiaali (pinget) ΔU võrra, väheneb anoodini jõudvate elektronide arv, sest sinna jõudvate elektronide kiineetiline energia peab nüüd ületama väärtust $q(U + \Delta U)$. Mõõtes anoodini küündivate elektronide arvu n pidurdava pinge U juures ja vastavate elektronide arvu $n_1 - \Delta n$ pinge $U + \Delta U$ korral, saab leida termoelektronide arvu Δn , millede kiirused asuvad vahemikus $v_{z1} = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ kuni $v_{z2} = \sqrt{\frac{2q(U + \Delta U)}{m}}$.

Nii võib pidurdava potentsiaali meetodil vahetult mõõta termoelektronide jagunemist kiiruse järgi ning ühtlasi kvalitatiivselt kontrollida Maxwelli-Boltzmanni jaotusseaduse rakendatavust termoelektronide kohta. Anoodini jõudnud elektronide arv n_1 määratakse praktikas vaakuumdiodi läbiva voolu tugevuse i kaudu, kui $i \propto n_1$.

Kontrollida võib ka Maxwelli-Boltzmanni jaotusseadusest tulenevaid arvutuseeskirju. Lähtudes näiteks kiirusjaotusest (8), võib analoogiliselt valemi (6) tuletusele näidata, et paralleelsete plaatielektroodide korral on anoodvoolu tugevus i pidurdava pinge U juures arvutatav valemiga

$$i = i_0 e^{-\frac{qU}{kT}}, \quad (10)$$

kui i_0 on anoodvoolu tugevus välja puudumisel plaatidevahelises ruumis. Logaritmides võrrandit (10), saame

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{q}{kT} U. \quad (11)$$

Võrrandi (11) vastavust praktikale saab kontrollida, kui mõõta vaakuumdiodi läbiva anoodvoolu tugevus i pidurdava pinge U erinevate väärtuste juures ning esitada saadud mõõtmistulemused graafikuna teljestikus $\ln i - U$. Võrrandi (11) põhjal peab graafik $\ln i = f(U)$ olema sirge tõusuga $\frac{q}{kT}$.

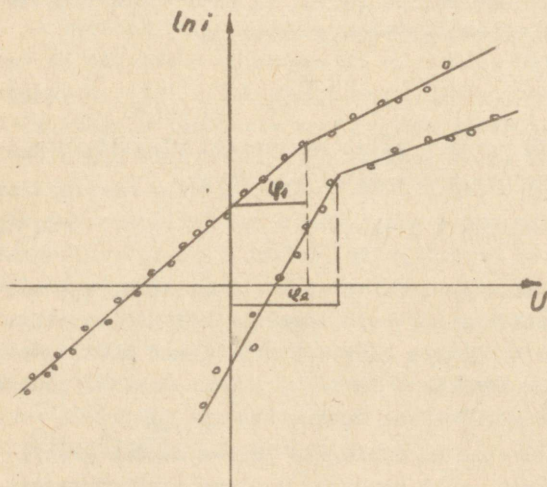
Määrates pidurdavate anoodpingete juures saadud graafiku $\ln i = f(U)$ tõusu, võib arvutada vastava elektrongaasi temperatuuri. Termoemissioonil on elektrongaas katoodiga soojuslikus tasakaalus ja seepärast on leitud temperatuur ühtlasi ka katoodi temperatuuriks.

Vaakuumdiodi katood ja anood on valmistatud erineva väljumistööga materjalidest. Välisahel ühendab nad üksteisega ning nende pindade vahele lambis tekib väline kontaktpotentsiaalide vahe U_k , mille väärtus ja märk on määratud väljumistööde vahega:

$$U_k = \varphi_a - \varphi_k.$$

Kontaktpotentsiaalide vahe sõltub katoodi temperatuurist (φ_a ja φ_k olenevad temperatuurist) ning ta liitub algebraliselt katoodi-anoodivahelisele pingele U . See muudab eespool kirjeldatud katsete tulemusi, kuna nii termoelektronide kiiruse järgi jagunemise uurimisel kui ka võrrandi (11) kontrollimisel tuleb teada anoodi-katoodivahelise pinge tegelikku väärtust. Kontaktpotentsiaalide vahe saab määrata praktiliste mõõtmiste põhjal joonestatud graafikute $\ln i = f(U)$ abil. Vaakuumdiodi anoodvool oleneb pingest eksponentsiaalselt

$i \sim e^{\frac{qU}{kT}}$ [vt. valem (10)] ainult pidurdava elektrivälja kor-

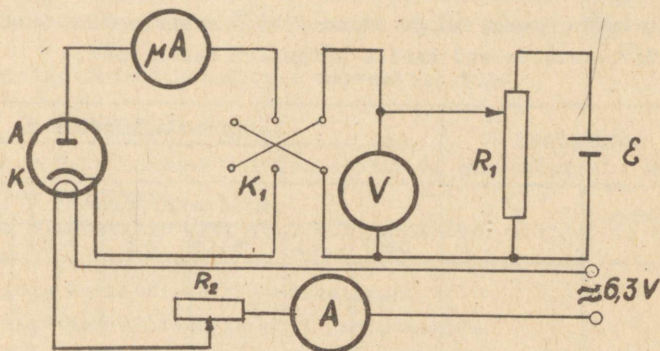


Joonis 45

ral. Kiirendava elektrivälja puhul on anoodvoolu muutused pingest väiksemad: $i \sim U^{3/2}$, küllastuse korral püsib anoodvool muutumatuna. Järelikult peab graafiku $\ln i = f(U)$ tõus pinge juures, kus resultantväli (-pinge) saab võrdseks nulliga, muutuma (vt. joon. 45). Selle, graafiku $\ln i = f(U)$ murdepunk-

ti järgi määrataksegi anoodi ja katoodi vahelise välise kontaktipotentsiaalide vahe väärtus ja märk. (Antud näidisgraafikute järgi suurendab kontaktipotentsiaal pidurdavat potentsiaali.)

Antud töös kasutatava katseseadme elektriline skeem on näidatud joonisel 46.



Joonis 46

Patareilt $\mathcal{E}$ saadavat anoodpinget reguleeritakse potentiomeetriga R_1 ja mõõdetakse voltmeetriga. Anoodvoolu tugevust mõõdetakse mitme mõõtepiirkonnaga mikroampermeetri abil, kuna anoodvool muutub väga laias piirkonnas. Küttevoolu reguleerimiseks on skeemi lülitatud reostaat R_2 .

4. Töö käik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega, eriti põhjalikult aga mitme mõõtepiirkonnaga mikroampermeetri käsitlemise ja šundi lülitamise eeskirjaga. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, tehase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
2. Tehke ühendused vastavalt joonisele 46. Paluge juhendajal ühendusi kontrollida ning anda konkreetne tööülesanne.
3. Mõõtke anoodvoolu tugevused juhendaja poolt antud anoodpingete (20 - 25 väärtust) ja küttevoolu tugevuste juu-

res. Mikroampermeetri näidu registreerimisel kasutage sellist mõõtepiirkonda, kus valgusindeksi hälve on teise skaalapoolle sees. Töötades negatiivsete anoodpingetega, kus anoodvoolu mõõtmiseks tuleb kasutada mikroampermeetri väiksemaid mõõtepiirkondi, vältige rangelt pinge polaar- suse muutumist ümberlülititi K_1 abil. Ümberlülitamine võib toimuda ainult kõige suuremat mõõtepiirkonda kasutades. Mõõtmistulemused kandke järgmisse tabelisse:

Anoodpinge U		Küttevoolu tugevus I _k					
näit	V	Anoodvoolu tugevus I					
		näit	MA	näit	MA	näit	MA

- Joonestage mõõtmistulemuste põhjal graafikud $\ln i = f(U)$. Määrake graafikult kontaktpotentsiaalide vahe märk ja väärtus erinevate katoodi temperatuuride (küttevoolu I_k väärtuste) juures.
- Arvutage graafikute $\ln i = f(U)$ tõusu kaudu katoodi temperatuur erinevatel küttevoolu tugevustel.
- Koostage tabelid mõõdetud anoodvoolu tugevuste, nendele vastavate tegelike pidurdavate pingete (arvestatud on ka kontaktpotentsiaalide vahe mõju) ning vastava elektronide minimaalse anoodisuunalise kiiruse komponendi v_z jaoks erinevate katoodi temperatuuride juures.

Anoodvool i (μA)				
Tegelik anoodpinge U_t (V)				
Minimaalne kiirus				
$v_z = \sqrt{\frac{2q U}{m} p}$ ($\frac{m}{s}$)				

$I_k = \dots$

$T_k = \dots$

7. Joonestage anoodvoolu ja tegeliku anoodpinge vahelise sõltuvuse graafikud $i = f(U_t)$.
8. Joonestage anoodvoolu ja temale vastava elektronide minimaalse kiiruse komponendi v_z vahelise sõltuvuse graafikud $i = f(v_z)$.
9. Leidke 6...7 punktis graafikute $i = f(v_z)$ tõus $\frac{di}{dv_z} \sim \frac{dn}{dv_z}$ ning joonestage saadud tulemuste põhjal graafik $\frac{dn}{dv_z} = f(v_z)$.
10. Võrrelge saadud graafikuid teoreetilistega.

5. Küsimused

1. Mis on Fermi nivoo? Millist elektroni nimetatakse Fermi nivool viibivaks?
2. Mida nimetatakse elektroni väljumistööks? Millest ta oleneb?
3. Esitage Fermi-Dirac'i jaotusseadus.
4. Esitage Maxwellli-Boltzmanni jaotusseadus.
5. Millal kehtib Fermi-Dirac'i, millal Maxwellli-Boltzmanni jaotusseadus?
6. Millest oleneb termoemissioonvoolu tihedus?
7. Kuidas saab määrata elektronlambi katoodi temperatuuri anoodvoolu ja -pinge kaudu?
8. Mida nimetatakse sisemiseks ja välimiseks kontaktpotentsiaalide vaheks? Selgitage selle tekke põhjusi.
9. Mis on termoemissioon?
10. Mis on küllastusvool?
11. Miks muutub antud töös graafiku $\ln i = f(U)$ tõus?
12. Miks tuleb antud töös kasutada lähedaste raadiustega maksimaalseid elektroode?
13. Miks ei tule mõõtmistel pärast anoodpinge polaarsuse muutmist muuta ka anoodvoolu mõõtvat mikroampermeetri polaarsust?

6. Kirjandus

- Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 57, 58, 63...66.
- Савельев И.В. Курс общей физики, т. II. М., 1966, § 71, 74, 75.
- Калашников С.Г. Электричество. М., 1964, § 169...171.
- Фриш С.Э. и Тиморева А.В. Курс общей физики I. М., 1962, § 50.

TRIOODI TUNNUSJOONED

1. Tööülesanne

Trioodi tunnusjoonte (karakteristikute) ülevõtmine ning parameetrite (tõus, sisetakistus, läbitavus) määramine.

2. Töövahendid

Stend uuritava trioodi tunnusjoonte ülevõtmiseks, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Elektronlampe kasutatakse tehnikas laialdaselt mitmesuguste elektriliste protsesside juhtimiseks. Üheks lihtsamaks neist on kolme elektroodiga vaakuumlamp-triood. Trioodis (vt. joon.47) on lisaks anoodile 4 ja kooetavale katoodile 2 (mida kooetakse hooõgniidi 1 abil) veel täiendav elektrood-tüürvõre

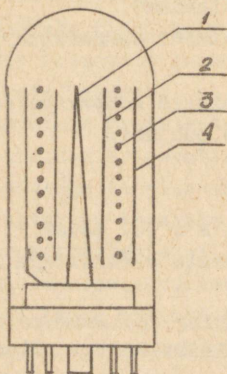
3. Elektronlampide tüürvõred valmistatakse tavaliselt spiraalsetena (uue matel ka võredena) ning paigutatakse lambi anoodi ja katoodi vahele nii, et võre asuks katoodile palju lähemal kui anood.

Katoodi kuumutamisel lahku b temast hulgaliselt elektrone. Elektronide eraldumist ainest viimase kuumutamisel nimetatakse termoemissiooniks. Termoemissioonil ajaühikus katoodi pinnaühikult eralduv elektronide arv - termoemissioonvoolu tihedus j - on kvantstatistika järgi arvutatav valemiga

$$j = A T^2 e^{-\frac{q\phi}{KT}}, \quad (1)$$

mis on kvalitatiivselt sarnane Riichardsoni-Deshmani valemiga

$$j = B T^{1/2} e^{-\frac{q\phi}{KT}},$$



Joonis 47

kus A ja B on katoodi materjalist ja temperatuurist sõltumata konstandid, T - katoodi absoluutne temperatuur, q - elementaarlaeng, $q\varphi$ - väljumistöö, k - Boltzmanni konstant.

Termoemissioonil katoodist lahkuvad elektronid moodustavad katoodi ümber elektronpilve. Elektronpilve negatiivne ruumilaeng vähendab väljunud elektronide kiirust, suunates suure osa neist katoodile tagasi. Seepärast jõuab anoodini vaid tühine arv kõigist katoodist väljuvatest termoelektronidest. Andes anoodile katoodi suhtes positiivse pinge, hakkab elektronpilv hõrenema. Suureneb anoodi poole liikuvate elektronide kiirus, kasvab ajaühikus anoodini jõudvate elektronide arv, s.t. anoodvoolu tugevus. Elektronpilve ruumlaengu tõttu (ta muudab potentsiaali jaotust katoodi ja anoodi vahel) ei ole anoodvoolu ja -pinge vaheline sõltuvus $i_a = f(U)$ lineaarne, s.t. ei allu Ohmi seadusele, vaid on väikeste positiivsete anoodpingete korral kirjeldatav $\frac{3}{2}$ seaduse nime all tuntud Boguslavski-Langmuiri valemiga

$$i_a = \text{const} \cdot U^{3/2}.$$

Suurte anoodpingete korral jääb anoodvoolu juurdekasv väiksemaks. Kui kõik katoodilt emiteeruvad elektronid jõuavad anoodile, siis saavutab anoodvool maksimumi. Edasisel pinge suurendamisel anoodvool enam ei kasva. Sellist pingest sõltumatut maksimaalset voolu tugevust elektronlambis nimetatakse küllastusvooluks. Küllastusvoolu tiheduse määrab termoemissioonvoolu tihedus (1). Järelikult oleneb elektronlambi küllastusvool, aga ka anoodvool üldse, katoodi temperatuurist, materjalist ning töötlustest. Et saavutada suuremat anoodvoolu tihedust madalamatel katoodi temperatuuridel, kaetakse katoodid sageli mitmesuguste oksiidide kihiga.

