TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

ELEKTRI-PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID

TARTU 1970

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL
Üld füüsika kateeder

E L E K T R I P R A K T I K U M I

tööjuhendid

Kolmas, parandatud ja täiendatud trükk
Koostanud ja toimetanud K. Kudu

T a r t u 1 9 7 0

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu

E e s s õ n a

Kogumik "Elektripraktikumi tööjuhendid" on 1962. ja 1965.a. väljaantud analoogiliste kogumike kolmandaks täiendatud ja parandatud trükiks. Käesolev kogumik sisaldab TRÜ üldfüüsika kateedri üldmõõtmiste ja elektripraktikumis ülesseatud elektritööde juhendeid peaasjalikult Füüsika-Keemia- ja Matemaatikateaduskonna üliõpilastele. Kogumikus puuduvad tööjuhendid trioodi ja elektronostsilloskoobi uurimiseks, samuti nende tööde juhendid, millised on käesoleval ajal ülesseadmisel.

Võrreldes 1965.a. väljaandega on uuteks või põhjalikult ümbertöötatud juhenditeks nr. 4, 5, 6, 7, 13, 23 ja 24. Suure töö nende ülesseadmisel ja juhendite koostamisel tegi v.-õp. E. Tamm. Nii nagu varemates väljaannetes, nii ka käesolevas võib leida iga konkreetse töö ülesseadmist juhendanud ja neile juhendi kirjutanud õppejõu nime sisukorrast.

Juuni, 1970.a.

Toimetaja

1. ELEKTROSTAATILISE VÄLJA UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Erineva kujuga elektroodide elektrostaatilise välja uurimine elektrolüüdivanni meetodil tasapinnalisel juhul.[1]

2. Töövahendid.

Vann veega, elektroodide komplekt, potentsiomeeter, ostsilloskoopiline nullindikaator, alus paberi jaoks, pantograaf sondi ja pliiatsiga, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Elektrostaatilise välja modelleerimine elektrolüüdivanni abil.

a) Ülesanne laengute liikumisest elektriväljas.

Rea praktiliste ülesannete korral on vaja teada, kuidas hakkavad laengud liikuma erineva kujuga elektroodide elektriväljas. Sellisteks ülesanneteks on elektronide liikumise arvutamine raadiolampides, ostsillograafide ja televiisorite elektronkiiretorudes, fotokordistites jne.

Neid ülesandeid lahendatakse kahes osas. Teades elektroodide laenguid (või potentsiaale) määratakse algul elektrivälja tugevus kõigis ruumipunktides. Kui elektrivälja tugevus on teada, siis leitakse valemi $F = qE$ järgi jõud,

---

[1] Tasapinnalisteks nimetatakse juhtusid, mille korral füüsikaline suurus sõltub ainult kahest koordinaadist ja ei muutu kolmanda koordinaadi muutumisel (eeldades, et kaks esimest jäävad muutumatuks).

mis mõjuvad mistahes ruumipunktis asuvale laengule.[1] Ülesande teine osa - liikumise trajektoori ja kiiruse määramine teadaolevate jõudude järgi antud algtingimustel - kuulub juba mehhaanika valdkonda ning on teostatav Newtoni seaduste abil.

Komplitseeritud kujuga elektroodide elektrivälja määramine osutub sageli raskeks matemaatiliseks ülesandeks. Paljudel juhtudel ei olegi võimalik seda ülesannet lahendada matemaatiliselt, vaid seda tehakse eksperimentaalselt elektrivälja modelleerimise abil.

Modelleerimisel asendatakse antud nähtuse uurimine tegelikkuses selle nähtuse mitmesuguste mudelite uurimisega spetsiaalsetes katsetingimustes.

Nähtusest osavõtvate kehade mõõtmete ja materjali muutmise kõrval asendatakse uuritav protsess sageli teisega, mis sõltub antud nähtuse jaoks kõige tähtsamatest füüsikalistest suurustest või on täiesti teistsuguse iseloomuga, kuid sarnaneb uuritava protsessiga matemaatiliselt kirjelduselt (näiteks mehhaaniliste võnkumiste uurimist võib asendada elektriliste võnkumiste uurimisega).

b) Elektrolüüdivann.

Elektrostaatilist välja vaakuumis või dielektrikutes saab modelleerida elektrolüüdivannis. Näitame, et elektriväli elektrolüüti asetatud metallelektroodide vahel on sarnane elektrostaatilise väljaga vaakuumis või dielektrikutes samade või nendega geomeetriliselt sarnaste elektroodide vahel.

Elektrolüüt sisaldab igas elementaarruumalas, mis on küllalt suur võrreldes iooni ruumalaga, võrdse arvu erimärgilisi ioone. Järelikult on ta tervikuna neutraalne ja vabade laengute mõju arvestada ei tule.

---

[1] Eeldatakse, et liikuvate laengute suurus ja nende kontsentratsioon on niivõrd väike, et nad ei moonuta elektroodide poolt tekitatud elektrivälja. Paljudel praktikas tähtsatel juhtudel on see tingimus täidetud.

Kui elektrolüüti paigutatud kahe metallelektroodi vahel tekitada vool, siis tekib ka potentsiaali langus nii elektroodides kui elektrolüüdis. Kui elektrolüüdi juhtivus on palju väiksem metallelektroodide juhtivusest, siis potentsiaali langus elektroodide ulatuses on kaduv-väike ja elektroodi pind on ekvipotentsiaalpind. Tingimus on täidetud seda paremini, mida väiksem on elektrolüüdi juhtivus. Juhtivus ei tohi olla aga ka liiga väike (destilleeritud vesi), sest siis elektrolüüt sarnaneb dielektrikuga ning sellesse viidud mõõtesond muudab oluliselt esialgset elektrivälja.

Elektroodide pingestamise momendil, kui ioonid oma inertsi tõttu pole jõudnud veel liikuma hakata, kujutab elektrolüüt endast dielektrikut ja temas tekib elektrostaatiline väli. Välja mõjul hakkavad ioonid liikuma väljatugevuse vektori sihis. Mittehomogeenses elektriväljas muutub väljatugevuse siht ruumis pidevalt ja laengukandja trajektoor kõverdub. Inertsi tõttu eemaldub ioon väljatugevuse joonest, millel ta algul asus. Elektrolüüdis põrkub ta aga teiste osakestega, kaotab omandatud kiiruse jõudmata oluliselt jõujoonest eemalduda. Edasi liigub ioon jälle väljatugevuse vektori, s.o. jõujoone puutuja sihis. Seega elektrolüüdis liigub ioon praktiliselt piki väljatugevuse joont. Mööda pindu, mis on risti osakeste trajektooridega, laengute liikumist ei toimu. Järelikult piki neid pindu puudub potentsiaalide vahe ja väljatugevuse komponent pinna sihis on null. Need on ekvipotentsiaalpinnad. Et laengukandjate trajektoorid ühtivad väljatugevuse joontega, siis ekvipotentsiaalpinnad elektrolüüdis ja vaakuumis ühtivad.

Seega on elektriväli küllalt väikese juhtivusega elektrolüüdis sarnane väljaga vaakuumis või dielektrikutes - metallelektroodide pinnad on ekvipotentsiaalpindadeks, väljatugevuse ja potentsiaali jaotus ühtivad.

Kirjeldatud analoogial on sügav matemaatiline põhjendus. Pidevate keskkondade korral saab Ohmi seadust kasutada ainult vektorkujus

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}, \qquad (1)$$

kus $\vec{j}$ - voolu tihedus,
σ - keskkonna erijuhtivus,
$\vec{E}$ - elektrivälja tugevus.

Siit on näha, et voolu tiheduse vektor on paralleelne elektrivälja tugevusega. Seega voolujooned (s.o. jooned, millele $\vec{j}$ on igas punktis puutuja ja mida mööda toimub laetud osakeste liikumine) ühtivad elektrivälja jõujoontega.

On teada, et elektrivälja potentsiaal vaakuumis ja dielektrikutes rahuldab Laplace'i võrrandit:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \qquad (2)$$

Et elektrolüüdis keskmine laengutihedus on null ja ei muutu aja jooksul, siis laengu voog läbi kinnise pinna on null:

$$\mathrm{div}\, \vec{j} = 0.$$

Et $\vec{j} = \sigma \vec{E}$ ja $\vec{E} = \mathrm{grad}\, \varphi$, siis

$$\mathrm{div\ grad}\, \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2},$$

s.t. väli elektrolüüdis rahuldab samuti Laplace'i võrrandit ja seega potentsiaali jaotus sarnaneb potentsiaali jaotusega vaakuumis ja dielektrikutes.

c) Katse põhimõtteline skeem.

Elektrolüüdi punktide potentsiaalide leidmine elektrolüüdivannis toimub joon. 1 näidatud skeemi järgi. Elektroodid a ja c ning potentsiomeeter (pingejagaja) AC on paralleelselt ühendatud pingeallikaga $\mathcal{E}$.

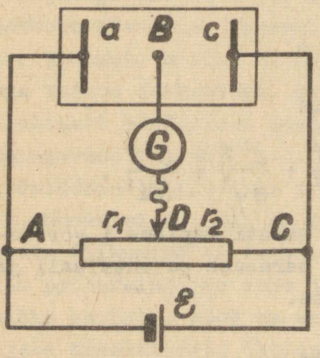
Mingis punktis B asetatakse elektrolüüti peenike metallvarras - sond, mis on ühendatud potentsiomeetri liugkontaktiga mõõteriista (galvanomeetri, nullindikaatori vms.)

kaudu. Indikaator näitab voolu juhtmes BD. Nihutades sondi või potentsiomeetri liugkontakti, võib saavutada voolu puudumise punktide B ja D vahel, mis tähendab seda, et punktide B ja D potentsiaalid on võrdsed.

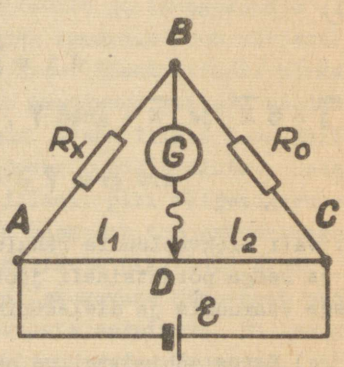
Loeme punkti C potentsiaali nulliks. Kui on teada punktide A ja C potentsiaalide vahe U_{AC}, mis võrdub elektroodide potentsiaalide vahega, ning potentsiomeetri osade AD ja DC takistused r_1 ja r_2, siis võib kergesti leida punktide D ja B potentsiaalid U_{DC} ja U_{BC}, mis on võrdsed, kui galvanomeeter voolu ei näita.

Vastavalt Ohmi seadusele $\frac{U_{DC}}{U_{AC}} = \frac{r_2}{r_1+r_2}$, millest

$$U_{BC} = U_{DC} = \frac{r_2}{r_1+r_2} U_{AC}. \qquad (3)$$



Joon. 1.



Joon. 2.

Valemi (3) abil võib määrata elektrolüüdivanni mistahes punkti potentsiaali. Kui potentsiomeetri liugkontakt on teatud asendis ja seega määratud punkti D potentsiaal, liigutatakse sondi. Saavutades voolu puudumise galvanomeetris, leitakse üksteise järel rida samal ekvipotentsiaalpinnal asuvaid punkte.

On kerge näha, et joon. 1 näidatud katseskeem on sisuliselt Wheatstone'i silla skeem, mis on võrdluseks toodud joonisel 2. Potentsiomeetri osade takistused r_1 ja r_2 vastavad reohordi õlgade l_1 ja l_2 takistustele, elektrolüüdi takistused sondi ja elektroodide a ja c vahel R_1 ja R_2 vastavad tuntud ja tundmatule takistusele R_0 ja R_x. Silla tasakaalu tingimust (voolu puudumine juhtmes BD) võib üles kirjutada järgmiselt:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{R_1}{R_2} . \qquad (4)$$

See tingimus nõuab ainult takistuste võrdelisust, kuid ei sõltu elektroodide potentsiaalide vahest U_{AC} . Seega, kui mingi U_{AC} väärtuse korral galvanomeetrit vool ei läbi, siis sondi B ja potentsiomeetri liugkontakti D muutumatu asendi korral voolu ei ole ka elektroodide mistahes teistsuguse potentsiaalide vahe korral. Järelikult ka ekvipotentsiaalpinna mistahes punkti asukoht, mis vastab potentsiomeetri liugkontakti teatud asendile, ei sõltu pingest elektroodide vahel.

Ekvipotentsiaalpinda elektrolüüdivannis on sobivam iseloomustada mitte tema potentsiaaliga, vaid potentsiomeetri liugkontakti asendiga, mille juures vool galvanomeetrit ei läbi, kui sond asub selle pinna punktides. See juures potentsiomeetri liugkontakti asend määratakse suhtega $r_2 : (r_1 + r_2)$, mis on arvuliselt võrdne antud ekvipotentsiaalpinna potentsiaaliga, kui pinge elektroodide vahel on 1 V.

Andes ette suhte $r_2 : (r_1 + r_2)$ väärtused, võib seega leida vastavad ekvipotentsiaalpinnad, pööramata tähelepanu elektroodide potentsiaalide vahe suurusele. Potentsiaali suurust, mis on nendel ekvipotentsiaalpindadel teatud elektroodidevahelise pinge korral, võib arvutada valemist (3).

d) Sarnasus.

Selleks, et mingi füüsikalise suuruse mudelilt leitud väärtuste järgi otsustada tema väärtuste üle tegelikkuses, on vaja teada nende väärtuste vahelist suhet. Tavaliselt ei valmistata mudeleid loomulikus suuruses, vaid teatud a korda suuremana või väiksemana originaalist, arvestades geomeetrilist sarnasust. Geomeetriline sarnasus seisneb selles, et mudeli mistahes kahe punkti vahelise kauguse suhe originaali vastavate punktide vahelise kaugusega peab jääma püsivaks. Geomeetrilise sarnasuse kõrval peavad olema täidetud sarnasuse tingimused kõigi antud ülesannet iseloomustavate füüsikaliste suuruste jaoks. See tähendab, et füüsikalise suuruse väärtuste suhe mudelil tema väärtustega originaalil peab jääma alati konstantseks (kõigis vastavates mudeli ja originaali punktides ja vastavate ajamomentide jaoks).[1]

Selle suhte väärtust nimetatakse sarnasuse koefitsiendiks. Erinevate füüsikaliste suuruste jaoks võivad sarnasuse koefitsiendid muidugi olla erinevad. Näiteks kõigi joonmõõtmete muutmisel sama arv korda muutub mistahes detaili kaal nagu lineaarmõõtmete kuup. Tema tugevus, mis on võrdeline ristlõikepindalaga, muutub nagu joonmõõtmete ruut. Mitte alati ei osutu võimalikuks rahuldada sarnasuse tingimusi kõigi füüsikaliste suuruste jaoks, mis on vajalikud antud ülesande lahendamisel. Sellisel juhul tuleb kas loobuda modelleerimisest või vähendada suuruste arvu, s.t. iseloomustada ülesannet mittetäielikult.

Elektrostaatilise välja modelleerimisel elektrolüüdivanni abil võib muuta originaaliga võrreldes nii elektroodide mõõtmeid kui ka nende potentsiaalide väärtusi. Sarnasuse tingimusi elektrivälja jaoks on elektroodidevahelises ruumis kerge täita. Need on järgmised: Kui muuta kõigi elektroodide mõõtmeid teatud arv korda ja samaaegselt kaugusi nende vahel sama arv korda, kusjuures potentsiaalide väärtused elektroodidel ei muutu, siis mudeli ja originaa-

1 Modelleerimisel võib muuta ka aja mastaapi, s.t. muuta kõigi protsesside kulgemise kiirust mingi arv korda.

li vastavate punktide potentsiaalid on ühesugused. Seejuures elektrivälja tugevus vastavalt valemile

$$E = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta l} \qquad (5)$$

(kehtib ligikaudu väikese Δl korral) muutub pöördvõrdeliselt joonmõõtmetega. Kui aga säilitame elektroodide mõõtmed ja nendevahelised kaugused, kuid muudame kõigi elektroodide potentsiaale, samaaegselt teatud arv korda, siis muutuvad kõigi elektroodidevaheliste punktide potentsiaalid sama arv korda. Elektrivälja tugevus sel puhul muutub võrdeliselt elektroodide potentsiaalidega.

e) Isolaatorid elektrolüüdivannis. Vanni seinte mõju.

Kui elektrolüüdivanni asetada isolaator, siis laengud mööduvad isolaatorist, liikudes paralleelselt pinnaga. Vastavalt Ohmi seadusele diferentsiaalkujul on väljatugevuse jooned isolaatori pinna lähedal samuti suunatud paralleelselt pinnaga. Järelikult peavad ekvipotentsiaalpinnad olema risti isolaatori pinnaga.

Kuid on teada, et dielektriku asetamisel elektrivälja tekib elektriväli ka dielektriku sees ning väljatugevuse jooned murduvad dielektriku pinnal, tungides tema sisse. Seega väljatugevuse joonte käitumine dielektriku asetamisel elektrolüüti on täiesti erinev sellest, kui dielektrik on asetatud vaakuumi või mittejuhtivasse keskkonda. Siit võib järeldada, et elektrolüüdivanni abil ei saa modelleerida neid elektrivälja muutusi, mis on tingitud dielektriku asetamisest elektroodidevahelisse ruumi.[1]

---

[1] Elektrostaatilise välja modelleerimisel alalisvoolu elektriväljaga elektrolüüdis on dielektrilise läbitavusega ε analoogiliseks suuruseks juhtivus σ. See tähendab, et kahe keskkonna lahutuspiiril, mille juhtivused on σ_1 ja σ_2, murduvad voolujooned samuti nagu elektrostaatilise välja jõujooned kahe keskkonna lahutuspiiril, mille dielektrilised konstandid on ε_1 ja ε_2, kui $\sigma_1 / \sigma_2 = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$. Kuid püsiva eraldusjoone tekitamine erineva juhtivusega elektrolüütide vahel on praktiliselt võimatu. Võib väga jämedalt

Kui vanni seinad on valmistatud isolaatorist, siis seinte lähedal on välja pilt moonutatud, võrreldes väljaga piiramata keskkonnas. Seinte moonutavat mõju võib tunduvalt vähendada, kui vanni mõõtmed on küllalt suured, võrreldes elektroodide mõõtmetega, ja selle seinad on tehtud metallist ning talle on antud potentsiaal, mis peaks olema reaalses väljas lõpmata kaugel.

f) Elektroodide polarisatsioon. Alalisvoolu asendamine vahelduvvooluga.

Nagu teada, toimub alalisvoolu läbimisel elektrolüüdist anoodil ja katoodil mitmesuguste ainete eraldumine (elektrolüüs). Seega isegi siis, kui elektroodid on valmistatud samast ainest, osutuvad nad teatud aja möödudes erinevateks. Kahe erineva juhi asetamisel elektrolüüti moodustub galvaani element: nende juhtide vahel tekib potentsiaalide vahe, mis on tingitud erinevatest potentsiaalihüpetest elektroodide pinnal. Potentsiaalihüpete muutumist elektroodide pinnal, mis tekib elektroodidele erinevate ainete eraldumise tulemusena, nimetatakse elektroodide polarisatsiooniks.

Elektroodide polarisatsiooni tulemusena võib potentsiaali jaotumise pilt elektrolüüdivannis katse jooksul tunduvalt muutuda, mistõttu mõõtmised osutuvad ebatäpseks. Seejuures võivad elektroodidele vahetult eralduda või sekundaarsete keemiliste protsesside tulemusena tekkida niisugused ained, mis võrreldes elektrolüüdiga omavad väikest elektrijuhtivust. See toob kaasa elektroodide pindade ekvipotentsiaalsuse kadumise. Elektroodide ekvipotentsiaalsus oli aga peamiseks tingimuseks, mis lubas asendada elektrostaatilist välja voolu elektriväljaga elektrolüüdis.

Selleks et kõrvaldada polarisatsiooni kahjulik mõju potentsiaali jaotumise pildile elektroodide vahel, kasuta-

---

(kvalitatiivselt) modelleerida elektrostaatilist välja, milles asub dielektrik, muutes vanni sügavust teatud kohtades, s.t. muuta üldist juhtivust vanni ristlõikepindala vähendamise arvel. Samaks otstarbeks võib kasutada ka kehasid, mis on valmistatud poorsetest isolaatoritest.

takse alalisvoolu asemel vahelduvvoolu. Sel juhul voolu läbimisel poolperioodi jooksul ühes suunas ei jõua polarisatsioon saavutada märkimisväärset suurust. Järgmise poolperioodi jooksul elektroodide osad vahetuvad, eraldunud ained lähevad üle elektrolüüti.

Alajaotuses (c) näidati, et voolu puudumine sondi potentsiomeetri liugkontaktiga ühendavas juhtmes ei sõltu liugkontakti kindla asukoha korral elektroodide potentsiaalide vahest, vaid ainult sondi asukohast. Seega, kui vool selles juhtmes teatud konstantse potentsiaalide vahe korral puudub, siis ta puudub ka mistahes ajahetkel sel juhul, kui elektroodidele on rakendatud muutuv potentsiaalide vahe.

Vahelduvvoolu kasutamine ei too järelikult mingeid muudatusi vanni punktide potentsiaalide leidmise meetodisse, välja arvatud see, et galvanomeeter, mis on lülitatud ahelasse sondi ja potentsiomeetri liugkontakti vahele, tuleb asendada riistaga, mis registreerib vahelduvvoolu olemasolu. Selliste riistadena võib kasutada elektronostsillograafi, katoodvoltmeetrit ja isegi telefoni.

g) Laengu trajektoori leidmine.

Kui elektriväli on teada laengukandja liikumise tee kõikides punktides, siis nagu juba märgitud, võib leida kõik seda liikumist iseloomustavad suurused, näiteks laengu trajektoori ja tema kiiruse mistahes punktis. Üheks küllalt lihtsaks ja võrdlemisi täpseks trajektoori leidmise meetodiks on kõverusraadiuste meetod. Seda meetodit on sobiv kasutada laengu tasapinnalise liikumise korral, kui on määratud ekvipotentsiaaljooned. Meetod seisneb järgmises:

Elektrivälja mõjul ei liigu ioonid üldiselt sirgeid, vaid kõverjoonelisi trajektoore mööda. Teatud väikesel teelõigul võib mistahes kõverjoont asendada sobiva raadiusega ρ ringjoone kaarega. Massi m ja kiirust v omava iooni liikumine mööda ringjoont raadiusega ρ võib toimu-

da ainult siis, kui talle mõjub keskẗmbejõud

$$F = \frac{mv^2}{\rho}, \qquad (6)$$

mis on suunatud piki raadiust ringjoone keskpunkti poole.

Iooni liikumisel elektriväljas on keskẗmbejõuks laengule elektrivälja poolt mõjuva jõu projektsioon raadiuse suunale, s.t. selle jõu komponent, mis on risti trajektooriga. Kui E on elektrivälja tugevus selles kohas, kus asub vaadeldav väike trajektoori osa, ning ϑ trajektoori normaali ning elektrivälja tugevuse vektori vaheline nurk, siis laengule mõjuva jõu projektsioon raadiuse suunale

$$F_n = qE\cos\vartheta. \qquad (7)$$

Olgu φ_1 elektrivälja potentsiaal vaadeldava trajektoori osa asukohas ning φ_0 punkti potentsiaal, milles iooni kiirus oli null. Elektrivälja jõudude töö iooni ümberpaigutamiseks nimetatud punktide vahel

$$A_{01} = q\,U_{01} = q(\varphi_0 - \varphi_1). \qquad (8)$$

Vastavalt energia jäävuse seadusele omandab laeng kineetilise energia, mis on võrdne tehtud tööga

$$\frac{mv^2}{2} = q\,(\varphi_0 - \varphi_1). \qquad (9)$$

Korrutades avaldise mõlemad pooled kahega ja jagades raadiusega ρ, saame

$$\frac{mv^2}{\rho} = \frac{2q}{\rho}\,(\varphi_0 - \varphi_1). \qquad (10)$$

Valemitest (6), (7) ja (10) leiame

$$\rho = \frac{2\,(\varphi_0 - \varphi_1)}{E\cos\vartheta}. \qquad (11)$$

Kui on teada potentsiaali jaotumine, siis võib leida elektrivälja tugevuse absoluutväärtuse

$$E = \left| \frac{\Delta \varphi}{\Delta l} \right|, \qquad (12)$$

kus $\Delta \varphi$ on potentsiaali juurdekasv lõigul Δl, mis on suunatud piki väljatugevuse joont ja on järelikult risti ekvipotentsiaaljoonega. Valemi (12) abil leiame lõpliku avaldise vaadeldava trajektoori lõigu kõverusraadiuse jaoks:

$$\rho = \frac{2(\varphi_0 - \varphi_1)\Delta l}{\Delta \varphi \cos \vartheta}. \qquad (13)$$

Laengu trajektoori lõikude järkjärgulise konstrueerimise praktiline meetod on näidatud joonisel 3. Olgu antud, et laeng, mille kiirus trajektoori punktis potentsiaaliga φ_0 oli null, jõudes punkti A_1, mis asub ekvipotentsiaaljoonel potentsiaaliga φ_1, omab kiirust, mida näitab joonisel vektor $\vec{v}_1$. Laengu trajektoori lõigu konstrueerimine kahe ekvipotentsiaaljoone vahel toimub sirkli ja joonlaua abil järgmiselt:

Leiame väljatugevuse joone lõigu ekvipotentsiaalpindade vahel, mille potentsiaalid on φ_1 ja φ_2. Selleks joonestame lõigu A_1B_1, mis on risti mõlema ekvipotentsiaaljoonega.[1]

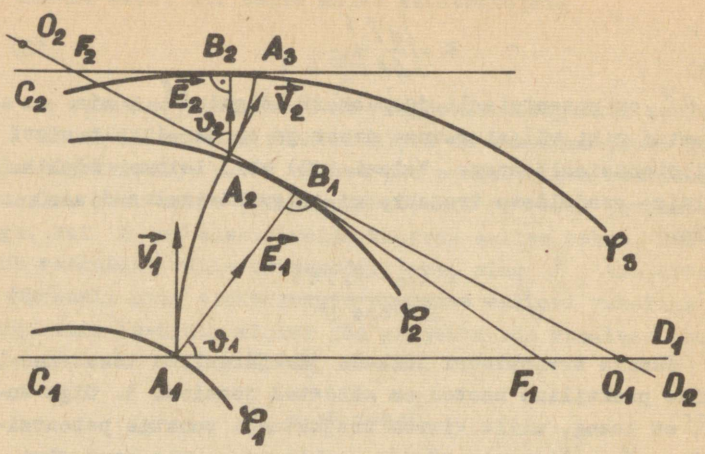
Tõmbame sirge $C_1A_1D_1$, mis on punktis A_1 risti vektoriga $\vec{v}_1$. See on trajektoori normaaliks. Nurk $B_1A_1D_1$ ongi ϑ. Lõigu A_1B_1 pikkus on Δl, ning $|\varphi_2 - \varphi_1| = |\Delta \varphi|$.

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

$$\Delta l' = \frac{\Delta l}{\cos \vartheta}. \qquad (14)$$

---

[1] Kui ekvipotentsiaalpinnad pole paralleelsed, siis lõik A_1B_1 tuleb joonestada nii, et ta moodustaks võimalikult väikesed nurgad mõlema ekvipotentsiaaljoone normaalide suhtes.



Joon. 3.

Kasutades seda avaldist, võib valemi (13) ümber kirjutada

$$\rho = \frac{2\,(\rho_0 - \rho_1)\,\Delta l'}{|\rho_2 - \rho_1|}\,. \qquad (15)$$

Mõõtes joonisel $A_1F_1 = \Delta l'$, arvutame kõverusraadiuse valemi (15) järgi. Suurused ρ_0, ρ_1, ρ_2 on antud.

Kandes punktist A_1 sirgele $C_1A_1D_1$ lõigu pikkusega ρ, leiame kõveruskeskpunkti O_1 asukoha. Tuleb arvesse võtta seda, et kõveruskeskpunkt asetseb punktist A_1 sirgel $C_1A_1D_1$ samas suunas, kus lõigu A_1B_1 projektsioongi sellel sirgel, kui

1) vaadeldakse positiivse laengu liikumist,

2) $\rho_1 > \rho_2$.

Kõveruspunkt asub teisel pool punkti A_1 kui üks nendest tingimustest asendada vastupidisega.

Tõmbame sirkliga kaare A_1A_2, mille raadius on ρ ning keskpunkt punktis O_1. Kaar A_1A_2 ongi otsitavaks

laengu trajektoori lõiguks ekvipotentsiaaljoonte φ_1 ja φ_2 vahel.

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

Lõpuks tuleb märkida, et ioon, mille algkiirus oli null, liigub jõujoont mööda nii kaua kuni jõujoon on sirge, s.t. äärmisel juhul (meie ligikaudse konstruktsiooni korral) kahe esimese ekvipotentsiaalpinna vahel. Seda on vaja arvestada trajektoori algosa konstrueerimisel.

4. Riistade kirjeldus.

a) Seadme skeem on näidatud joonisel 4. Potentsiomeetrina kasutatakse 11-positsioonilise ümberlülijaga takistussalve. Äärmised kontaktid ühendatakse kondensaatorite[1] kaudu üle lüliti vahelduvvoolu allikaga (võrk 220 V) ja klemmidega, mille külge on ühendatud elektroodid.