On kaht tüüpi katode. Otsese küttega lampidel täidab katoodi ülesandeid strontsium-, baarium- või kaltsiumoksiidiga kaetud hõõgniit. Selline katood on ökonoomne, kuid väikese soojusmahtuvuse tõttu väikese soojusliku inertsiga. Seepärast tuleb otsese küttega lampe toita stabiilse alalisvooluga. Vahelduva või pulseeriva küttevoolu korral muutuks neil pidevalt ka katoodi temperatuur ning termoemissioonvoo-

lu tihedus. Sellise küttevoolu korral kasutatakse kaudse küttega lampe. Neis on hõõgniidi (1) ümber asetatud nikkel- või nikeldatud keraamiline toruke 2 (vt. joon.47), mille välispind kaetakse hästi emiteeriva oksiidkihi kihiga. Hõõgniidi (1) ülesandeks on siin ainult nikkeltoru kuumutamine, kusjuures tavaliselt ta ei ole viimasega elektrilises kontaktis. Skeemi ühendatakse katood eraldi väljavõtte abil. Sellisel katoodil on suur soojusmahtuvus ja soojuslik inertsus. Ta ei jõua jälgida kiireid voolu muutusi ja tema termoelektronide voog jääb praktiliselt konstantseks.

Trioodis võib anoodvoolu muuta ka katoodi ja anoodi vahel asetseva tüürvõre abil. Kui anda võrele katoodi suhtes positiivne potentsiaal, siis väheneb ruumlaengu pidurdava välja tugevus ning suureneb anoodi-katoodisuunalise resultant elektrivälja tugevus, suureneb ka anoodvool. Negatiivse potentsiaali korral võrel resultantvälja tugevus väheneb, vähendades vastavalt ka anoodvoolu. Võre negatiivse pinge suurendamisel saab resultantvälja tugevus katoodi lähedal peagi võrdseks nulliga ja muutub seejärel suunalt vastupidiseks. Siis vool läbi lambi katkeb. Sellise olukorra kohta öeldakse, et lamp on lukus. Niisugust minimaalset pinget, mida tuleb rakendada võrele katoodi suhtes antud anoodpinge korral, et lamp oleks lukus, nimetatakse lukustuspingeks.

Kui võrd võre asub trioodis katoodile palju lähemal kui anood, siis põhjustavad võrepinge muutused palju suuremaid katoodilähedase elektrivälja muutusi kui samasugused anoodpinge muutused. Anood- ja võrepinge muutuste vahetegur, mis sama anoodvoolu tugevuse juures muudaks anoodvoolu niisama palju, määrab kaks trioodi parameetrit: lähitavuse D ja võimendusteguri M :

$$D = \left(\frac{\Delta U_v}{\Delta U_a} \right)_{I_a} \quad (2)$$

ja

$$M = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_v} \right)_{I_a}, \quad (3)$$

kus ΔU_V on võrepinge ja ΔU_a anoodpinge muutused konstantse anoodvoolu tugevuse i_a juures. Mida tihedam on võre ja mida lähemal ta katoodile asetseb, seda suurem on võrepinge mõju anoodvoolule ning seda väiksem on läbitavus D ja suurem võimendustegur μ . Nii saab väikeste võrepingete muutustega suurtes piirides muuta anoodvoolu tugevust. Seejuures järgneb igale võrepinge muutusele momentaanselt ka anoodvoolu muutus, sest elektrivool vaakuumlambis on põhjustatud väikese massi ja inertsiga elektronide poolt. Seega elektronlambi juhitus võrepingega on praktiliselt inertsivaba ja lubab reguleerida ka väga kiirelt toimuvaid protsesse.

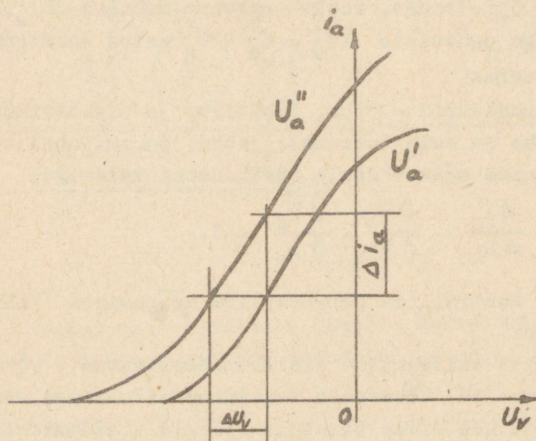
Trioodi iseloomustamiseks vaadeldakse tema anoodvoolu i_a sõltuvust võrepingest $U_V [i_a = f(U_V)]$ mitme erineva konstantse anoodpinge U_a väärtuse korral. Saadud kõverat $i_a = f(U_V)_{U_a}$ (vt. joon.48) nimetatakse trioodi võrekarakteristikuks e. võre

tunnusjooneks.

Anoodvoolu muutumist sõltuvalt võrepinge muutustest näitab trioodi võrekarakteristiku tõus:

$$S = \left(\frac{\Delta i_a}{\Delta U_V} \right)_{U_a} \quad (4)$$

kus U_a on vastav konstantne anoodpinge. Parameetrit S nimetatakse



Joonis 48

lambi tõusuks. (Kataloogides antakse tõus soovitatava tööpunkti jaoks.)

Tihti iseloomustatakse trioodi ka anoodvoolu ja anoodpinge vahelise sõltuvusega $i_a = f(U_a)_{U_V}$ erinevate võrepingete juures. Saadud kõveraid $i_a = f(U_a)_{U_V}$ nimetatakse trioodi

anoodkarakteristikuteks. Trioodi anoodkarakteristikud ei ole lineaarsed, kuivõrd triood kujutab endast juhti, mis ei allu Ohmi seadusele. Siiski võib väiksemat lõiku anoodkarakteristikul lugeda lineaarseks ning rääkida siis ka takistusest antud pinge või voolu korral, s.t. diferentsiaalsest takistusest $R = \frac{dU}{di}$. Trioodi juures nimetatakse niisugust diferentsiaalset takistust

$$R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta i_a} \right) U_v \quad (5)$$

trioodi sisetakistuseks.

Trioodi sisetakistuse R_i võib arvutada vastavalt valemile (5) ka võrekarakteristikutelt. Kui tõmmata (vt. joon. 48) vertikaalsirge $U_v = \text{const}$ läbi võre tunnuskõverate parve ja valida neist anoodpingetele U_a ja U_a'' vastavad kõverad, siis annab kahe valitud kõvera vaheline lõik, võetuna piki vertikaalsirget $U_v = \text{const}$, voolu tugevuse muutuse Δi_a , mis vastab anoodpinge muutusele $\Delta U_a = U_a'' - U_a'$ antud konstantse võre pinge U_v juures.

Trioodi parameetrid - tõus, läbitavus ja sisetakistus, mis on leitud ühe ja sama tööpunkti jaoks, on omavahel seotud vastavalt nende määratlusele Barkhauseni valemiga:

$$S.D.R = \frac{\Delta i_a}{\Delta U_v} \cdot \frac{\Delta U_v}{\Delta U_a} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta i_a} = 1. \quad (6)$$

See valem lubab kontrollida parameetrite määramisel tehtud arvutuste õigsust.

Osa katoodist emiteerunud elektronidest satub võrele, põhjustades võrevoolu. Võrevoolu tekkimine ei ole aga enamasti soovitatav, sest see viiks kasutule energia eraldumisele võre ahelas ja võimendatava signaali moonutamisele. Võrevoolu vältimiseks ja sobivama tööpunkti saamiseks on tüürvõre potentsiaal tavaliselt väiksem katoodi potentsiaalist.

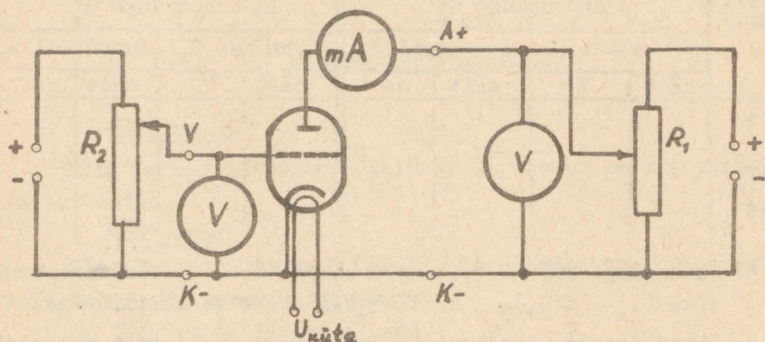
Töölukorras on tavaliselt anoodahelasse lülitatud koormustakisti R_a . Anoodvoolu muutudes muutub ka pingelang $i_a R_a$ koormustakistil. Kuivõrd elektronlambi anoodpinge U_a on nii-

suguse lülituse korral määratud anoodpingeallika klemmipinge E_a ja koormustakisti pingelangu $i_a R_a$ vahena

$$U_a = E_a - i_a R_a ,$$

siis järgneb anoodvoolu muutusele ka pinge U_a muutus elektronlambil. See viib ka lambi anood- ja võrekarakteristikute muutusele (väheneb viimaste tõus). Karakteristikuid, mille ülesvõtmisel oli anoodahelas koormustakistus, nimetatakse dünaamilisteks karakteristikuteks.

Võrekarakteristikute ülesvõtmiseks kasutame antud tööstendi, mille põhimõtteline skeem on joonisel 49.



Joonis 49

Anoodpinge andmiseks lambile suureoomiliselt pingejagajalt R_1 on tema väljund ühendatud paneelil klemmide A_+ ja K_- alla. Lambi küttepinge ($\sim 6,3$ V) võetakse trafolt ning on toodud klemmide "küte" alla. Võrepinge on reguleeritav potentiomeetriga R_2 ning antakse klemmide V ja K_- vahele paneelil.

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolliiga mõõteriista nimetus, tehase- või inventarinumber, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.

2. Tehke stendil ühendused vastavalt joonisele 49. Jälgige seejuures, et mõõteriistad oleksid ühendatud vastavalt polaarsusele.
3. Pärast ühenduste kontrollimist ja tööülesande täpsustamist juhendaja poolt lülitage vool skeemi. Oodake 3...4 minutit, et lambi katood jõuaks piisavalt soojeneda ning termoemisioonvool stabiliseeruda.
4. Mõõtke juhendaja poolt antud anood- ja võrepingete juures lambi anoodvoolu tugevused ning kandke mõõtmistulemused tabelisse.

Jrk. nr.	I anoodpinge U_a'				II anoodpinge U_a''			
	Võrepinge U_v		Anoodvool i_a		Võrepinge U_v		Anoodvool i_a	
	näit	V	näit	mA	näit	V	näit	mA
1								
.								
.								
15								

5. Joonestage mõõtmistulemuste põhjal trioodi võrekarakteristikud $i_a = f(U_v)_{U_a}$. Kandke graafikule ka mõõtmisvead.
6. Tunnusjoonte sirgjoonelise osa jaoks arvutage parameetrite S , R_1 , D ja μ väärtused.
7. Arvutage võimendustegur μ veel mitme erineva karakteristiku punkti jaoks ja joonestage graafik $\mu = f(U_v)$.

5. Küsimused

1. Selgitage trioodi ehitust.
2. Millal kasutatakse otsese, millal kaudse küttega elektronlampe?
3. Millest sõltub elektronide katoodilt lähtuva emissioonvoolu tihedus?
4. Mis on küllastusvool? Millega on määratud küllastusvoolu väärtus?
5. Mis on lukustuspinge?
6. Millised on trioodi anood- ja võrekarakteristikud?

7. Millest sõltuvad trioodi parameetrid: tõus, läbitavus, võimendustegur?
8. Miks on trioodi võrel tööolukorras tavaliselt negatiivne eelpinge?
9. Millal saame staatilised, millal dünaamilised karakteristikud?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 63, 64, 65, 67.

Савельев И.В. Курс общей физики II. М., 1966, § 75, 78, 102.

ELEKTRONOSTSILLOSKOOP

1. Tööülesanne

Elektronostsilloskoobi ehituse ja kasutamisvõimalustega tutvumine.

2. Töövahendid

Elektronostsilloskoop (30-7), transformaator, reostaat, voltmeeter, helisagedusgeneraator.

3. Töö teoreetilised alused

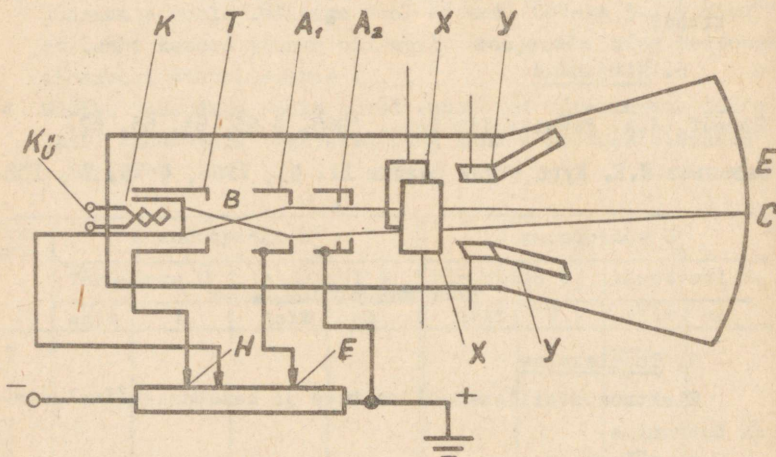
Elektronostsilloskoopi kasutatakse mitmesuguste protsesside uurimisel. Toome siin näidetena mõningad neist:

1) saab uurida muutuvate pingete või voolu tugevuste sõltuvust ajast; 2) saab võrrelda kahe pinge või kahe voolu tugevuse amplituude; 3) saab võrrelda kahe voolu tugevuse, kahe pinge või voolu ja pinge faasinihet; 4) saab jälgida kiiresti kulgevaid protsesse ja mõõta nende parameetreid.

Protsesside uurimisel tekitame ostsilloskoobi ekraanil kõvera, mis kujutab uuritava suuruse ajalist muutumist.

Elektronostsilloskoop koosneb elektronkiiretorust, alaldisest kõikide ostsilloskoobi osade toiteks, muudetava sagedusega kallutuspingegeneraatorist ning uuritavate pingete võimendajatest x- ja y-teljel.

Elektronostsilloskoobi põhiliseks osaks on elektron-kiiretoru. Siin tutvume nn. elektrostaatiliselt toruga, mille puhul elektronide tüürimine toimub elektriväljade abil (vt. joon.50).



Joonis 50

Elektronide allikaks on kaudse küttega katood K. Katoodi kütteniiti Kü ümbritseva metallsilindri esipinnale on kantud leelismuldmetallide (Ba, Sr jt.) oksüüdide kiht, mis kuumendatult eraldabki elektrone. Katoodi ümbritseb väikese avaga varustatud tüüriv elektrood T, millele antakse potentiomeetri kontakti H abil väike negatiivne pinge. Mida suurem on see pinge, seda vähem elektrone läbib ava. Muutes elektroodi T negatiivset pinget, muudame silindri pinnalt eralduvate elektronide arvu, millest sõltub toru fluorestseerival ekraanil E tekkiva elektronkiire jälje C heledus.

Elektroodid A₁ ja A₂ moodustavad anoodide süsteemi ja neile antakse kõrge (800 - 6000 V) positiivne pinge. Elektrivälja toimel, mis tekib katoodile K, tüürivale elektroodile T ja esimesele anoodile A₁ rakendatud pinge tõttu koonduvad katoodi pinnalt eraldunud elektronid pärast tüüri-

va elektroodi ava läbimist punkti B esimese anoodi lähedal. Fokuseerimist saab juhtida potentsiomeetri kontakti F abil. Pärast punkti B elektronkiirte kimp laieneb, sest väljatugevus esimese anoodi sees on lähedane nullile. Esimese ja teise anoodi vahel kõverdab väli uuesti elektronide trajektoore, lähendades neid toru teljele, ja elektronkiirte kimp fokuseerub fluorestseerival ekraanil punkti C väikeseks täpiks. Nende elektroodide toimet elektronkiirte kimbule võib võrrelda optiliste läätsede mõjuga valguskiirtele. See pärast nimetatakse vastavaid elektriväljade süsteeme elektronoptilisteks läätsedeks. Kogu kirjeldatud süsteemi aga, mis koosneb katoodist, tüüriivast elektroodist ja anoodist, nimetatakse elektronkahuriks.

Fluorestseeriv aine, mis on kantud toru sisemisele küljele, hakkab helenduma temale sattuvate kiiresti liikuvate elektronide toimel. Seda nähtust nimetatakse katoodluminestsentsiks. Kiiresti liikuvad elektronid löövad ekraanist välja nn. sekundaarelektrone, mis lendavad anoodile A_2 ja sulevad seega vooluahela. Kui sekundaarelektronide emissioon puuduks, siis omandaks ekraan kiiresti sellise negatiivse pinge, et katoodilt eraldunud elektronid ei suudaks enam lennata ekraanile.

Elektronkiirte tee ja seega ka fokuseerimispunkti asukoha muutmiseks on torus kaks omavahel risti asetatud kallutusplaatide paari: vertikaal- ehk X-plaadid ja horisontaal- ehk Y-plaadid.

Kallutusplaatide paari pingestamisel tekib plaatide vahel elektriväli, mille toimel elektronkiirte kimp hälbib oma algsuunast. Hälve on võrdeline plaatidevahelise pingega. X-plaatide pingestamisel kaldub kiirte kimp horisontaalsuunas, Y-plaatide pingestamisel aga vertikaalsuunas.

Andes ühele plaatide paarile võrdlemisi kiire (sagedus vähemalt 10 Hz) vahelduvpinge, näeme ekraanil helendavat vertikaal- või horisontaalsirget sõltuvalt sellest, kumb plaatide paar on pingestatud.

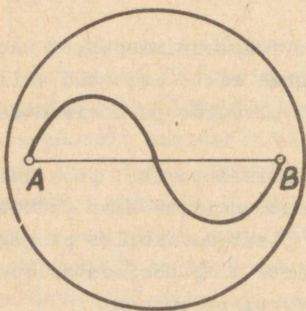
Kui pingestame mõlemad plaatide paarid vahelduvpingega, siis ilmub ekraanile kõver, mis vastab kahe ristsihilise

pingekõvera liitumisele. Siinuseliste pingete liitumise tulemuseks on nn. Lissajous' kujundid.

Anname X-plaatidele ajahetkel t_0 pinge U_x , mis muutub lineaarselt ajaga, s.o. $\frac{dU_x}{dt} = \text{const}$. Sel juhul valgustäpp liigub ekraanil jääva kiirusega ($\frac{dy}{dt} = \text{const}$) horisontaalsuunas. Kui anname Y-plaatidele samal ajahetkel t_0 uuritava pinge $U(t)$, siis näeme ekraanil pingele $U(t)$ vastavat kõverat sõltuvalt ajast ajavahemikus t_0 kuni t_1 , kus t_1 on ajahetk, mil valgustäpp jõuab ekraani äärele.

Kui $U(t)$ on perioodiliselt muutuv funktsioon perioodiga $T = t_1 - t_0$, siis, sundides kiirt hetkel t_1 kiiresti tagasi kalduma algasendisse A (joon.51) ja korrates kallutamist jääva kiirusega kuni punktini B, näeme ekraanil suuruse $U(t)$ muutumist teisel perioodil.

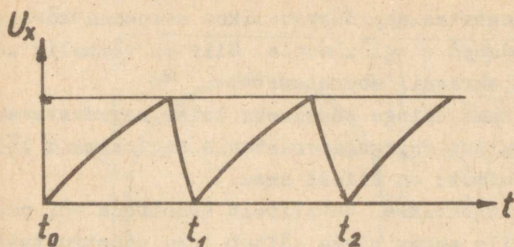
Kui täpi liikumise aeg $t_1 - t_0$ ekraanil punktist A punkti B võrdub funktsiooni $U(t)$ perioodiga, siis, teostades korduvalt sellist kallutamist, näeme ekraanil funktsiooni $U(t)$ muutumise liikumatut pilti ühe perioodi vältel. Kui $t_1 - t_0 = nT$, kus n on täisarv, siis saame ekraanil suuruse $U(t)$ muutumise n perioodi.



Joonis 51

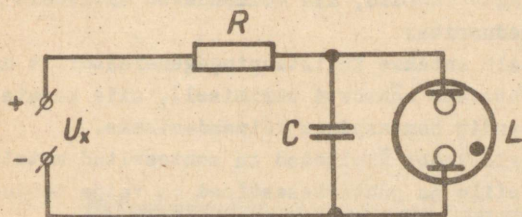
järsu languse ajal tuuakse elektronkiir algasendisse tagasi.

Liikumatu kujutise tekkimiseks ekraanil on tarvilik, et valgustäpi liikumise aeg ekraanil oleks uuritava pinge perioodi kordne ja et X-plaatidele antav pinge valgustäpi jõudmisel punkti B väheneks algsuuruseni. Sellele nõudele vastab nn. hammaspinge perioodiga $t_1 - t_0$ (joon.52). Pingele aeglase tõusu vältel toimub kõvera kujutamine ekraanil ja



Joonis 52

Hammaspinge saamiseks on ostsilloskoopi monteeritud kallutuspingegeneraator. Lihtsaima kallutuspingegeneraatori skeem on kujutatud joonisel 53. Pinge lülitamisel laadub



Joonis 53

R - takistus, C - kondensaatori mahtuvus, t - lülitamisest möödunud aeg ja e - naturaallogaritmide alus.

Pinge tõus lakkab huumlambi L süttimispinge U_s saabumisel. Lambi süttimisel tema takistus langeb järsku ja kondensaator tühjeneb läbi huumlambi. Pinge kondensaatoril langeb eksponentsiaalselt kuni huumlambi kustumispingeni U_k . Pärast lambi kustumist algab kondensaatori laadumine uuesti. Sel viisil saame ligikaudu hammaspinge, kus üksikud pingekõvera lõigud on eksponentkõverad. Kui $R \gg R_1$, kus R_1 on süttinud huumlambi sisetakistus, siis pinge tõusu ajavahemik T on märgatavalt suurem languse ajavahemikust T_1 .

Kui hammaspinge ja uuritava pinge perioodid on võrdsed ja uuritava pinge kordub täpselt, siis saame ekraanil seisva kujutise. Kui need tingimused ei ole täidetud, siis liigub kujutis ühes või teises suunas.

kondensaator C ja pinge kondensaatoril tõuseb eksponentsiaalselt seaduse

$$U = U_B (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

järgi, kus U ja U_B on vastavalt kondensaatori ja pingegaallika pinged,

Skeemi parameetrite vastava valikuga on võimalik saavutada olukord, kus teatavas sagedusvahemikus eksponentkõvera lõigud on väga lähedased sirglõikudele. Siis on võimalik uuritavat kõverat saada ekraanil moonutuseta.

Sirglõikudega hammaspinge saamiseks laias sagedustevahemikus kasutatakse kallutuspingegeneraatoris keerukamaid lülitusi, kuid nende põhimõte on siiski sama.

Alaldajatena kasutatakse tavaliselt kenotrone või pooljuhtalaldeid. Anoodile antav pinge sõltub toru konstruktsioonist ja on 800... 6000 V. Sama alaldi abil pingestatakse ka toru teised elektroodid.

Kallutuspingegeneraatori ja võimendite toiteks on ostsilloskoobis tavaliselt teine alaldi.

Enamikul ostsilloskoopidel on kaks võimendit - eraldi X- ja Y-plaatidele antavate pingete võimendamiseks. Need on tavalised vahelduvpingevõimendid, mis võimendavad ühtlaselt kogu kasutatavas sagedusribas.

Kui X-plaatidele antakse kallutuspingegeneraatorilt hammaspinge (ajast sõltuvate nähtuste uurimisel), siis kasutatakse x-telje võimendit hammaspinge võimendamiseks.

Elektronostsilloskoobi üksikosad on monteeritud metallkastis asuvale šassiile ja juhtimisseadised on välja toodud esiplaadile (vt.foto ja skeem joonisel 54).

Kiirte kõrvalekalde mõõtmise hõlbustamiseks võib ekraani ette asetada läbipaistva ruutvõrgu.

Ostsilloskoobil on ka sünkronisatsiooniseadis. Sünkronisatsiooniseadise abil hoitakse uuritava pinge ja hammaspinge sageduste suhe konstantne, mis võimaldab ekraanil saada liikumatut kujutist.

Ostsilloskoobi 30-7 esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid:

- 1) elektronkiiretoru ekraan;
- 2) võrgulüliti;
- 3) elektronkiire (helendava täpi) lüliti (elektronkiir lülitatakse sisse 2...3 minutit pärast aparadi sisselülitamist; see aeg on vajalik toiteseadme lampide kuumenemiseks);

4) helendava täppa (kujutise) heleduse regulaator (muudab pinget tüüriaval elektroodil T);

5) kiire teravustaja;

6) kiire nihutaja y-teljel;

7) kiire nihutaja x-teljel;

8) sünkroniseeriva pinge amplituudi regulaator kõikide sünkronisatsiooniliikide jaoks;

9) sünkroniseerivate pingeallikate ümberlüüti: sünkronisatsioon välisest pingeallikast, sünkronisatsioon võrgust ja sisemine sünkronisatsioon kallutuspingegeneraatori ahelast;

10) klemm välise sünkronisatsiooni ühendamiseks;

11) kallutuspinge pidev reguleerija;

12) kallutuspingegeneraatori sageduse astmeline lüüti 2 Hz kuni 50 KHz. Kui lüüti on näiteks asendis 7, siis kallutuspinge pidev reguleerija 11 katab vahemiku 7 Hz kuni 30 Hz (arv paremal) jne. Asendis "ВНХМ." on kallutuspingegeneraator välja lülitatud ja x-teljele antav signaal antakse võimendi kaudu X-kallutusplaatidele;

13) y-telje klemmid }
14) x-telje klemmid } uuritava pinge ühendamiseks;

15) y-telje võimendi võimenduse pidev regulaator;

16) y-telje võimendi võimenduse astmeline regulaator;

17) x-telje võimendi võimenduse pidev regulaator;

18) kontrollsignaali klemm (50 Hz ja 2,5 V);

19) maandusklemmid;

20) signaallamp.

Ostsilloskoobi tagaseinal on klemmilaud, mille klemmid on otseühenduses kallutusplaatidega. Normaalses tööolukorras on kallutusplaadid ühendatud võimendite väljunditega.

Samal klemmilaul asuvad klemmid kiire heleduse moduleerimiseks (vajaduse korral). Normaalses tööolukorras on heledust tüüriav elektrood ühendatud heleduse regulaatoriga.

Enne ostsilloskoobi võrku lülitamist tuleb tutvuda elektroniiretoru ehitusega, ostsilloskoobi kirjeldusega ja lülitite ning regulaatorite ülesannetega. Töö protokollis tuleb joonistada esiplaat lülitite ja regulaatorite tähendustega. Alles pärast seda võib tutvuda ostsilloskoobiga tööolukorras.

Toru ekraani riknemise vältimiseks ei tohi helendavat täppi hoida pikemat aega ühel kohal ja tema heledus peab olema võimalikult väike.

Sõltuvalt elektronkiiretoru ehitusest kaldub elektronkiir kõrvale erineva suuruse võrra ühe ja sama pinge korral, järelikult erinevate tüüpide korral on elektronkiiretoru tundlikkus erinev.

Elektronostsilloskoobi tundlikkus pinge järgi võrdub arvuliselt elektronkiire kõrvalekaldega ekraanil, kui muudame pinget kallutusplaatidel 1 V võrra.

Kuna sisendpinge antakse kallutusplaatidele läbi võimendi, siis me ei saa vahetult mõõta pinget kallutusplaatidel. Seepärast määratakse tundlikkus sisendpinge suhtes valemist

$$\gamma = \frac{L}{2 \sqrt{2} \cdot U_e},$$

kus L on helenduva joone pikkus ekraanil, U_e - sisendisse antava vahelduvvoolu pinge efektiivväärtus, $\sqrt{2} \cdot U_e$ - vahelduvpinge amplituud, $\frac{L}{2}$ - elektronkiire kõrvalekalde amplituud.

4. Töö kõik

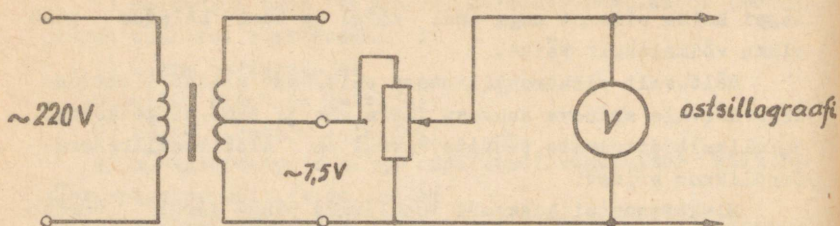
Töösse kuuluvad järgmised harjutused:

- 1) ostsilloskoobi tundlikkuse γ määramine x- ja y-teljel;
- 2) heligeneraatori pinge mõõtmine mitmel sagedusel;
- 3) Lissajous' kujundite uurimine;
- 4) ostsilloskoobi kallutuspingegeneraatori kalibreerimine:

Praktikumi juhendaja valikul tuleb nendest sooritada 2...3 harjutust.