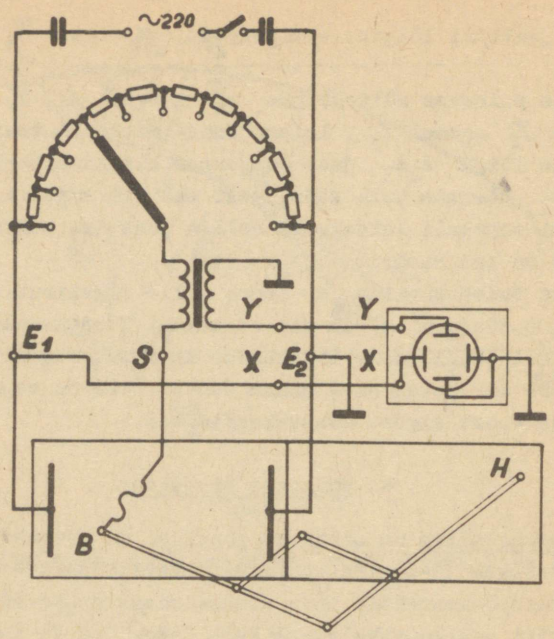
Takistussalve iga sektsiooni takistus (kokku on neid 10) on 100 oomi. Pingejagaja võimaldab leida 9 ekvipotentsiaalpinna asukoha (peale elektroodide endi kahe ekvipotentsiaalpinna), kusjuures naaberpindade potentsiaalid erinevad teineteisest 1/10 võrra võrreldes elektroodidevahelise pingega.

Vahelduvvoolu olemasolu registreeriva riistana kasutatakse ostsilloskoopilist nullindikaatorit. Indikaatori ja sondi lülitamiseks on pingejagaja paneelil klemmid X ja Y ning S. Ekvipotentsiaalpinnad kantakse paberile pantograafi abil.

b) Pantograaf on jooniste, kaartide jne. teatud mastaabis vähendamiseks või suurendamiseks kasutatav vahend,

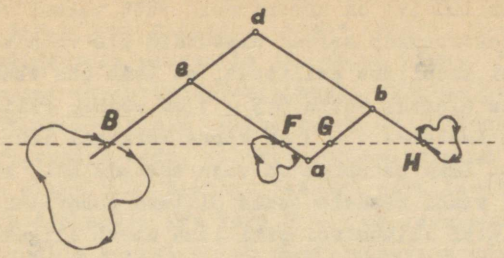
---

[1] Kondensaatorid on vajalikud vanni läbiva voolu tugevuse piiramiseks.



Joon. 4.

mis võimaldab sarnasust säilitades kanda tasapinnal asuvate punktide asukohad paberile. Ta koosneb neljast omavahel šarniirselt ühendatud õlast, mis moodustavad parallelogrammi (joonisel 5). Parallelogrammi võib pöörata horisontaaltasapinnas koos tema külgedevaheliste nurkade samaaegse muutmisega punkti G (pooluse) ümber, mis asub ühel tema küljel (või selle pikendusel). Kui mingi punkt B , mis asub parallelogrammi ühel küljel (või selle pikendusel), joonistab teatud kõvera, siis punktid F ja H , mis asuvad punkte B ja G ühendava sirge lõikepunktides teiste külgedega (või nende pikendustega), joonistavad sarnased kõverad. Seejuures jäävad nad kogu aeg



Joon. 5.

punkte B ja G läbivale sirgele.[1] Punktide F ja H poolt joonistatavate kõverate mastaabid võrreldes punkti B poolt moodustatud kõveraga määratakse suhtega aG : : (Be + aG) ja bH : (Be + aG). Antud juhul (vt. joon.4) on parallelogramm ühtlasi romb, poolus G asub tipus a ja Be = bH. Neil tingimustel punktid B ja H joonestavad ühesuguste mõõtmetega kõverad. Punktis B on kinnitatud sond, punktis H pliiats.

5. Töö käik.

a) Elektroodide paigutamine elektrolüüdivanni toimub vastavalt juhendaja näpunäidetele. Kuna töös kasutatakse vahelduvpinget, siis on ükskõik, millise pingejagaja klemmi külge ühendada elektroodid.

Juhi ekraneeriva mõju uurimisel suurt silindrit klemmidega ei ühendata. Selleks et mõõtmiste jooksul elektroodid paigalt ei nihkuks, on vastavates kohtades vanni põhja kinnitatud spetsiaalsed toed.

---

[1] Kõverate sarnasuse tõestamiseks lähtume kolmnurkade BeF , FaG ja GbH sarnasusest pantograafi mistahes liikumiste korral ja suhete Be : aG ning Be : bG konstantsusest.

b) Sondi, pliiatsi ja laua paigutamine. Sobiva juhtivusega elektrolüüdiks on kraanivesi. Vett valame vanni nii palju, et elektroodide servad ulatuksid üle veenivoo ca 0,5 cm. Sondi kinnitame selliselt, et tema ots vanni mistahes punktis ulatuks vette 0,5 - 1 cm võrra. Pliiatsi grafiit peab asetsema 1 - 3 mm võrra kõrgemal laua mistahes punktist. Laud paberiga on vaja asetada nii, et sondi paigutamisel vanni keskele asuks pliiats paberilehe keskel, ning et pliiatsi liikumisel piki laua servi liiguks sond piki vanni seinu.

c) Elektroodide asukohtade märkimine. Enne pingejagaja võrku lülitamist kanname paberile elektroodide asukohad (seda on parem teha enne juhtmete ühendamist elektroodidega). Selleks puudutame sondiga elektroodi tema mingis punktis ja vajutades kergelt pliiatsile, märgime punkti paberile. Seejärel nihutame sondi piki elektroodi pinda 1,5 - 2 cm võrra ning märgime järgmised punktid, niikaua kuni oleme sondiga käinud ümber elektroodi ning tema kontuurid paberile kandnud.

d) Vooluringi koostamine. Seadme elektrilise montaaži teostame vastavalt joon. 4. Elektrolüüdivanni elektroodide ja sondi juurest tulevad juhtmed ühendame seadme paneeli vastavate klemmidega E_1, E_2 ja S. Paneelil asuvad kontaktid X ja Y ühendame spetsiaalsete juhtmetega ostsilloskoopilise nullindikaatori samade kontaktidega.

Olles eelnevalt tutvunud ostsilloskoopilise nullindikaatori kasutamisjuhendiga, seame ta töökorda.

e) Ekvipotentsiaalpindade määramine. Asetades potentsiomeetri ümberlüliti nullasendisse, nihutame sondi elektroodi juurde, mis on ühendatud pingejagajaga nullkontaktipoolsest küljest. Pingejagaja lülitame võrku. Puudutades sondiga elektroodi, kontrollime nullindikaatori abil, et elektroodi pinna mistahes punkt omab sama potentsiaali, mis pingejagaja nullkontaktki.

Asetame ümberlüliti esimesse asendisse. Nihutades sondi risti elektroodi pinnaga, leiame sellise asendi, mille juures indikaatori ekraanile joonestub sirge. Punkti, mis asub esimesel ekvipotentsiaalpinnal, märgime paberile. Selle ekvipotentsiaalpinna teiste punktide asukohta on kerge leida, arvestades seda, et ekvipotentsiaalpind peab juhi läheduses olema juhi pinnaga peaaegu paralleelne.

Nihutades sondi iga kord 2 - 3 cm (suurema kõverusega elektroodide korral tuleb sondi nihutada väiksemate sammude kaupa) ja saavutanud sirge joone ostsilloskoobi ekraanil, märgime paberile ekvipotentsiaalpinna punktid, kuni sond on liikunud ümber elektroodi või jõudnud vanni seinteni. Selliselt leitud ekvipotentsiaalpinna punktid ühendame sujuva joonega.

Asetades ümberlüliti järgnevalt teise, kolmandasse jne. asendisse, määrame selliselt 9 ekvipotentsiaalpinda. Lülitame pingejagaja võrgust välja. Pärast elektroodide asetamist mingi teise variandi järgi kordame katset. Ühe praktikumi jooksul tuleb selliselt määrata elektrivälja pilt 3 - 4 elektroodide paigutuse variandi jaoks.

Saadud jooniste töötlemisel tuleb vastavalt juhendaja korraldusele neile kanda väljatugevuse jooned ja määrata elektrivälja tugevus reas piirkondades elektroodide vahel või konstrueerida laengu trajektoor, mis algab mingist punktist ühel elektroodidest.

Märkusi.

- Sondi tuleb punktist punkti nihutada ettevaatlikult, jälgides, et kokkupuutel elektroodide või vanni seintega ta ei painduks. Tuleb jälgida, et ühendusjuhtmed ei takistaks sondi liikumist. Kui on vaja määrata punktide asukoht kinnise elektroodi sees, tuleb kinnitav kruvi lahti keerata, sond üles tõsta, viia ta üle elektroodi ääre ning uuesti kinnitada selliselt, et ta ots oleks asetatud elektrolüüti.

- Võrku lülitatud pingejagaja korral on keelatud asetada käsi vette või puudutada samaaegselt kahte elektroodi, mis on ühendatud pingejagaja erinevate klemmidega.
- Ostsilloskoobi töötamisel põhjustab elektronkiire üleliigne intensiivsus toru eluea lühenemise ekraani riknemise tõttu. Seepärast, kui mõõtmisi ei sooritata, peavad nupud "Яркость" ja "Фокусировка" olema äärmises vasakpoolses asendis.

6. Lisaülesandeid.

a) Tuletada Ohmi seadus vektorkujus.
b) Põhjendada, miks tekib ostsilloskoopilise nullindikaatori ekraanil ellips.
c) Tuletada valem elektrolüüdiga täidetud silinderkondensaatori elektroodidevahelise takistuse jaoks. Võrrelda seda silinderkondensaatori mahtuvuse valemiga.
d) Tuletada empiiriliselt (katsest leitud välja pildi järgi) valem väljatugevuse E jaoks silinderkondensaatoris - E ja r vaheline sõltuvus, kus r on kaugus teljest. Selleks arvutatakse valemi (5) järgi väljatugevused mitmesugustel kaugustel teljest, joonestatakse graafik E = E(r), valitakse graafiku üldkuju järgi sobiv funktsioon ja määratakse kordajad keskmiste meetodil. (Vt. näit. Бронштейн и Семендяев, Справочник по математике, 1956, lk. 578.)

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.П. 1968, стр.9-81.
2. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. 1960,lk.191.
3. Пустовалов. Электролитическая ванна. Изд. МГУ, 1961.
4. Elektronostsilloskoopilise nullindikaatori tehniline kirjeldus.

2. ELEKTROSTAATILISE VOLTMEETRI KALIIBRIMINE.

1. Tööülesanne.

Elektrostaatilise voltmeetri kaliibrimine absoluutsel meetodil.

2. Töövahendid.

Absoluutne elektromeeter, kõrgpingealaldi reguleeritava väljundpingega 0 - 2500 V, telefon, heligeneraator, kaliibritav elektrostaatiline voltmeeter, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

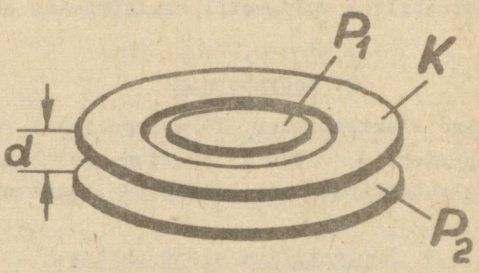
Potentsiaalide vahe mõõtmiseks absoluutsel meetodil peab teadma valemit, mis võimaldab arvutada kahe laetud juhi potentsiaalide vahet nendele juhtidele mõjuva elektrostaatilise jõu ning juhtide asendit ning mõõtmeid iseloomustavate suuruste kaudu.[1] Leides sobiva meetodi jõu mõõtmiseks võib arvutada potentsiaalide vahe. Lihtne on vajalik valem tuletada plaatkondensaatori jaoks. Olgu mõlemad plaadid horisontaalsed, kusjuures ülemist plaati P_1 ümbritsegu kitsa õhupiluga eraldatud rõngas K (vt. joon. 1). Kui ülemise plaadi ja rõnga potentsiaal on φ_1 ja alumise plaadi potentsiaal φ_2, on elektriväli P_1 ja P_2 vahel homogeenne, kuna ääreefekt ilmneb ainult rõnga välisserva lähedal. Rõngast K, mille ülesandeks on ääreefekti likvideerimine plaadi P_1 serva lähedal, nimetatakse tavaliselt kaitserõngaks. Pole raske näidata, et

---

[1] Eriline tähtsus on sellel meetodil CGSE süsteemi jaoks.

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{d}{D}\sqrt{\frac{8F}{\varepsilon_0 \varepsilon \pi}}, \qquad (1)$$

kus d on plaatidevaheline kaudus,
D - plaadi P_1 diameeter,
ε_0 - elektriline konstant,
ε - keskkonna suhteline dielektriline läbitavus ja
F - ülemisele plaadile mõjuv jõud.



Joon. 1.

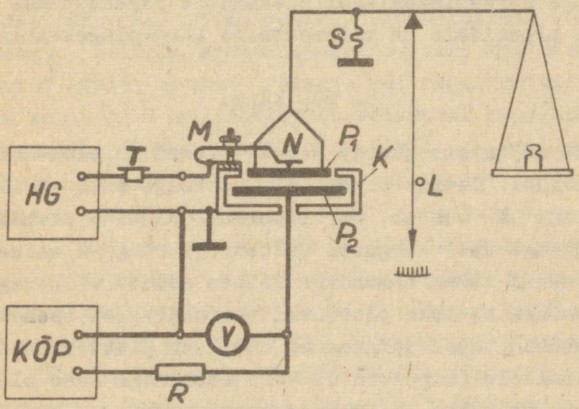
Plaadile mõjuvat jõudu võib mõõta näiteks tundlike kangkaalude abil. Riistu, mille abil saab määrata potentsiaalide vahet kondensaatori plaatidele mõjuva elektrostaatilise tõmbejõu mõõtmise kaudu, nimetatakse absoluutseteks elektromeetriteks. Absoluutseteks sellepärast, et nad võimaldavad potentsiaalide vahe absoluutseid mõõtmisi, s.t. eelnevalt kaliibrimata riistaga. Esimese absoluutse elektromeetri konstrueeris 1867.a. W. Thomson, mistõttu seda nimetatakse sageli Thomsoni elektromeetriks.

Teist tüüpi elektromeetrite (näit. niit- või kvadrantelektromeetrite) korral liikuva osa potentsiaali arvutamine sõltuvalt sellele mõjuva jõu suurusest ning asukohast küllaldase täpsusega tehtav ei ole. Et niisuguseid riistu kasutada potentsiaalide vahe mõõtmiseks, tuleb nad eelne-

valt kaliibrida absoluutse elektromeetri abil. Viimasel juhul osutuvad mõõteriistad suhteliseks, samuti nagu nende abil tehtavad mõõtmisedki.

4. Seadme kirjeldus.

Absoluutne elektromeeter on konstrueeritud analüütiliste kaalude baasil (joon. 2). Riista tähtsamaks osaks on kondensaator, mille moodustavad plaadid P_1 ja P_2 ning kaitserõngas K. Ülemine plaat on kinnitatud kaalu õla külge, kuna alumine asetseb sellega paralleelselt ning on ümbritsetud metallkarbiga. Nii metallkarp, plaat P_1 kui ka kõrgepingeallika üks poolustest on maandatud, teine poolus on ühendatud plaadiga P_2.



Joon. 2.

Laadimata kondensaatori ülemine plaat P_1 tasakaalustatakse kaitserõngaga ühele tasapinnale, kaugusele d alumisest plaadist. Tõke N hoiab plaati P_1 selles asendis ka siis, kui parempoolne kaalukauss on koormatud vihtidega. Selleks, et kondensaatori laadimisel ülemine plaat ei satuks külgetõmbejõu mõjul kontakti alumise plaadiga, on osu-

ti läheduses tõke L .

Heligeneraatori HG ja telefoni T vooluringi abil on mugav fikseerida tasakaalu saabumise momenti kaalukausile asetatud koormuse ning plaadile P_1 mõjuva elektrostaatilise jõu vahel. Takistuse R ülesanne on piirata võimaliku läbilöögi voolu.

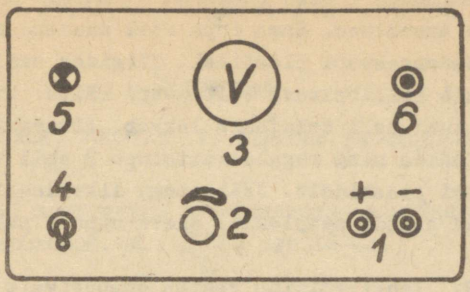
Alalispingeallikana (KÕP) kasutatakse stabiliseeritud kõrgepingealaldit BCM , mille väljundpinge on sujuvalt reguleeritav 0 - 2500 voldini. Alaldi esiplaadil (joon. 3) on kaks pesa (+ ja -) ühenduste tegemiseks välise vooluringiga, nupp 2 pinge sujuvaks muutmiseks, alalispinge voltmeeter 3 väljundpinge jämedaks hindamiseks, lüliti 4 alaldi sisselülitamiseks, signaallamp 5, nupp 6, mille abil on võimalik lühistada alaldi väljundklemmid 1.

Pinge kõrgepingealaldi klemmidelt rakendatakse elektromeetri plaatidele ja voltmeetrile kõrgepingekaabli kaudu.

5. Töö käik.

Enne mõõtmiste juurde asumist veendume elektromeetri korrasolekus. Ülemine plaat P_1 asetsegu sümmeetriliselt kaitserõnga K suhtes, paralleelselt alumise plaadiga ja kaitserõngaga ühel kõrgusel (plaadi ja rõnga ülemised pinnad asetsevad samas tasandis). Riista eelnev väljareguleerimine toimus kaalude platvormi horisontaalse asendi juures, mistõttu tuleb jälgida ka nüüd, et platvorm asetseks horisontaalselt (ripplood!). Vertikaalsihis saab plaadi P_1 asendit muuta tõkke N nihutamisega mutri M abil, kuna platvormi asendi reguleerimine toimub viimase toetuskruvide vahendusel. Kui plaadi P_1 sümmeetrilist asendit ja platvormi horisontaalseisu üheaegselt saavutada ei ole võimalik, pöördume juhendaja poole.

Plaadi ülalkirjeldatud seis peab vastama pingestamata kondensaatoriga kaalude tasakaaluasendile. Tasakaalu võime kaalud viia kahel viisil. Esiteks, nihutame tõket N ülespoole, olles eelnevalt fikseerinud selle algseisu (helige-



Joon. 3.

neraatori vooluring on seejuures suletud). Parempoolsele kaalukausile lisame vihte, muudame ratsuri või reguleerimismutri asukohta kaalude õlal seni, kuni osuti asend ühtib nulltäpiga. Nüüd viime tõkkekruvi algseisu tagasi. Teise meetodi puhul võime kaalud tasakaalustada tõket N liigutamata. Selleks asetame parempoolsele kaalukausile niisugused vihid, muudame ratsuri või reguleerimismutri asendit kaalu õlal selliselt, et väiksemgi koormuse muutus põhjustaks ühenduse katkemise tõkke N ja plaadi P_1 vahel, mida näitab heli lakkamine telefonis. Elektromeetri reguleerimisel jälgime, et kaalukausi ning kangi ja plaadi P_1 käik oleks vaba ja et plaatidevaheline ruum oleks täiesti puhas (tolmukübemete, juuksekarvade vms. puudumine plaatidevahelises ruumis). Riista reguleerime ranges vastavuses analüütiliste kaalude käsitsemise reeglitega. Eriti oluline on vältida järske tõukeid, mis võivad põhjustada kaalukausside prismadelt libisemist ning peenikese kontakttraadi S katkemist.

Mõõdame järgmiselt. Koostame vooluringid vastavalt joonisele 2. Arreteerime korrastatud kaalud ning asetame parempoolsele kaalukausile 50-mg koormuse. Suleme kaalude uksed ja vabastame õlad arretiiri abil. Plaat P_1 surutakse vastu tõket N ning telefonis tekib heli. Lülitame vooluvõrku kõrgepingealaldi ja laseme tal soojeneda 2-3

min. Reguleerimisnupp 2 olgu pööratud eelnevalt äärmisesse vasakpoolsesse asendisse. Sama nupu abil suurendame sujuvalt pinget kondensaatori plaatidel, jälgides seejuures tähelepanelikult kaliibritava voltmeetri näitu. Pinget suurendame seni, kuni heli telefonis lakkab. Fikseerime kaliibritava riista näidu ning reguleerimisnupu 2 abil võtame pinge kondensaatori plaatidelt. Jääklaengu likvideerimiseks lühistame plaadid alaldi esiplaadil oleva nupu 6 põhjasurumise teel.

Plaadi P_1 lahtirebimine vastab ebapüsivale tasakaalule elektrostaatiliste tõmbejõudude ning koormuse vahel.

Suurendame kaalukausi koormust 50 mg võrra ja teeme eelmisega analoogilise protseduuri. Mõõtmisi jätkame seni, kuni pole läbitud kogu voltmeetri skaala ühes ning seejärel vastupidises suunas.

Mõõtmisel tuleb kogu aeg meeles pidada, et töötame kõrgepingeallikaga, mistõttu on kategooriliselt keelatud pingestada skeemi ilma juhendaja eelneva loata, teha pingestatud skeemis mistahes ümberlülitusi ning töötada kaaludega sulgemata nende uksi.

Mõõtmistulemused korraldame tabelisse, kuhu kanname ka valemi (1) põhjal arvutatud potentsiaalide vahe väärtused ning mõõtmisvead.

Joonestame kaliibrimiskõvera, kandes abstsissteljele kaliibritava voltmeetri näidud, ordinaatteljele aga arvutatud potentsiaalide vahe väärtused.

6. Riista konstandid.

Kondensaatori ülemise plaadi diameeter $D = 82$ mm, plaatidevaheline kaugus $d = 2{,}5$ mm. Takistus $R = 3$ kΩ.

7. Täiendavaid küsimusi.

a) Tuletada valem (1) nii SI kui CGSE süsteemi jaoks.
b) Kirjeldada elektrostaatilise voltmeetri ehitust.
c) Miks võib antud töös saavutada ainult ebapüsiva tasakaalu olekut?

d) Milline on joonisel 2 kujutatud metallkarbi ülesanne?

Kirjandus.

1. J. A. Strauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 73-77.

2. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., 1968, стр.16-22.

3. ELEMENTAARLAENGU MÄÄRAMINE MILLIKANI MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Veenduda elektrilaengute diskreetses struktuuris. Määrata elektroni laeng.

2. Töövahendid.

Millikani riist koos pulverisaatori, valgusallika, filtri ja pingeallikaga; elektrisekundimõõtja, elektrostaatiline voltmeeter, potentsiomeeter, lülitid, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Millikani meetod elementaarlaengu määramiseks seisneb laetud õlipiiskade liikumise uurimises plaatkondensaatori elektriväljas. Mõõtes piisa liikumise kiiruse Maa raskusväljas elektrivälja puudumisel ja selle olemasolu korral, võib arvutada piisale mõjuva elektrostaatilise jõu. Teades elektrivälja tugevust saab arvutada piisa laengu. Kui elektrilaengute struktuur on diskreetne ja elementaarlaeng tõepoolest eksisteerib, saab iga keha laeng q olla vaid selle laengu täisarvkordne, s.t.

$$q = \pm ne,$$

kus n on positiivne täisarv ja e - elementaarlaeng.

Tuletame arvutuste tegemiseks vajalikud valemid. Pingestamata horisontaalse plaatkondensaatori katete vahel langeva õlipiisa liikumisvõrrand on järgmine:

$$m \frac{dv}{dt} = P - F_t, \qquad (1)$$

kus P tähistab piisa raskusjõu ja õhu üleslükkejõu vahet;
v - piisa kiirust;
F_t - õhutakistust.

Stokes'i valemi kohaselt

$$F_t = 6\pi\eta\, rv = kv, \qquad (2)$$

kus r - piisa raadius,
η - õhu sisehõõrdetegur ja
$k = 6\pi\eta\, r$.

Seega

$$m \frac{dv}{dt} = P - kv. \qquad (3)$$

Pole raske veenduda, et viimast diferentsiaalvõrrandit rahuldab funktsioon

$$v = \frac{P}{k}\left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right). \qquad (4)$$

Tasakaalustatud liikumise kiirus

$$v_t = \frac{P}{k} = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho - \rho_o)}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9}\frac{\rho - \rho_o}{\eta} gr^2, \qquad (5)$$

kus ρ - õli tihedus ja ρ_o - õhu tihedus.

Olgu märgitud, et (5) tuleneb otseselt liikumisvõrrandist (3), kui lugeda $\frac{dv}{dt} = 0$.

Nagu näha valemist (4) määrab tasakaalustatud liikumise saabumise ajategur

$$\tau = \frac{m}{k} = \frac{2}{9}\frac{\rho}{\eta} r^2. \qquad (6)$$

Ühtlase liikumise saabumise aeg, nagu selgub valemist (6), väheneb kiiresti piisa raadiuse vähenemisel. Küllalt

väikeste piiskade puhul on see niivõrd lühike, et piisa liikumise võib alati lugeda ühtlaseks. Määrates ühtlase langemise kiiruse läbitud tee h ja selleks kulunud aja t_o kaudu, võime valemi (5) abil arvutada piisa raadiuse

$$r = \sqrt{\frac{9\eta h}{2(\rho - \rho_o)g t_o}} . \qquad (7)$$

Liikumisvõrrand laetud piisa jaoks pingestatud kondensaatori plaatide vahel juhul, kui liikumine toimub vertikaalselt üles, on järgmine:

$$m \frac{dv}{dt} = q \frac{U}{d} - P - kv, \qquad (8)$$

kus q tähistab piisa laengut,
U - plaatide potentsiaalide vahet,
d - plaatidevahelist kaugust.

Konstantne lisaliige liikumisvõrrandis ei muuda ajategurit γ. Ühtlase liikumise kiiruse arvutamiseks võrdsustame võrrandi (8) vasakpoolse liikme nulliga. Teades aega t, mille jooksul piisk tõuseb endisele kõrgusele, s.t. läbib teepikkuse h ning kasutades valemeid (3), (7) ja (8), saame piisa laengu arvutamiseks valemi

$$q = 9\pi \sqrt{\frac{2\eta^3 h^3}{(\rho - \rho_o)g}} \cdot \frac{d(t_o + t)}{U\, t_o^{3/2}\, t} . \qquad (9)$$

Laengu diskreetsuses, lähtudes antud katse andmetest, saab veenduda vaid siis, kui laengu määramisel tehtud viga dq on oluliselt väiksem elementaarlaengu e absoluutväärtusest. Katsetulemuse suhteline viga $\frac{dq}{q}$ peab olema järelikult palju väiksem $\frac{e}{q} = \frac{1}{n}$, kus n on piisa laeng väljendatult elementaarlaengute arvu kaudu. Seda tingimust on seda kergem täita, mida väiksem on n. Õppelaboratooriumis on piisa laengu määramise täpsus mitte suurem kui 5%, mistõttu piisa laeng peab olema tunduvalt väiksem 20-kordsest elementaarlaengust - on hea, kui see ei ületaks viit elementaarlaengut.

Kõikidest valemis (9) esinevatest suurustest katse käigus mõõdetavateks on ainult t_o, t ja U. Nende mõõtmise täpsusest sõltub peaasjalikult q mõõtmise viga. Valemist (9)

$$\frac{dq}{q} = \frac{dU}{U} + \frac{t_o}{t(t + t_o)}\,dt + \frac{3t + t_o}{2t_o(t + t_o)}\,dt_o ,$$

millest $t \approx t_o$ korral järgneb

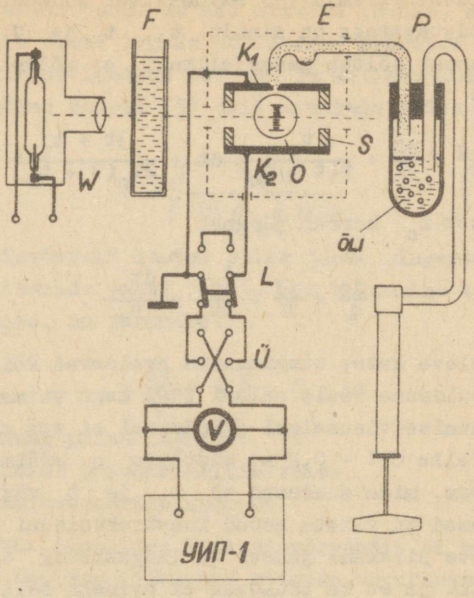
$$\frac{dq}{q} = \frac{dU}{U} + \frac{dt}{2t_o} + \frac{dt_o}{t_o} . \qquad (10)$$

Käesoleva katse tingimustes avaldavad kõige suuremat mõju lõpptulemuse veale valemi (10) kaks viimast liiget. Piisa liikumise visuaalsel jälgimisel ei saa aja mõõtmise viga viia alla 0,1 - 0,2 s, mistõttu q mõõtmise viga on seda väiksem, mida suuremad on t_o ja t väärtused, s.t. mida kergemad on riista antud konstruktsiooni juures piisad. Kergete piiskade juures on langemisaeg t_o tõepoolest küllalt pikk ja et ka tõusuaeg ei erineks sellest oluliselt, peab kondensaatori plaatidele rakendatud pinge olema mitte eriti suur.