4.1. Ostsilloskoobi tundlikkuse määramine x- ja y-teljel

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolliga mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number ning tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem ja täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv.
2. Koostage järgmine skeem (joon.55):



Joonis 55

Ühendage skeemi väljund ostsillograafi maandus- ja soovitava telje sisendklemmiga.

3. Lülitage kallutuspingegeeneraator välja. Laske kontrollida skeemi ja lülitage vool sisse, fookuseerige kiir ning tehke mõõtmised konstantsete sisendpingete puhul.
4. Esmalt määrake ostsilloskoobi tundlikkuse γ olenevus kasutatavast võimendusest N , s.o. kalibreerige ostsilloskoobi võimendust reguleeriva potentsiomeetri skaala. N on siin x - või y -teljele vastava potentsiomeetri skaalalt võetav näit. Selleks pöörake potentsiomeeter suurimale võimendusele vastavasse asendisse ($N = 10$) ja valige reostaadi abil U_e väärtus nii, et ostsilloskoobi ekraanil saadakse maksimaalse, kuid siiski veel mõõdetava pikkusega joon. Seejärel fikseerige kõigile potentsiomeetri skaala täisarvulistele jaotistele vastavate joonte pikkused (11 tulemust).
5. Ostsilloskoobi tundlikkus ei või oleneda ostsilloskoobile antava signaali suurusest. Seepärast on tarvis teostada vastav kontroll. Selleks muutke reostaadiga sisendpinget alates 0-väärtusest kuni maksimaalse võimaliku väärtuse-ni, fikseerides kümnele asendile vastavate pingete ja ekraani kujutise pikkuste väärtused. Sooritage katse konstantse võimenduse juures, mille määrab juhendaja.

Mõõtmistulemused kandke järgmistesse tabelitesse:

Tundlikkuse määramine x-telje suhtes.

Sisendpinge $U_x = \dots V$

Jrk. nr.	L (mm)	Võimendus N_x	γ_x (mm/V)
1.			
.			
.			
11.			

Tundlikkuse määramine sõltuvalt sisendpingest.

Võimendus $N_x = \dots$

Jrk. nr.	L (mm)	U_x (V)	γ_x (mm/V)
1.			
.			
.			
.			
10.			

Teostage mõõtmised ja koostage analoogiline tabel veel tundlikkuse määramiseks y-telje suhtes, jättes vastavalt juhendaja korraldusele konstantseks kas sisendpinge U_y või võimenduse N_y .

6. Saadud tulemuste põhjal joonistage graafikud:

$$\gamma_x = f(N_x) ;$$

$$\gamma_x = f(U_x)$$

$$\text{ja} \quad \gamma_y = f(N_y)$$

$$\text{või} \quad \gamma_y = f(U_y).$$

4.2. Heligeneraatori pinge mõõtmine mitmel sagedusel (20 - 20 000 Hz)

7. Lülitage mõõdetav pinge x-telje klemmidele ja mõõtke helenduva joone pikkus millimeetrites. Kasutades eelnevalt määratud ostsilloskoobi tundlikkust, arvutage otsitava pinge amplituud valemi

$$U_x = \frac{L}{2 \sqrt{2} \gamma_x}$$

järgi.

Mõõtmiste tulemused kandke järgmisesse tabelisse:

Jrk. nr.	Sagedus f (Hz)	Võimendus N_x	L (mm)	U_x (V)
1.				
.				
.				
.				
5.				

8. Saadud tulemuste põhjal joonestage graafik $U_x = f(f)$.

4.3. Lissajous' kujundite uurimine

9. Andke x-teljele pinge heligeneraatorist ja y-teljele klemmist "kontrollsignaal" standardsignaali (50 Hz ja 2,5 V). Kui ostsilloskoobil puudub vastav klemm, siis tuleb kasutada vajaliku pinge saamiseks joonisel 55 kujutatud skeemi. Ekraanil tuleb saada liikumatud Lissajous' kujundid vastavalt sageduste suhtele 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5, 2:3, 3:4.

Vastavad kujundid joonestada protokollis.

4.4. Ostsilloskoobi kallutuspingegeneraatori kalibreerimine

Kallutuspingegeneraatori kalibreerimine tähendab generaatori sageduse leidmist sõltuvalt generaatori sageduse astmelise ja pideva reguleerimise nupu asendist. Kalibreerimine tuleb teha astmelise lüliti 12 3...5 asendis ja pideva reguleerimise nupu 11 kõigis kümnes asendis.

10. Mõõtmisteks lülitage kallutuspingegeneraator etteantud sageduste piirkonnale. Sünkroniseeriva pinge regulaator 8 lülitage välja (äärmine vasakpoolne asend).
11. y-teljele andke sinusoidaalne pinge heligeneraatorist. Valige signaali sagedus nii, et kallutuspingegeneraatori pideva reguleerimise nupu valitud asendi korral oleks ostsilloskoobi ekraanil täisarv sinusoidaalset võnget. Kallutuspingegeneraatori sagedus f_x leitakse heligeneraatori sageduse f_g kaudu:

$$f_x = \frac{f_g}{n},$$

kus n on täisvõngete arv ekraanil.

Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Jrk. nr.	f_g (Hz)	n	f_x (Hz)
1.			
.			
.			
.			
10.			

12. Saadud tulemuste põhjal joonestage graafik, kandke abstsissiteljele pideva reguleerimise nupu asendid ja ordinatiteljele - mõõdetud sagedused.

5. Küsimused

- Elektronkiiretoru ehitus.
- Ostsilloskoobi ehitus ja tööpõhimõtte.
- Milleks võib kasutada ostsilloskoopi?
- Milleks on vajalik kallutuspinge ja millist pinget selleks kasutatakse?
- Millal saadakse ostsilloskoobi ekraanil püsiv kujutis? Milles seisneb kiire sünkroniseerimine?

6. Kummalegi plaatide paarile rakendatakse hammaspinge, kusjuures vertikaalsetele 3 korda suurema sagedusega kui horisontaalsetele. Milline kujutis tekib ostsilloskoobi ekraanil?
7. Kummalegi plaatide paarile rakendatakse hammaspinge, kusjuures sagedus horisontaalplaatidel on 2,5 korda suurem kui vertikaalsetel. Milline kujutis tekib ostsilloskoobi ekraanil?
8. Kas ja kuidas on võimalik mõõta vahelduvvooluvõrgu sagedust?
9. Kuidas on võimalik mõõta pinget ostsilloskoobiga?
10. Mis on ostsilloskoobi tundlikkus?
11. Kas ostsilloskoobi tundlikkus sõltub kiirendavast anoodpingest? Miks?
12. Miks esinevad ostsilloskoobi tundlikkuse arvutusvalemis arvulised kordajad?
13. Milline on kujutis ekraanil, kui lülitame sisendile patarei?
14. Leida elektronide ekraanile langemise kiirus antud kiirendava pinge korral.
15. Kuidas mõjutab Maa magnetväli kujutist ostsilloskoobi ekraanil? Millised moonutused tekivad?
16. Milleks on vajalik regulaator "sünkroniseerimine"?
17. Kui tundlikkuse karakteristik on mittelineaarne, millised on siis ekraanil tekkiva kujutise moonutused?
18. Kuidas määrata pinge ja voolu vahelist faasinihet?

6. Kirjandus

Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 113.

Hendre, I. Füüsika katseid elektronostsilloskoobi ja heligeneraatoriga, Tln., 1968.

Калашников С.Г. Электричество. М., 1964, §2II, стр.462...464.

Фрин С.Э., Тиморева А.В. Курс общей физики II. М., 1961, §208, стр. 463...467.

Физический Энциклопедический Словарь, Т.3. Осциллограф. Осциллограф электроннолучевой. Осциллографическая трубка. М., 1963, стр. 54I...545.

ELEKTROLÜÜS

1. Tööulesanne

Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine.

2. Töövahendid

Alalisvoolu allikas, juhtmed ühenduste tegemiseks, ampermeeter, stopper ja anum vasevitrioli lahusega, milles asuvad vasest elektrodid (voltameeter).

3. Töö teoreetilised alused

Anumat, milles kulgeb elektrolüüs, nimetatakse volta-meetriks ehk elektrolüüseriks, vedelikku ennast aga elektrolüüdiks. Elektrolüüdis on osa lahustunud aine molekulide disotsieerunud ioonideks. Protsessi, mille puhul aine neutraalsed molekulid jagunevad vedelikes positiivseteks ja negatiivseteks ioonideks, nimetatakse elektrolüütiliseks disotsiatsiooniks. Näiteks on CuSO_4 vesilahuses CuSO_4 molekulid jagunenud Cu^{++} ja SO_4^{--} ioonideks.

Kui elektrolüüti asetada vooluallikaga ühendatud elektrodid, siis hakkavad positiivselt laetud ioonid lahuses tekkinud elektrivälja mõjul liikuma katoodi ja negatiivselt laetud ioonid anoodi poole.

Katoodiga kokkupuutuvad positiivselt laetud vase ioonid (Cu^{++}) annavad katoodile oma elektrilaengu ja sadestuvad teataval vase aatomina. Anoodile jõudnud negatiivselt laetud SO_4^{--} ioonid tõmbuvad anoodist välja vase ioonid, mille tagajärjel tekivad CuSO_4 molekulid, mis omakorda disotsieeruvad vees. Seega toimub ioonide kaudu vase ülekandumine anoodilt katoodile.

Elektrolüüsi nähtust uuris Faraday, kes avastas kaks elektrolüüsi põhiseadust (1834.a.).

Vastavalt Faraday esimesele seadusele on ükskõik kummal elektroodil eralduva aine mass võrdeline elektrolüüti läbiva elektrilaenguga q :

$$m = k q.$$

Tegurit k nimetatakse eraldunud aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks. Aine elektrokeemiline ekvivalent võrdub elektrootodil eralduva aine massiga, kui elektrolüüti läbib ühekuloniline laeng. Elektrokeemilist ekvivalenti väljendatakse tavaliselt mittesüsteemsete ühikute abil - grammides või milligrammides kuloni kohta. Konstantse voolu tugevuse I korral

$$m = k I t,$$

kus t on voolu kulgemise aeg.

Faraday teise seaduse võib sõnastada lühidalt järgmiselt: kõikide ainete elektrokeemilised ekvivalendid on võrdelised nende ainete keemiliste ekvivalentidega. Kuna keemiliseks ekvivalendiks nimetatakse aatom- või molekulmassi M jagatist valentsiga Z , siis

$$k = c \frac{M}{Z}.$$

Faraday teises seaduses esineva võrdeteguri C asemel kasutatakse tema pöördväärtust

$$F = \frac{1}{C}.$$

Viimast nimetatakse Faraday arvuks. Mõlemad seadused koos võib kirjutada järgmiselt:

$$m = \frac{1}{F} \frac{M}{Z} q. \quad (1)$$

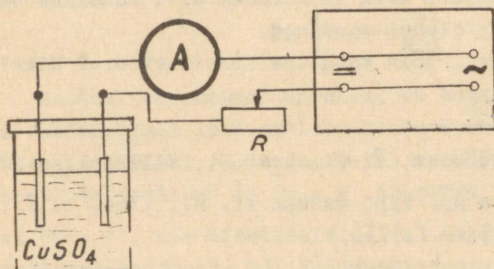
Teatavasti keemilise ekvivalendiga arvuliselt võrdset ainehulka kilogrammides (grammides) nimetatakse kilogrammekvivalendiks (kg-ekv pro grammekvivalendiks g-ekv). Seega siis, kui elektrolüüsil eraldub 1 kilogrammekvivalent, s.o. $m = \frac{M}{Z}$ kg mistahes ainet, siis seosest (1) saame, et $F = q$. Seega on Faraday arv võrdne elektrolüüti läbiva laenguga, mis eraldab ühe kilogrammekvivalendi ainet. Katsetest nähtub, et $F = 9,65 \cdot 10^7 \frac{C}{\text{kg-ekv}} (= 96\,500 \frac{C}{\text{g-ekv}})$.

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolli mõõteriista nimetus, inventari-

või tehase number ning tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem ja täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv.

2. Puhastage elektrodid peenikese liivapaberiga. Pärast seda ei tohi sõrmedega puudutada puhastatud pinda, sest elektrodidele jäävad sõrmejäljed takistavad vase sadestumist.
3. Kaaluge katood ja anood analüütilistel kaaludel 1 mg täpsusega.
4. Asetage puhastatud elektrodid CuSO_4 vesilahusesse ja ühendage vastavalt skeemile joonisel 56, kuid vooluallikaga mitte ühendada. Paluge juhendajal skeemi kontrollida.



5. Laske voolu läbi volta-meetri 15...20 minuti vältel. Registreerige voolu tugevuse I väärtused iga 2...3 minuti tagant ja võtke neist aritmeetiline keskmine.

Joonis 56

6. Loputage anoodi ja katoodi algul kraani all, siis destilleeritud veega ja kuivatage. Kaaluge elektrodid uuesti. Teoreetiliselt peaks mõlema elektroodi massi muutused olema võrdsed. Erinevuse korral leidke massi muutuse aritmeetiline keskmine.

Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

	Anood	Katood
Mass enne elektrolüüsi		
Mass pärast elektrolüüsi		
Erinevus	$m_1 =$	$m_2 =$

$$\text{Eraldunud vase hulk } m = \frac{m_1 + m_2}{2} = \dots$$

$$\text{Aeg } t = \dots \text{ s}$$

$$\text{Voolu tugevus } I = \dots \text{ A}$$

$$\text{Vase elektrokeemiline ekvivalent } k = \frac{m}{It} = \dots$$

5. Küsimused

1. Millist laengut kannavad metalli ja vesiniku ioonid?
2. Mispärast ei olene aine elektrokeemiline ekvivalent temperatuurist ega lahuse kontsentratsioonist?
3. Missuguste ainete vesilahused on elektrolüütideks?
4. Mida nimetatakse dissotsiatsioonistmeks?
5. Milline on Avogadro arvu ja Faraday arvu vaheline seos?
6. Sõnastage elektrolüüsi seadused.
7. Kas elektrolüüsil võib kasutada vahelduvvoolu? Miks?

6. Kirjandus

Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965., VIII ptk. § 70...73.

Яворский Б.М. и др. Курс физики II. М., 1964, т. XI,
§ II.1...II.3.

KONDENSAATORI LAADUMINE JA TÜHJENEMINE

1. Tööülesanne

Kondensaatorite laadumis- ja tühjenemiskõverate koostamine. Takistuse ja mahtuvuse määramine laadumis- ja tühjenemiskõverate abil.

2. Töövahendid

Alalisvooluallikas, voltmeeter, mikroampermeeter, stopper, lülitid, ühendusjuhtmed, mõõdetavad kondensaatorid ja takistid.

3. Töö teoreetilised alused

Kui vooluringi on kondensaatoriga järjestikku ühendatud ainult aktiivtakisti, siis väheneb tema laadumis- ja tühjenemisvoolu tugevus ajas eksponentsiaalseaduse kohaselt:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad (1)$$

kus I_0 on voolu tugevus vooluringi sulgemise momendil ($t=0$), I - voolu tugevus ajamomendil t , R - vooluringi aktiivtakistus, C - kondensaatori mahtuvus, e - naturaalogaritmide alus.

Logaritmites võrrandi (1) mõlemad pooli alusel e , saame:

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{t}{RC}$$

või

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\frac{t}{RC}. \quad (2)$$

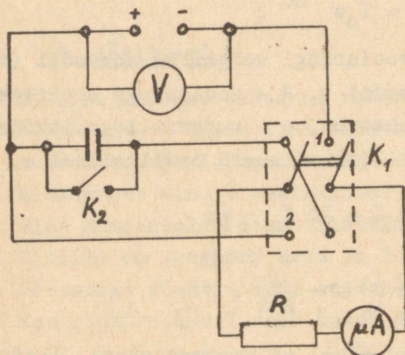
Saadud tulemustest on näha, et kondensaatori laadumisel või tühjenemisel läbi aktiivtakistuse on seos voolu tugevuse naturaalogaritmi ja laadumis-tühjenemisaja vahel lineaarne. Graafik teljestikus $\ln \frac{I}{I_0} - t$ on sirge tõusuga $\frac{1}{RC}$. Suurust $RC = \tau$, mis sisuliselt näitab aega, mille jooksul kondensaatori laadumis- või tühjenemisvoolu tugevus väheneb $e = 2,71$ korda, nimetatakse kontuuri ajakonstandiks ehk relaksatsiooniajaks.

Kui võrrandiga (2) määratud sirge on joonestatud katseandmete põhjal, siis võib selle abil lihtsalt määrata relaksatsiooniaja τ ning ka kondensaatori mahtuvuse C . Relaksatsiooniajaks on abstsisssteljelt võetud aja t väärtus, millele vastav ordinaadi väärtus $\ln \frac{I}{I_0}$ on võrdne -1 -ga. Tõepoolest, kui $t = \tau = RC$, siis vastavalt võrrandile (2) peab $\ln \frac{I}{I_0} = -1$. Leitud τ väärtuse kaudu saab arvutada mahtuvuse C suuruse, kui ahela aktiivtakistus R on teada:

$$C = \frac{\tau}{R}.$$

Kui takistus R on tundmatu, siis tuleb lisaks mõõta veel alalispingeallika klemmipinget U ning arvutada seejärel aktiiv-

takistuse suurus Ohmi seaduse järgi. Voolu tugevuseks selles arvutuses tuleb võtta I_0 , kuna kondensaatorist ja aktiivtakistist koosnevas vooluringis on voolu tugevus vooluringi sulgemise hetkel määratud ainult aktiivtakistusega.



Joonis 57

Lüliti K_2 kasutatakse kondensaatori lühistamiseks. See on vajalik I_0 täpsaks ning mugavaks mõõtmiseks. Lühistamata kondensaatori korral ei saa I_0 väärtust täpselt mõõta, sest sisselülitamise momendil läheb mõõteriista osuti inertsi tõttu üle tegelikule väärtusele vastavast näidust, hiljem aga hakkab voolu tugevus juba kiiresti vähenema.

Skeemi toitva alalispinge väärtuse mõõdab voltmeeter.

4. Töö käik

1. Tutvuge töös kasutatavate mõõteriistadega ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number ning tüüp, vooluliik, mõõtesüsteem ja täpsusklass, mõõtepiirkond, jaotiste arv skaalal.
2. Ühendage seadmed vastavalt joonisel 57 esitatud skeemile, kasutades juhendaja poolt näidatud väärtusega takisteid ja kondensaatoreid.

Võrrandite (1)

ja (2) kontrolliks ning tööülesande täitmiseks kasutame joo-
nisel 57 esitatud ühendusskeemi.

Lüliti K_1 on ühendatud skeemi nii, et pärast kondensaatori ümberlülitamist laadumisel tühjenemisele lülituks ümber ka mikroampermeeter, mille tulemusena voolu suund läbi mikroampermeetri jääb muutu-

3. Paluge juhendajal ühendusi kontrollida.
4. Viige lüliti K_1 asendisse 1 (lüliti asend, mille juures toimuks kondensaatori laadumine), lühistage kondensaator võtmega K_2 ning määrake voolu tugevuse algväärtus I_0 .
5. Avage lüliti K_2 , alustades samast hetkest ka aja mõõtmist. Registreerige voolu tugevuse väärtused I_1 esimese 1,5 minuti jooksul iga 15 sekundi järel, hiljem iga 30 sekundi tagant, kuni vool muutub nulliks.
6. Viige lüliti K_1 asendisse 2 ja mõõtke tühjenemisvoolu tugevuse väärtused samade ajavahemike tagant nagu laadumiselgi.
7. Korrake laadumis- ja tühjenemisvoolu (I_2) mõõtmisi sama takisti ja kondensaatori jaoks. Tulemused kandke järgmise tabelisse ja leidke keskmine voolu tugevus I_k :

$R = \dots\dots\dots$, $C = \dots\dots\dots$, $\tau = \dots\dots\dots$, $I_0 = \dots\dots\dots$, $U = \dots\dots\dots$

Aeg	L a a d u m i n e						
	I_1	I_2	I_k	$\frac{I_k}{I_0}$	$\Delta \frac{I_k}{I_0}$	$\ln \frac{I_k}{I_0}$	$\Delta \ln \frac{I_k}{I_0}$

Aeg	T ü h j e n e m i n e						
	I_1	I_2	I_k	$\frac{I_k}{I_0}$	$\Delta \frac{I_k}{I_0}$	$\ln \frac{I_k}{I_0}$	$\Delta \ln \frac{I_k}{I_0}$

8. Mõõtkte laadumis- ja tühjenemisvoolu väärtused tundmatu takistuse R_x ja mahtuvuse C_x korral. Kui tundmatu mahtuvusega kondensaatoriks on elektrolüütkondensaator, siis jälgige ühendamisel polaarsust. Valesti ühendatud elektrolüütkondensaator rikneb.

Mõõtmistulemused kandke eelnevaga analoogilisse tabelisse.

9. Joonestage mõõtmistulemuste põhjal graafikud $\frac{I}{I_0} = f(t)$ ja $\ln \frac{I}{I_0} = \varphi(t)$. Kandke $\ln \frac{I}{I_0}$ viga graafikule ning võrrelge seejärel laadumis- ja tühjenemiskõveraid ning nende vastavust võrranditele (1) ja (2).
10. Määrake tuntud takistuse ja mahtuvusega vooluringi jaoks relaksatsiooniaeg graafikult ning võrrelge seda arvutatuga $\tau = R C$. (Kui praktilistest mõõtmistest saadud sirge $\ln \frac{I}{I_0} = \varphi(t)$ ei läbi 0-punkti, siis ei tohi τ väärtuseks võtta abstsisssteljelt aja t väärtust, millele vastav ordinaat on -1 , vaid aeg τ tuleb arvutada sirge $\ln \frac{I}{I_0} = \varphi(t)$ tõusu kaudu.)
11. Kasutades mõõtmistulemusi ning tühjenemis-laadumiskõveraid, arvutage R_x , τ_x , C_x .

5. Küsimused

- Elektrimahtuvus ja tema ühikud.
- Kondensaatorite tüübid ja nende ehitus.
- Kondensaatorite järjestikune ja paralleelne ühendamine.
- Laetud kondensaatori energia.
- Millise seaduse järgi muutub pinge kondensaatori laadumisel ja tühjenemisel?
- Kondensaatori laadimise algusest on möödunud ajavahemik $n\tau$. Mitu korda on vähenenud laadimisvool?
- Mis on relaksatsiooniaeg?
- Kuidas muutuvad graafiku $\frac{I}{I_0} = f(t)$ ja $\ln \frac{I}{I_0} = \varphi(t)$, kui kasutada teistsuguse klemmipingega vooluallikat?
- Millega seletada, et elektrolüütkondensaatori korral laadimis- ja tühjenemiskõverad langevad omavahel halvemini kokku kui teist liiki kondensaatorite korral?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 40, 21...23, 127.

Савельев И.В. Курс общей физики. т. II М., 1964, § 24...29, 59.

Калашников С.Г. Электричество. М., 1964, § 80, 219.

VAHELDUVVOOLU VÕIMSUSTEGUR

1. Tööülesanne

Vahelduvvoolu võimsusteguri ja pooli induktiivsuse või kondensaatori mahtuvuse määramine.

2. Töövahendid

Voltmeeter, ampermeeter, sagedusmõõtja, induktsioonipool või kondensaator, reostaat, alalisvoolusild.

3. Töö teoreetilised alused

Vaatame vooluahelat, millesse on järjestikku ühendatud kondensaator mahtuvusega C , aktiivtakisti takistusega R ja induktsioonipool induktiivsusega L (vt. joonis 58).

Olgu ahela otstele rakendatud sinusoidaalne vahelduvpinge:

$$U = U_m \sin \omega t, \quad (1)$$

kus U_m on pinge amplituudväärtus, ω - nurk- e. ringsagedus ja t - aeg. Vastavalt Ohmi seadusele mittehomo-geense ahela osa kohta on igal aja- hetkel t

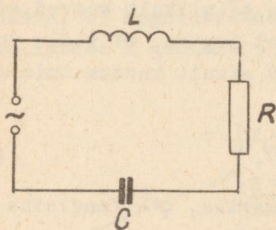
$$U_R + U_C - \mathcal{E}_L = U, \quad (2)$$

kus U_R on pinge aktiivtakistil, U_C - pinge kondensaatoril ja $\mathcal{E}_L$ - omainduktsiooni emf.

Pinge aktiivtakistil

$$U_R = IR,$$

kus I on voolu tugevus ahelas ajahetkel t .



Joonis 58

Pinge kondensaatoril

$$U_C = \frac{q}{C},$$

kus q on kondensaatori laeng samal ajahetkel t .

Poolil indutseeritud omainduktsiooni emj.

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{dI}{dt}.$$

Seega

$$L \frac{dI}{dt} + IR + \frac{q}{C} = U_m \sin \omega t. \quad (3)$$

Võrrandi (3) alusel saab leida ahelas voolu tugevuse sõltuvuse ajast, sest diferentseerides võrrandit (3) aja järgi ning arvestades, et $I = \frac{dq}{dt}$, saame voolu tugevuse arvutamiseks 2. järku diferentsiaalvõrrandi:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = \omega U_m \cos \omega t. \quad (4)$$

Sellise mittehomogeense diferentsiaalvõrrandi lahend koosneb vastava homogeense võrrandi üldlahendist ja antud mittehomogeense võrrandi erilahendist. Lahendamisel selgub, et üldlahend kirjeldab kiiresti sumbuvaid võnkumisi. Kuna viimased ahelas mõninga aja möödudes täielikult kaovad, siis võime pikemaajaliste vaatluste korral lugeda, et voolu tugevus vaadeldavas ahelas on määratud ainult kustumatuid sundvõnkumisi kirjeldava erilahendiga:

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi), \quad (5)$$

kus I_m on voolu tugevuse amplituudväärtus, φ - faasinihe pinge ja voolu tugevuse vahel.

Tähendab teatud aja möödudes pärast võrrandiga (1) esitatud pinge rakendamist tekib vaadeldavas ahelas sama perioodiga (nurksagedusega) muutuv vool. Üldjuhul ei ole rakendatud pinge ja ahelas tekkiva voolu tugevus samas faasis, s.t. muutudes saavutavad nad sama arenguastme (näit. maksimumi) erinevatel ajahetkedel.

Võrrandi (4) põhjal saame voolu tugevuse amplituudväärtuse I_m ja faasinihke φ jaoks avaldised:

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (7)$$

Analooogia põhjal nimetatakse seost (6) Ohmi seaduseks vahelduvvoolu kohta, suurust

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (8)$$

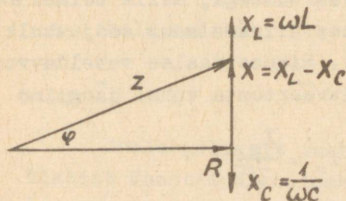
aga vooluahela kogutakistuseks vahelduvvoolule e. impedantsiks.

Suurusi $X_L = \omega L$ ja $X_C = \frac{1}{\omega C}$ nimetatakse vastavalt induktiivseks ja mahtuvuslikuks takistuseks ning nende vahet $X = |X_L - X_C|$ reaktiiv- e. näivtakistuseks.

Esitades valemi (8) kujul

$$Z^2 = R^2 + X^2,$$

näeme, et kogutakistus Z avaldub aktiivtakistuse R ja reaktiivtakistuse X geomeetrilise summana.



Joonis 59

Nagu näha valemist (7) ja jooniselt 59, sõltub faasinihe φ ahela induktiivsusest ja mahtuvuslikust takistusest ning võib olla positiivne ($X_L > X_C$), negatiivne ($X_L < X_C$) või null ($X_L = X_C$). Vastavalt sellele jääb vool faasilt pingest maha, on ees või siis samas faasis.

Kuna vahelduvvoolu tugevus ja pinge pidevalt muutuvad, siis on vahelduvvooluvõimsus ($N = IU$) igal ajamomendil erinev.

Seepärast on vahelduvvoolu korral mõtet rääkida ainult keskmisest võimsusest. Perioodilise voolu korral saame keskmise võimsuse, kui jagame perioodi jooksul tehtud töö A perioodi kestusega T.

Üldiselt on voolu töö leitav valemiga

$$dA = U I dt.$$

Perioodi jooksul tehtud töö

$$A = \int_0^T U I dt.$$

Seega keskmine võimsus perioodi kohta

$$\begin{aligned} N &= \frac{1}{T} \int_0^T U I dt = \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin (\omega t - \varphi) dt = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi. \end{aligned}$$

Suurust $\cos \varphi$ nimetatakse vahelduvvoolu võimsusteguriks ning ta näitab, et vahelduvvooluvõimsus sõltub peale pingest ja voolu tugevusest ka faasinihkkest nende vahel.