Liiga väikeste piiskade valik ei ole aga ka soovitatav. Märgatavat mõju selliste piiskade liikumisele avaldab Browni liikumine, ning võimalikud konvektsioonvoolud; samuti on nad kergesti aurustuvad (katse käigus muutuvad piisa mõõtmed) ja raskesti jälgitavad.

4. Töö käik.

a) Riista kirjeldus. Katsekorralduse skeem on esitatud joonisel 1. Seadme tähtsamaks osaks on metallkarpi E paigutatud plaatkondensaator, mille ülemises kattes K_1 on ava pulverisaatorist P saabuvate õlipiiskade juhtimiseks katetevahelisse ruumi. Kondensaatori siseosa on ümbritsetud eboniitrõngaga S. Valgusallikas W formeeritud kiirtekimp juhitakse läbi filtri F ja avade kondensaatorisse. Filtri F moodustab veega täidetud klaasanum ning selle ülesandeks



Joon. 1.

on vähendada pikalainelise kiirguskomponendi intensiivsust. Õlipiiskade liikumist jälgitakse valguskiirte sihiga risti asetseva mõõtemikroskoobi abil. Kondensaatorisse juhitud valgus otseselt objektiivi ei satu, mistõttu mikroskoobi vaateväli osutub pimedaks. Kondensaatori sisepindadelt peegeldunud valguse intensiivsuse vähendamiseks on nad värvitud mattmustaks või kaetud tahmaga. Valguskiirte teele sattunud õlipiisad hajutavad valgust, mistõttu mikroskoobi vaatevälja tumedal foonil on nad märgatavad helenduvate punktidena. Okulaarvõre O abil, mida vajaduse korral saab valgustada spetsiaalsest valgusallikast, on võimalik määrata õlipiisa poolt läbitud teepikkusi.

Stabiliseeritud pingeallikas, voltmeeter V ja lülitid Ü ja L on vajalikud vastavalt kondensaatori plaati-

de pingestamiseks, selle reguleerimiseks ja mõõtmiseks, polaarsuse muutmiseks ja plaatide lühistamiseks.

b) Mõõtmised. Millikani riista toetuskruvide ning vesiloodi abil reguleerime kondensaatori horisontaalseks. Teeme vajalikud ühendused, seejuures kondensaatori plaate pingestamata. Olles eelnevalt tutvunud valgusallika W käsitsemisjuhendiga, lülitame selle vooluvõrku. Valgusallikaks on käesolevas töös ultraviolettvalgusti ОИ-18, mille ekspluatatsioonireeglite täitmine on normaalseks tööks hädavajalik. Kummiballoonile kiire vajutamisega pulveriseerime õlipiisku kondensaatori katetevahelisse ruumi. Hõõrdumise tõttu piisad laaduvad. Mikroskoobi abil veendume piiskade olemasolus ning nende liikumises. Mikroskoobi tuubus olgu välja tõmmatud 130. jaotuseni ning kogu edasise töö vältel jälgime, et see asend ei muutuks. Mikroskoopi saab teravustada mõnele piisale kogu mikroskoobi nihutamise teel horisontaalsuunas. Kui okulaarskaala ei ole nähtav, lülitame sisse skaalavalgustuse. Et mikroskoop annab ümberpööratud kujutise, siis piiskade langemisele vastab nende vastassuunaline liikumine riista vaateväljas. Pärast õli pulveriseerimist teeme 5 - 10 s vaheaja, mille jooksul raskemad ja mõõtmisi segavad piisad jõuavad vaateväljast lahkuda ning sadestuda kondensaatori alumisele plaadile. Uurimiseks sobivaks osutub antud katseriista juures piisk, mille liikumisaeg mõõteskaala ulatuses on 10 - 30 s. Niisugusele piisale fokuseerimegi mikroskoobi. Valemi (9) abil olgu eelnevalt hinnatud pinge U, mida tuleb kondensaatori katetele rakendada, et 1 - 5 elementaarlaenguga piisa vastassuunaline liikumisaeg eespool nimetatud teepikkusel ka elektrivälja korral oleks samasugune.

Kui vaatlusobjektiks valitud piisa kujutis läbib vertikaalse tõusu käigus mõõteskaala alumises osas oleva jaotise n_1, käivitame sekundimõõtja. Jõudnud jaotiseni n_2 skaala ülalosas, fikseerime sekundimõõtja näidu t_0 ning pingestame lüliti L abil kondensaatori plaadid. Piisa

liikumise suund peab seejuures muutuma vastupidiseks. Analoogiliselt eelmisega mõõdame ajavahemiku t, mis kulub piisa kujutise liikumiseks vaateväljas jaotiselt n_2 jaotiseni n_1 ning kui see ajavahemik osutub ligikaudu samasuguseks kui langemisaeg t_0, võib mõõtmisi jätkata. Tõusu- ja langemisajad ühe ja sama piisa jaoks määratakse eespool kirjeldatud viisil 5-1 korral. Kui piisa tõusuaeg t osutus plaatidele rakendatud pinge korral märgatavalt väiksemaks langemisajast t_0, siis on selle laeng liiga suur ning piisk vaatlusteks mittesobiv.

Töö jooksul tuleb vaadelda ning mõõta vähemalt 20 erineva piisa liikumist ja arvutada nende raadiused r ning laengud q. Tuleb arvestada seda, et mõõtmise käigus piisa laeng võib muutuda, mistõttu ühe ja sama piisa jaoks võib saada mitu erinevat q väärtust. Kõikide arvutatud q väärtuste jaoks leiame suurima ühise jagaja. Selleks võib olla muidugi nii e, 2e, 3e jne., kuid mida suurem on vaadeldud piiskade arv, seda väiksema tõenäosusega saadakse elementaarlaengust e erinev laengu väärtus. Lõpptulemused eraldame välja koos mõõtmisveaga.

Käesolev töö tuleb sooritada kahekesi. Piisa liikumist jälgiv üliõpilane lülitab ühe käega sekundimõõtjat ja teisega kommuteerib pinget, kuna teine üliõpilane kirjutab protokolli pinge U väärtused ning vastavalt esimese üliõpilase märguannetele, sekundimõõtja näidud. Töö kestel osad vahetuvad.

Aja mõõtmise vea vähendamiseks tuleb sekundimõõtja käivitamisel ja seiskamisel lähtuda samast tunnusest - alati vajutada sekundimõõtja lülitile siis, kui piisk kaob skaalajaotise taha või väljub sealt. Piiska on soovitav jälgida pidevalt, pead mikroskoobist eemaldamata, kuna vastasel korral võib selle vaateväljal kergesti kaotada ning kogu mõõteseeria tuleb korrata.

5. Riista konstandid.

Kondensaatori plaatide vaheline kaugus $d = (6{,}9 \pm 0{,}1)$ mm, okulaarskaala jaotise väärtus $d = (0{,}100 \pm 0{,}004)$ mm, õli tihedus $\rho = (0{,}826 \pm 0{,}008)\ g/cm^3$, õhu tihedus $\rho_0 = 0{,}00123\ g/cm^3$, õhu sisehõõrdetegur $\eta = 1{,}832 \cdot 10^{-7}$ puaasi.

6. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Millised jõud mõjuvad kondensaatori plaadi vahel asetsevale laetud õlipiisale?
b) Tuletada valem (9).
c) Kuidas saab kindlaks teha laenguta piisa olemasolu?
d) Kirjeldada teisi meetodeid elementaarlaengu määramiseks.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 7-22.
2. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., 1968, стр. 22-29.
3. Valgusti ОИ-18 käsitsemisjuhend.
4. Elektrostaatilise voltmeetri С-50 tehniline kirjeldus.
5. Stabiliseeritud pingeallika УИП-1 tehniline kirjeldus.

4. ELEKTRIMÕÕTERIISTADE KALIIBRIMINE.

1. Tööülesanne.

Tutvumine mõõteriistade taatlemise ja kaliibrimise aluste ning tehnikaga. Voltmeetri ja ampermeetri kaliibrimine.

2. Töövahendid.

Kaliibritav galvanomeeter, voltmeeter, ampermeeter, kaks reostaati, kaks takistussalve, kaliibritud juhtmetega millivoltmeeter, manganiintraadist reguleeritava pikkusega šunt, kruvik.

3. Mõõteriistade taatlemise ja kaliibrimise üldised alused.

Mõõteriista kaliibrimise all mõistetakse riistal oleva meelevaldse skaala jaotistele vastavate mõõdetava suuruse väärtuste leidmist. Kaliibritakse uued riistad, olemasolevad riistad mõõtepiirkondade laiendamisel või riistade kohandamisel neile algselt mittemääratud suuruse mõõtmiseks (näit. temperatuuri mõõtmisel termopaariga võib millivoltmeetri skaala kaliibrida kraadides). Teaduslikuks tööks, tootmisprotsesside kontrollimiseks jne. kasutatavate mõõteriistade kaliibrimise õigus on ainult NSVL Ministrite Nõukogu juures asuva Standardite, Mõõtude ja Mõõteriistade Komitee ning tema allasutuste, samuti ka mõõteriistu tootvate tehaste tehnilise kontrolli osakondade töötajatel. Teised isikud võivad kaliibrida ainult demonst-

ratsiooniks või õppeotstarbeks määratud riistu.

Kõik kaliibritud mõõteriistad kuuluvad perioodilisele kohustuslikule riiklikule kontrollile ülalnimetatud komitee allasutustes. Kontrolli sagedus oleneb põhiliselt mõõteriista otstarbest ja täpsusest. Osutimõõteriistu kontrollitakse mitte harvemini kui kord kolme aasta jooksul. Mõõteriistu, mille viimasest kontrollimisest on möödunud üle 3 aasta, kasutada ei tohi. (Kontrolli aeg märgitakse pitsatile, millega pitseeritakse mõõteriista korpuse sulgemise kruvid.)

Kõigile mõõteriistadele esitatavad nõuded täpsuse, näitude püsivuse jne. suhtes fikseeritakse riiklike standarditega (GOST-idega). Riiklik kontroll peab kindlustama mõõteriistade vastavust GOST-i normidele.

Otsese näiduga elektrimõõteriistad (osutimõõteriistad) peavad vastama riiklikule standardile GOST 1845-59, mis hakkas kehtima 1. jaanuarist 1961.a. GOST määrab lubatavate põhi- ja täiendavate vigade suuruse vastavalt mõõteriista täpsusklassile, nõuded mehhaanilise vastupidavuse, ülekoormuse talumise ja korpuse isolatsiooni suhtes, markeerimise eeskirjad, katsetuste ja kontrollimeetodid. Samuti määrab nimetatud GOST nõuded mõõteriistadega koos kasutatavate mõõtemanuste (šuntide, eeltakistite) kohta ja mõõteriistade skaalale kantavad märgid.

Lühikokkuvõte GOST-is 1845-59 osutimõõteriistadele esitatavatest nõuetest, riistade markeerimisest ja otseste elektrimõõtmiste täpsusest on esitatud kirjanduses [2, lk. 44-56].

Kaliibrimisel (kontrollimisel) kasutatava võrdlusriista lubatud põhiviga peab olema vähemalt 5 korda väiksem kui kaliibritaval mõõteriistal (see kehtib juhul, kui kaliibritava mõõteriista täpsusklass on teada). Seepärast kasutatakse tavaliselt täpsemate mõõteriistade (alates klassist 0,5) kaliibrimisel ja kontrollimisel potentsiomeetrilisi seadmeid. Vähem täpseid mõõteriistu kaliibritakse täpsematega võrdlemise teel. On lubatud kasutada ka 2,5 korda väiksema põhiveaga võrdlusriistu, kui neile on

juurde antud paranduste tabelid kõigi skaalajaotiste jaoks.

Osutimõõteriistade kontrollimisel (taatlemisel) leitakse kontrollitava riista skaala igale kriipsule vastavad mõõdetava suuruse väärtused kahel korral - osuti lähendamisel vaadeldavale kriipsule altpoolt ja ülaltpoolt. Mõlemal juhul arvutatakse viga - taadeldava riista näidu x ja mõõdetava suuruse tõelise väärtuse X vahe. Tõeliseks väärtuseks X loetakse võrdlusriista näit; võrdlusriista viga jäetakse arvestamata (miks?). Kumbki neist vigadest skaala ühegi kriipsu korral ei tohi ületada mõõteriista lubatud põhiviga. Peale selle ei tohi variatsioon (kahe näidu vahe) ühegi kriipsu korral ületada lubatud väärtust [2, lk. 8, 53]. Sel juhul loetakse mõõteriist korras olevaks ja vastavasse täpsusklassi kuuluvaks. Kui taadeldava mõõteriista skaala kriipsudele on tarvis leida parandid, arvutatakse iga kriipsu korral võrdlusriista kahe näidu keskmine X' ja leitakse parandid [1, lk. 7]

$$\delta(x') = X' - x.$$

Kõik need mõõtmistulemused ja arvutatud vead ning parandid esitatakse ühises 5-veerulises tabelis. Taadeldud mõõteriista kasutamisel liidetakse parand riista näidule.

Osutimõõteriistade kaliibrimisel esineb kaks erinevat olukorda.

1. Mõõteriista piirkonda laiendatakse või kohandatakse sellise suuruse mõõtmiseks, mis sõltub lineaarselt suurusest, mille mõõtmiseks antud riist on ette nähtud (näit. ampermeetri kaliibrimine voltmeetriks). Jaotise väärtus on nüüd konstantne kogu skaala ulatuses, mõõtepiirkonna saab valida nii, et igale skaalakriipsule vastav mõõteriista näit oleks võimalikult "ümmargune arv". Skaala lõppnäit reguleeritakse võrdlusriista näiduga kokkulangevaks, edasi tegutsetakse täpselt nagu taatlemisel.

2. Mõõteriista kohandatakse sellise suuruse mõõtmiseks, mis lineaarselt riistale ettenähtud suurusest ei sõltu. Jaotise väärtus muutub nüüd skaala ulatuses, skaala tuleb ebalineaarne. Sellisel juhul leitakse igale kaliibritava mõõ-

teriista skaala kriipsule vastav mõõdetava suuruse väärtus kahel korral, nagu taatlemiselgi, arvutatakse keskmised. Kaliibrimistulemused esitatakse tabelina ja graafikuna. Iga skaalakriipsu jaoks arvutatakse absoluutne viga võrdlusriista absoluutse vea, kaliibritava riista lugemi vea ning poole variatsiooni summana. Taandvea saamiseks avaldatakse kõik need vead skaala jaotistes, neist maksimaalse järgi arvutataksegi taandviga. Kui kaliibrimine toimus normaaltingimustes [2, lk. 4, 53], siis määrab viimane taandpõhivea, seega kaliibritud riista täpsusklassi. Kui see on väiksem riista enda täpsusklassist, jääb kehtima viimane, sest mõõteriista ei saa kaliibrida paremasse täpsusklassi kui see, mis on tema konstruktsiooniga määratud. Viimane arvestab ka näitude võimalikke muutusi pikaajalise kasutamise korral, mis võivad olla tingitud materjalide omaduste muutumisest, liikuvate pindade kulumisest jne.

GOST 1845-59 normid ei kehti galvanomeetrite kohta. Galvanomeetrid on väga tundlikud kaliibrimata skaalaga mõõteriistad. Galvanomeetritele antakse dokumentatsioonis tavaliselt kaasa vaid voolu- ja pingekonstandid, s.o. voolu tugevus (või pinge), mis tekitab osuti või valgusindeksi 1 jaotise suuruse hälbe. Need suurused antakse ligikaudu; galvanomeetri täpsem kaliibrimine tuleb vajaduse korral teha tema kasutajal. Täpsusklass määratakse kaliibrimistäpsuse ja variatsiooni kaudu; kalibratsiooni tuleb aeg-ajalt kontrollida, sest suure tundlikkuse korral on näitude muutus väga tõenäoline.

4. Tundliku mõõteriista (mikroampermeeter, galvanomeeter) kaliibrimine ampermeetriks ja voltmeetriks.

Käesolevas töös tuleb laiendada galvanomeetri mõõtepiirkonda, kaliibrida ta ampermeetriks ja voltmeetriks. Esimesel juhul tuleb galvanomeetriga paralleelselt lülitada šunt, teisel juhul järjestikku eeltakistus. Sobiva šundi ja eeltakistuse arvutame eelnevalt.

Olgu maksimaalne mõõdetava voolu tugevus I, galvanomeetrile lubatav maksimaalne voolu tugevus (s.o. vool, mille mõjul galvanomeetri osuti hälbib äärmise jaotiseni) I_g. Lähtudes Kirchhoffi seadusest voolu hargnemise kohta, saame šundi takistuseks

$$R_š = \frac{1}{n-1} R_g, \qquad (1)$$

kus $n = \frac{I}{I_g}$ on šundi kordaja,

R_g - galvanomeetri sisetakistus.

Analoogiliselt saame valemi ka eeltakistuse jaoks:

$$R_e = (n - 1) R_g, \qquad (2)$$

kus $n = \frac{U}{U_g}$ on eeltakistuse kordaja,

U - maksimaalne mõõdetav pinge,

$U_g = I_g R_g$ - galvanomeetrile lubatav maksimaalne pinge.

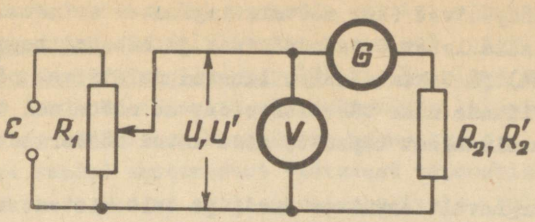
Mõõteriista skaala lineaarsuse korral on suurused I_g ja U_g seotud galvanomeetri voolu- ja pingekonstantidega Δi ja Δu valemite

$$I_g = \Delta i \alpha ; \quad U_g = \Delta u \alpha$$

abil, kus α on jaotiste arv skaalal.

Seega šundi ja eeltakistuse arvutamiseks tuleb määrata vähemalt kaks suurustest I_g, U_g ja R_g. Väga tundlike galvanomeetrite korral ei saa ühtki neist mõõta otseselt küllalt tundlike võrdlusriistade puudumise tõttu. Takistuse mõõtmise tavalised meetodid (oommeeter, sild) ka ei sobi, kuna nende kasutamisel läbib mõõdetavat takistust küllalt tugev vool. Seepärast kasutatakse kaudseid meetodeid.

Lihtsaim, kuid samal ajal küllalt täpne meetod I_g ja R_g määramiseks on järgmine. Galvanomeetriga järjestikku lülitatakse täppistakisti R_2 (joon. 1). See valitakse nii suur, et galvanomeetrist ja takistist R_2 voolu I_g läbijuhtimisel (galvanomeetri osuti on skaala äärmise kriipsu ko-



Joon. 1.

hal) on nendel tekkivate pingelangude summa U voltmeetriga mõõdetav. Suurendades R_2 väärtuseni R_2' ja samal ajal suurendades ka pinget, saab voolu tugevuse reguleerida uuesti võrdseks I_g-ga, sealjuures pingelangude summa on U'. Saadakse võrrandisüsteem:

$$\begin{cases} \frac{U}{I_g} = R_2 + R_g , \\ \frac{U'}{I_g} = R_2' + R_g . \end{cases} \qquad (3)$$

Siit on väga lihtne leida I_g ja R_g. R_2 ja R_2' õige valikuga (vastavalt kasutatava voltmeetri mõõtepiirkondadele) on võimalik saavutada, et I_g määramise relatiivne viga oleks määratud põhiliselt voltmeetri täpsusega, R_g relatiivne viga oleks aga pinge mõõtmise veast ainult 2 korda suurem.

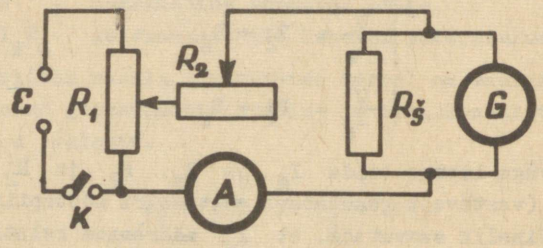
5. Töö käik.

Koostame joonisel 1 toodud skeemi, määrame I_g ja R_g ning arvutame U_g. Täppistakistina kasutame takistussalve, pinge mõõtmiseks mitme piirkonnaga voltmeetrit. Kui on kasutada reguleeritava väljundpingega toiteallikas, siis pole pingejagaja (reostaat R_1 potentsiomeetrilises lülituses) vajalik. I_g ja R_g määramisel valime R_2 ja R_2' selliselt, et I_g relatiivne viga tuleks võrdne voltmeetri luba-

tud taandpõhivea (kui mõõtmistingimused erinevad normaalseist, siis lubatud taandpõhivea ja lubatud taandlisavigade summa) ja takistussalve lubatud relatiivse põhivea summaga. Viimane nõue tähendab seda, et mõõtmisel tuleb kasutada maksimaalset täpsust, mida antud mõõteriistad võimaldavad.

Järgnevalt arvutame šundi ja eeltakistuse vastavalt juhendaja poolt antud mõõdetava voolu ja pinge maksimaalväärtustele. Eeltakistuseks kasutame takistusmagasini, šundiks aga manganiintraati. Mõõtnud diameetri kruvikuga, arvutame traadi vajaliku pikkuse, lugedes manganiini eritakistuseks $\rho = 43 \times 10^{-8}\,\Omega\cdot m$.

Koostame ampermeetri kaliibrimise skeemi:



Joon. 2.

R_1 ja R_2 - reostaadid, $R_š$ - manganiintraadist šunt,
A - võrdlusampermeeter, G - kaliibritav galvanomeeter,
K - lüliti.

Valinud arvutatud pikkusega šundi, pingestame vooluringi, vajaduse korral reguleerime šundi pikkust katseliselt, kuni mõõtepiirkonna lõppnäit vastab etteantule.

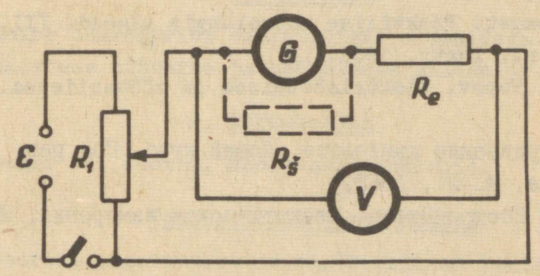
Šundi pikkuse sobitamine nõuab erilist ettevaatust, sest kasvõi hetkeline katkestus šundi ahelas tähendab galvanomeetri mähise läbipõlemist. (Miks?) Seepärast on ümberlülitatavate mõõtepiirkondadega ampermeetritel spetsiaalse ehitusega ümberlülijad, mis kindlustavad pideva kon-

takti. Ka antud töös tuleb kasutada erilisi ettevaatusabinõusid. Igasuguste ümberlülituste tegemisel, eriti aga šundi pikkuse reguleerimisel, peab lüliti K olema avatud!

Antud juhul on tegemist mõõtepiirkonna laiendamisega, skaalajaotise väärtus on konstantne kogu skaala ulatuses. Kontrollime saadud ampermeetri vastavust täpsusklassile vastavalt punktis 3 toodud taatlemise reeglitele, tulemused esitame tabelina. Kui võrdlusriista täpsusklass ei vasta nõuetele, tuleb kontrollitava ampermeetri näitude vea arvutamisel arvestada ka võrdlusriista viga (võrdlusriista absoluutne viga tuleb liita suurusele x-X). Ehitame ka saadud ampermeetri kaliibrimise graafiku - sõltuvuse skaalajaotiste arvu ja ampermeetrit läbiva voolu tugevuse vahel. See tuleb ilmselt sirge. Sirge kõrvale kanname ka taatlemisel saadud punktid, mis iseloomustavad viga ja variatsiooni skaala igas punktis. Parandeid pole tarvis arvutada.

Samas teljestikus ehitame ka ampermeetri näitude relatiivse vea graafiku. Mida see graafik näitab?

Edasi koostame voltmeetri kaliibrimise skeemi:



Joon. 3.

R_1 - reostaat, R_e ja $R_š$ - takistussalved, V - võrdlusvoltmeeter, G - galvanomeeter.

Suure sisetakistusega galvanomeetrite korral võib juhtuda, et etteantud pinge jaoks tuleb eeltakistus liiga suur, nii et olemasolevatest takistussalvedest pole seda võimalik

valida. Siis tuleb eelnevalt vähendada sisetakistust (seega ka voolutundlikkust) šundi $R_š$ abil ja eeltakistus uuesti arvutada. Edasi sobitame eeltakistuse katseliselt täpseks ja taatleme analoogiliselt ampermeetriga. Joonestame kaliibrimise ja vea graafikud.

6. Lisaülesandeid.

a) Tutvuda viidatud kirjanduse [3, 4, 5] abil elektrimõõteriistade ehitusega. Määrata töös kasutatud mõõteriistade tüübid.
b) Dešifreerida kõigi töös kasutatavate mõõteriistade skaaladel olevad märgid.
c) Miks tehakse šunt manganiinist?
d) Miks ei piisa ampermeetri kaliibrimisel ainult pingejagajast R_1, vaid peab olema ka reostaat R_2?

Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed. I. TRÜ rotaprint, Tartu, 1967.
2. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed. III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.
3. V. S. Popov. Elektrimõõtmised ja mõõteriistad. Tallinn, 1966.
4. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А. В. Фремке. М.-Л., 1963.
5. Н. Г. Востроκнутов. Электрические измерения. М., 1966.

5. JUHTIDE TAKISTUSE MÕÕTMINE.

Sissejuhatus.

Elektrijuhtide takistuse mõõtmise meetodi valik oleneb mõõdetava takistuse väärtusest. Suhteliselt lihtsalt on saavutatav küllaldane täpsus keskmiste takistuste (1Ω – $10^6\Omega$) mõõtmisel. Käesolevas töös tutvustataksegi just selliste takistuste mõõtmise meetodeid.

A. TAKISTUSTE MÕÕTMINE OOMMEETRIGA.

1. Tööülesanne.

Tutvumine oommeetrite elektriliste skeemidega. Kahe takisti takistuse mõõtmine ja mõõtmisvea hindamine.

2. Töövahendid.

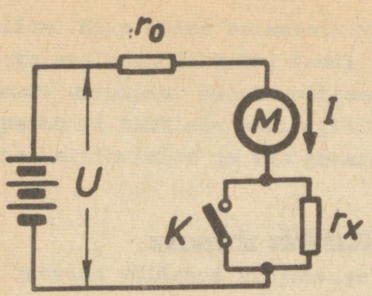
Oommeeter või tester, mõõdetavad takistid.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

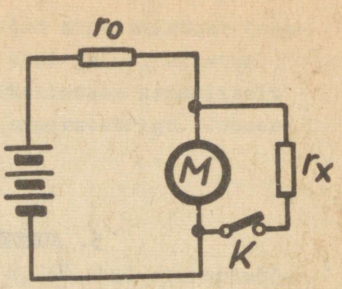
Oommeetriks nimetatakse osutimõõteriista takistuste mõõtmiseks.

Lihtsamate oommeetrite printsipiaalsed skeemid on toodud joonistel 1 ja 2.

Skeemil 1 on mõõdetav takistus r_x lülitatud järjestikku magnetelektrilise mõõteriistaga M ja tuntud takistusega r_o. Mõõteriista osuti kõrvalekalle α on võrdeline ahelat läbiva voolu tugevusega I , ja vastupidi:



Joon. 1.



Joon. 2.

$$I = C\alpha ,$$

kus C on mõõteriista konstant.

Ohmi seaduse kohaselt

$$I = \frac{U}{r_o + r_i + r_x} ,$$

kus r_i tähistab mõõteriista takistust.

Kui pinge U ja mõõteriista konstant C mõõtmise protsessis ei muutu, siis riista osuti kõrvalekalle α avaldub r_x ühese funktsioonina

$$\alpha = \frac{I}{C} = \frac{U}{C} \cdot \frac{1}{r_o + r_i + r_x} .$$

Sellise mõõteriista skaala võib olla gradueeritud vahetult oomides. On selge, et skaala ei ole lineaarne.

Skeemis 2 on mõõdetav takistus r_x lülitatud mõõteriistaga paralleelselt. Nüüd on riista läbiv vool arvutatav valemist

$$I = C\alpha = \frac{U}{r_o + \frac{r_x r_i}{r_x + r_i}} \cdot \frac{r_x}{r_x + r_i} , \text{ millest } \alpha = \frac{U}{C} \cdot \frac{1}{r_o + r_i + r_i \frac{r_i}{r_x}} .$$

Nagu näha viimasest valemist, avaldub mõõteriista osuti hälve ka seekord konstantsete U ja C väärtuste juures r_x ühese funktsioonina. Skaala pole ka siin lineaarne.

Skeemi 1 kasutatakse tavaliselt oommeetrites, mis on ette nähtud <u>suurte</u> takistuste mõõtmiseks ($r_x \gg r_o$ ja $r_x \gg r_i$). Skeemi 2 kasutatakse oommeetrites, mis on ette nähtud <u>väikeste</u> takistuste (võrreldavad r_i-ga) mõõtmiseks.