Vahelduvvoolu mõõteriistad mõõdavad tavaliselt mitte pinget ja voolu tugevuse amplituudväärtusi U_m ja I_m , vaid nende suuruste efektiivväärtusi U_e ja I_e . Vahelduvvoolu pinget ja voolu tugevuse efektiivväärtused on võrdsed siisuguste alalisvoolu pinget ja voolu tugevuse väärtustega, mille toimel eraldub aktiivtakistusel igas ajaühikus siisama suur soojushulk nagu antud vahelduvvoolu korralgi. Sinusoidaalse vahelduvvoolu puhul on amplituud- ja efektiivväärtuste vahel järgmine seos:

$$U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \text{ ja } I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Nii on vahelduvvooluvõimsus efektiivväärtuste kaudu arvutatav valemist

$$N = U_e I_e \cos \varphi. \quad (9)$$

Antud töös uurime kas induktsioonpooli ja reostaadi või kondensaatori ja reostaadi järjestikuse ühendamisega saadud vooluahelaid. Määrame neis vahelduvvoolu võimsusteguri $\cos \varphi$ ja faasinihke φ sõltuvuse aktiiv- ja reaktiivtakistusest.

Esimest tüüpi vooluahelatel on märgatav induktiivsus L ja aktiivtakistus R , kusjuures mahtuvuse osa võib arvestamata jätta. Seega on kogu ahela reaktiivtakistus induktiivne ning $X = X_L = \omega L$. Sellises vooluahelas, nagu näha valemist (7), on faasinihe positiivne, s.t. ahelas jääb vool faasilt pingest maha.

Ahela induktiivsuse ja vahelduvvoolu võimsusteguri arvutamiseks mõõdame katseliselt aktiivtakistuse R , pinget ja voolu tugevuse efektiivväärtused U_e ja I_e ning sageduse f . Nüüd võib ahela kogutakistuse Z arvutada Ohmi seadusest vahelduvvoolule:

$$Z = \frac{U_e}{I_e} \quad (10)$$

Vastavalt joonisele 59 on vahelduvvoolu võimsustegur

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \quad (11)$$

Võimsuse N saab arvutada valemi (9) abil, kus faasinihe

$$\varphi = \arccos \frac{R}{Z} \quad (12)$$

Ahela induktiivsuse avaldame valemist (8):

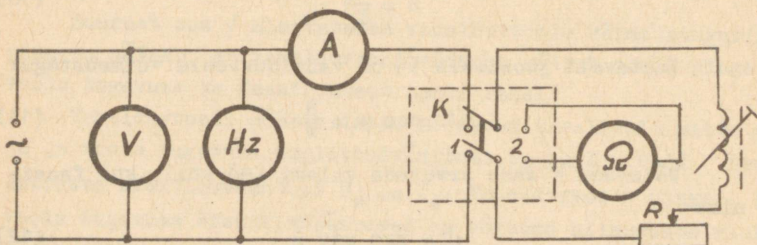
$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f} \quad (13)$$

Analoogiliselt saab uurida ka kondensaatorist ja takistist koostatud vooluahelat. Siis $X = X_C = \frac{1}{\omega C}$. Pinget ja voolu tugevuse vaheline faasinihe on negatiivne, s.t. vool on faasilt pingest ees. Suurused Z , $\cos \varphi$, N ja φ leiame jällegi valemite (10), (11), (9) ja (12) põhjal. Mahtuvuse C avaldame valemist (8):

$$C = \frac{1}{\omega X} = \frac{1}{2\pi f \sqrt{Z^2 - R^2}} \quad (14)$$

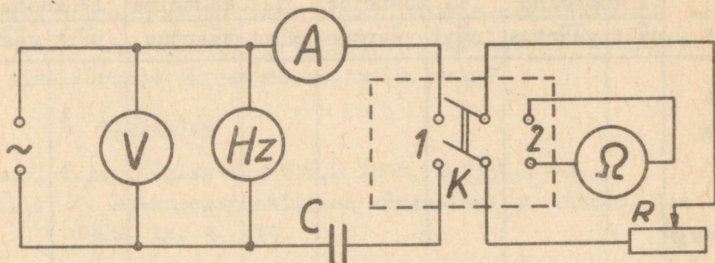
4. Töö kõik

- Küsige juhendajalt konkreetne tööülesanne. Selleks võib orienteeruvalt olla:
 - uurida võimsusteguri sõltuvust aktiivtakistusest, kui reaktiivtakistus $X = \text{const}$;
 - uurida võimsusteguri sõltuvust reaktiivtakistusest, kui aktiivtakistus $R = \text{const}$;
 - uurida võimsusteguri muutumist, kui muutub nii aktiiv- kui ka reaktiivtakistus.
- Tutvuge töös vaja minevate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.
- Tehke ühendused vastavalt tööülesandele kas joonise 60 või 61 põhjal.



Joonis 60

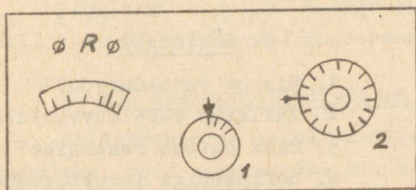
- Mõõtku ahela aktiivtakistus alalisvoolusilla abil. Selleks
 - viige lüliti K asendisse 2,
 - keerake nupp 1 (vt. joonis 62) asendisse 10,
 - leidke nupu 2 pööramisega selline asend, mille puhul galvanomeeter ei annaks sisselülitamisel hälvet (galvanomeetrit võib võtmega sisse lülitada vaid hetkeks). Voolu puudumine galvanomeetris näitab, et sild on tasakaalus. Sillaga mõõdetud ahela takistus on oomides võrd-



Joonis 61

ne nuppude 1 ja 2 näitude korrutisega.

Kui katseks vajalikud ahela aktiivtakistuse väärtused on juhendaja poolt ette antud, siis valige sillal etteantud takistus ning tasakaalustage sild seejärel reostaadi liugkontakti nihutamisega.



Joonis 62

5. Viige lüliti K asendisse 1.
6. Ühendage uuritav ahel pingeallikaga ning mõõtake seejärel pinge ja voolu tugevuse efektiivväärtused U_e ja I_e ning

sagedus f etteantud induktiivsuse L või mahtuvuse C juures.

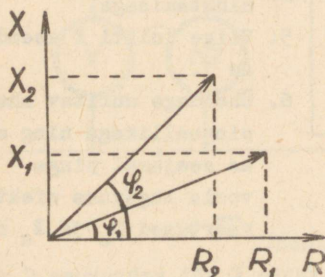
Vool lülitage ahelasse ainult lugemite võtmise ajaks!
Vastupidisel juhul pool ja reostaat soojenevad ning nende takistus muutub.

Katseandmed ja hilisemate arvutuste tulemused kandke alljärgnevasse tabelisse:

Suurus	I mõõtmine		II mõõtmine		III mõõtmine		IV mõõtmine	
	näit	väärtus	näit	väärtus	näit	väärtus	näit	väärtus
I_e								
U_e								
f								
R								
Z								
$\cos \varphi$								
N								
X								
$L \text{ või } C$								

- Muutke vastavalt tööülesandele R , L või C suurst ja tehke uus mõõtmine punktide 4,5 ja 6 kohaselt. Katseandmed kandke samasse tabelisse.
- Konstrueerige iga katse jaoks takistuste kolmnurk (vt. joonis 59), kandes tulemused ühele ja samale RX -teljestikule (vt. joonis 63).

5. Küsimused



Joonis 63

- Mis on vahelduvvool?
- Takistus vahelduvvoolule.
- Mida näitab faasinihe?
- Defineerige induktiivsuse ühik.
- Mis on vahelduvvoolu keskmine võimsus, aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus?
- Kui suur on faasinihe vahelduvvoolu ahelas, kui seal esineb ainult: a) induktiivne takistus, b) mah-

tuvuslik takistus, c) aktiivtakistus.

- Kui suur on keskmine võimsus eelmises küsimuses esitatud juhtudel?
- Mis on vahelduvpinge ja -voolu efektiivväärtused?
- Pingeresonants.

10. Vooluresonants.

11. Mis põhimõttel töötavad vahelduvvoolu mõõteriistad?

12. Kuidas koostatakse elektriliste sundvõnkumiste diferentsiaalvõrrand järjestikuse ahela jaoks?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 139...143.

Schults, K. Elektromagnetilised võnkumised ja lained. Tln., 1966, lk. 9...19.

VAHELDUVVOOLUSILD

1. Tööülesanne

Turvumine vahelduvvoolusilla tööpõhimõttega. Hea isolatsiooniga kondensaatorite mahtuvuse mõõtmine.

2. Töövahendid

Vahelduvvoolusild, heligeneraator, nulliindikaator (ostsilloskoop), mõõdetavad kondensaatorid, ühendusjuhtmed.

3. Töö teoreetilised alused

Sildskeemid on laialt levinud elektriliste mõõtmiste tehnikas. Neid kasutatakse nii elektriliste kui ka mitteelektriliste suuruste (näit. temperatuur, rõhk jne.) mõõtmisel. Viimasel juhul kasutatakse ära mitteelektriliste suuruste mõju mõnede vooluahela parameetritele. Kasutatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolul töötavaid sildskeeme.

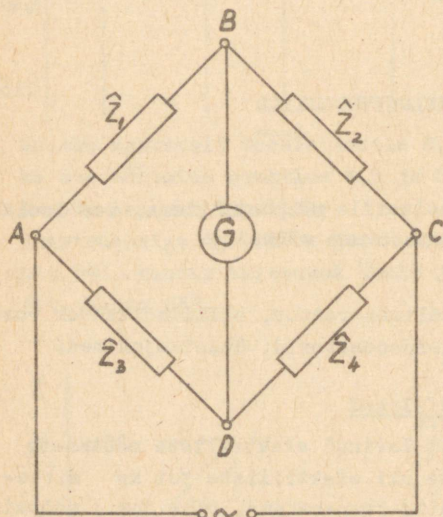
Vahelduvvoolusild on teooria ja tehnilise teostuse poolest alalisvoolusillast keerulisem. Tema eeliseks on aga suuremad rakendusvõimalused ja suurem tundlikkus.

Vahelduvvoolusilla teooriat on lihtne esitada nn. sümbolse e. kompleksmeetodi abil. See meetod võimaldab formaalselt rakendada vahelduvvoolu kohta kõiki alalisvoolu jaoks tuletatud valemeid ja seadusi.

Selle meetodi kohaselt tuleb voolu tugevus, pinge ja takistus esitada kompleksarvudena.

Väga levinud on nn. neljaõlgne vahelduvvoolusild (joon. 64), mille skeem on sarnane Wheatstone'i silla skeemiga. Silla õlgadeks on kompleksed kogutakistused $\hat{Z}_1, \hat{Z}_2, \hat{Z}_3, \hat{Z}_4$.

Nende sobiva valikuga saab silla tasakaalustada, s.t. reguleerida voolu tugevuse diagonaalis BD võrdseks nulliga. Tasakaaluoleku fikseerimiseks on silla diagonaalis BD tundlik vahelduvvoolu (-pinge) mõõteriist - nulliindikaator.



Joonis 64

Sild on tasakaalus ($I_0 = 0$), kui potentsiaalide vahepunktide B ja D vahel on igal ajahetkel võrdne nulliga. Selleks peavad olema täidetud järgmised tingimused:

$$\hat{I}_1 \hat{Z}_1 = \hat{I}_3 \hat{Z}_3 \quad \text{ja} \quad \hat{I}_1 \hat{Z}_2 = \hat{I}_3 \hat{Z}_4, \quad (1)$$

kus $\hat{I}_1$ ja $\hat{I}_3$ on kompleksed voolu tugevused silla õlgades ABC ja ADC.

Nendest tingimustest saame, et

Lihtsaimaks vahelduvvooluindikaatoriks on telefon. Kuid telefoni puuduseks on heli valjuse miinimumi hindamise subjektiivsus.

Madalatel sagedustel kasutatakse indikaatoritena sageli ka vibrogalvanomeetreid, nende tundlikkus pole aga eriti suur. Seejärel kasutatakse tänapäeval indikaatoritena peamiselt elektronostilloskoope ja lampvoltmeetreid, mis on küllalt tundlikud ja kasutatavad laias sageduste vahemikus.

$$\frac{\hat{z}_1}{\hat{z}_2} = \frac{\hat{z}_3}{\hat{z}_4} \quad \text{ehk} \quad \hat{z}_1 \hat{z}_4 = \hat{z}_2 \hat{z}_3. \quad (2)$$

Kasutades takistuste esitamisel kompleksarvude eksponentsiaalset kuju

$$\hat{z}_k = z_k e^{j\varphi^k}, \quad (3)$$

kus $k = 1, 2, 3, 4$.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R},$$

$$j = \sqrt{-1},$$

saab tingimuse (2) anda kujul:

$$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_1 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} z_1 z_4 &= z_2 z_3, \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Tingimusest (5) on näha, et vahelduvvoolusilda ei saa tasakaalustada mitte igasuguse õlgade valiku korral. Kui näiteks kahes kõrvutiolevas õlas on aktiivtakistused ($\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), siis ülejäänud kahes õlas peavad samal ajal olema kas ainult mahtuvuslikud ($\varphi > 0$) või ainult induktiivsed ($\varphi < 0$) takistused.

Kui aga kahes vastasõlas on aktiivtakistused, siis ülejäänud õlgadest peab ühes olema mahtuvuslik, teises aga induktiivne takistus.

Tasakaalutingimus kahe võrrandi kujul näitab vahelduvvoolusilla põhiomadust ja tema põhilist erinevust alalisvoolusillast. Alalisvoolusilla tasakaalutingimus on määratud ühe võrrandiga. Järelikult saab sellest määrata ka ainult ühe suuruse ja silla tasakaalustamiseks piisab ühe elemendi (parameetri) reguleerimisest. Vahelduvvoolusilla tasakaalutin-

gimusest üldjuhul saab määrata kaks suurust - takistuse ning faasinihke voolu ja pinge vahel sellel takistil. Silla tasakaalustamiseks tuleb muuta aga vähemalt kaht parameetrit. Kui ühe parameetri muutmisel pinge indikaatoril väheneb ja saavutab miinimumi, siis tuleb hakata muutma teist parameetrit sügavama miinimumi saamiseks jne., kuni pinge (antud indikaatori tundlikkuse piirides) on muutunud nulliks. Selleks vajalike eri parameetrite järjestikuste reguleerimiste arv sõltub suurel määral muudetavate parameetrite valikust. Ebaõnnes- tunult valitud reguleeritavate parameetrite korral võib silla tasakaalustamine osutuda praktiliselt võimatuks.