Oommeetreid toidetakse tavaliselt akudest või kuivelementidest, mille pinge pole rangelt konstantne. Seetõttu on oommeetris seadmed, mis võimaldavad teda reguleerida nii, et pinge U väärtuste korral, mis vähe erinevad normaalsest, oommeeter näitaks mõõdetava takistuse õiget väärtust. Reguleerimine toimub mõõteriista konstandi C muutmise teel, mida võib teha mitmel viisil. Levinud on oommeetrid, mille magnetelektriline mõõteriist on varustatud magnetilise šundiga. Šundi käepide on toodud välja paneelile. Pöörates käepidet, muudetakse šundi asendit mõõteriista magneti pooluste suhtes ja seega järelikult ka tema konstanti. Järjestikuse lülitusega (joon. 1) oommeetri reguleerimisel suletakse lüliti K ($r_x = 0$) ja pöörates magnetilise šundi käepidet asetatakse riista osuti skaala jaotisele, mis vastab $r_x = 0$. Vool läbi mõõteriista on maksimaalne

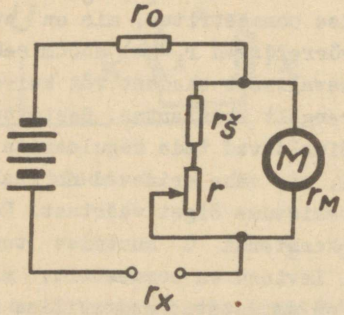
$$I_o = C\alpha_o = \frac{U}{r_o + r_i} .$$

Paralleelse lülitusega oommeetrit reguleeritakse lüliti K avatud asendis. Sellele vastab $r_x = \infty$. Šundi käepideme pööramisega asetatakse riista osuti jaotisele, mis vastab $r_x = \infty$. Seejuures läbib riista maksimaalne vool

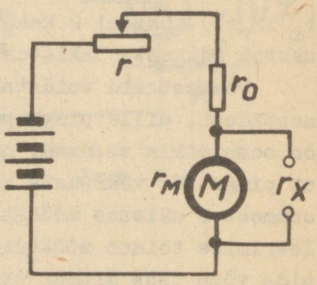
$$I_o = C\alpha_o = \frac{U}{r_o + r_i} .$$

Universaalsetes mõõteriistades - amper-volt-oommeetrites (testrites) kasutatakse ühte mitme skaalaga mõõteriista nii voolutugevuse, pinge kui ka takistuse mõõtmiseks. Mõõtemehhanismi tundlikkus peab olema seejuures konstantne. Oom-

meetrit reguleeritakse muudetava takistuse r abil, mis on ühendatud paralleelselt mõõteriistaga järjestikuse skeemiga oommeetrites (joon. 3) või järjestikku sellega - paralleelse skeemiga oommeetrites (joon. 4).



Joon. 3.



Joon. 4.

Täiuslikumad on oommeetrid, milles mõõteriistaks on magnetelektriline logomeeter. Logomeeter mõõdab kahe voolutugevuse suhet ja seepärast tema näidud ei muutu, kui toitepinge teatud vahemikus muutub. Logomeetrilised oommeetrid ei vaja eelnevat reguleerimist.

Tööstuslike oommeetrite täpsusklassid (K) on 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; ja 4,0.

Et oommeetrite skaalad on ebalineaarsed, siis leitakse lubatud põhiviga näitude vahena, mis vastab K protsendile skaala geomeetrilisest pikkusest [1, lk. 24; 2, lk. 52-53]. Seega on lubatud põhiviga skaala igas punktis erinev. Seda tuleb arvestada mitme mõõtepiirkonnaga oommeetrite korral optimaalse piirkonna valimisel.

4. Töö käik.

1. Valime testril esialgu vabalt mingi oommeetri piirkonna. Lühistanud välisahela, reguleerime oommeetri osuti nullile.

Lülitanud mõõdetavad takistid kordamööda testri klemmidele, võtame näidud.

2. Määrame lubatud põhivea vähemalt 7 punktis skaalal, joonestame graafiku. Valinud eelneva orienteeriva mõõtmise tulemuste ja põhivea graafiku järgi optimaalse mõõtepiirkonna, mõõdame mõlema takisti takistused ja määrame piirvead.

B. TAKISTUSE MÕÕTMINE ALALISVOOLU SILLAGA.

1. Tööülesanne.

Kahe takisti takistuste mõõtmine reohordi sisaldava ja tööstusliku alalisvoolu sillaga. Järjestikku ja paralleelselt ühendatud takistite kogutakistuse valemite kontrollimine.

2. Töövahendid.

Reohord, takistussalv, nullgalvanomeeter, vooluallikas (patarei), lüliti, ümberlüliti, tööstuslik sild, ühendusjuhtmed, 2 mõõdetavat takistit.

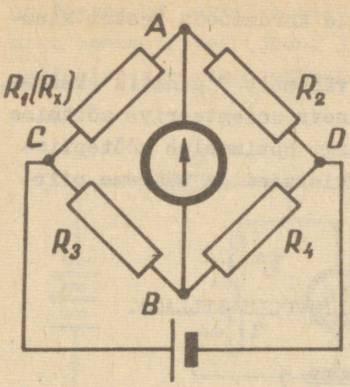
3. Sissejuhatus.

Takistuse mõõtmisel võrreldakse mõõdetava takisti takistust mõõttakisti või takistussalvest valitud takistite takistusega. Et mõõtude lubatud vead on väikesed, saavutatakse sealjuures suur täpsus.

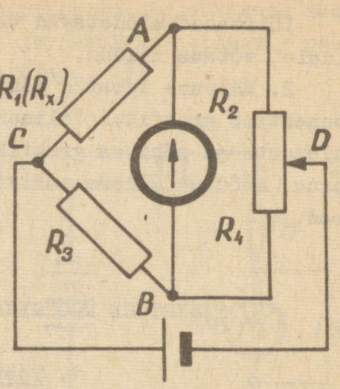
Keskmise suurusega takistuste mõõtmisel kasutatakse lihtsat sildskeemi (Wheatstone'i silda) (joon. 1).

Silla elementide (õlgade) takistuste vastava valikuga on võimalik saavutada olukorda, kus voolutugevus läbi galvanomeetri $I_g = 0$. Sel juhul on punktide A ja B potentsiaalid võrdsed ja võib kirjutada

$$I_1R_1 = I_3R_3,$$
$$I_2R_2 = I_4R_4.$$



Joon. 1.



Joon. 2.

Kui $I_g = 0$, siis ilmselt $I_1 = I_2$ ja $I_3 = I_4$ ning silla tasakaalutingimus on

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \text{või}$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}. \qquad (1)$$

Olgu R_1 tundmatu takistus

$$R_1 = R_x.$$

Silda võib põhimõtteliselt tasakaalustada ükskõik millise takistuse muutmisega ülejäänud kolmest. Tavaliselt valitakse muudetavaks kas R_3 (võrdlusõlg) või suhe R_2/R_4 (suhteõlg); laia mõõtepiirkonnaga sildade korral muudetakse mõlemat. Tööstuslikes sildades on R_3 muudetav tavaliselt kas väga väikeste astmete (0,1Ω, 0,01Ω) kaupa või pidevalt, R_2/R_4 aga 10, 10^2, 10^3, ... 10^n korda.

Lihtsamates ja vähemtäpsetes sildades muudetakse pidevalt suhet R_2/R_4, R_3 reguleeritakse astmeliselt (joon. 2). Selliseid sildu nimetatakse lineaarseteks. Siin on R_2 ja R_4 sama takistustraadi - reohordi - kaks osa; punktis D on

liikuv (libisev, veerev) kontakt. Reohordi silla puhul saab takistuste R_2 ja R_4 mõõtmise asendada vastavate traadiosade pikkuste mõõtmisega. Tõepoolest, ühtlase läbimõõduga traadi korral

$$\frac{R_2}{R_4} = \frac{l_2}{l_4}$$

ja silla tasakaalutingimus saab kuju

$$R_x = R_3 \frac{l_2}{l_4}. \qquad (2)$$

Silla konstruktsiooni õige valikuga on üldjuhul võimalik saavutada seda, et R_x viga on määratud ainult mõõttakistite R_2, R_3, R_4 suhteliste vigade summaga. Selleks on tarvis viia miinimumini kõik kontaktide takistused ja valida küllalt tundlik nullgalvanomeeter - muuta tasakaalustamise viga väikeseks võrreldes mõõtude vigadega [2, lk. 57]. Reohordiga silla puhul lisandub täiendavaid veaallikaid. Kõigepealt võib olla traat ebaühtlane. Seda võib põhjustada liikuv kontakt. Järelikult $l_2/l_4 \neq R_2/R_4$. Tekkinud metoodilise vea kõrvaldamiseks mõõdetakse R_x kahel korral, vahetades vahepeal õlad R_2 ja R_4 (reohordi otsad lülitatakse skeemis ümber), kahe tulemuse keskmine on sellest veast vaba. Omakoostatud sildade puhul ühendatakse silla kõik elemendid omavahel kaablikingade või pistikutega varustatud juhtmetega, juhtmeotsad pigistatakse kruviklemmide alla. Suure hulga jootmata kontaktide korral, kui lisaks sellele ka riistad on küllalt hajali laual ja on tõenäoline, et temperatuur skeemi erinevates punktides pole sama, võivad silla õlgades tekkida termoelektromotoorsed jõud. Sel juhul tasakaalutingimus (1) ei kehti täpselt ja R_x määramisel tekib metoodiline viga. Sellest veast on vaba kahe mõõtmistulemuse keskmine, mis on saadud voolu erinevate suundade korral skeemis (vahetatakse toiteallika otsad).

Sildskeemide üheks tähtsaimaks parameetriks on tundlikkus. Kui silla tasakaaluolukorras muuta veidi reguleeritavat

õlga - näiteks R_3 suuruse ΔR_3 võrra, tekib galvanomeetri ahelas nõrk vool ΔI_g. Suhet

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta R_3}$$

nimetatakse sildskeemi voolutundlikkuseks. Silla tundlikkus peab olema vähemalt nii suur, et reguleeritava takistuse muutmine tema lubatud vea võrra tekitaks sellise ΔI_g, mis annab galvanomeetri osuti hälbe suurusega vähemalt 1 jaotis. Et töötamine tundlike galvanomeetritega on tülikas, siis on kasulik valida silla õlad nii, et skeemi tundlikkus oleks võimalikult suur. Joonisel 2 kujutatud lineaarse silla skeem valitakse lähtudes sellest, et siin puudub liikuv kontakt galvanomeetri ahelas. Liikuva kontakti ülemineku takistus võib muutuda, määrdunud pindadel võib tekkida küllalt suur ja muutlik termopinge. Et reohordi takistus on väike (tavaliselt suurusjärgus 10 oomi), siis kindlustab joonisel 2 kujutatud skeem suuremate takistuste ($R_x > 10\Omega$) mõõtmisel toiteallika minimaalse koormamise. Tundlikkuse seisukohast on aga see skeem halb. Saab näidata, et kui lülitada väikesed takistused pingeallikaga järjestikku (tarbida allikast suurt võimsust), siis suureneb skeemi tundlikkus oluliselt. Seepärast on mõnikord kasulikum joonisel 3 kujutatud skeem. Maksimaalne on tundlikkus juhul, kui reohordi õlad on võrdsed (sümmeetriline sild):

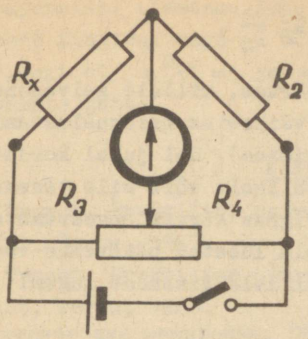
$$R_3 = R_4$$

ehk $$l_3 = l_4.$$

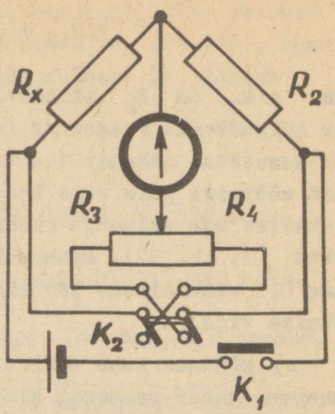
Wheatstone'i sild ei sobi väga väikeste takistuste ($R_x < 1 \div 10\Omega$) mõõtmiseks. Sel juhul kasutatakse Thomsoni (kahekordset) silda [4, lk. 105-115].

4. Töö käik.

a) Et kasutatavate galvanomeetrite tundlikkus on väike, siis termopinged oluliselt mõõtmistulemust ei mõjusta, mistõttu valime suurema tundlikkusega skeemi (joon. 4).



Joon. 3.



Joon. 4.

Eelöeldu põhjal pole voolu suuna vahetamine vajalik; reohordi õlgade vahetamiseks on skeemis ümberlüliti K_2. Võrdlusõlaks R_2 on takistussalv; R_3, R_4 on reohordi osad. K_1 on surunupplüliti.

Kõik klemmid tuleb hästi tugevasti kinni keerata!

b) Uuritavad takistid tuleb eelnevalt mõõta oommeetriga. Kui salvest on võimalik valida takistust nii, et $R_2 \approx R_x$, siis kasutame sümmeetrilist silda. Seame reohordi õlad võrdseks, valime $R_2 \approx R_x$ ja tasakaalustame silla R_2 reguleerimisega. Selleks et vältida juhtmete ja kontaktide soojenemist ning galvanomeetri kahjustumist, võib voolu ahelasse lülitada ainult hetkeks. Kui salve takistuse minimaalse võimaliku muutmise korral galvanomeetri osuti nihkub märgatavalt, tuleb tasakaalustamist täpsustada reohordi õlgade suhte l_3/l_4 muutmisega. Sel juhul tuleb tasakaalustamise vea hindamiseks teha vähemalt kolm mõõtmist ning arvutada R_x juhuslik viga. Kui aga silla saab tasakaalustada ainult R_2 muutmisega, loeme tasakaalustamise veaks suuruse

$$\Delta R_{tk} = \frac{1}{2}\ \Delta' R_2 \frac{l_3}{l_4},$$

kus $\Delta' R_2$ on R_2 minimaalne väärtus, millele galvanomeeter märgatavalt reageeris (salve väikseima tasakaalustamisel kasutatud dekaadi 1.astme takistus). Sel juhul korduvaid mõõtmisi pole vaja teha. Tavaliselt võib siis tasakaalustamise vea salve ja reohordi vigade kõrval arvestamata jätta [2, lk. 57]. Reohordi skaala lubatud põhiveaks võtame 0,2 väikseimast jaotisest, millele lisandub lugemi võtmise viga.

c) Mõõdame kahe takisti takistused 2 korda, lülitanud vahepeal ümber reohordi õlad. Arvutame takistused koos piirveaga. Arvutame nende takistite järjestikuse ja paralleelse ühenduse kogutakistused, mõõdame need ka otseselt.

d) Mõõdame mõlemad takistid ka tööstusliku sillaga MO-62, tutvunud eelnevalt sillale tehase poolt kaasaantava instruktsiooniga. Instruktsioonis (ka silla kasti kaane siseküljel) on antud suhteõlgade ja toiteallika pinge optimaalsed väärtused sõltuvalt mõõdetava takistuse suurusest. Tuleb arvestada, et tasakaalustamist alustatakse "tuima" skeemiga (vajutatakse lülitile "Грубо"), lõplikuks tasakaalustamiseks kasutatakse lülitit "Точно".

e) Võrdleme kolmel meetodil mõõdetud takistuste väärtusi ja piirvigu.

5. Lisaküsimusi.

a) Tõestada, et mõõtmistulemuse viga on minimaalne, kui valida reohordil $l_3 = l_4$ (eeldusel, et reohordi õlgade pikkuse määramise viga on kogu skaala ulatuses sama).

b) Tõestada, et aritmeetiline keskmine kahe mõõtmise tulemustest, millest kummagi korral on ainult reohordi õlad vahetatud, on esimeses lähenduses vaba reohordi traadi ebaühtlusest tingitud veast.

Näpunäide: tõestame juhu jaoks, kus $l_3/l_4 = 1$; et ebaühtlusest tingitud viga on väike, loeme $R_3/R_4 = 1 + \alpha$, kus $\alpha \ll 1$, nii et $\alpha^2 \ll \alpha$ ja α^2 võib summas α kõrval arvestamata jätta.

Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed. I. TRÜ rotaprint, Tartu, 1967.
2. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed. II. TRÜ rotaprint, Tartu, 1968.
3. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А.В.Фремке. М.-Л., 1963.
4. К. Б. Карандеев. Специальные методы физических измерений. М.-Л., 1963.

6. TAHKETE ELEKTRIJUHTIDE TAKISTUSE SÕLTUVUS TEMPERATUURIST.

1. Tööülesanne.

Takistustermomeetri kaliibrimine. Mõnede juhtide takistuse temperatuurikoefitsiendi määramine.

2. Töövahendid.

Alalisvoolu mõõtesild, termostaat, laboratoorne ja kontakttermomeeter, kolm uuritavat resistorit, juhtmed.

3. Sissejuhatus.

Juhtide elektriline takistus sõltub temperatuurist. Metallidel ta suureneb temperatuuri kasvades, elektrolüütidel ja söel (grafiidil) aga väheneb. Seda juhtide omadust kasutatakse takistustermomeetrite valmistamiseks. Viimased kujutavad endast traatresistoreid (plaatina, vask, nikkel, raud), mille takistuse sõltuvus temperatuurist on eelnevalt määratud. Takistustermomeetrite abil on võimalik mõõta temperatuuri sageli täpsemalt ja mugavamalt kui vedeliktermomeetrite abil. Samuti on takistustermomeetrid rakendatavad väga laias temperatuuridiapasoonis. Nii näiteks töötab plaatinaga takistustermomeeter temperatuurivahemikus $-263^{\circ}C$ kuni $+1300^{\circ}C$. Samuti saab takistustermomeetrite abil registreerida väikesi temperatuurimuutusi (kuni tuhandik kraadi).

Metalli takistus sõltub temperatuurist ligikaudu lineaarselt

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \qquad (1)$$

kus R_t on takistus temperatuuril t ja R_0 takistus temperatuuril 0^oC.

Takistuse temperatuurikoefitsient α määratakse kui suhteline takistuse muutus ühikulise temperatuurimuutuse korral. Funktsioon $R_t = R_t(t)$ ei ole täpselt lineaarne ja seetõttu sõltub takistuse temperatuurikoefitsient α ka temperatuurist ning seosest (1) saame α keskmise väärtuse temperatuurivahemikus $0^oC - t^oC$. Puhaste metallide korral α muutub vähe ja temperatuurivahemikus 0^o kuni 100^oC võib teda lugeda praktiliselt konstantseks. Üldjuhul avaldub temperatuurikoefitsient

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dt}$$

ja takistus temperatuuril t

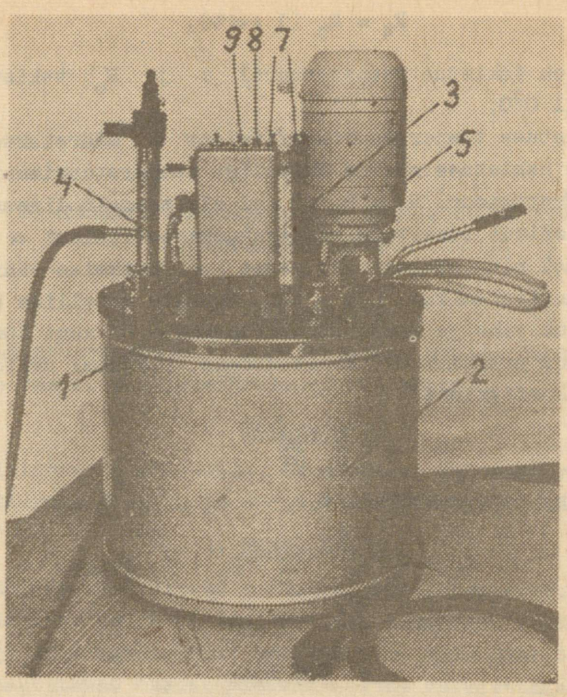
$$R_t = R_0 + \int_{R_0}^{R_t} dR = R_0 + \int_0^t R\alpha\, dt.$$

4. Töö käik.

Käesolevas töös tuleb määrata vask-, manganiin- ja süsimassresistori takistuse sõltuvus temperatuurist ja arvutada nende takistuse temperatuurikoefitsient. Tuleb otsustada, millised neist resistoreist sobivad takistustermomeetriteks.

Uuritava takistustermomeetri 1 (joon. 1) asetame veega täidetud termostaati 2. Termostaadi sees (külgedel) asuvad küttekehad. Termostaadi kaanele on kinnitatud laboratoorne termomeeter 3, kontakttermomeeter 4 ja mootor 5, mis on ette nähtud veesegaja käivitamiseks.

Termostaat lülitatakse vahelduvvoolu võrku (~ 220 V). Küttekehade sisselülitamiseks on paneelil tumblerid 7. Segaja mootor lülitatakse sisse vajutusega nupule 8 pealkirjaga "Пуск", välja vajutusega punasele nupule "C".



Joon. 1.

Takistustermomeetri takistuse mõõtmiseks kasutame alalisvoolu mõõtesilda. Termostaadi temperatuuri mõõdame laboratoorse termomeetriga. Algul mõõdame takistuse väärtuse toatemperatuuril. Järgnevalt reguleerime termostaadi temperatuuri kontakttermomeetri abil 10° võrra kõrgemaks ja mõõdame jälle takistuse suuruse. Analoogiliselt teeme mõõtmised iga 10° järel kuni 100°C-ni. Arvestades termostaadi suurt inertsust tuleb termostaadi iga tasakaalustunud temperatuuri korral mõõta kõigi resistorite takistused korda-mööda.

Saadud andmetest ehitame graafiku

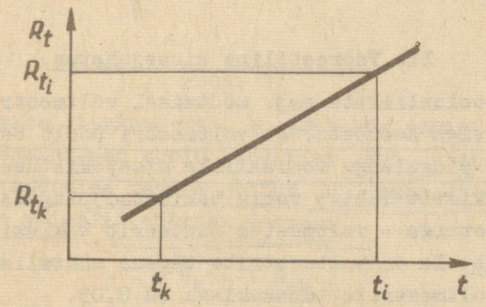
$$R_t = f(t), \qquad (2)$$

kandes x-teljele t väärtused ja y-teljele R_t väärtused. Sõltuvus (2) kujutabki endast takistustermomeetri kaliibrimiskõverat.

Takistuse temperatuurikoefitsiendi α leiame meie poolt saadud graafiku andmete põhjal seosest (joon. 2)

$$\alpha = \frac{R_{ti} - R_{tk}}{\Delta t \; R_{tk}} . \qquad (3)$$

Kui sõltuvus $R_t = f(t)$ on mittelineaarne, siis leiame α kõvera eri osade jaoks.



Joon. 2.

5. Täiendavaid küsimusi.

a) Selgitada metallide elektrijuhtivuse mehhanismi.
b) Miks temperatuuri kasvades metallide elektriline takistus suureneb, elektrolüütidel ja grafiidil aga väheneb?
c) Milline on takistuse temperatuurikoefitsiendi dimensioon?

Kirjandus.

1. J.A. Štrauf. Füüsika II. Tallinn, 1965, lk. 141.
2. С. Т. Калашников. Электричество. М., 1964, стр.134-140.

7. MÕÕTMISI ALALISVOOLU KOMPENSATSIOONIMEETODIL.

I. Tööülesanne.

Tutvumine alalisvoolu kompensatsioonimeetodi teooria ja lihtsaimate rakendustega, samuti tööstuslike potentsiomeetritega.

II. Teoreetiline sissejuhatus.

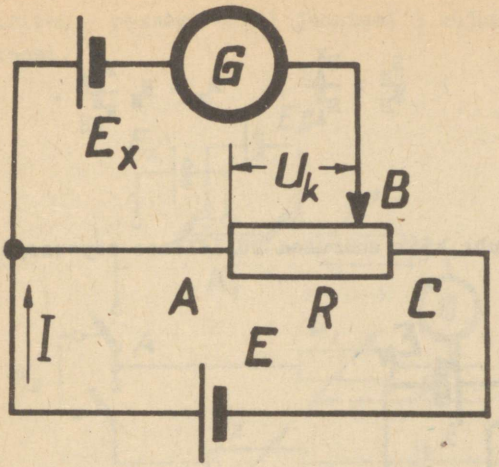
Alalisvooluallikate emj. mõõtmisel voltmeetriga tekib metoodiline viga seetõttu, et voltmeetri poolt tarbitav vool tekitab pingelangu vooluallika sisetakistusel. Sama juhtub ka takistit läbiva voolu tekitatud pingelangu mõõtmisel voltmeetriga - voltmeeter šunteerib takisti, pinge sellel muutub. Ka on voltmeetrite täpsus suhteliselt väike - parimate voltmeetrite täpsusklass on 0,05.

Mõõteriista voolutarbest tingitud metoodilisest veast on vaba kompensatsioonimeetod. See meetod võimaldab mõõtmisel ka palju suuremat täpsust kui parimad voltmeetrid.

Kompensatsioonimeetodi põhiideed selgitab joonis 1. Abivooluallikast emj-ga E tulev vool tekitab täppistakistil R pingelangu U = IR. Mõõdetav elektromotoorne jõud $E_x < E$ (või pinge $U_x < E$) lülitatakse paralleelselt takisti R osaga AB, millel on kompenseeriv pingelang U_k. Et punktis A on ühendatud vooluallikate samamärgilised poolused, siis, kui on täidetud tingimus

$$U_k = E_x, \qquad (1)$$

galvanomeeter voolu ei näita. (Tingimuse (1) täitmiseks



Joon. 1.

reguleeritakse liugkontakti B asukohta takistil R.) Sellega ongi saavutatud voolu puudumine läbi uuritava voolualika. E_x mõõtmise täpsus sõltub U_k määramise täpsusest. U_k on võimalik määrata seosest

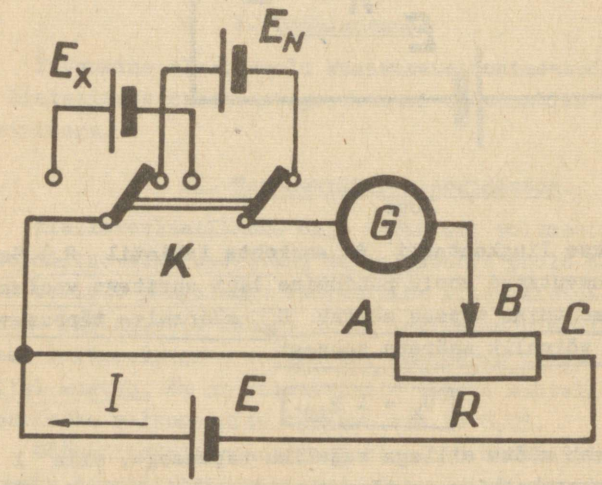
$$U_k = I R_{AB}.$$

Kui R_{AB} saab mõõta sillaga vajaliku täpsusega, siis I mõõtmisel ampermeetriga on täpsus mitte parem kui E_x mõõtmisel voltmeetriga. Suuremat täpsust võib saada etaloonelektromotoorse jõu kasutamisel. Elektromotoorse jõu etaloonina kasutatakse Westoni normaalelemente [3], mille emj. püsib konstantsena täpsusega kuni 10^{-3}% ja sõltub nõrgalt temperatuurist. Normaalelemendi kasutamist emj. mõõtmisel kompensatsioonimeetodiga selgitab joon. 2. E_x mõõtmiseks tuleb teha kaks operatsiooni: leida kompenseeriv pingelang nii E_x kui E_N jaoks. Eeldades, et abivooluallika emj. E nende operatsioonide tegemise ajal ei muutu (seega I = = const.), saadakse:

$$E_x = U_k^x = IR_{AB}^x ,$$
$$E_N = U_k^N = IR_{AB}^N ,$$

$$\frac{E_x}{E_N} = \frac{R_{AB}^x}{R_{AB}^N} , \qquad E_x = E_N \frac{R_{AB}^x}{R_{AB}^N} . \qquad (2)$$

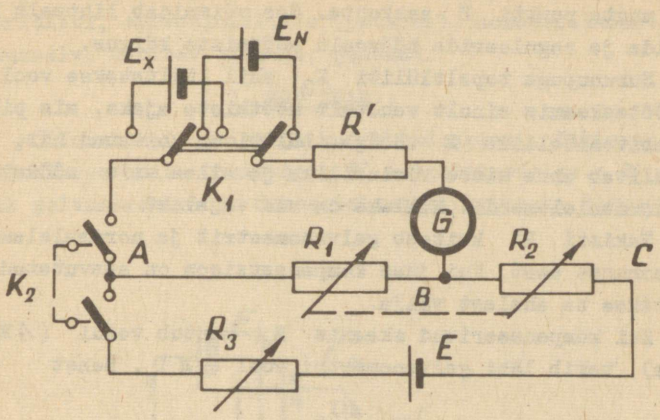
Valemis (2) on juba kõik suurused küllaldase täpsusega mõõdetavad.



Joon. 2.

Joonisel 2 kujutatud mõõteskeemil on 2 põhilist puudust. Esiteks tuleb iga emj. või pinge mõõtmiseks teha kaks operatsiooni ja teiseks on takistina R kasutatavatel reohordidel kontakt takistustraadi ja liugkontakti B vahel mitte eriti kindel, kontakti kohal võib tekkida termoelektromotoorseid jõude, mis toovad mõõtmistulemusse juhuslikke, mittekontrollitavaid vigu. Seepärast kasutatakse kompensatsioonimeetodil töötavates mõõteriistades - kompensaa-

torites - peaaegu alati joonisel 3 kujutatud põhimõttelist skeemi.



Joon. 3.

Siin R_1 ja R_2 kujutavad endast rida järjestikku ühendatud täppistakisteid; R_1 ja R_2 väärtuse samaaegne muutmine tähendab tegelikult punkti B asukoha muutmist ümberlüliti abil. Konkreetsest lülitusviisist sõltumata peab R_1 ja R_2 muutma samaaegselt nii, et oleks täidetud tingimus

$$R_1 + R_2 = \text{const}$$

Enne mõõtmiste algust lülitatakse ümberlüliti K_1 abil mõõteahelasse normaalelement E_N, valides seejuures $R_1 = R_1^o$ nii suure, et kompenseeriv pinge U_k oleks võrdne normaalelemendi elektromotoorse jõuga E_N siis, kui vool läbi mõõtetakistite R_1 ja R_2 on soovitud tugevusega. Tavaliselt valitakse

$$I = \frac{E_N}{R_1^o} = 0{,}1 \text{ mA} \ldots 1 \text{ mA}.$$

Kompensatsioon (s.t. voolu puudumine läbi galvanomeetri G) saavutatakse takisti R_3 takistuse reguleerimisega. Seda

operatsiooni nimetatakse töövoolu seadmiseks. Tööstuslikes potentsiomeetrites lülitab K_1 normaalelemendi paralleelselt valitud takistusega R_1^o, nii et töövoolu seadmisel ei tule muuta punkti B asukohta. See võimaldab lihtsalt kontrollida ja reguleerida töövoolu mõõtmiste käigus.

Surunupuga topeltlüliti K_2 abil lülitatakse vool kogu mõõteskeemis ainult vahetult mõõtmiste ajaks, mis pikendab abivooluallika E tööiga. Lüliti on ehitatud nii, et ta lülitab enne sisse vooluallika ja alles siis mõõdetava või normaalelemendi. Milleks on see vajalik?

Takisti R' kaitseb galvanomeetrit ja normaalelementi ülekoormuse eest. Kui jäme kompensatsioon on saavutatud, lülitatakse ta ahelast välja.

Kui kompenseeritud skeemis E_x muutub veidi (ΔE_x võrra), tekib läbi galvanomeetri vool ΔI_g. Suhet

$$S = \frac{\Delta I_g}{\Delta E_x}$$

nimetatakse kompensatsiooniahela tundlikkuseks. On lihtne näha, et S on seda suurem, mida väiksem on ahela mõõtetakisti R (joonisel 3 $R_1 + R_2$) ja mida väiksem on uuritava vooluallika sisetakistus või takistus, millelt pingelangu mõõdetakse. Seepärast on iga konkreetse potentsiomeetri jaoks olemas takistuse ülempiir, millelt saab pingelangu riista poolt lubatava täpsusega mõõta; suuremate takistuste korral mõõtmistäpsus langeb galvanomeetri vähese tundlikkuse tõttu. Tundlikuma galvanomeetri valikuga on võimalik seda viga parandada.

III. MÕÕTMISED.

A. Elemendi emj. mõõtmine lihtsaima kompensatsiooniskeemi abil.

1. Tööülesanne.

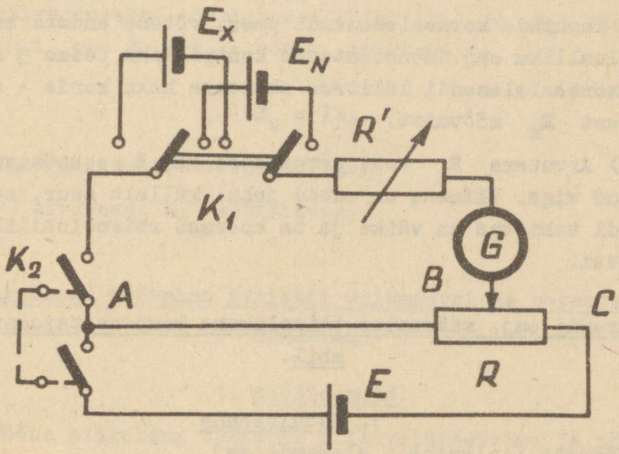
Määrata Leclanché elemendi emj.

2. Töövahendid.

Reohord, nullgalvanomeeter, surunupuga topeltlüliti, ümberlüliti, abivooluallikas (patarei), normaalelement, takistussalv, uuritav element, juhtmed.

3. Töö käik.

a) Koostame joonisel 4 kujutatud skeemi. Takistina R kasutame reohordi, takistina R' - takistussalve. R' on vajalik galvanomeetri ja normaalelemendi kaitseks ülekoormuse eest.



Joon. 4.

b) Lülitame kordamööda ahelasse E_x ja E_N ning reohordi reguleerides saavutame mõlemal juhul voolu puudumise galvanomeetris. Alustada tuleb R' maksimaalsest väärtusest, edaspidi vähendame R' nullini. R'_{max} määramisel tuleb lähtuda sellest, et võimalik vool läbi galvanomeetri ei ületaks galvanomeetri skaala ulatust (leiame riistale märgitud andmete järgi) või normaalelemendile lubatud voolutugevust 10^{-5} A. K_2 lülitame pärast reohordi reguleeri-

mist ainult hetkeks.

E_x arvutame valemist (2), asendades takistuste suhte reohordi traadi vastavate pikkuste suhtega:

$$E_x = E_N \frac{R_{AB}^x}{R_{AB}^N} = E_N \frac{l_{AB}^x}{l_{AB}^N} .$$

E_N arvutame vastavalt toatemperatuurile t^oC valemist (3):

$$E = 1{,}01865 - 4{,}06 \cdot 10^{-5}(t - 20) -$$

$$- 0{,}95 \cdot 10^{-6} (t - 20)^2 + 10^{-8}(t - 20)^3 V. \quad (3)$$

Kui on kasutada normaalelemendi pass, võtame andmed sealt. Abivooluallika emj. konstantsuse kontrolliks teeme 3 mõõtmist: normaalelemendi lülitame ahelasse kaks korda - enne ja pärast E_x mõõtmist.

c) Arvutame E_x vea, arvestades ka E ebapüsivusest tingitud viga. Viimane on antud juhul küllalt suur, sest reohordi takistus on väike ja ta koormab abivooluallikat tugevasti.

B. Elemendi emj. määramine täiuslikuma kompensatsiooniskeemi abil.

1. Tööülesanne.

Määrata Leclanchè'i elemendi emj.

2. Töövahendid.

4 takistussalve, nullgalvanomeeter, surunupuga topeltlüliti, ümberlüliti, abivooluallikas (patarei), normaalelement, uuritav element, juhtmed.

3. Töö käik.

a) Koostame joonisel 3 kujutatud skeemi, kus R_1, R_2, R_3 ja R' on takistussalved.

b) Valime töövooluks $I = 0{,}1$ mA. Arvutame E_N valemist (3) ja vastava R_1^0:

$$R_1^0 = \frac{E_N}{I} .$$

Valime $R_1 = R_1^0$ ja $R_2 = R_1^0$. R_3 reguleerimisega saavutame voolu puudumise läbi galvanomeetri, kui ahelasse on lülitatud E_N. K_2 ja R' kasutamise kohta loe käesoleva juhendi osast A.

Milleks on vaja valida $R_2 = R_1^0$? Kas see on tingimata vajalik?

c) Lülitame ahelasse E_x, saavutame voolu puudumise läbi galvanomeetri. Sealjuures tuleb R_1 ja R_2 väärtust muuta nii, et $R_1 + R_2 = \text{const}$. Arvutame

$$E_x = IR_1 .$$

Kontrollime töövoolu püsivust.

d) Arvutame E_x mõõtmisvea.

C. Pingelangu mõõtmine takistil voltmeetri ja potentsiomeetriga.

1. Tööülesanne.

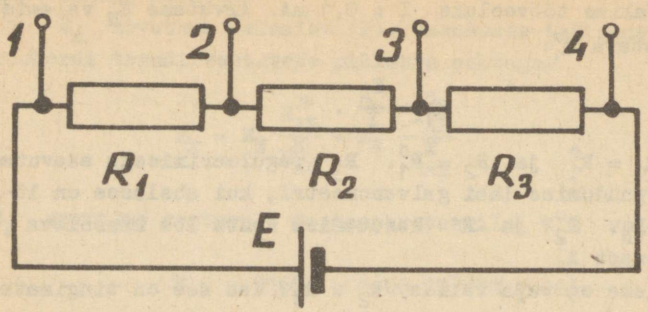
Mõõta pingelang takistil millivoltmeetriga ja tööstusliku potentsiomeetriga. Hinnata voltmeetri voolutarbest tingitud viga.

2. Töövahendid.

Millivoltmeeter, potentsiomeeter КП-59 või ПП-62, takistussalv Р33, vooluallikas (patarei), juhtmed.

3. Töö käik.

a) Koostame skeemi vastavalt joonisele 5. R_1, R_2, R_3 on takistussalve osad, mille vahelt on riista korpusel olevate klemmide alla tehtud väljavõtted. Valime $R_1 + R_2 + R_3$



Joon. 5.

nii suurena, et vool läbi salve oleks suurusjärgus 1 mA (selleks peab orienteerivalt teadma patarei emj. E).

b) Valinud takistussalve madalaoomiliste dekaadide takistuse niiviisi, et nendel 1 mA voolu korral tekkiv pingelang oleks nii millivoltmeetri kui ka potentsiomeetri mõõtepiirkonnas, lülitame nimetatud mõõteriistad kordamööda klemmide 1 ja 3 vahele ning mõõdame pingelangu takistil R_1+ +R_2. Potentsiomeetri käsitsemise kohta loeme tehase poolt kaasaantavast juhendist.

c) Määrame riista vead mõlema meetodi korral ning metoodilise vea millivoltmeetri kasutamisel.

D. Voolutugevuse ja takistuse mõõtmine kompensatsioonimeetodil.

1. Tööülesanne.

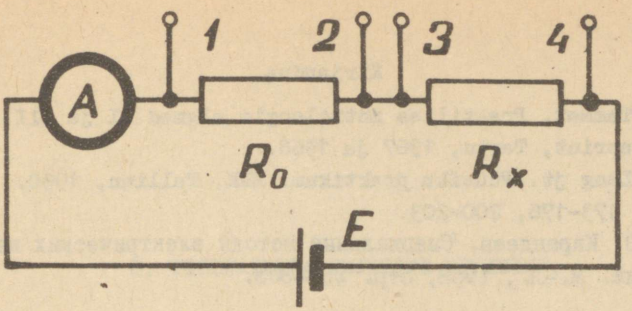
Määrata takistit läbiva voolu tugevus ja takistus kompensatsioonimeetodil.

2. Töövahendid.

Potentsiomeeter, ampermeeter, etaloontakisti, mõõdetav takisti, vooluallikas (patarei), juhtmed.

3. Töö käik.

a) Koostame skeemi vastavalt joonisele 6. R_0 on eta-



Joon. 6.

loontakisti, R_x - mõõdetav takisti.

b) Mõõdame potentsiomeetri abil pingelangud etaloontakistil (klemmid 1 ja 2) ning mõõdetaval takistil (klemmid 3 ja 4). Arvutame

$$I = \frac{U_{R_0}}{R_0},$$

$$R_x = \frac{U_{R_0}}{I} = R_0 \frac{U_{R_x}}{U_{R_0}}.$$

c) Määrame I ja R_x mõõtmisvead. Võrdleme mõõtmistäpsusi voolutugevuse mõõtmisel ampermeetriga ja kompensatsioonimeetodil.

IV. LISAKÜSIMUSI.

a) Selgitada lähemalt metoodilise vea teket emj. ja pinge mõõtmisel voltmeetriga.

b) Miks võib voolutugevust takisti R osal AB (joon. 1), s.o. vooluringi hargnenud osa ühes harus, pidada võrdseks voolutugevusega vooluringi hargnemata osas?

Kirjandus.

1. H. Tammet. Praktilise metroloogia algmed. I ja III. TRÜ rotaprint, Tartu, 1967 ja 1968.
2. J. Lang jt. Füüsika praktikum. ERK, Tallinn, 1960, lk. 173-176, 200-203.
3. К. В. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М.-Л., 1963, стр. 253-303.

8. VOOLUALLIKA OMADUSTE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Vooluallika kasuliku võimsuse ja kasuteguri sõltuvuse määramine voolu tugevusest.

2. Töövahendid.

Kaks akut, voltmeeter, ampermeeter, kolm lükatreostaati, topeltlüliti, juhtmed.

3. Töö käik.

a) Suletud vooluringis eralduv koguvõimsus N on määratud valemiga

$$N = IE, \qquad (1)$$

kus E tähistab vooluallika elektromotoorset jõudu - emj.,
I - voolu tugevust.

Välistakistusel eralduv võimsus on kasulik võimsus ning see arvutatakse valemist

$$N_1 = IU, \qquad (2)$$

U - pingelang välisahelas.

Seda osa võimsusest, mida on võimalik kasutada, iseloomustab kasutegur

$$\eta = \frac{IU}{IE} = \frac{U}{E} \qquad (3)$$

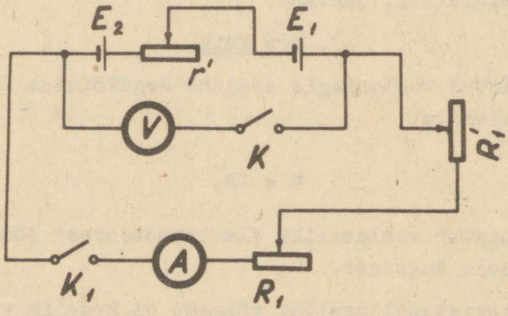
või

$$\eta = \frac{E - Ir}{E} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}, \qquad (3')$$

kus R tähistab vooluringi välis-, r aga vooluallika sisetakistust.

Tuletatud valemitest on näha, et voolu tugevuse vähenemisel, s.t. välistakistuse suurenemisel kasutegur muutub, lähenedes ühele; välisahelas eralduv võimsus läheneb seejuures nullile. Teatud välis- ja sisetakistuste suhte puhul on kasulik võimsus maksimaalne.

Vooluring kasuteguri ning vooluallika võimsuse sõltuvuse uurimiseks voolu tugevusest koostatakse joonisel 1 toodud skeemi järgi. Skeemil näidatud reostaat r' on selleks, et kunstlikult suurendada akupatarei sisetakistust tugeva lühisevoolu vältimiseks vooluringis.



Joon. 1.

b) Koostame vooluringi joonisel 1 kujutatud skeemi kohaselt. Pärast vooluringi kontrollimist praktikumi juhendaja poolt lülitame reostaadi r' takistuse ahelasse täielikult, R_1 ja R_1' takistus olgu aga minimaalne. Suleme lülitid K ja K_1 ning muutes takistust r' , tekitame vooluringis voolu tugevusega 1,5 A (või sellest erineva väärtusega, mitte aga üle 2 A). Reostaadi r' liugkontakti asendi jätame nüüd muutmatuks kogu edasise katse vältel. Registree-

rime voolu tugevuse ning sellele vastava pinge. Reostaatide R_1' ja R_1 abil muudame voolu tugevust ning fikseerime volt- ja ampermeetri näidud iga 0,1 A järel. Katkestame lüliti K_1 abil voolu läbi ampermeetri ning võtame voltmeetri näidu, mis antud juhul on ligikaudu võrdne vooluallika elektromotoorse jõuga. Mõõtmistulemused kanname tabelisse 1.

Tabel 1.

Jrk. nr.	Voolu tugevus I	Pinge välisahelas U	emj. E	Kasulik võimsus N_1	Kasutegur η
1.					
2.					
.					
.					

c) Iga mõõtmistulemuse kohta leiame valemite (2) ja (3) abil kasuliku võimsuse ja kasuteguri ning paigutame tabelisse 1. Arvutatud suuruste järgi joonistame ühes ja samas teljestikus vooluallika võimsuse ja kasuteguri sõltuvuse graafikud voolu tugevusest, kusjuures kasuteguri ning võimsuse kanname ordinaatteljele, voolu tugevuse - abstsisstteljele. Määrame katsevea.

4. Täiendavaid ülesandeid.

a) Leida, millise välistakistuse korral on kasulik võimsus maksimaalne.
Näpunäide. Kasutades Ohmi seadust suletud vooluringi kohta, elimineerida kasuliku võimsuse valemist $N_1 = I^2R$ voolu tugevus ning leida funktsiooni ekstreemumi tingimused.

b) Leida maksimaalne kasulik võimsus, väljendades selle elektromotoorse jõu E ja sisetakistuse r kaudu.

Arvutada, mitu korda on maksimaalne kasulik võimsus väiksem lühise võimsusest (R = 0).

c) Leida, millega võrdub kasutegur maksimaalse kasuliku võimsuse puhul.

5. Täiendavaid küsimusi.

a) Mida nimetatakse elektromotoorseks jõuks, mida pingelanguseks?

b) Mille poolest erineb vooluallika elektromotoorne jõud vooluallika klemmidega ühendatud voltmeetri näidust?

c) Mida nimetatakse aku kasulikuks võimsuseks ja kasuteguriks? Mispärast voolu tugevuse vähendamisel vooluringis potentsiaalide vahe patarei klemmidel kasvab?

d) Kuidas muutub vooluallika kasulik võimsus ja kasutegur sõltuvalt välistakistusest?

e) Millistel tingimustel on vooluallika kasutegur maksimaalne, millistel minimaalne?

f) Leida kasuliku võimsuse ja voolu tugevuse graafikult akupatarei sisetakistus.

g) Kas võib selles töös kasutada voltmeetrit, mille takistus ei ole küllalt suur?

h) Miks sisaldab joon. 1 kujutatud vooluring kahte järjestikust reostaati R_1 ja R_1' ?

6. Tehnilised andmed.

Reostaatide r', R_1 ja R_1' takistused on vastavalt 6,5Ω, 25Ω ja 6,5Ω. Vooluallikaks on kahest elemendist koosnev leelisaku.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 124–140.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.II. 1968, стр. 82–96.

9. TERMOELEMENDI VALMISTAMINE JA KALIIBRIMINE.

1. Tööülesanne.

Termoelemendi valmistamine, kaliibrimine ja elektrikaare karakteristiku määramine.

2. Töövahendid.

Tükk vask- ja konstantaantraati, purk kvartsliiva ja booraksiga, sütehoidja, ampermeeter, voltmeeter, isekirjutav potentsiomeeter, termospudel, 4 tiiglit, statiiv, keeduklaas, mõnikümmend grammi seatina, tsinki, inglistina ja vismutit, reostaat, kumerlääts, joonlaud, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Termoelektrilist efekti on selle avastamisest saadik püütud rakendada temperatuuride mõõtmiseks. Tänapäeval kasutatakse tehnikas temperatuuride mõõtmiseks peaaegu eranditult termoelemente, sest võrreldes elavhõbedatermomeetriga on esimesel rida paremusi. Ta ehitus on lihtne, ta on mehhaaniliselt ja termiliselt vastupidav ja võimaldab mõõta nii kõrgeid kui ka madalaid temperatuure. Oma väikeste dimensioonide tõttu võimaldab termoelement mõõta ka väga väikeste ruumide temperatuure. Tema soojusmahtuvus on väga väike, mil on suur tähtsus paljude füüsikaliste ja keemiliste mõõtmiste puhul. Tööstuses on tähtis, et mõõdetavat temperatuuri saaks jälgida kaugel mõõtmiskohast või jälgida mitmes kohas mõõdetavaid temperatuure ühes kohas

ning üheainsa elektrimõõteriista abil.

Termoelektriline efekt seisneb teatavasti selles, et kahest eri metallist moodustatud ahela ühe jootekoha soojenemisel tekib ahelas elektromotoorne jõud.

Paljude termopaaride elektromotoorne jõud on ligikaudu võrdeline jootekohtade temperatuuride vahega. On aga ka termopaare, millede elektromotoorne jõud temperatuuri tõusuga esialgu suureneb, hakkab siis teatud temperatuurist alates vähenema ja teataval kindlal temperatuuril muudab märgi (näiteks W-Mo, Fe-Cu, Ni-uushõbe jm.).

Tehnikas kasutatakse peamiselt järgmisi termoelemente:

Cu-konstantaan	kuni	500°C,	kusjuures	$E_{500} = 26,8$ mV
Kromell[1]-kopell[2]	"	800°C,	"	$E_{800} = 66,4$ "
Fe-konstantaan (40% Ni, 60% Cu)	"	900°C,	"	$E_{900} = 50,9$ "
Ni-CrNi (12,3% Cr) ..	"	1100°C,	"	$E_{1100} = 41,3$ "
Kromell-alumell[3]	"	1300°C,	"	$E_{1300} = 52,41$"
Pt-PtRh (normaal) (10% Rh)	"	1600°C,	"	$E_{1600} = 16,65$"
W-Ta	"	2500°C,	"	$E_{2500} = 32,3$ "

Tehnilise termoelemendi ehitus on järgmine: kahest eri metallist 0,5 - 1,5 mm läbimõõduga traadid on otsapidi kokku joodetud. Jootekohast alates on traadid isoleeritud mingi temperatuurikindla keraamilise ainega (harilikult kvartsiga SiO_2 või korundiga Al_2O_3). Mõlemad traadid ühes isoleertoruga on paigutatud kaitsetorusse, mille ülesandeks on kaitsta jootekohta ja traatide isolatsiooni mehhaaniliste vigastuste ning samuti mõõdetavate keskkondade keemiliste ja elektriliste mõjude eest. Eriti kõrgete temperatuuride puhul, kus kasutatakse W-Ta termoelementi, valmistatakse isolatsioon ja kaitsetoru tsirkooniumoksiidist ning termo-

---

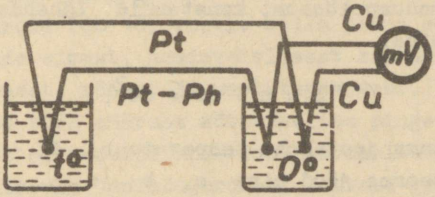
1 Kromell: 90% Ni, 9,7% Cr, 0,3% Si.

2 Kopell: 43-44% Ni, 56-57% Cu.

3 Alumell: 94,8% Ni, 2% Al, 0,2% Fe, 2% Mn, 1% Si.

element ise on inertses gaasis ülerõhu all (harilikult arroon).

Tehnilistel mõõtmistel ühendatakse termoelemendi traadid otse mõõteriistaga (millivoltmeetriga) või isekirjutava potentsiomeetriga. Sel juhul on teiseks "jootekohaks" ühendus mõõteriista klemmiga, mille temperatuur võrdub toatemperatuuriga. Toatemperatuuri kõikumised suurendavad sel juhul mõõtmisviga.



Joon. 1.

Kui on vaja saavutada suuremat täpsust, siis asetatakse teised jootekohad termostaati (joon. 1), tavaliselt termospudelisse, mis on täidetud jääga. Termostaadist väljuvad juhtmed on vasest. Millivoltmeetri ahel on tavaliselt samuti vasest, nii et selles osas täiendavat elektromotoorset jõudu ei teki.

Soojendamisel termoelemendi traatide takistus muutub ja et igal mõõtmisel termoelemendi traadid soojenevad erinevas ulatuses - kord 5 - 6 cm, kord aga üle 20 cm pikkuselt - olenevalt sellest, kui sügavale kõrge temperatuuri tsooni tuleb jootekoht paigutada, siis ei ole võimalik seda ahela takistuse muutust arvestada. Seepärast tuleb hoolitseda, et termoelemendi takistus oleks väike - kümnendike oomide kuni mõne oomi piirides, sest siis muutub ka takistus kümnendikes oomides. Vastupidi: millivoltmeetri takistus peab olema suur - mõnisada kuni tuhat oomi. Milli-

voltmeetri temperatuur peaks olema alati üks ja sama, sest vastasel korral muutub ka tema takistus.

Täpsel temperatuuri määramisel või termopaari taatlemisel mõõdetakse elektromotoorset jõudu kompensatsioonimeetodil. Siis ei tule termoelemendi takistus üldse arvesse.

Käesoleva töö ülesandeks on termopaari valmistamine keevitamise teel, kasutades selleks elektrikaart, elektrikaare karakteristiku määramine ja termopaari kaliibrimine, s.o. tuleb leida tema elektromotoorne jõud viiel jääval temperatuuril ja selle järgi leida elektromotoorse jõu teise astme lähenduspolünoomi konstandid. Lähenduspolünoomi kuju on järgmine:

$$E = a + bt + ct^2, \qquad (1)$$

kus t on kuuma jootekoha temperatuur, E - termoelemendi elektromotoorne jõud ning a, b ja c - empiiriliselt määratavad konstandid.

4. Töö käik.

a) Elektrikaare karakteristikute määramine. Elektrikaar (termiline) on gaaslahendus suhteliselt kõrgetel rõhkudel, mis eeldab kõrge temperatuuriga katoodi, kusjuures katood kuumeneb kaare enda mõjul.

Elektrikaare võib tekitada, lähendades teineteisele kaks 50 - 100 V pingestatud süsielektroodi. Momendil, kui süte otsad üksteist puutuvad, tekib vool, puutekoht kuumeneb ja nüüd võib elektroode üksteisest eemaldada mitme millimeetri ja isegi sentimeetrite kaugusele, ilma et vool katkeks. Süte otste vahele jääb püsima helenduv kaar. Seejuures helenduvad mõlema söe otsad. Positiivse otsa temperatuur on tunduvalt kõrgem negatiivse otsa temperatuurist, mida võib järeldada esimese intensiivsemast valguskiirgusest. Kestval põlemisel tekib siin kraater, mille temperatuur on ca 4000°C, kuna negatiivse elektroodi ots põleb teravaks.

Elektrikaart saab tekitada mitte üksi süte, vaid ka teiste elektrit juhtivate ainete vahel. Elektrolüüdi ja söepulga vahel võib tekitada kaarleeki ainult siis, kui süsi on katoodiks. Mainitud ja teistest analoogilistest katsetest võib järeldada, et kaarleegi tekitamiseks ja püsimiseks on vajalik negatiivse elektroodi kuumenemine. Kuumenenud katoodilt väljub intensiivne elektronide voog. Oma teekonnal ioniseerivad elektronid gaasimolekule, tekitades uusi laengukandjaid. Elektroodidevahelises ruumis tekib suure juhtivusega plasma.

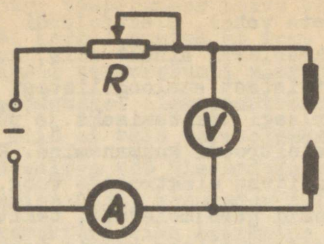
Vajalik pinge elektroodide otste vahel kaare põlemisel on mõnikümmend (ca 40) volti. Selle pinge suurus oleneb elektroodide ainest, nendevahelisest kaugusest, ümbritsevast keskkonnast, rõhust ja voolutugevusest.

Käesolevas töös määrame sütevahelise pinge olenevuse voolutugevusest erinevatel elektroodidevahelistel kaugustel. Pinge sõltuvuse voolutugevusest esitame graafikuna. Saadud kõverad iseloomustavad pinge ja voolutugevuse vahelist seost ning neid nimetatakse tunnuskõveraiks ehk karakteristikuiks. Käesoleval juhul väheneb voolutugevuse suurenemisel pinge, mistõttu tunnuskõverat nimetatakse langevaks kõveraks. Matemaatiliselt on seos pinge ja voolutugevuse vahel avaldatav järgmiselt:

$$U = \frac{\alpha}{I} + \beta, \qquad (2)$$

kus α ja β on elektrikaare põlemistingimustest olenevad konstandid.

Mõõtmiste tegemiseks koostame vooluringi joon. 2 kujutatud skeemi kohaselt. Mõõtmisseeria kestel tuleb hoida sütevaheline kaugus konstantsena, mida võimaldab vastav regulaator. Põleva kaare korral on süte otsene jälgimine plasma suure heleduse ja ultravioletkiirte tõttu võimatu. Seepärast tekitame kumerläätse abil seinale või vastavale ekraanile süte kujutised, mida võime vaadelda reguleerimisel.



Joon. 2.

Kaare tekitamiseks reguleerime reostaadi R nii, et voolutugevus oleks umbes 4 A. Seejuures tuleb arvestada, et kaares tekkiv pingelang on umbes 40 V. Viime söed regulaatoriga nihutades kokkupuutumiseni ja eemaldame kiiresti 2 - 3 mm kauguseni. (Kokkupuute kestel on voolu tugevus normaalsest tunduvalt suurem ja kahjustab seetõttu pikemal kestusel riistu.)