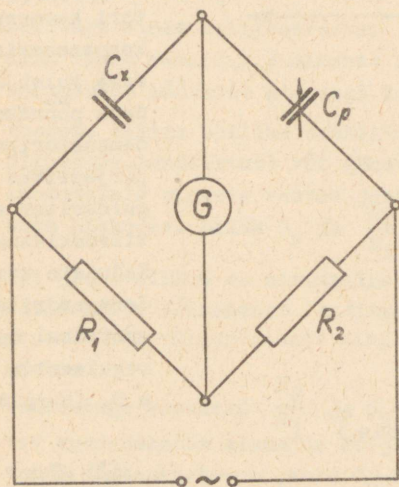
Vahelduvvoolu sildskeemide praktilisel kasutamisel on väga mugav, kui kumbki määratavatest suurustest sõltub ainult ühest reguleeritavast parameetrist. Sellisel juhul võib kum- magi reguleeriva parameetri igale väärtusele seada vastavusse ühe määratava suuruse väärtuse. Võime ehitada kaks gradueeri- tud skaalat ja tulemused on siis loetavad otseselt näitudena, ilma arvutusteta. Tööstuslike sildade korral valitakse skeem alati nii, et see nn. lahutatud näidu nõue oleks rahuldatud.

Mõõtmistulemusi moonutavateks mõjudeks vahelduvvoolusil- dades on peamiselt mahtuvuslikud ja induktiivsed sidestused (juhtivused) skeemi elementide ja neid ühendavate juhtmete vahel ning skeemi elementide ja ümbritsevate esemete vahel.

Need nn. parasiitjuhtivused võivad lülituda paralleel- selt skeemi elementidega. Sel juhul nad muudavad otseselt nen- de elementide takistust ja põhjustavad mõõtmisvigu. Parasiit- sidestused võivad tekitada ka parasiitvoolusid läbi indikaas- tori ja põhjustada skeemi näilist tasakaalustamatust või voo- lu puudumist indikaatoris mittetasakaalu-olukorras.

Parasiitsidestused on enamasti väga muutlikud ja sõltu- vad sagedusest. Seepärast on nende arvessevõtmine arvutustes võimatu ja nad tuleb kas kõrvaldada või püüda nende mõju vä- hendada. Tavaliselt on ohtlikumad mahtuvuslikud sidestused. Kaitseks mahtuvuslike mõjude eest kasutatakse põhiliselt skee- mi elementide ja juhtmete elektrostaatilist ekraanierimist ning skeemi sobiva punkti maandamist.

Antud töös kasutatava seadme põhimõtteline skeem on toodud joonisel 65, silla konkreetne lülitusskeem aga tema pa-
sis.



Joonis 65

Antud juhul on ka-
hes silla õlas aktiivta-
kistused R_1 ja R_2 ($\varphi=0$)
ning kahes ülejäänud
õlas puhtmahtuvuslikud
takistused $X_x = \frac{1}{\omega C_x}$ ja
 $X_p = \frac{1}{\omega C_p}$ (ω - voolu nurk-
sagedus, $\varphi = -\frac{\pi}{2}$). Sel
juhul taandub tasakaalu-
tingimus (5) üheks
võrrandiks

$$\frac{1}{\omega C_x} \cdot R_2 = \frac{1}{\omega C_p} \cdot R_1, (6)$$

millest

$$C_x = C_n \frac{R_2}{R_1}. (7)$$

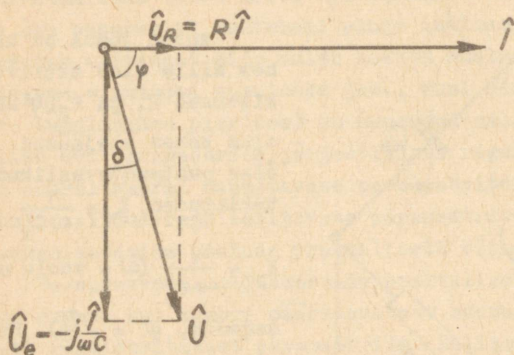
Seega saab antud juhul silda tasakaalustada ainult ühe
parameetri (C_p) reguleerimisega. Tavaliselt kasutatakse sel-
leks muudetava mahtuvusega õhkdielektrikuga kondensaatorit
(pöördkondensaator). Kordaja $\frac{R_2}{R_1}$ väärtus on samuti muudetav
ja on tavaliselt võrdne 1, 10, 100 jne.

Reaalsed kondensaatorid, eriti tahke või vedela dielekt-
rikuga, ei ole kunagi ideaalselt reaktiivsed elemendid, vaid
nendes hajub suuremal või vähemal määral energiat, mis eral-
dub dielektrikus soojusena. Faasinihe voolu ja pinget vahel
erineb sel juhul $\frac{\pi}{2}$ -st väikese nurga δ võrra (joon.66). Nur-
ka δ nimetatakse kondensaatori kaonurgaks. Ta on määratud
kondensaatori dielektriku juhtivusega.

Kadudega kondensaatorit võib ekvivalentskeemis kujutada
puhta mahtuvusena, millega on paralleelselt (või järjestikku)

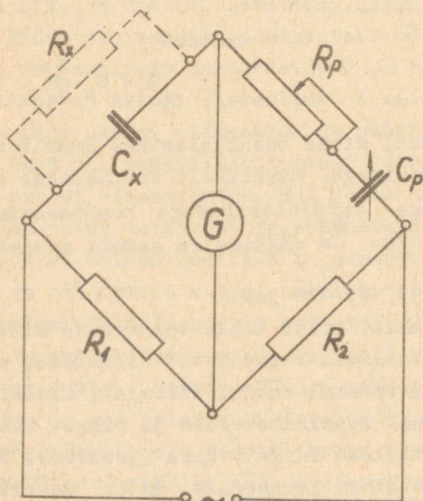
lülitatud takistus. Tasakaalutingimuse (5) täitmiseks tuleb kadudega kondensaatori mõõtmisel kasutada joonisel 67 esita-

tud skeemi. Mõõdetava kondensaatori kaonurga δ kompenseerimiseks tuleb ühendada pöördkondensaatoriga järjestikku reguleeritav aktiivtakistus R_p . Kadudeta kondensaatorite mõõtmisel tuleb reguleerida $R_p = 0$. (Nupp t_g d



Joonis 66

äärmises vasakpoolses asendis.)



Joonis 67

sutage selle tundlikumat (γ) telge.

4. Töö kõik

1. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokolli iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehasenumber ning tüüp.
2. Teostada ühendused vastavalt joonisel 67 (ja silla passis) toodud skeemile. Kui indikaatoriks on elektronostsiloskoop, siis ka-

3. Laske juhendajal skeem kontrollida ja täpsustada tööülesannet. Tavaliselt on selleks kondensaatorite mahtuvuse mõõtmine ühekaupa ning järjestikuses ja paralleelses lülituses.
4. Lülitage sisse heligeneraator ja elektronostsilloskoop ning laske neil 2...3 minutit soojeneda.
5. Mahtuvuste mõõtmist alustage kõige väiksemast $\frac{R_2}{R_1}$ väärtusest. Valige selline ostsilloskoobi võimendus (s.o. indikaatori tundlikkus) või generaatori väljundpinge, et mõõdetavale pingele vastav joon oleks ekraanil jälgitav kogu pikkuses. Leida C_p ja $\frac{R_2}{R_1}$ selline väärtus, mille korral joone pikkus on minimaalne. Seejärel suurendage ostsilloskoobi võimendust (indikaatori tundlikkust) ja heligeneraatori väljundpinget ning täpsustage silla tasakaalu.
6. Fikseerige vastavad $\frac{R_2}{R_1}$ ja C_p väärtused, ühendage mõõdetav kondensaator klemmide küljest lahti ja määrake kasutatud mõõtepiirkonna jaoks C_p skaala nullpunkti C_0 . Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Mõõdetav kondensaator	$\frac{R_2}{R_1}$	C_p	C_0	C_x	C	ΔC_x
C_1						
C_2						
C_3						
$C_1 + C_2 + C_3$						
$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$						

7. Otsitav mahtuvus arvutage valemist $C_x = (C_p - C_0) \cdot \frac{R_2}{R_1}$. Paralleelse ja järjestikuse lülituse korral arvutage vastavad mahtuvused, võttes aluseks üksikult mõõdetud kondensaatorite mahtuvused, ja kandke tulemused lahtrisse C.
8. Hinnake mõõtmisvead.

5. Küsimused

1. Miks tuleb antud töös kasutada vahelduvvoolusilda?
2. Millised on vahelduvvoolusilla tasakaalutingimused?
3. Kas vahelduvvoolusillaga mõõtmisel oleneb mõõtmistulemus generaatori sagedusest?
4. Milliseid seadmeid võib kasutada vahelduvvoolusillas voolu (pinge) indikaatorina?
5. Kuidas leida ahela takistust vahelduvvoolule?
6. Miks ei ole vool ja pinge mahtuvusel ning induktiivsusel samas faasis? Milline on faasinihe?
7. Mida nimetatakse elektrimahtuvuseks?
8. Kas üksikul kehal on elektrimahtuvus?
9. Selgitage kondensaatorite ehitust.
10. Millest ja kuidas sõltub plaatkondensaatori mahtuvus? Miks?
11. Mida iseloomustab kondensaatori kaonurk δ ?
12. Kuidas saab antud vahelduvvoolusillaga mõõta halva isolatsiooniga kondensaatorite mahtuvusi?
13. Miks ei saa antud töös mõõtmisvigu täpselt määrata?

6. Kirjandus

Strauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 21...23, 140, 142.
Савельев И.В. Курс общей физики II. М., 1966, § 24...26, 95, 97.

PINGERESONANTS

1. Tööülesanne

Pingeresonantsi uurimine järjestikuses vahelduvvooluahelas. Mahtuvuse või induktiivsuse määramine.

2. Töövahendid

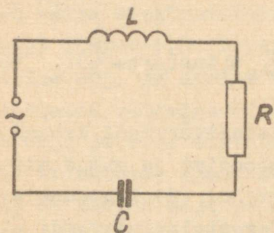
Heligeneraator, voltmeeter, milliampermeeter, takistusmagasin, mahtvusmagasin, induktiivsusmagasin, mõõdetavad kondensaatorid, induktsioonpoolid ja ümberlüüti.

3. Töö teoreetilised alused

Vaatame kondensaatori, aktiivtakisti ja induktsioonpooli järjestikuses ühendamisel saadud vooluahelat. Olgu

seejuures ahela aktiivtakistus R , kondensaatori mahtuvus C ,
pooli induktiivsus L ning muutugu ahela otstele (vt. joonis

68) rakendatud vahelduvpingeal-
lika elektromotoorne jõud har-
mooniliselt:



Joonis 68

$$\xi = \xi_m \cos \omega t, \quad (1)$$

kus ξ on emj. hetkväärtus aja-
hetkel t , ξ_m - emj. amplituudvää-
rtus, ω - nurk- e. ringsagedus.

Muutuv emj. tekitab ahelas
elektrilised sundvõnkumised. Leia-
me järgnevalt nende võnkumiste
võrrandi. Selleks avaldame

1) pinge aktiivtakistusel

$$U_R = IR, \quad (2)$$

kus I on voolu tugevuse hetkväärtus;

2) pinge kondensaatoril

$$U_C = \frac{q}{C}, \quad (3)$$

kus q on kondensaatori laengu hetkväärtus;

3) induktiivsusest tingitud omainduktsiooni emj.

$$\xi_L = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4)$$

Vastavalt Kirchhoffi teisele seadusele on igal ajahet-
kel

$$U_R + U_C = \xi_L + \xi. \quad (5)$$

Seoste (1)...(4) põhjal saab võrrandile (5) anda kuju

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{q}{C} = \xi_m \cos \omega t. \quad (6)$$

Diferentseerides nüüd võrrandit (6) aja järgi ja arves-
tades, et vool ahelas

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (7)$$

saame muutuva emj. toimel ahelas tekkinud voolu tugevuse arvutamiseks mittehomogeense lineaarse 2. järku diferentsiaalvõrrandi:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{I}{C} = -\mathcal{E}_m \omega \sin \omega t = \mathcal{E}_m \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (8)$$

Sellise mittehomogeense diferentsiaalvõrrandi lahend koosneb vastava homogeense võrrandi üldlahendist ja antud mittehomogeense võrrandi erilahendist. Võrrandi (8) lahendamisel selgub aga, et vastava homogeense diferentsiaalvõrrandi üldlahend kirjeldab kustuvaid võnkumisi. Kuna viimased kaovad täielikult mõninga aja möödudes peale emj. rakendamist, siis võime ahelas väljakujunenud sundvõnkumisi kirjeldada ainult võrrandit (8) rahuldava erilahendiga:

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi), \quad (9)$$

kus I_m on voolu tugevuse amplituudväärtus, φ - faasinihe väliste sundiva emj. ja voolu vahel ahelas. Avaldised I_m ja φ arvutamiseks saame lahendi (9) asendamisel võrrandis (8):

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}}, \quad (10)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (11)$$

Analoogia põhjal nimetatakse seost (10) Ohmi seaduseks vahelduvvoolu korral, suurust

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (12)$$

aga ahela kogutakistuseks vahelduvvoolule e. impedantsiks.

Meenutame, et sama seos kehtib antud juhul ka efektiivväärtuste korral, kuna $I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$ ja $\mathcal{E}_e = \frac{\mathcal{E}_m}{\sqrt{2}}$.

Kõigest eespooltoodust järeldub, et teatud aja möödudes (kuni vabade võnkumiste täieliku kustumiseni) pärast harmooniliselt muutuva emj. rakendamist, kujuneb vaadeldavas ahelas välja elektromotoorse jõuga sama nurksagedusega (sagedusega) muutuv vahelduvvool. Seejuures ei ole üldjuhul sundiv väline emj. ja ahelas tekkinud vahelduvvool samas faasis, vaid nihutatud valemiga (11) arvutatava faasinurga φ võrra, s.t., et emj. ja vool saavutavad sama arenguastme (näit. maksimumi) erinevatel ajahetkedel. Valemist (11) on samal ajal näha, et välise emj. ja ahelas tekkinud voolu vaheline faasiniihe sõltub välise emj. ringsagedusest ω . Sageduse muutmisel võib $\varphi \rightarrow 0$, kui $\omega L - \frac{1}{\omega C} \rightarrow 0$. Vastavalt valemitele (9) ja (10) toimub siis ahelas voolu tugevuse kiire kasv. Voolu tugevuse amplituudväärtus saavutab maksimumi, kui

$$\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0. \quad (13)$$

Ahelas esineb siis resonants, millele vastava ringsageduse saab arvutada seosest (13):

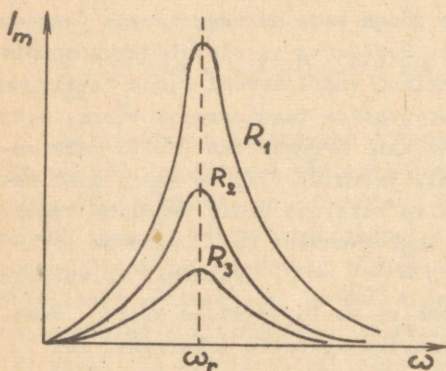
$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (14)$$

voolu tugevuse amplituudväärtuse I_{mr} aga võrrandist (10):

$$I_{mr} = \frac{\mathcal{E}_m}{R}. \quad (15)$$

Resonantsi iseloomustamiseks kasutatakse tavaliselt resonantsikõveraid. Vaadeldud juhul on selleks kõver, mis näitab voolu tugevuse amplituudi sõltuvust sundiva välise emj. ringsagedusest või sagedusest (vt. joonis 69). Valemist (15) ja joonisel 69 toodud ahela erinevate aktiivtakistuste korral saadud resonantsikõveratest on näha, et resonantsile vastava voolu tugevuse amplituudväärtus I_{mr} on seda suurem, mida väiksem on ahela aktiivtakistus. Mida väiksem on aktiivtakistus, seda teravam on ka resonantsikõver.