Enne mõõteriistade lugemite registreerimist tuleb oodata kuni kaar põleb rahulikult. Muutes voolutugevust reostaadi abil järk-järgult 0,5 A võrra, loeme voltmeetrilt vastavad pinged ja kanname saadud andmed tabelisse, mille põhjal hiljem joonestame graafiku. Katset kordame veel mingil teisel kaare pikkusel. Kaare pikkuse (sütevahelise kauguse) saame arvutada süte kujutiste vahelisest kaugusest, kui mõõdame kujutise ja kaarleegi kaugused läätsest.

b) Termoelemendi valmistamine. Harilikust metallist valmistatakse termopaar kas keevitamise või jootmise teel. Keevitatakse kas atsetüleeni või elektrikaare leegis. Laboratoorselt on viimane keevitusviis kättesaadavam. Tavaliselt keevituvad metallid hästi booraksi ja kvartsliiva kaitsekihi all. Selleks kaetakse jootekoht alguses booraksiga ning kui see on sulanud ja märganud jootekoha, siis puistatakse viimasele kvartsliiva. Kõrge temperatuuri juures tekib klaasist kaitsekiht. Pärast traatide kokkukeevitamist tuleb kaitsekiht eemaldada. Selleks pistetakse tuline jootekoht vette. Pragunenud kaitsekiht on nüüd jootekohalt kergesti kõrvaldatav.

Traatide kokkukeevitamiseks tekitame kaare joonisel 2 kujutatud lülituse järgi. Keevitamisel kasutame kaitseprille.

c) Kaliibrimisel kasutame termopinge registreerijana isekirjutavat potentsiomeetrit, olles eelnevalt tutvunud riista instruktsiooniga.

Kaliibrime kahe jootekohaga termopaari, milline on valmistatud järgmise skeemi kohaselt: vasktraat-konstantaantraat-vasktraat. Vasktraatide vabad otsad ühendame isekirjutajaga; ühe jootekoha asetame termospudelis olevasse sulavasse jäässe, teise vette, mida hakkame soojendama. Käivitame isekirjutaja. Kui vesi keema hakkab, toome termopaari jootekoha võimalikult veepinna lähedale, sest tugevasti keeva vee seesmiste kihtide temperatuur on veidi üle 100°C. Katset jätkame, kuni isekirjutaja joonistab ajateljega (s.o. lindi liikumissuunaga) paralleelse sirge. Seiskame isekirjutaja, kui selle sirglõigu pikkus on ca 3–4 cm.

Järgmiseks võtame väikese tiigli seatinaga ja asetame sellesse termoelemendi jootekoha. Teine jootekoht jääb endiselt termospudelisse. Kuumutame tiiglit gaasileegil või elektriahjus, kuni metall sulab. Sulamise kestel temperatuur ei muutu ja isekirjutaja joonistab ajateljega paralleelse sirglõigu.

Jätkame soojendamist, kuni seatina temperatuur ületab mõne kraadi võrra sulamistemperatuuri. Seejärel eemaldame gaasileegi ning registreerime jahtumise kõvera. Seatina tahkumisel tekib seisak (platoo) temperatuuri languses ja seega ka termoelektromotoorse jõu muutumises. Graafikult leiame sulamis- ja tahkumistemperatuurile vastavad termoelektromotoorse jõu väärtused. Et termoelementi seatinast kätte saada, tuleb see uuesti üles sulatada. Ühtlasi põletame jootekoha puhtaks. Selleks pistame jootekoha gaasileeki, kuumutame üles ja eemaldame raputamise teel seatina jäänused. Milleks on see vajalik?

Kordame katset ülejäänud kolme metalliga. Eksimuste vältimiseks märgime iga katse järel graafikule, millisele metallile see vastab. Katseandmed kanname tabelisse.

Nr.	Kindlad temperatuurid	Teise jootekoha temperatuur	Termoelektromotoorne jõud
1.	H_2O 100°C		
2.	Sn 231,9°C		
3.	Bi 271,0°C		
4.	Pb 327,3°C		
5.	Zn 419,4°C		

Saadud andmetest koostame kolm võrrandit:

$$E_1 = a + bt_1 + ct_1^2$$
$$E_2 = a + bt_2 + ct_2^2$$
$$E_3 = a + bt_3 + ct_3^2$$

kus otsitavateks on konstandid a, b ja c.

Seda võrrandisüsteemi on sobiv lahendada determinantide kaudu. Lahutades igas determinandis esimesest reast teise ja teisest kolmanda ning taandades kogu murru $(t_1 - t_2)\cdot(t_2 - t_3)$-ga, saame tulemuse, mida võib numbriliselt lahendama hakata:

$$c = \frac{\begin{vmatrix} 1 & \frac{E_1 - E_2}{t_1 - t_2} \\ 1 & \frac{E_2 - E_3}{t_2 - t_3} \end{vmatrix}}{t_3 - t_1}, \qquad b = \frac{\begin{vmatrix} \frac{E_1 - E_2}{t_1 - t_2} & t_1 + t_2 \\ \frac{E_2 - E_3}{t_2 - t_3} & t_2 + t_3 \end{vmatrix}}{t_3 - t_1}.$$

a saame, kui asetame võrrandisse leitud c ja b väärtused. Võrrandisüsteemi lahenduskäik esitada täielikult, nii et iga arvutustehet saab kontrollida.

Kui ruutvõrrandi $E = a + bt + ct^2$ kordajad, a, b, c on leitud, joonestame vastava funktsionaalse sõltuvuse kõvera, arvutades E väärtusi iga 50°C tagant. Samasse teljestikku kanname ka kõik eksperimendist leitud punktid.

Kui arvutustes pole vigu, peab kõver läbima neid kolme punkti, mille järgi on koostatud võrrandid. Ülejäänud kahe punkti järgi saab hinnata, kuivõrd hästi lähendab saadud kõver termopinge sõltuvust temperatuurist kaliibrimispunktide vahelises alas.

Samas teljestikus joonestame ka lineaarseose E = bt ja võrdleme mõlemate joonte erinevust. Kui suures piirkonnas tohime kasutada lineaarseost?

Saadud kõver võimaldab termopinge järgi määrata temperatuuri. Seejuures peame silmas pidama kaht asjaolu. Et kaliibrimisel teine jootekoht oli $0^{o}C$, siis kehtib meie kaliibrimine ka ainult sellel juhul, kui termoelemendi üks jootekohtadest on temperatuuril $0^{o}C$ (mis tuleb ka protokolli kanda). Teiseks oleme õigustatud mõõtma ainult interpolatsiooni teel saadavaid temperatuure, s.o. vahemikus $100^{o}C$ - $419^{o}C$, ja kaugele sellest piirkonnast väljaspoole me ekstrapoleerida ei tohi.

Kõvera punktid arvutame järgmise tabeli järgi:

a = ...		b = ...		c = ...
t	bt	ct^2	Parandusliige $bt + ct^2$	E
50^{o}				mV
100^{o}				mV
....				
....				
....				
....				
....				
....				
....				
450^{o}				mV

Kõikidele katsest saadud punktidele ehitame vearistkülikud, nende järgi veakoridori. See võimaldab hinnata termo-

paariga mõõdetud temperatuuri väärtuste piirviga.

5. Täiendavaid küsimusi.

a) Missuguses suurusjärgus on termoelektromotoorne jõud, mida tekitab 1°-ne temperatuuride vahe?
b) Millised on termoelemendi eelised tavalise termomeetriga võrreldes?
c) Miks pole tarvis arvestada termopaari takistust, kui termoelektromotoorset jõudu mõõdetakse kompensatsiooni meetodil?
d) Millega seletada elektrikaare kaaretaolist kuju?
e) Milleks kasutatakse elektrikaart?
f) Mis toimub kaare süütamisel ilma reostaadita?
g) Kuidas oleks võimalik katsest määrata valemis (2) esinevaid konstante α ja β ?
h) Selgitada isekirjutava potentsiomeetri töötamise põhimõtet.

Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. Tallinn, 1960, lk. 227-232.
2. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 160-172.
3. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.II. М., 1968, стр. 212-221, 259-262.
4. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А.В.Фремке. М.-Л., 1963, стр. 392-397.

10. FARADAY ELEKTROLÜÜSISEADUSTE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Faraday elektrolüüsiseadustega tutvumine, vesiniku elektrokeemilise ekvivalendi, Faraday arvu ning elementaarlaengu määramine.

2. Töövahendid.

Ampermeeter, lükatreostaat, gaasivoltameeter, sekundimõõtja, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Olgu iooni laeng Ze, kus e - elektroni laeng, Z - iooni valents, s.o. dissotsieerumisel aatomi poolt äraantud või juurdesaadud elektronide arv. Kui elektrolüüsil läbib lahust n iooni, siis elektroodile äraantud laengu suurus

$$q = nZe.$$

Samaaegselt elektroodil eraldunud aine mass

$$M = nm,$$

kus m - ühe iooni mass. Järelikult

$$M = \frac{m}{Ze} q.$$

On teada, et mistahes aine ühes gramm-molekulis (s.o.

aine hulgas grammides, mis arvuliselt võrdub antud aine molekulkaaluga) sisaldub ühesugune arv aatomeid

$$N = 6{,}023 \cdot 10^{23} \text{ (Avogadro arv).}$$

Ühe iooni mass (jättes arvestamata aatomist eraldunud elektronide massi)

$$m = \frac{A}{N}$$

ning eraldunud aine hulk

$$M = \frac{A}{NZe} q. \qquad (1)$$

Suurus

$$\frac{A}{NZe} = k \qquad (2)$$

on antud ainet iseloomustav konstant, mida nimetatakse aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks.

Seega on elektroodil eraldunud aine mass M võrdeline elektrolüüti läbinud elektrihulgaga q (Faraday esimene seadus).

Elektrolüüti läbinud elektrihulka võib määrata vooluringi läbiva voolu tugevuse I ja kestuse τ abil: $q = I\tau$. Seega võib elektrokeemilist ekvivalenti arvutada valemist

$$k = \frac{M}{I\tau}. \qquad (3)$$

Valemist (1)

$$\frac{A}{Z} = \text{Nek.} \qquad (4)$$

Suurust $\frac{A}{Z}$ nimetatakse aine keemiliseks ekvivalendiks - arvuliselt võrdub ta antud aine massiga grammides, mis keemilistes ühendites asendab 1,0078 g vesinikku. $\frac{A}{Z}$ grammi antud ainet moodustab aine grammekvivalendi.

Valemist (4) järgneb, et ainete keemilised ekviva-

lendid on võrdelised nende elektrokeemiliste ekvivalentidega (Faraday teine seadus).

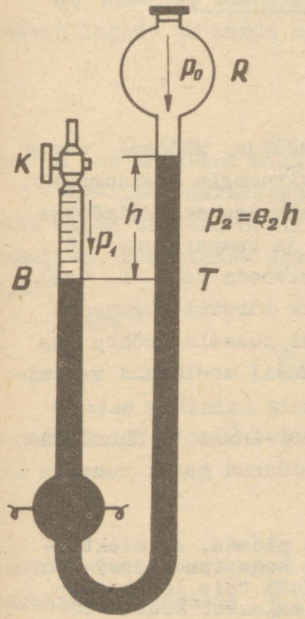
Konstanti Ne = F nimetatakse Faraday arvuks. Valemi (1) võib seega kirjutada kujul

$$M = \frac{1}{F}\frac{A}{Z}q. \qquad (5)$$

Järelikult selleks, et elektroodil eralduks aine hulk, mis on võrdne grammekvivalendiga, s.t. $M_1 = \frac{A}{Z}$ on vaja, et elektrolüüti läbiks laeng $q = F$.

Ühevalentse iooni laeng on arvuliselt võrdne elektroni laenguga, mistõttu elementaarlaengu määramiseks on küllaldane arvutada suhe

$$\frac{F}{N} = e.$$



Joon. 1.

4. Töö käik.

Teeme väävelhappe vesilahuse elektrolüüsi. Elektrolüüsil eralduvad gaasid - vesinik ja hapnik - kogume gaasivoltameetrisse.

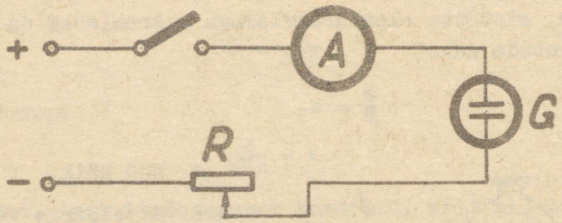
Gaasivoltameeter (joon. 1) koosneb elektroodidega büretist B ning klaastorust T , mille ülemises osas asub reservuaar voltameetri täitmiseks väävelhappe vesilahusega.

Pärast riista täitmist väävelhappe vesilahusega, tuleb avada büreti kraan K , lastes õhu sellest täielikult välja suruda, mille järel kraan suletakse. Riist on töövalmis.

Voolu sisselülitamisel

eralduvad elektroodidel hapnik ja vesinik, mis büreti ülemisse ossa kogunedes suruvad osa lahust büretist klaastorusse ja reservuaari. Nivoo alanemise järgi skaalaga varustatud büretis võib määrata eraldunud gaasi ruumala.

Gaasivoltameeter G ühendatakse alalisvooluringi järjestikku maksimaalsele takistusele viidud lükatreostaadi ja ampermeetriga (joon. 2). Reostaadiga reguleerime katseks vajaliku voolu tugevuse (1 - 2 A). Nüüd katkestame voolu ning kraani avamisega laseme eraldunud gaasi välja, millega on ettevalmistused mõõtmisteks tehtud. Koos vooluallika



Joon. 2.

sisselülitamisega käivitame sekundimõõtja. Mõõdame voolu tugevuse I amprites ja teatud gaasiruumala eraldumisel lülitame voolu välja, samaaegselt peatades sekundimõõtja. Mõõdame eraldunud gaasi ruumala V ja temperatuuri t . Millimeetrijoonlauaga mõõdame happenivoode vahe h (mm) büretis ja klaastorus, mis on vajalik büretti kogunenud gaasi rõhu arvutamiseks. Teades gaasi ruumala, rõhku ja temperatuuri võib arvutada elektrolüüsil eraldunud vesiniku massi.*

Tuginedes Boyle-Mariotte'i ja Gay-Lussac'i ühendatud seadusele, taandame voltameetris eraldunud gaasi ruumala

---

* Katse sooritamisel tuleb silmas pidada, et elektrolüüsil eraldunud vesiniku ja hapniku segu (paukgaas) on plahvatusohtlik, mistõttu tuleb hoiduda tule lähendamisest või elektrisädeme tekkimise võimalusest kontaktide vahel.

normaalruumalale V_0 (0°C ja 760 torri juures).

$$V_0 = \frac{V}{(1 + 0{,}00366\ t)} \cdot \frac{P}{760}, \qquad (6)$$

kus t on gaasi temperatuur sentikraadides, p - gaasi rõhk torrides, V - eraldunud gaasi ruumala kuupsentimeetrites.

Voltameetris eraldunud gaasi rõhu p ja büretis väävelhappelahuse küllastava auru rõhu p_1 summa on tasakaalustatud atmosfäärirõhu p_0 ja väävelhappelahuse samba h kaalust tingitud rõhu p_2 summaga (joon. 1). Seega

$$p = p_0 + p_2 - p_1.$$

Et 10%-lise väävelhappevesilahuse võib küllaldase täpsusega lugeda 12 korda kergemaks elavhõbedast, siis

$$p_2 = \frac{h}{12},$$

kus h on mõõdetud millimeetrites.

10%-lise väävelhappe vesilahuse küllastavate aurude rõhu antud temperatuuril leiame küllastava veeauru rõhu tabelist, korrutades saadud arvu empiirilise kordajaga 0,88.

Seega

$$p = p_0 + \frac{h}{12} - 0{,}88\ p_1. \qquad (7)$$

Teades vesiniku tihedust normaaltingimustes $\rho_0 = 0{,}0899 \cdot 10^{-3}$ gcm^{-3}, võib Faraday I seaduse kirjutada kujul

$$kI\tau = \frac{2}{3} V_0 \rho_0, \qquad (8)$$

sest vastavalt Avogadro seadusele moodustab eraldunud paukgaasist vesinik $\frac{2}{3}$ ruumiosa:

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2.$$

Võrrandist (8) avaldame vesiniku elektrokeemilise ekvivalendi, võttes arvesse normaalruumala arvutamiseks valemeid (6) ja (7):

$$k = \frac{\frac{2}{3} V \left(p_0 + \frac{h}{12} - 0{,}88 p_1\right) \rho_0}{760(1 + 0{,}00366\, t)\, I \tau} \quad \left(\frac{g}{C}\right).$$

Katse tulemused koondame tabelisse:

	Määratud suurus	Mõõtmisviga
Elektrokeem. ekvivalent k		
Keemiline ekvivalent $\frac{A}{Z}$		
Faraday arv F		
Elementaarlaeng $e = \frac{F}{N}$		

Lisa.

Küllastava veeauru rõhk p .

t°C	p_1(Torr)	t°C	p_1(Torr)
12	10,5	19	16,5
13	11,2	20	17,5
14	12,0	21	18,6
15	12,8	22	19,8
16	13,6	23	21,1
17	14,5	24	
18	15,5	25	23,8

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Selgitada esimest ja teist liiki juhtide elektrijuhtivuse mehhanismi.

b) Milline on aine elektrokeemilise ekvivalendi füüsikaline sisu?

c) Milline seos on Faraday arvu, aine elektrokeemilise ja keemilise ekvivalendi vahel?

d) Kes võib määrata elektrokeemilist ekvivalenti, kasutades vahelduvvoolu?

e) Lähtudes vesiniku ja hapniku tihedusest ja nende ruumalalisest suhtest paukgaasis, arvutada paukgaasi tihedus.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 199-219.
2. J. Lang jt. Füüsika üldkursus II. Tallinn, 1961, lk.77--87.
3. С. Г. Калашников. Электричество. М., 1964, lk.464-492.
4. И. В. Савельев. Курс общей физики.Т.II, М., 1968, lk. 228-238.

11. TERMOEMISSIOONI UURIMINE JA ELEKTRONI VÄLJUMISTÖÖ MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Dioodi volt-amperkarakteristikute määramine, küllastusvoolu tiheduse ja katoodi temperatuuri vahelise sõltuvuse uurimine, elektroni väljumistöö määramine volframi jaoks.

2. Töövahendid.

Raadiolamp ГУ-4, milliampermeeter, voltmeeter anoodpinge mõõtmiseks, ampermeeter, voltmeeter küttepinge mõõtmiseks, kaks reostaati, pingeallikad, lülitid, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Nagu hästi teada, on toatemperatuuril metallist ümbritsevasse ruumi lahkunud elektronide arv tühiselt väike. See näitab, et üleminekukihis metall - vaakum eksisteerib potentsiaali barjäär, mis takistab elektronide väljumist ja mille ületamiseks tuleb teha tööd. Et aga rea elektronide väljumine on võimalik ka madalatel temperatuuridel, siis tuleb eeldada nende jagunemist kiiruste järgi. Erinevalt ideaalse gaasi molekulide jaotusseadusest alluvad juhtivuselektronid metallis Fermi-Dirac'i jaotusseadusele. Vastavalt viimasele seadusele ei puudu elektronidel kineetiline energia isegi absoluutse nulli juures. Suuremal osal elektronidest on sellel temperatuuril energia, mis vähe

erineb maksimaalselt võimalikust W_F. Seda elektronide jaoks maksimaalselt võimalikku energiahulka temperatuuril 0^oK nimetatakse Fermi energiaks, niisugust energiat omavat elektroni aga Fermi nivool viibivaks. Metalli kuumutamisel juhtivuselektronide kineetiline energia suureneb. Niisugustes tingimustes võib leida elektrone, millede energia on suurem kui W_F, kusjuures ka selliseid, mis võivad metallist lahkuda. Et elektron saaks metallist lahkuda, peab tal olema teatud minimaalne, igale metallile iseloomulik energia W_a. Vahe $e\varphi = W_a - W_F$ näitab minimaalset lisaenergia hulka, mida tuleb anda Fermi nivool asetsevatele elektronidele nende metallist eemaldamiseks. Seda energiahulka nimetatakse elektroni väljumistööks.

Metalli temperatuuri edasisel suurendamisel metallist lahkuvate elektronide arv suureneb järsult. Termoemissioonvoolu tiheduse j sõltuvust temperatuurist väljendab Richardsoni-Dushmani seadus

$$j = AT^2 \exp(-\frac{e\varphi}{kT}), \qquad (1)$$

kus A on kõikide metallide jaoks konstantne suurus,
k - Boltzmanni konstant.

Tänu eksponentsiaalsele sõltuvusele on φ ja T mõju voolu tihedusele väga suur. Nii näiteks volframi temperatuuri suurenemisel 2000^oK kuni 2500^oK-ni emissioonvoolu tihedus suureneb peaaegu 200 korda.

Logaritmides võrrandit (1) saame:

$$\ln \frac{j}{T^2} = \ln A - \frac{e\varphi}{k} \cdot \frac{1}{T}. \qquad (2)$$

Viimati esitatud kujul on termoemissiooni põhivõrrandit eksperimentaalselt kõige mugavam kontrollida ning kasutada ka väljumistöö $e\varphi$ arvutamiseks. Leides graafiliselt sõltuvuse $\ln \frac{j}{T^2}$ ja $\frac{1}{T}$ vahel saame sirge, mille tõus on $\frac{e\varphi}{k}$. Määranud selle tõusu võib arvutada $e\varphi$.

Esmakordselt kasutas kirjeldatud meetodit väljumistöö määramiseks Richardson, mistõttu on see sageli tuntud Richardsoni sirgete meetodi nime all.

Käesolevas töös uuritakse termoemissiooni volframkatoodiga vaakumlambis. Suurendades pinget anoodi ja kuumutatud katoodi vahel suureneb ka voolutugevus, kuni saabub küllastus. Küllastusvoolule eelnevas, suhteliselt nõrkade voolude piirkonnas väljendab voolutugevuse ja anoodpinge vahelist sõltuvust Boguslavski-Langmuire'i ehk 3/2-seadus:

$$i = KU^{3/2},$$

kus K - elektroodide kujust ja asetusest sõltuv võrdetegur.

Küllastusvoolu tingimustes jõuavad kõik katoodilt ajaühikus emiteeritud elektronid anoodini. Seega võib küllastusvoolu mõõtmise järgi määrata katoodi emissioonvoolu.

Sõltuvuse (2) graafiliseks esitamiseks tuleb teada katoodi temperatuuri T. Temperatuuri määramine võib toimuda katoodi termilise tasakaalu analüüsi kaudu. Katoodi kuumutamiseks kulutatav võimsus eraldub peaasjalikult soojuskiirguse näol, sest konvektsioon vaakumis puudub. Osa energiat kaob katoodi hoidvate jalgade soojusjuhtivuse tõttu, kuid küllalt kõrgetel temperatuuridel on need kaod suhteliselt väikesed. Katseliselt on volframi jaoks sõltuvus katoodi iga pinnaühiku kohta tuleva küttevõimsuse ja temperatuuri vahel eelnevalt leitud. (Kaod on võrdelised katoodi pinnaga!) Arvutuste lihtsustamiseks on tabelis 1 antud küttevõimsuse ja ld suhe, kus l tähistab katoodi pikkust ja d - läbimõõtu. Tabeliandmeid interpoleerides võib määrata katoodi temperatuuri mistahes kulutatud võimsuse juures.

Lampi ГУ -4 kasutades ei ole soovitatav mõõta temperatuuridel alla 2000°K, mil energiakaod soojusjuhtivuse tõttu osutuvad suhteliselt suurteks.

Tabel 1.

T^oK	$\frac{P}{ld}$ W/cm^2	T^oK	$\frac{P}{ld}$ W/cm^2
1500	17,33	2300	148,2
1600	24,32	2400	181,2
1700	33,28	2500	219,3
1800	44,54	2600	263,0
1900	58,45	2700	312,7
2000	75,37	2800	368,9
2100	95,69	2900	432,4
2200	119,8	3000	503,5

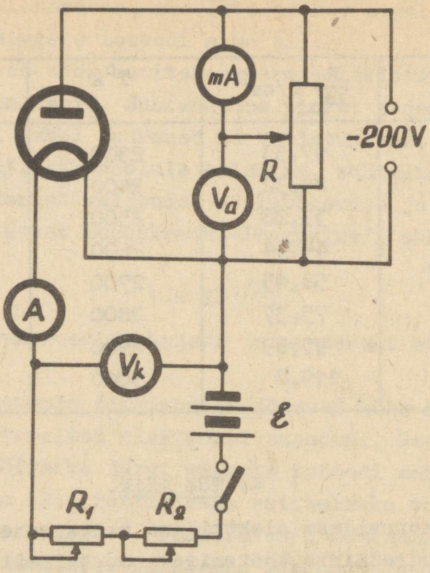
4. Töö käik.

Katsekorralduse elektriline skeem on esitatud joonisel 1. Dioodrežiimis töötamiseks on trioodi ГУ-4 võre ühendatud anoodiga. Küttevoolu reguleerime reostaatide R_1 ja R_2 ja anoodpinget potentsiomeetri R abil. Küttevõimsust arvutame ampermeetri A ja voltmeetri V_k näidu järgi.

Pärast ühenduste tegemist ja juhendava õppejõu poolset kontrolli mõõdame anoodvoolu ja pinge vahelise sõltuvuse 1,4; 1,5; 1,6; 1,7 A tugevuse küttevoolu juures ning esitame saadud tulemused graafikutena.

Katoodi küttevõimsuse ja emissioonvoolu tiheduse vahelise sõltuvuse määramiseks muudame katoodvoolu tugevust intervallis 1,2 - 1,7 A, hoolitsedes selle eest, et anoodpinge oleks küllaldane küllastusrežiimi tekitamiseks. Voolu tugevust muudame seejuures nii, et emissioonvoolu tugevus suureneks iga kord 1,5 - 2 korda. Kasutades tabelit 1 arvutame katoodi temperatuurid ning esitame sõltuvuse emissioonvoolu tiheduse ning temperatuuri vahel graafiliselt.

Lõpuks joonestame graafiku $\ln \frac{j}{T^2} - \frac{1}{T}$ ning arvutame



Joon. 1.

elektroni väljumistöö. Voolutiheduse ja temperatuuri vahelise sõltuvuse võime esitada ka teljestikus log $\frac{j}{T^2}$ - $\frac{1}{T}$. Väljumistöö arvutamisel korrutame viimati joonestatud sirge tõusu 2,3-ga.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Esitada Maxwelli jaotusseadus.
b) Esitada Fermi-Diraci jaotusseadus.
c) Kuidas arvutada käesolevas töös anoodvoolu tihedust?
d) Selgitada juhtivusmehhanismi metallides.
e) Mis on metallides potentsiaalbarjääri põhjuseks?
f) Kirjeldada dioodide konstruktsioone.
g) Loetleda termoemissiooni rakendusi.

6. Riista konstandid.

ГУ-4 maksimaalne küttepinge U_f = 7 V, küttevoolu maksimaalne tugevus i_f = 1,9 A; katoodi pikkuse ja läbimõõdu korrutis ld = 0,05 cm^2.

Kirjandus.

1. J.A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 183-198.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.II. 1968, lk. 184-197, 205-212.
3. С. Г. Калашников. Электричество. 1964, lk.375-398.

12. TERMOELEKTRONIDE JAGUNEMINE KIIRUSTE JÄRGI.

1. Tööülesanne.

Termoelektronide jagunemise uurimine kiiruste järgi pidurdava potentsiaali meetodil.

2. Töövahendid.

Vaakumlamp 6X6C, mikroampermeeter, millivoltmeeter, ampermeeter, potentsiomeeter, reostaadid, pingeallikad, lüliti, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Nagu teada, jagunevad juhtivuselektronid metallis Fermi-Diraci jaotusseaduse kohaselt, s.t.

$$dn = \frac{2m^3}{h^3} \cdot \frac{du\,dv\,dw}{\exp\left(\frac{W-W_F}{kT}\right)+1},$$

kus dn on ruumiühikus sisalduvate juhtivuselektronide arv, mille kiiruste komponendid satuvad intervalli (u, u + du), (v, v + dv), (w, w + + dw),

W - elektroni energia,

m - elektroni mass,

h - Plancki konstant,

k - Boltzmanni konstant,

T - absoluutne temperatuur,

W_F - Fermi nivoole vastav energia.

Esitatud jaotusseadus erineb oluliselt molekulaarfüüsikas tuntud ideaalse gaasi molekulide jaotusseadusest - Maxwelli-Boltzmanni seadusest. Termoemissiooni juures väljuvad aga metallist ainult suuremate kiirustega elektronid, mistõttu nende kontsentratsioon on seal 10^{10} - 10^{12} korda väiksem juhtivuselektronide kontsentratsioonist metallis. Niisugustes tingimustes Fermi-Diraci jaotusseadus praktiliselt ühtib Maxwelli-Boltzmanni seadusega, s.t.

$$dn = n \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right) du\, dv\, dw,$$

kus n on metallist vaakumisse siirdunud elektronide kontsentratsioon.

Viimati esitatud jaotusseaduse katseliseks kontrollimiseks võib kasutada pidurdava potentsiaali meetodit. Kui muuta vaakumdioodi anoodi potentsiaal katoodi suhtes negatiivseks, siis osutub elektronide liikumine anoodile takistatuks ning sinna jõuavad vaid need elektronid, millede kineetiline energia on küllaldane pidurdava välja vastumõju ületamiseks. Mõõtes anoodvoolu tugevuse pidurdava potentsiaali erinevatel väärtustel võib otseselt uurida termoelektronide jagunemist energiate või kiiruste järgi.