Välise emj. sageduse muutmisel muutub ka ping kondensaatoril ja induksioonpoolil. Pinge kondensaatoril, mille



Joonis 69

dielektrikut võib vaadelda lähedasena ideaalsele (dielektriku takistus $R_d \rightarrow \infty$), saab määrata seoste (3), (7) ja (9) alusel:

$$\begin{aligned} U_C &= \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I \, dt = \\ &= \frac{1}{C} \int I_m \cos(\omega t - \varphi) dt = \\ &= \frac{I_m}{\omega C} \sin(\omega t - \varphi) \end{aligned}$$

või

$$U_C = U_{Cm} \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{2}), \quad (16)$$

kus ping amplituudväärtus kondensaatoril

$$U_{Cm} = I_m \cdot \frac{1}{\omega C}.$$

Suurust $X_C = \frac{1}{\omega C}$ nimetatakse mahtuvuslikuks takistuseks.

Pinge kondensaatoril, nagu näitab võrrandite (16) ja (9) võrdlus, jääb faasilt voolust ahelas $\frac{\pi}{2}$ võrra maha.

Vastavalt Ohmi seadusele ahela mittehomoogeense osa kohta on ping induksioonpoolil

$$U_L = IR_L - \mathcal{E}_L,$$

kus R_L on pooli aktiivtakistus. Induksioonpoolide valmistamisel kasutatakse tavaliselt väikese eritakistusega materjale, seepärast on pooli takistus R_L tühine ning pingelang $I R_L \ll \mathcal{E}_L$. Nii võime pingelangu pooli aktiivtakistusel edaspidi mitte arvestada. Kasutades nüüd avaldisi (4) ja (9) saame:

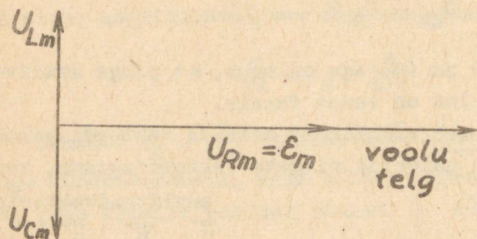
$$U_L = -\mathcal{E}_L = L \frac{dI}{dt} = -I_m \omega L \sin(\omega t - \varphi)$$

vastavalt valemitele (14) ... (17) on

$$U_{Cmr} = I_{mr} X_{Cr} = \frac{\mathcal{E}_m}{R \omega_r C} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}},$$

$$U_{Lmr} = I_{mr} X_{Lr} = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \omega_r L = \frac{\mathcal{E}_m}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Pingete hetkväärtused kondensaatoril U_C ja induktsioonpoolil U_L on aga faasilt nihutatud π võrra [vt. valemid (16) ja (17)]. Seega resonantsi korral on pingete U_C ja U_L summa null ja pingelangus ahela aktiivtakistusel U_R on võrdne välise elektromotoorse jõuga. Ahel mõjub nagu aktiivtakistus, mille tunnuseks on ka faasinihke puudumine välise emf. ja voolu vahel ahelas [vt. valemid (13) ja (11)]. Vektordiagramm resonantsi korral on näidatud joonisel 71.



Joonis 71

Pinged kondensaatoril ja induktsioonpoolil on resonantsi korral võrdsed, kuid võivad saavutada väärtusi, mis tunduvad ületavad välise elektromotoorse jõu väärtuse, kui vaid $\sqrt{\frac{L}{C}} \gg R$. Seepärast nimetatakse resonantsi järjestikuses vooluahelas pingeresonantsiks.

Resonantsisagedusel $\omega = \omega_r$ on ahelas maksimaalne voolu tugevus. Võrrandi (16) analüüs näitab, et pinge amplituudväärtuse maksimum kondensaatoril esineb ringsagedusel

$$\omega_{Cr} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}, \quad (19)$$

mis on väiksem kui ω_r . Võrrandi (17) analüüs aga annab pinge amplituudväärtuse maksimumi induktioonpoolil sagedusest ω_r suurema sageduse ω_{rL} juures.

Järjestikust LRC-ahelat võib kasutada pooli induktiivsuse L või kondensaatori mahtuvuse C määramiseks, kui üks neist suurustest on teada. Selleks määratakse ahela resonantsagedus ν_r ja arvutatakse siis otsitav suurus valemist

$$\nu_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (20)$$

4. Töö kõik

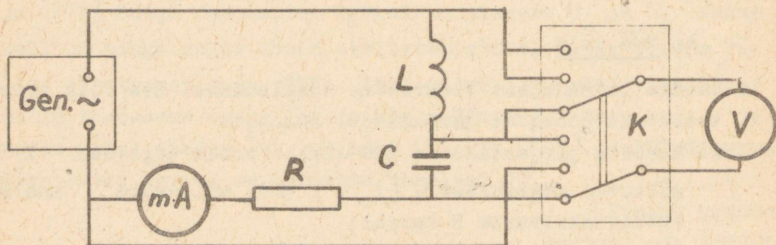
1. Küsige juhendajalt konkreetne tööülesanne. See võib orienteeruvalt koosneda järgmistest osadest:

- a) määrata järjestikuses LRC-ahelas voolu tugevuse I_e sõltuvus sagedusest ν [$I_e = f(\nu)$] erinevate ahela aktiivtakistuste R korral;
- b) määrata järjestikuses LRC-ahelas kondensaatori pinge U_{Ce} sõltuvus sagedusest ν [$U_{Ce} = f(\nu)$] erinevate ahela aktiivtakistuste R juures;
- c) määrata järjestikuses LRC-ahelas induktioonpooli otsel oleva pinge U_{Le} sõltuvus sagedusest ν [$U_{Le} = f(\nu)$] erinevate ahela aktiivtakistuste R puhul;
- d) määrata induktioonpooli induktiivsus L_x pingeresonantsi kaudu;
- e) määrata kondensaatori mahtuvus C_x pingeresonantsi kaudu.

2. Tutvuge käesolevas töös kasutatavate mõõteriistade ja seadmetega. Kandke protokollile iga mõõteriista nimetus, inventari- või tehase number, tüüp, vooluliik, mõõteriista süsteem, täpsusklass, mõõtepiirkond ja jaotiste arv skaalal.

3. Koostage vooluring joonisel 72 toodud skeemi kohaselt. Selles on muutuva emj. allikaks heligeneraator. Sobiva suurusega takistuse R , mahtuvuse C ja induktiivsuse L saamiseks on aga järjestikku ühendatud vastavalt takistus-, mahtuvus- ja induktiivsusmagasinid. Pingete mõõtmiseks

mahtuvus- ja induktiivsusmagasinidel kasutatakse lampvoltmeetrit (või muud antud tingimustes sobivat tüüpi voltmeetrit). Mõõtmiste hõlbustamiseks kasutatakse ümberlülitit K, millega voltmeeter on pidevalt ühendatud. (Kui juhendaja poolt antud konkreetses tööülesandes ei ole ette nähtud pingete mõõtmist kondensaatoril ja poolil, siis võivad lülitit K ja voltmeeter puududa. Emj. väärtust kontrollitakse siis generaatoril asuva voltmeetri järgi.)



Joonis 72

4. Arvutage juhendaja poolt antud resonantsisageduse ν_r väärtuse järgi korrutis LC [valem (20)]. Valige mahtuvus- ja induktiivsusmagasinidel leitud korrutistele vastavad L ja C väärtused.
5. Pärast ühenduste kontrollimist juhendaja poolt lühistage takistusmagasin ($R_m = 0$) ja veenduge eksperimentaalselt, et antud sagedusel ν_r esineb resonants (vool ahelas on maksimaalne). Generaatori väljundtakistus ($R_{\text{välj}}$) valige selline, et resonants oleks terav. Seejuures pidage ka silmas, et generaatori väljundpinge muutub sageduse muutudes, seepärast tuleks väljundtakistus valida niisugune, et väljundpinge muutused oleksid võimalikult väikesed.
6. Teostage mõõtmised resonantsikõverate saamiseks lühistatud takistusmagasini ($R_m = 0$) korral. Selleks muutke generaatori väljundpinge sagedust ja registreerige iga ν väärtuse

juures voolu tugevus ahelas ning vajaduse korral ka pinged mahtuvus- ja induktiivsusmagasinidel. Maksimumilähedases sageduspiirkonnas tuleb mõõta eriti väikeste sagedusvahemike järel, kaugemal võivad sagedusvahemikud olla pikemad (ühe kõvera saamiseks tuleks registreerida keskmiselt 15...20 punkti). Jälgige, et generaatori väljundpinge oleks konstantne!

Mõõtmistulemused kandke tabelisse:

Sagedus		Voolu tugevus I_e		Pinge U_{Ce}		Pinge U_{Le}	
näit	väärtus Hz	näit	väärtus mA	näit	väärtus V	näit	väärtus V

- Korrake mõõtmisi juhendaja poolt antud takistusmagasini takistuse R_m väärtuse korral. Mõõtmistulemused kandke eelnevaga analoogilisse tabelisse.
- Joonestage kõverad $I_e = f(\nu)$, kandes mõlema katse tulemused ühele ja samale graafikule. Määrake graafiku järgi ν_r ja võrrelge seda arvutustes kasutatuga.
- Joonestage ühele ja samale graafikule kõverad $U_{Ce} = f(\nu)$ ja $U_{Le} = f(\nu)$.
- Vastavalt tööülesandele määrake uuritava pooli induktiivsus L_x või kondensaatori mahtuvus C_x . Selleks lülitage mõõdetav pool või kondensaator vooluringi vastavalt induktiivsus- või mahtvusmagasini asemele. Teostage mõõtmised resonantsikõvera $I = f(\nu)$ saamiseks lühistatud takistusmagasini juures ($R_m = 0$, ainult resonantsi lähedal). Joonestage üles kõver $I = f(\nu)$ ja leidke selle järgi täpne resonantsisageduse ν_r väärtus. Valemi (20) järgi arvutage siis vastavalt L_x või C_x . (Ärge unustage protokolli kandmast skeemi jäänud mahtuvus- või induktiivsusmagasini näitu C või L .)

5. Küsimused

- Kuidas koostatakse elektriliste sundvõnkumiste diferentsiaalvõrrand järjestikuse ahela jaoks?

2. Milline on elektriliste sundvõnkumiste diferentsiaalvõrrandi lahend väljakujunenud võnkumiste jaoks?
3. Esitage Ohmi seadus homogeense ja mittehomoogeense ahela osa kohta.
4. Kuidas avaldub Ohmi seadus vahelduvvoolu korral?
5. Millest ja kuidas oleneb faasinihe välise emj. ja voolu vahel järjestikuses ahelas?
6. Mida nimetatakse mahtuvuslikuks takistuseks, induktiivtakistuseks ja kogutakistuseks?
7. Kuidas avaldub pingeline kondensaatoril, induktioonpoolil ja aktiivtakistil?
8. Kuidas joonestatakse pingeline vektordiagramme?
9. Millal esineb järjestikuses ahelas resonants ja millest oleneb resonantsikõvera kuju?
10. Missugused on pingeline kondensaatoril, induktioonpoolil ja aktiivtakistil resonantsi korral?
11. Mispärast resonantsi järjestikuses LRC-ahelas nimetatakse pingeresonantsiks?
12. Kuidas saab mõõta mahtuvust ja induktiivsust pingeresonantsi abil?
13. Millega on määratud sagedus, mille juures pingeline amplituud kondensaatoril on maksimaalne?
14. Millisele väärtusele läheneb U_{Cm} sageduse lähenemisel nullile?
15. Kas L $C = \text{const}$ korral L ja C valik mõjutab kõverate $I = f(\nu)$, $U_L = f(\nu)$ ja $U_C = f(\nu)$ kuju?
16. Mispärast lühistatud takistusmagasini ($R_m = 0$) korral vool ahelas ei ole lõpmata suur?

6. Kirjandus

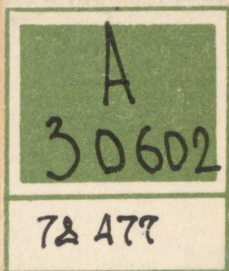
Štrauf, J.A. Füüsika II. Tln., 1965, § 139, 140, 143.

Савельев И.В. Курс общей физики II. М., 1968, § 92...95, 100, 101.

S I S U K O R D

Töökord füüsika praktikumides (A.Talkop, K.Toomik). . .	3
Ohutustehnika eeskirjad füüsika praktikumis (A.Talkop, K.Toomik)	6
Mõõtmisvigade arvutamine (Ü.Uder).	6
Metoodilisi näpunäiteid (V.Bender)	33
Vooluallikad (V.Bender).	38
Voolu- ja pingeregulaatorid (V.Bender)	40
Elektrimõõteriistad (V.Bender)	44
Elektrostaatile välti (V.Bender).	61
Hõõglambi tunnuskõverad (T.Ruus)	72
Joule'i-Lenzi koefitsient (T.Ruus, Ü.Uder)	78
Kompensatsioonimeetod (T.Ruus, K.Seljamäe)	83
Keedukannu kasutegur (T.Ruus).	88
Vooluallika kasutegur (A.Paat)	92
Wheatstone'i sild (T.Ruus, M.Vahemetsa).	97
Thomsoni sild (T.Ruus, Ü.Uder)	103
Pooljuhtalaldi (T.Ruus).	109
Termoemissioon (T.Ruus, M.Vahemetsa)	122
Trioodi tunnusjooned (T.Ruus).	132
Elektronostilloskoop (L.Pakkas)	139
Elektrolüüs (J.Meitre).	153
Kondensaatori laadumine ja tühjenemine (T.Ruus, K.Seljamäe)	156
Vahelduvvoolu võimsustegur (V.Bender, K.Loide) . . .	161
Vahelduvvoolusild (V.Bender)	169
Pingeresonants (A.Paat).	176

Hind 33 kop.



TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00497026 7