Peale anoodi potentsiaali sõltub anoodvoolu tugevus katoodi antud temperatuuril elektroodide süsteemi geomeetriast. Klassikalisele Maxwelli-Boltzmanni jaotusseadusele põhinevad arvutused näitavad, et paralleelsete plaatelektroodide puhul on

$$i = i_0 \exp\left(-\frac{eU}{kT}\right),$$

kus i on anoodvoolu tugevus,
i_0 - anoodvoolu tugevus elektrivälja puudumisel elektroodidevahelises ruumis,
e - elektroni laeng,
U - anoodi pidurdava potentsiaali absoluutväärtus.

Logaritmides viimast võrrandit saame

$$\ln i = \ln i_0 - \frac{e}{kT} U. \qquad (1)$$

Niisugusel kujul on klassikalisest jaotusseadusest tulenev valem kergesti katseliselt kontrollitav: ln i - U teljestikus kujutab see sõltuvus sirget. Määranud sirge tõusu, saab arvutada elektronide temperatuuri, mis elektronide ja katoodi termilise tasakaalu tõttu on ühtlasi katoodi temperatuuriks.

Käesolevas töös kasutatakse vaakumdioodi, mille elektroodid on teineteisele küllalt lähedal asetsevad koaksiaalsed silindrid. Ka niisugusel juhul on paralleelsete plaatide jaoks tuletatud valem (1) hästi rakendatav.

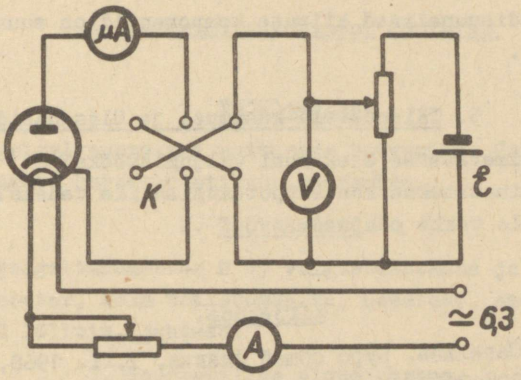
Vaakumdioodi katood ja anood on valmistatud erinevatest materjalidest, mistõttu nende vahel tekib elektroodide temperatuurist sõltuv kontaktpinge. Kontaktpotentsiaali märgi ja suuruse saab määrata ln i - U graafikult. Sõltuvus (1) kehtib vaid anoodi negatiivsete potentsiaalide juures. Kui anoodi potentsiaal on positiivne, siis voolutugevuse kasvu kiirus potentsiaali suurenemisel väheneb ja küllastuse saabumisel lakkab hoopis. Teades, et resultantvälja võrdumisel nulliga on ülalkirjeldatud graafikul murdepunkt, võime määrata kontaktpotentsiaalide vahe suuruse kui ka märgi.

Pärast kontaktpotentsiaalide vahe määramist võib anda graafiliselt anoodvoolu tugevuse sõltuvuse anoodi negatiivsest potentsiaalist. See graafik näitab elektronide arvu, millede energia on suurem antud pidurdavale potentsiaalile vastavast energia väärtusest. (Jutt on siin mitte elektronide koguenergiast, vaid sellest, mis vastab nende liikumisele katoodilt anoodi suunas.) Teades pidurdavat potentsiaali võib arvutada vastavasuunalise kiiruse komponendi valemist

$$\frac{mv^2}{2} = eU.$$

4. Töö käik.

Katsekorralduse elektriline skeem on esitatud joonisel 1. Vooluallikaks E on aku element, anoodvoolu mõõdetakse tundliku mitme mõõtepiirkonnaga mikroampermeetriga. Mõõte-



Joon. 1.

piirkondi saab muuta juurdeühendatava ja reguleeritava välisšundi abil. Enne skeemi kokkupanemist tutvume põhjalikult mikroampermeetri käsitsemisjuhendi ning šundi lülitusviisiga.

Pärast ühenduste tegemist ning juhendava õppejõu luba mõõdame anoodvoolu tugevusi pingete intervallis +0,75 kuni -0,5 V katoodi küttevooludel 0,2; 0,22; 0,24; 0,26 A. Mikroampermeetri näidu registreerimisel kasutame sellist piirkonda, kus valgusindeksi hälve on võimalikult suur. Kasutades väiksemaid mõõtepiirkondi ning töötades negatiivsete anoodpotentsiaalidega peame rangelt vältima potentsiaali polaarsuse võimalikku muutmist ümberlüliti K abil. Ümberlülitamine võib toimuda ainult kõige suuremat mõõtepiirkonda kasutades. Saadud mõõtmistulemused esitame ln i - U teljestikus ja määrame kontaktpotentsiaalide vahe märgi ning väärtuse katoodi vastavatel temperatuuridel. Katoodi

temperatuurid arvutame ülalkirjeldatud viisil. Joonestame anoodvoolu ning negatiivse potentsiaali vahelist sõltuvust väljendavad graafikud, arvestades kontaktpotentsiaalide vahet.

Esitame graafikud, mis väljendavad sõltuvust elektronide kiiruse ja nende elektronide suhtelise arvu vahel, millede anoodisuunalised kiiruse komponendid on suuremad antud kiirusest.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Mida nimetatakse elektroni väljumistööks?
b) Mida nimetatakse kontaktpotentsiaalide vaheks? Selgitada selle tekke põhjusi.

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.II. 1968, lk. 184--197, 205-212.
2. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс общей физики. Т.I. 1962, lk. 188.
3. Электроника. Под ред. А. А.Жигарева.1951, lk. 202.

13. PEEGELGALVANOMEETRI UURIMINE.

1. Tööülesanne.

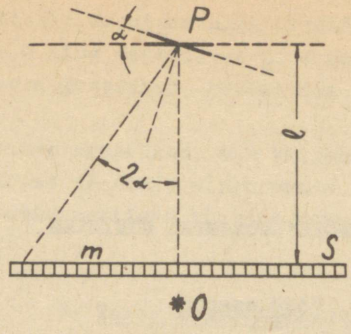
Peegelgalvanomeetri ehitusega tutvumine. Galvanomeetri tähtsamate karakteristikute määramine.

2. Töövahendid.

Peegelgalvanomeeter M 17 valgustusseadme ja skaalaga, voltmeeter, kolm takistussalve, reostaat, aku, ümberlüliti, 2 lülitit, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Galvanomeetreid kui suure tundlikkusega mõõteriistu kasutatakse nõrkade voolude, väga madalate pingete või väikeste laengute mõõtmiseks. Nõrkade alalisvoolude mõõtmisel kõige enam kasutatavateks galvanomeetriteks on pöördpoolgalvanomeetrid peegelgalvanomeetritena. Tavalisest magnetelektrilisest mõõteriistast erineb peegelgalvanomeeter selle poolest, et pöörduv pool on riputatud õhukese metall-lindi või kvartsniidi otsa. Seega puuduvad galvanomeetril laagrid, milles hõõrdumine on üheks takistuseks mõõteriistade tundlikkuse suurendamisele. Pooli lähedale lindi külge on kinnitatud peeglike, mida kasutatakse pooli pöördenurga määramiseks - sellest ka riista nimetus. Peegli otstarve selgub jooniselt 1. Valguskiirte kimp juhitakse valgusallikast O peeglikesele P. Sealt tagasipeegeldunult tekitab ta skaalal S valguslaigu, mille keskel on tume joon. Peeglikese pöördumisel nurga α võrra nihkub joon skaalal m millimeetrit.



Joon. 1.

Kui skaala kaugus peeglikesest on l mm, siis galvanomeetri lugem

$$m = l \tan 2\alpha ,$$

s.t. m on võrdeline pöördenurga tangensiga. Väikeste pöördenurkade korral (3 - 5°) võib nurga tangensit asendada nurgaga, mistõttu

$$m = 2l\alpha . \qquad (1)$$

Osuti ja osutit tasakaalustavate koormuste puudumise tõttu on peegelgalvanomeetri liikuv süsteem eriti kerge, mis võimaldab kasutada peent ripplinti ja seega suurendada riista tundlikkust. Vool juhitakse pooli ripplindi kaudu. Teiseks juhtmeks on pooli alla kinnitatud õhuke kuld- või hõbelindike, mis ei tohi takistada pooli liikumist. Pooli hoiab nullseisus ripplindi elastsusjõud. Pool saab vabalt pöörduda püsivmagneti kitsas silindrilises pilus siis, kui pooli pöördetelg ühtib pilu teljega. Galvanomeeter seatakse õigesse asendisse galvanomeetri küljes oleva vesiloodi ja kolme reguleeritava toetuskruvi abil. Kui vesiloodi mull on keskel, siis on ka galvanomeetri pool õiges asendis. Vesiloodita galvanomeetrite ülesseadmisel tuleb saavutada olukord, kus pool liigub vabalt,

hüpeteta. Transportimisel ja siis, kui galvanomeetriga ei töötata, peab pöörduv süsteem olema kinnitatud erilise seadeldise - arretiiri abil. Arreteerimata riista transportimisel võib ripplint kergesti vigastuda või isegi rebeneda. Enne tööle asumist tuleb galvanomeetri arretiir vabastada ja pärast töö lõppu sulgeda. Seda tuleb teha ettevaatlikult, sest arretiiri tõuked kanduvad otseselt üle ripplindile. Praktikumis tuleb selleks pöörduda juhendava õppejõu või laborandi poole.

Ripplindi ülemine ots on kinnitatud pööratava nupu - nulli korrektori - külge, mille abil pöördpool seatakse enne töö algust õigesse asendisse nii, et pooli tasand on paralleelne magneti pooluste keskkohti ühendava sirgega. Ka seda nuppu tuleb pöörata väga ettevaatlikult ja aeglaselt, sest pool järgneb pöördele teatava hilinemisega (pöördemoment kandub poolile ripplindi kaudu). Veidi pööranud, tuleb oodata, kuni pool võtab uue asendi, ja alles siis edasi pöörata. Ka selleks operatsiooniks tuleb paluda praktikumi juhendaja abi. Et vähendada juhuslike raputuste mõju, paigutatakse galvanomeeter mõõtmiste ajal massiivse seina külge kinnitatud alusele - konsoolile. M 17 tüüpi galvanomeetri skaala koos valgustusseadmega kinnitatakse samale seinale. Valgusallikast väljunud valguskiire juhtimiseks galvanomeetri pöörduvale peeglile on galvanomeetri ees veel horisontaaltasandiga 45° nurga all olev väike tasandpeegel või prisma. Mõõtmiste alguseks peab vooluta galvanomeetri peeglilt peegeldunud valgusindeks olema reguleeritud skaala keskele ja hästi teravustatud.

Galvanomeetri pooli nullseisust välja viiv pöördemoment M on tingitud mähist läbivast voolust i. Homogeensés magnetväljas

$$\vec{M} = \left[\vec{p_m}, \vec{B}\right],$$

kus pooli magnetmoment $p_m = iSN$,

S - keeru pindala,

N - keerdude arv,

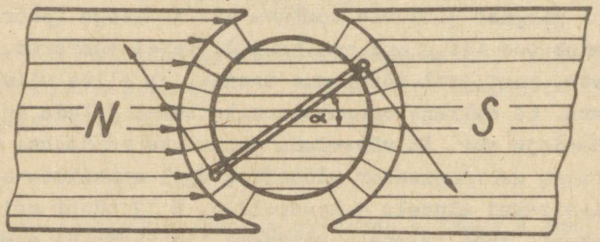
B - magnetvälja induktsioon.

Pooli nullseisu tagasipöörav elastsusjõu moment $M_e = -D\alpha$, kus α tähistab pöördenurka ja D keerdjäikust.

On arusaadav, et pooli uues tasakaaluasendis

$$NSBi \cos \alpha = D\alpha. \qquad (2)$$

Nagu näha valemist (2), on seos α ja i vahel ebalineaarne ning mõõteriista skaala järelikult ebaühtlane. Sellest vabanemiseks on magneti poolustele antud joonisel 2 näidatud kuju ja nende vahele paigutatud pehmest rauast silinder. Tekkinud õhupilus on magnetväli radiaalne ja induktsioon arvuliselt konstantne, mistõttu pöördemoment



Joon. 2.

$$M = NSBi = Gi \quad \text{ja}$$

$$\alpha = \frac{NSB}{D} i = S_i i, \qquad (3)$$

milles konstanti S_i nimetatakse galvanomeetri voolutundlikkuseks. Ta mõõtub pooli pöördenurgaga ühikulise tugevusega voolu mõjul. Tavaliselt väljendatakse galvanomeetri voolutundlikkust valgusindeksi kõrvalekaldega millimeetrites 1 m kaugusel asuval skaalal, kui galvanomeetrit läbib vool tugevusega 1 A. Seega on voolutundlikkuse mõõtühik $\frac{mm}{A \cdot m}$. Voolutundlikkuse pöördväärtust nimetatakse galvanomeetri voolukonstandiks. Väikeste pingete mõõtmisel

on oluline galvanomeetri pingetundlikkus

$$S_u = \frac{S_i}{R_g} .$$

Galvanomeetri pingetundlikkus S_u mõõtub valgusindeksi kõrvalekaldega millimeetrites 1 m kaugusel asuval skaalal, kui galvanomeetri klemmidele on rakendatud pinge 1 V.

Valemist (3) on näha, et galvanomeetri tundlikkus on seda suurem, mida väiksem on D ja suuremad on B, N ja S. Keerdjäikust D saab vähendada valides võimalikult peenikese ja pika ripplindi. Magnetiline induktsioon B õhupilus on seda suurem, mida väiksem on pilu. Korrutist NS saab suurendades keerdude arvu suurendada, mis viib paratamatult B vähenemisele. Tavaliselt valitakse B, N ja S niisugused, et korrutise BNS väärtus oleks maksimaalne.

Kirjeldatud süsteemi mõõteriistad lubavad käesoleval ajal mõõta voolutugevusi kuni 10^{-11} A ja potentsiaalide vahet kuni 10^{-8} V.

Galvanomeetri valikul või töötamisel galvanomeetriga ei ole tähtis mitte üksnes riista voolu- ja pingetundlikkus, vaid ka tema pöörduva süsteemi liikumisviis ja ajavahemik, mille jooksul pool jõuab uude tasakaaluasendisse.

Galvanomeetri pooli pöördumisel uude tasakaaluasendisse avaldavad talle mõju peale voolust tingitud pöördemomendi $M = NSBi$ ja elastsusjõudude momendi $M_e = -D\alpha$ hõõrdejõudude moment $M_h = -h\frac{d\alpha}{dt}$, kus h on hõõrdetegur, ja induktsioonivoolust tingitud pidurdav moment $M_i = -\frac{G^2}{R_g+R}\frac{d\alpha}{dt}$.

Newtoni II seaduse põhjal pöördliikumise kohta

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} = M + M_e + M_h + M_i ,$$

kus I on pöörduva süsteemi inertsimoment. Võttes arvesse ülaltoodut ning korraldades ümber viimases avaldises

esinevad liikmed, omandab pooli liikumisvõrrand kuju

$$I\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(h + \frac{G^2}{R_g+R}\right)\frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = Gi \qquad (4)$$

või

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + \frac{h + \frac{G^2}{R_g+R}}{I}\frac{d\alpha}{dt} + \frac{D}{I}\alpha = \frac{G}{I}i\ . \qquad (4a)$$

Tähistades võrrandis (4a)

$$\frac{D}{I} = \omega_o^2 \quad \text{ja} \quad \frac{h + \frac{G^2}{R_g+R}}{I} = 2\beta\ ,$$

saame

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta\frac{d\alpha}{dt} + \omega_o^2\alpha = \frac{G}{I}i\ . \qquad (4b)$$

Viimase diferentsiaalvõrrandi lahendiks eeldusel, et galvanomeetri pool oli enne sellesse alalisvoolu juhtimist paigal (s.t. $\alpha = 0$ ja $\frac{d\alpha}{dt} = 0$) on funktsioon

$$\alpha = \alpha_m\left[1 - e^{-\beta t}\sqrt{\frac{\beta^2+\omega^2}{\omega^2}}\sin(\omega t + \varphi)\right], \qquad (5)$$

kus $\alpha_m = \frac{BNSi}{D}$, $\varphi = \operatorname{arctg}\frac{\omega}{\beta}$

ja

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{I} - \beta^2}. \qquad (6)$$

Kui pool oli algul pöördunud nurga α_o võrra, pärast seda aga vabastatud, kusjuures galvanomeetri vooluring vooluallikaid ei sisalda ja on suletud, siis kirjeldab pooli liikumist funktsioon

$$\alpha = \alpha_o e^{-\beta t}\sqrt{\frac{\beta^2+\omega^2}{\omega^2}}\sin(\omega t + \varphi). \qquad (7)$$

On otstarbekohane vaadelda galvanomeetri pooli pöör-

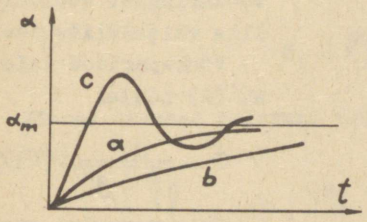
dumise kolme erijuhtu.

a) Kui $\frac{D}{I} - \beta^2 = 0$, s.o. $\omega = 0$, siis on võrrandites (5) ja (7) hälvet määravaks ajast sõltuvaks suuruseks ainult $e^{-\beta t}$. See tähendab, et galvanomeetri pool pöördub tasakaaluasendisse aperioodiliselt. Sellist galvanomeetri tööreziimi nimetatakse kriitiliseks. Kriitiline režiim on töötamiseks kõige otstarbekohasem, sest siis jõuab pool kõige lühema aja vältel tasakaaluasendisse. Kriitilises režiimis töötava galvanomeetri pooli pöördenurga sõltuvust ajast kujutab joonisel 3 kõver a. Muude tingimuste konstantsuse korral võib kriitilist režiimi saavutada välisahela takistuse R muutmise teel, sest sellest sõltub β väärtus. Kui seejuures $h \ll \frac{G^2}{R_g + R}$, siis

$$\beta \approx \frac{G^2}{2(R_g + R)I} .$$

Võttes arvesse, et antud juhul $\beta = \sqrt{\frac{D}{I}}$, on kriitilise režiimi tingimuseks

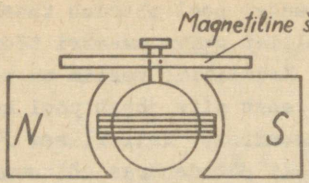
$$R_g + R = \frac{G^2}{2\sqrt{ID}} = \frac{N^2 S^2 B^2}{2\sqrt{ID}} . \qquad (8)$$



Joon. 3.

Välisahela takistust, mis vastab kriitilisele režiimile, nimetatakse välisahela kriitiliseks takistuseks. Kogu ahela takistust $R_g + R$ kriitilisel režiimil nimetatakse täielikuks kriitiliseks takistuseks R_{kr}.

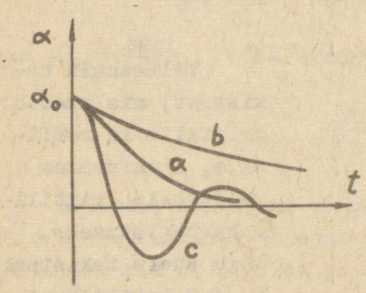
Sageli on galvanomeetrid varustatud magnetilise šundiga (joon. 4), mille abil saab muuta galvanomeetri pilus magnetilist induktsiooni B. Viimase muutmisel muutub ka G ja seega galvanomeetri töörežiim. Sel viisil saab kriitilist režiimi kohandada välisahela takistusele, s.t. saavutada võrduse (8) kehtivust antud R korral. Praktiliselt valitakse galvanomeetri vooluringi kogutakistus kriitilisest veidi suurem, sest siis on kergem fikseerida tasakaaluseisu saabumist.



Joon. 4.

b) Kui $\frac{D}{I} < \beta^2$, s.o. kui galvanomeetri vooluringi kogutakistus on väiksem täielikust kriitilisest takistusest, liigub galvanomeetri pool samuti aperioodiliselt tasakaaluasendi poole, kuid aeglasemalt kui eelmisel juhul (joon. 3, kõver b). Niisugust galvanomeetri töörežiimi nimetatakse ülesummutatuks.

c) Kui $\frac{D}{I} > \beta^2$, siis on tegemist pooli sumbuvate võnkumistega (joon. 3, kõver c). Joonisel 5 esitatud kõverad kirjeldavad pooli liikumist galvanomeetri vooluringist vooluallika väljalülitamisel.



Joon. 5.

Võnkeperiood valemi (6) põhjal

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{D}{I} - \beta^2}}. \quad (9)$$

Galvanomeetri avatud vooluringi (R = ∞) ja väikese hõõrdumise korral on $\beta = 0$ ja

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}. \qquad (10)$$

Võnkumiste sumbuvussuhe

$$k = \frac{A_1}{A_2} = \frac{A_2}{A_3} = \ldots = \frac{A_{n-1}}{A_n}, \text{ milles}$$

$$A_n = \alpha_m \sqrt{\frac{\beta^2+\omega^2}{\omega^2}}\, e^{-\beta nT}, \text{ vt. võrrandit (5).}$$

Pooli võnkumiste sumbuvuse logaritmiline dekrement

$$\delta = \ln k = \beta T = \frac{T}{2I}\left(h + \frac{G^2}{R_g + R}\right). \qquad (11)$$

Ülalesitatust on näha, et galvanomeetri pooli liikumist antud I ja D juures võib laiades piirides reguleerida magnetilise šundi või välistakistuse abil. Sellel tugineb ka galvanomeetri pooli võnkumiste kiire summutamine. Galvanomeetri võnkuva pooli kiireks seiskamiseks piisab mähise lühistamisest momendil, mil ta läbib voolu puudumisele vastavat tasakaaluasendit.

Galvanomeetri tundlikkust määravate faktorite väljaselgitamiseks on teda sobiv esitada galvanomeetri kriitilise takistuse ja perioodi funktsioonina. Eespool esitatust

$$S_i = \frac{NSB}{D}.$$

Võttes arvesse valemeid (8) ja (10) on voolutundlikkuse ruut

$$S_i^2 = \frac{(R_g + R)\, T_0}{\pi D}. \qquad (12)$$

Seega galvanomeetri perioodi juures, mis on tavaliselt 1 - 5 s on galvanomeetri tundlikkus võrdeline ruutjuurega kriitilisest takistusest, mida tundlikkuse tõstmiseks tuleks seega suurendada. Kriitilise takistuse suu-

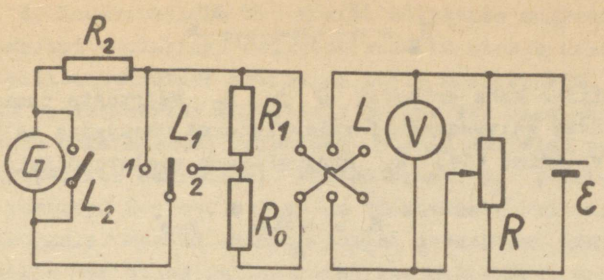
rendamine vähendab aga galvanomeetri pingetundlikkust, mis paljudel juhtudel on aga ebasoovitav. Tõepoolest, vooluringide takistused, milles tuleb mõõta nõrku voole või väikseid potentsiaalide vahesid, võivad olla tunduvalt erinevad. Väikeste voolutugevuste mõõtmine on tavaliselt iseloomulik suurt takistust sisaldavates vooluringides (fotoelemendid, elektronkiiretoru jt.). Sellistel juhtudel galvanomeetri suur kriitiline takistus ei ole segavaks faktoriks. Sageli kasutatakse galvanomeetrit väikese potentsiaalide vahe mõõtmiseks (termoelektromotoorne jõud, galvanomagnetilised efektid, galvanomeetri kasutamine sild- või potentsiomeetrilistes skeemides). Tavaliselt on niisuguste vooluringide takistus väike ning suure kriitilise takistusega galvanomeetri kasutamisel osutub viimane ülesummutatuks. Selleks et galvanomeeter hakkaks niisuguses vooluringis töötama kriitilises režiimis, tuleb sellesse täiendavalt lülitada galvanomeetriga järjestikku suur takistus. See aga tähendab, et galvanomeetri pingetundlikkuse määrab praktiliselt mitte tema voolutundlikkuse ja galvanomeetri takistuse,vaid voolutundlikkuse ja kriitilise takistuse suhe. Seega osutub suure voolutundlikkuse ja suure kriitilise takistusega galvanomeeter sageli ebasobivaks väikeste pingete mõõtmisel. Väikese kriitilise takistusega galvanomeetri konstrueerimine valmistab aga küllaltki suuri raskusi, sest kriitiline takistus sõltub samadest parameetritest, millest voolutundlikkuski (vt. vastavaid valemeid).

Kokku võttes kõike ülalesitatut võib väita, et mõõtmiste edukuseks vooluringis on galvanomeetri õigel valikul otsustav tähtsus.

4. Töö käik.

a) Galvanomeetrit läbiva voolu tugevuse ja tundlikkuse määramiseks koostame vooluringi joonisel 6 esitatud skeemi kohaselt.

Pärast lülituste kontrollimist praktikumi juhendaja poolt valime takistussalvest R_1 takistuse umbes 5 oomi.



Joon. 6.

Takisti R_0 peab olema umbes 10 000 oomi. Potentsiomeetri R abil reguleerime galvanomeetri vooluringi antava pinge U suuruseks 0,1 - 0,5 V, avame lüliti L_2 ja viime lüliti L_1 asendisse 2.

Seejärel anname ümberlüliti L abil galvanomeetrile erineva suunaga pingeid, et saada võrdse suurusega hälbeid vasakule ja paremale. Selle saavutamiseks peab skaala olema horisontaalne ja paralleelne galvanomeetri peegli nullasendiga.

Galvanomeetrit läbiva voolu tugevus on

$$i_g = \frac{U \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2} . \qquad (13)$$

Muutes takistust R_2, s.t. töötades galvanomeetriga mitmesugustes režiimides, jälgime galvanomeetri valgusindeksi liikumist. Voolutugevust reguleerime pinge U muutmisega. Sõltuvuse galvanomeetri valgusindeksi hälbe ja teda läbiva voolutugevuse vahel esitame graafiliselt.

Galvanomeetrit läbiva muutumatu voolu, kuid erinevate R_2 ja U väärtuste korral võib valemi (13) põhjal kirjutada

$$\frac{U' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2'} = \frac{U'' \frac{R_1}{R_0}}{R_g + R_2''} , \quad \text{millest}$$

$$R_g = \frac{U'' R_2' - U' R''_2}{U' - U''} . \qquad (14)$$

Valides kaks erinevat U ja R_2 väärtuste paari, mis põhjustavad galvanomeetri valgusindeksi ühesuguse hälbe, arvutame valemist (14) R_g ning määrame voolutundlikkuse

$$S_i = \frac{m}{I_g l} , \text{ kus}$$

m on valgusindeksi kõrvalekalle nullasendist millimeetrites ja l skaala kaugus galvanomeetri peeglist meetrites. Arvutame galvanomeetri voolukonstandi, pingetundlikkused

$$S_u = \frac{S_i}{R_g} \quad \text{ja} \quad S_u' = \frac{S_i}{R_g + R} .$$

Mõõtmisi ja arvutusi teeme valgusindeksi hälbe vähemalt kolme erineva väärtuse jaoks.

b) Galvanomeetri pooli omavõnke perioodi T_0 määramiseks valime takistused R_1 ja R_2 nii, et saame skaalal küllalt suure (150–200 mm) hälbe. Pärast hälbe tekitamist avame galvanomeetri vooluringi lüliti L_1 abil, mille tulemusel galvanomeetri pool hakkab võrdlemisi väikese sumbuvusega võnkuma nullseisu ümber. Perioodi määramiseks registreerime hulga loendatud täisvõngete aja sekundimõõtjaga ja arvutame T_0.

c) Galvanomeetri kriitilise takistuse määramine. Juhime läbi galvanomeetri voolu, mis põhjustab skaalal valgusindeksi hälbe 150–200 mm. Järgnevalt viime lüliti L_1 kiiresti asendist 2 asendisse 1 ja jälgime, millises režiimis liigub valgusindeks nullseisu. Kui valgusindeks võngub tasakaaluasendi ümber, siis tuleb katseid korrata järk-järgult R_2 vähendades, kuni indeks hakkab liikuma aperioodiliselt. Takistuse R_2 suurus, mille puhul galvanomeetri pool hakkas liikuma aperioodiliselt, ongi välisahela kriitiline takistus. Täieliku kriitilise takistuse leiame liites sellele galvanomeetri takistuse.

d) Logaritmilise dekremendi sõltuvuse määramine galvanomeetri vooluringi välistakistusest toimub samuti nagu kriitilise takistuse määramine selle erinevusega, et siin tuleb registreerida üksteisele järgnevate ühesuunaliste hälvete maksimaalsed väärtused. Saadud andmeist arvutame logaritmilise dekremendi. Katsed teeme R_2 väärtustel, mis vastavad 2-, 4-, 6-, 8- ja 10-kordsele kriitilisele takistusele. Saadud andmete põhjal joonestame graafiku välisahela takistuse ja logaritmilise dekremendi teljestikus.

Takistuse R_2 suurenemisega vähenevad valgusindeksi hälbed ja järelikult lugemise täpsus. Hälvete suurendamiseks võib suurendada galvanomeetrile rakendatavat pinget.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Miks ei ole soovitav töö käigus ettenähtud ülesandeid c) ja d) täita galvanomeetri vooluringi voolualliku sisselülitamisel?

b) Tuletada valem galvanomeetri pooli pidurdava momendi jaoks, mille põhjustab pooli läbiv induktsioonivool.

c) Kirjeldage mõnda mittemagnetelektrilise süsteemi galvanomeetri konstruktsiooni ja töö printsiipi.

Kirjandus.

1. Курс электрических измерений. Под ред. В. Т. Прыткова и А. В. Талицкого. Ч.I., 1960.
2. Электрические измерения. Под ред. А. В. Фремке, 1963.

14. KONDENSAATORI MAHTUVUSE MÄÄRAMINE BALLISTILISE GALVANOMEETRI ABIL.

1. Töölesanne.

Määrata kondensaatorite mahtuvusi üksikult ja järjestikuses ning paralleelses lülituses.

2. Töövahendid.

Ballistiline galvanomeeter, lükatreostaat, millivoltmeeter, etaloonkondensaator (mahtuvussalv), uuritavad kondensaatorid, ümberlüliti, lüliti, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Mahtuvuse mõõtmise põhimõte käesolevas töös on väga lihtne: kasutatakse tuntud seost kondensaatori mahtuvuse C ja temale antud laengu q ning selle laengu mõjul tekkinud potentsiaalide vahe U vahel:

$$C = \frac{q}{U}.$$

C arvutamiseks võib q ja U mõõta otseselt, võib aga kasutada ka tuntud mahtuvusega etaloonkondensaatorit C_1, laadida C ja C_1 võrdse pingeni U, võrrelda kondensaatorite laenguid q ja q_1 ning määrata C valemist:

$$C = C_1 \frac{q}{q_1},$$

Laengu suuruse mõõtmiseks kasutatakse käesolevas töös ballistilist galvanomeetrit. See nn. ballistiline meetod

on laboratoorsete mõõtmiste juures laialdaselt kasutusel, eriti magnetiliste mõõtmiste puhul.

Ballistiline galvanomeeter kujutab enesest pöördpool-galvanomeetrit, mille pöörduva süsteemi inertsimomenti on kunstlikult suurendatud (näit. ripplindi külge kinnitatud ristvarvakeste otstele koormuste asetamisega). Sellise galvanomeetri pooli omavõnkeperiood T on suur (suurusjärgus 20 s) ja lühiajaliste voolude puhul, kui voolu läbimise aeg $\tau \ll T$, omandab galvanomeeter integreerivad omadused - esimese võnke amplituud on võrdeline pooli läbinud laenguga.

Ballistilise galvanomeetri pooli liikumise diferentsiaalvõrrand on üldjuhul sama, mis tavalisel galvanomeetrilgi (vt. eelmist juhendit käesolevas kogumikus):

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(h + \frac{G^2}{R_g+R_v}\right) \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = Gi, \quad (1)$$

kus I - pöörduva süsteemi inertsimoment,
α - süsteemi pöördenurk tasakaalu asendist,
h - hõõrdetegur (arvestab hõõrdumist õhus ja kinnitustes),
G - vooluga pooli ja magnetvälja vastastikust mõju arvestav konstant; $G = BSN$, kus B - magnetvälja induktsioon pooli liikumise pilus, S - pooli keeru pindala, N - keerdude arv,
D - ripplindi keerdjäikus,
R_g - galvanomeetri sisetakistus,
R_v - ahela välistakistus,
i - galvanomeetrit läbiva voolu tugevus,
t - aeg.

Kui voolu läbimise aeg τ on väike, siis ei jõua pool praktiliselt selle ajaga tasakaalu asendist väljuda. Seega, kui $t > \tau$, siis voolu enam pole ja kehtib võrrand:

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} + \left(h + \frac{G^2}{R_g+R_v}\right) \frac{d\alpha}{dt} + D\alpha = 0. \quad (2)$$

Ajavahemikus $t < \tau$, kus $\frac{d\alpha}{dt} \approx 0$ ja $\alpha \approx 0$, kehtib aga võrrand:

$$I \frac{d^2\alpha}{dt^2} = Gi. \qquad (3)$$

Ballistilise galvanomeetri põhiseose, s.o. läbinud laengu ja esimese maksimaalse hälbe võrdelisuse, saab tuletada võrrandite (2) ja (3) lahendite võrdsusest piirjuhul, kui $t = \tau$. On aga olemas lihtsam ja üldisem meetod, mis ei sõltu võrrandi (2) lahendi iseloomust.

Integreerime võrrandit (3):

$$I \int_0^{\tau} d\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = G \int_0^{\tau} i dt,$$

millest

$$I \left[\frac{d\alpha}{dt}\right]_{t=\tau} = Gq, \qquad (4)$$

kus q on galvanomeetri pooli läbiv kogulaeng.

Esimese maksimaalse hälbe α_0 sissetoomiseks võib lähtuda energeetilistest kaalutlustest. Kui lint on pöördunud α võrra, on elastsusjõu moment $D\alpha$; pööramiseks nurga $d\alpha$ võrra tuleb teha tööd $D\alpha\, d\alpha$; kogu töö, mis tehakse maksimaalse hälbe α_0 saamiseks:

$$A = \int_0^{\alpha_0} D\alpha\, d\alpha = \frac{D\alpha_0^2}{2}.$$

Momendil, kui pool hakkab liikuma, s.t. $t = \tau$, on tema kineetiline energia:

$$W = \frac{1}{2} I \left[\frac{d\alpha}{dt}\right]^2_{t=\tau}$$

Energia jäävuse seaduse alusel:

$$I \left[\frac{d\alpha}{dt}\right]^2 = D\alpha_0^2. \qquad (5)$$

Võrranditest (4) ja (5)

$$q^2 = \frac{ID\,\alpha_o^2}{G^2},$$

millest

$$q = \frac{\sqrt{ID}}{G}\,\alpha_o = B\,\alpha_o. \qquad (6)$$

Valem (6) näitab, et esimene maksimaalne nurkhälve on tõepoolest võrdeline pooli läbinud laenguga. Võrdetegurit B nimetatakse galvanomeetri ballistiliseks konstandiks; ta on arvuliselt võrdne laenguga, mis tekitab ühikulise nurkhälbe. Nagu näha, ei sõltu B väärtus ahela takistusest. Ballistilist konstanti saab avaldada voolukonstandi C_i kaudu. Avatud vooluringi korral pooli võnkeperiood (vt. lk. 113):

$$T_o = 2\pi\sqrt{\frac{I}{D}}.$$

Avaldades siit I saadakse

$$B = \frac{T_o}{2\pi}\,C_i, \qquad (7)$$

kus $C_i = \frac{D}{G}$.

Praktiliselt kasutatakse ballistilist konstanti B', mis näitab, kui suur laeng tekitab valgusindeksi ühikulise nihke galvanomeetri skaalal. Kuna

$$\alpha_o = \frac{n_o}{2L},$$

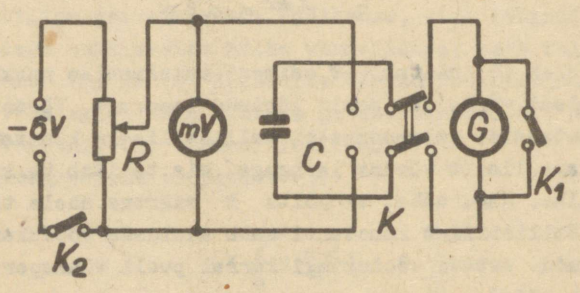
kus n_o - indeksi esimene maksimaalne hälve skaalal,
L - skaala kaugus peeglist, siis

$$q = \frac{B}{2L}\,n_o = B'n_o. \qquad (8)$$

B' määratakse katseliselt, kuna tema arvutamiseks vajalike suuruste D ja G mõõtmine on raskendatud.

4. Töö käik.

Skeemi koostame joon. 1 järgi.



Joon. 1.

Akupatareist laeme üle lüliti K_2, potentsiomeetri R ja ümberlüliti K kondensaatori C. Pinget kondensaatoril mõõdame millivoltmeetriga mV. Lülitades ümber K, tühjendame kondensaatori läbi galvanomeetri G. Lüliti K_1 on valgusindeksi võnkumiste summutamiseks; tavaliselt on see suletud. Kondensaator on vahetatav, lülitatakse vaheldumisi etaloon- ja uuritav kondensaator.

a) Ballistilise konstandi määramine. Lülitame skeemi etaloonkondensaatori, mis laadub pingeni U, tühjendame selle läbi galvanomeetri, loeme esimese maksimaalse hälbe n_0. Valime mahtuvussalvest mingi mahtuvuse; alustades madalaimast pingest valime pinge selliselt, et galvanomeeter annaks peaaegu kogu skaala ulatusele vastava hälbe. Määrame n_0 viiel korral, arvutame keskmise ning valemi (8) abil, võttes arvesse, et $q = CU$, ballistilise konstandi B' .

b) Mahtuvuse mõõtmine. Tundmatu mahtuvusega kondensaatorid on alusel. Mõõta tuleb juhendaja poolt määratud vähemalt kolme kombinatsiooni mahtuvus, samuti kombinatsiooni-

desse kuuluvate kondensaatorite mahtuvus üksikult; kontrollime mõõtmistulemusi, arvutades kombinatsioonide mahtuvused teoreetiliselt.

Mõõtmised teeme analoogiliselt ülalkirjeldatule: valime pinge, mil valgusindeksi hälve on küllalt suur ja määrame n_0 iga mahtuvuse juures vähemalt 5 korda. Arvutame q ning teades pinget - C.

Kõik mõõtmisandmed ja nende piirvead koondame tabelitesse.

T ä h e l e p a n u ! Skeemi pingestame aku ülekoormamise vältimiseks ainult lühiajaliselt. Lüliti K_2 sulgemisel peab potentsiomeeter R olema reguleeritud nii, et temalt võetav pinge oleks 0.

5. Lisaküsimusi.

a) Miks on otstarbekas kasutada võimalikult suuri hälbeid n_0?

b) Kuidas määrata tundmatut mahtuvust, kui on kasutada etaloonkondensaator, kuid pole voltmeetrit pinge U mõõtmiseks?

Kirjandus.

1. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. Tallinn, 1960.
2. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., 1968, стр. 105-110.
3. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А. В. Фремке. М.-Л., 1963.

15. MAGNETILISE INDUKTSIOONI MÕÕTMINE PIKI SOLENOIDI TELGE

1. Tööülesanne.

Uurida solenoidi magnetvälja piki solenoidi telge ballistilisel meetodil.

2. Töövahendid.

Normaal- ja uuritav solenoid koos mõõtepoolidega, ballistiline galvanomeeter, ampermeeter, takistussalved, pingeallikas, reostaat, lülitid, juhtmed.

3. Töö käik.

Magnetiline induktsioon piki solenoidi telge OA on määratud valemiga

$$B = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n i (\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1), \qquad (1)$$

kus i tähistab voolutugevust,

μ - keskkonna suhtelist magnetilist läbitavust,

μ_0 - magnetilist konstanti,

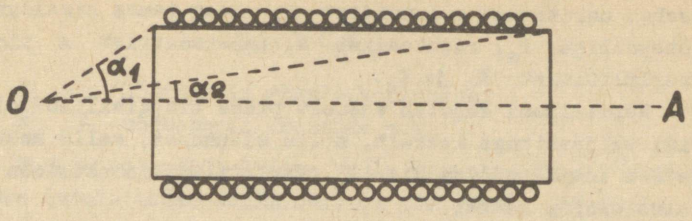
n - keerdude arvu pikkusühiku kohta,

α_1 ja α_2 - nurki, millede all on näha vaadeldavast punktist solenoidi raadiused selle lähemal ning kaugemal asuvas otsas (joon. 1).

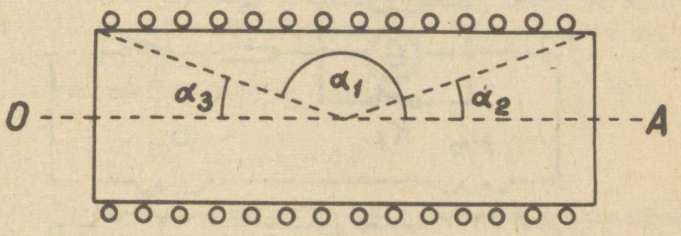
Kui vaadeldav punkt asetseb solenoidi sees, on α_1 nürinurk ning valem (1) võtab kuju

$$B = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n i (\cos\alpha_2 + \cos\alpha_3), \qquad (2)$$

milles α_3 tähistab nurga α_1 täiendnurka (joon. 2).



Joon. 1.



Joon. 2.

Kui solenoidi pikkus l on tunduvalt suurem selle raadiusest R , saame solenoidi keskpunkti jaoks valemi

$$B = \mu\mu_0 n\, i. \qquad (3)$$

Solenoidi otsal

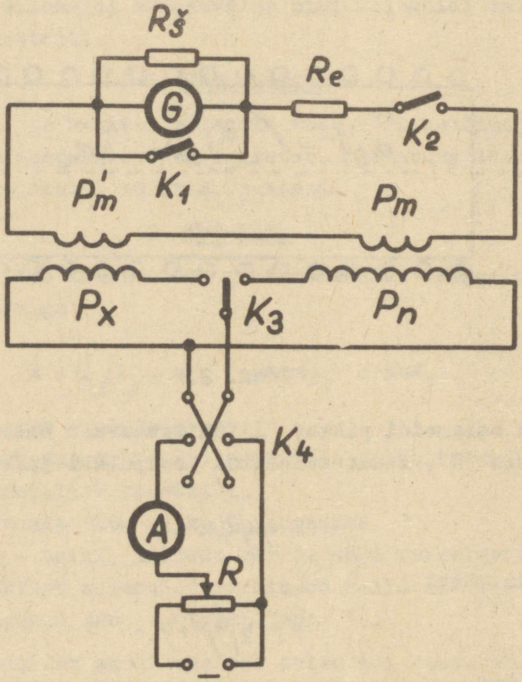
$$B = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n\, i.$$

a) <u>Mõõteskeemi ning meetodi kirjeldus</u>. Magnetilist induktsiooni mõõdetakse käesolevas töös ballistilisel meetodil. Vooluring (joon. 3) koosneb ballistilisest galvano-

meetrist G, normaalpoolist P_n koos temas sisalduva mõõtepooliga P_m galvanomeetri ballistilise konstandi määramiseks, uuritavast solenoidist P_x koos temas sisalduva mõõtepooliga P_m', reostaadist R, ampermeetrist A ning ümberlülititest K_3 ja K_4.

Normaalpool kujutab enesest pikka kahekihilist solenoidi väljavõttega keskelt, mille sisemuses, selle keskosas, asetseb lühike mõõtemähis P_m. Magnetiline induktsioon normaalsolenoidi keskel

$$B = \mu\mu_0 n\, i,$$



Joon. 3.

kus n tähistab normaalsolenoidi keerdude arvu pikkusühiku kohta. Normaalsolenoidi mõõtepooli P_m aheldusvoog

$$\psi = B S_m N_m,$$

kus S_m on mõõtepooli ristlõikepindala,
N_m - mõõtepooli keerdude arv.

Normaalsolenoidi läbiva voolu suuna muutmisel vastupidiseks (voolu kommuteerimisel) on mõõtepooli aheldusvoo muutus

$$2\psi = 2 BS_m N_m.$$

Aheldusvoo muutuse tagajärjel indutseeritakse mõõtepoolis induktsiooni emj, mille tagajärjel läbib galvanomeetrit lühiajaline induktsioonivool. Galvanomeetri valgusindeks hälbib.

Galvanomeetrit läbinud laeng

$$q = C\beta,$$

kus β tähistab galvanomeetri valgusindeksi maksimaalset hälvet piki skaalat,
C - galvanomeetri ballistilist konstanti.

Konstant C võib olla väljendatud kulonites galvanomeetri skaala iga pikkusühiku või valgusindeksi pöördenurga ühiku kohta.

Galvanomeetriga ühendatud pooli ristlõiget läbiv laeng aheldusvoo muutumisel 2ψ võrra

$$q = \frac{2\psi}{r},$$

kus r on ballistilise galvanomeetri vooluringi kogutakistus. Järelikult

$$C = \frac{q}{\beta} = \frac{2\psi}{\beta r} = \frac{2 BS_m N_m}{\beta r} = \frac{2\mu\mu_0 n S_m N_m i}{\beta r}.$$

Joonisel 3 toodud skeemis jäävad normaal- ning uuritava solenoidi mõõtepoolid P_m ja P'_m kõikide mõõtmiste kestel ühendatuks järjestikku, mistõttu galvanomeetri vooluringi takistus on konstant. Sellest tingitult on mugavam kasutada ballistilist konstanti

$$C' = Cr = \frac{2\mu\mu_0 nS_m N_m}{\beta} i. \qquad (4)$$

Pärast seadeldise ballistilise konstandi C' määramist ühendatakse vooluringi lüliti K_3 abil uuritav solenoid P_x.

Selle mõõtepool P'_m on lühike ning kinnitatud piki solenoidi telge nihutatava varva külge. Pooli keerdude arv on N'_m ning iga keeru pindala S'_m. Uuritavat solenoidi läbiva voolu kommuteerimisel magnetiline induktsioon mõõtepooli asukohas muutub $+B_x$ kuni $-B_x$, s.t. $2B_x$ võrra, ning põhjustab mõõtepooli P'_m aheldusvoo muutuse

$$2\psi' = 2\, B_x S'_m N'_m = q'r. \qquad (5)$$

Teisalt

$$q' = C\alpha,$$

kus α on galvanomeetri valgusindeksi maksimaalne hälve solenoidi läbiva voolu kommuteerimisel.

Seega

$$2\psi' = C\alpha r = C'\alpha. \qquad (6)$$

Seostest (5) ja (6)

$$C'\alpha = 2\, B_x S'_m N'_m,$$

millest

$$B_x = \frac{C'}{2N'_m S'_m}\alpha = C''\alpha, \qquad (7)$$

kus

$$C'' = \frac{C'}{2N'_m S'_m}.$$

b) Mõõtmised.

- Koostame vooluringi joonisel 3 toodud skeemi järgi ning lülitiga K_3 viime mõõtmisseisu normaalsolenoidi P_n. Pingestame skeemi ning kasutades potentsiomeetrit R hoolitseme selle eest, et voolutugevus läbi normaalsolenoidi ei ületaks 0,3 amprit. Ümberlüliti K_4 abil kommuteerime* normaalsolenoidi läbivat voolu ja määrame hälbe β. Galvanomeetri valgusindeksi hälve peab olema seejuures küllalt suur - sattuma skaala lõpuossa. Galvanomeetri vajalik töörežiim saavutatakse sobiva seltakisti ning šundi valikuga vastavatest takistussalvedest (vt. joon. 3). Mõõtmisi teostame viiel erineval voolutugevusel à viis korda. Lõpuks arvutame ballistilise konstandi C' keskmise väärtuse.

- Normaalsolenoidi asemel viime lüliti K_3 abil mõõtmisseisu uuritava solenoidi P_x ning reguleerime voolutugevuse selles 0,3 ampri suuruseks. (Kestvalt solenoidi voolu all hoida ei ole selle kuumenemise tõttu soovitatav.) Lükkame mõõtepooli P'_m solenoidi ühte otsa. Kommuteerides ümberlüliti K_4 abil voolu solenoidis registreerime hälbe ning valemi (7) järgi arvutame B_x-i.

Nihutame mõõtepooli 1 cm võrra solenoidi teise otsa poole ning kordame mõõtmisi. Iga asendi juures teeme kolm mõõtmist. Analoogiliselt toimime seni, kuni pole jõudnud solenoidi teise otsani.

- Arvutanud kõik B_x väärtused, joonestame graafiku teljestikus $B_x - x$; x - mõõtepooli kaugus solenoidi ühest otsast. Saadud kõver väljendab magnetilise induktsiooni jaotust piki solenoidi telge solenoidi pikkuse ning läbimõõdu antud suhte λ jaoks. Solenoidi suhtelise pikkuse $\lambda = \frac{l}{d}$ märgime samuti joonisele.

---

* Kommuteerimise kestus peab olema tunduvalt väiksem võrreldes galvanomeetri võnkeperioodiga. Vastasel korral ei tööta galvanomeeter ballistilises režiimis.

4. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

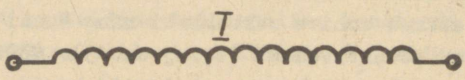
a) Tuletada valem (1).

b) Kuidas arvutada solenoidi magnetvälja tugevust?

c) Milles seisneb ballistiline meetod magnetilise induktsiooni mõõtmisel?

d) Tutvuda ballistilise galvanomeetri tööga.

5. Riistade tehnilised andmed.



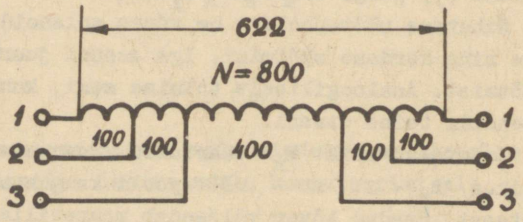
Normaalsolenoid I:

magneetiva pooli keerdude arv 1 cm kohta $n = 12{,}9\ 1/cm$;

magneetiva pooli traadi diameeter d = 0,7 mm (ilma isolatsioonita);

mõõtepooli ristlõike pindala $S_m = 14{,}0\ cm^2$;

mõõtepooli keerdude arv $N_m = 20$.



Uuritav solenoid:

magneetiva pooli traadi diameeter d = 0,7 mm (ilma isolatsioonita);

mõõtepooli keeru pindala $S_m = 2{,}6\ cm^2$;

mõõtepooli keerdude arv $N'_m = 160$.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 256-272, 409-412.
2. Б. М. Яворский, А. А. Детлаф, Л. В. Микловская. Курс физики. Т. II, М., 1966, стр. 231.
3. Töö nr. 14 käesolevas kogumikus.

16. KESKKONNA MÕJU MAGNETVÄLJA ISELOOMUSTAVATELE SUURUSTELE.

1. Töölesanne.

Uurida erinevate materjalide magnetilisi omadusi ballistilisel meetodil.

2. Töövahendid.

Uuritavast ainest toroidid, normaalsolenoid, takistussalved, ballistiline galvanomeeter, ampermeeter, lülitid, reostaat, vooluallikas, ühendusjuhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Dia- ja paramagneetikutes sõltub magnetiline induktsioon magnetvälja tugevusest laias intervallis lineaarselt, ferromagneetikutes on see sõltuvus mittelineaarne. Viimaste ainete korral sõltub kõvera B = f(H) kulg mitte üksnes nende keemilisest koostisest, vaid ka temperatuurist, aine eelnevast termilisest töötlusest, selles esinevatest pingetest jt. Kõiki neid asjaolusid tuleb magneetikute uurimisel arvestada.

Esimesi laiaulatuslikke katseid B ja H vahelise sõltuvuse leidmiseks korraldas A. Stoletov 1871. - 1872.a. Stoletov näitas, kuidas antud kujuga magneetiku magnetilistelt karakteristikutelt üle minna vastava aine magnetiliste karakteristikute juurde. Viimase ülesande lahendamise tähtsus on arusaadav, kuna erilist mõtet omab magnetilise induktsiooni sõltuvuse uurimine magneetikus eksisteerivast tõelisest magnetvälja tugevusest. Magnetvälja tuge-

vus magneetikus ei tarvitse aga mitte alati ühtida välise, magneetiva välja tugevusega.

Kui toroidaalse mähise ristlõike raadius on tunduvalt väiksem mähise enese raadiusest, võib selles kulgeva voolu magnetvälja lugeda homogeenseks; homogeenseks jääb see väli ka mähise sisemuses asetsevas toroidaalses südamikus - toroidis. Magnetvälja jõujooned toroidi pinnaga ei lõiku ja moodustavad kontsentriliste ringjoonte süsteemi, millede keskpunktid asetsevad toroidi teljel. Niisugust tüüpi magneetikus saadud mõõtmistulemused ei vaja geomeetrilist kuju arvestava parandusliikme sissetoomist. Just selliseid magneetikuid kasutataksegi antud töös.

B ja H vahelist sõltuvust võib uurida mitmel viisil. Antud töös kasutatakse laialdaselt levinud ballistilist meetodit. Meetodi iseärasus seisneb selles, et võimaldab saada võrdlemisi lihtsate vahenditega usaldusväärseid kvantitatiivseid tulemusi.

Ballistilise meetodi olemus seisneb järgmises. Ballistiline galvanomeeter ühendatakse uuritavasse magnetvälja paigutatud pooliga. Mõõtepooli suuruse määrab uuritava magnetvälja mittehomogeensus. Mida homogeensem on väli, seda suuremad võivad olla pooli mõõtmed.

Kui pooli telg on paralleelne magnetväljaga, siis aheldusvoog

$$\Psi = BSN,$$

kus S tähistab iga keeru ristlõikepindala,
N - mõõtepooli keerdude arvu.

Aheldusvoo muutumisel indutseeritakse poolis induktsiooni emj.

$$E = -\frac{d\Psi}{dt}$$

ning läbi galvanomeetri kulgeb vool

$$i = \frac{dq}{dt} = -\frac{d\Psi}{Rdt},$$

kus q on laeng,

R - galvanomeetri vooluringi takistus.

Esitatust järgneb, et mõõtepooli aheldusvoo muutumisel $\Delta\Psi$ võrra kulgeb läbi galvanomeetri laeng

$$q = \frac{\Delta\Psi}{R} .$$

Ballistilise galvanomeetri valgusindeksi maksimaalne hälve, nagu teada, on võrdeline galvanomeetri mähist läbinud laenguga (kui vaid laengu läbimise aeg on küllalt väike võrreldes galvanomeetri mõõtesüsteemi omavõnkeperioodiga). Seega, kui galvanomeetriga ühendatud mõõtepooli aheldusvoogu muuta küllalt kiiresti, on galvanomeetri hälve võrdeline aheldusvoo muutusega.

Galvanomeetri maksimaalsest hälbest võib arvutada aheldusvoo muutuse ning sellest magnetilise induktsiooni.

Mõõtepooli aheldusvoogu võib muuta kas mõõtepooli asendi muutmise või magnetvälja tekitanud voolu tugevuse muutmise teel.

Voolu magnetvälja uurimisel on mugavam viimati nimetatud võte ja eriti voolu suuna muutmine vastupidiseks - voolu kommuteerimine. Voolu kommuteerimisel magnetilise induktsioonivektori B suund muutub vastupidiseks ning põhjustab aheldusvoo muutuse $\Delta\Psi = 2\,BSN = qR$, millest

$$B = \frac{qR}{2SN} . \qquad (1)$$

Osale uuritavast toroidist, otse selle pinnale on paigutatud peenikesest traadist mõõtemähis, mille otsad on ühendatavad ballistilise galvanomeetriga. Magneetiv mähis on keritud ühtlaselt üle kogu toroidi. Voolu kommuteerimine magneetivas mähises tekitab mõõtemähises vooluimpulsi ning galvanomeetrit seejuures läbiv laeng arvutatakse valgusindeksi hälbest, kui on teada galvanomeetri tundlikkus. Valemi (1) põhjal arvutatakse B.

B = f(H) sõltuvuse määramiseks vajalik magnetvälja tugevus leitakse valemist

$$H = n\,i, \qquad (2)$$

milles n tähistab piki toroidi keskjoont ühe pikkusühiku kohta tulevat keerdude arvu.

Tavaliselt ei gradueerita ballistilist galvanomeetrit laengu mõõtmiseks, vaid toimitakse teisiti, taandades kõik mõõtmised antud magneetiku magnetilise induktsiooni võrdlemiseks tuntud magnetvälja induktsiooniga. Magnetvälja "etalooniks" on käesolevas töös magnetväli pikas tihedalt mähitud südamikuta solenoidis. Magnetvälja tugevus selles nn. normaalsolenoidis arvutatakse samuti valemi (2) alusel. Normaalsolenoidi keskel asetseb lühike, galvanomeetriga ühendatav mõõtemähis.

Põhjustagu voolu kommuteerimine normaalsolenoidis ballistilise galvanomeetri valgusindeksi maksimaalse hälbe β ; see hälve on võrdeline normaalsolenoidi mõõtepooli aheldusvoo muutusega

$$\Delta\Psi = 2\,BS_nN_n' = 2\mu_0 n'iS_nN_n' = A\beta, \qquad (3)$$

kus B on magnetiline induktsioon normaalsolenoidi keskel,

S_n - normaalsolenoidi mõõtepooli iga keeru pindala,

N_n' - mõõtepooli keerdude arv,

μ_0 - magnetiline konstant,

n' - pikkusühiku kohta tulev keerdude arv normaalsolenoidis,

A - mõõteseadise ballistiline konstant.

Viimasest valemist

$$A = \frac{2\mu_0 n'i\,S_n\,N_n'}{\beta}. \qquad (4)$$

Toroidiga töötamisel olgu galvanomeetri hälve α. Aheldusvoo muutus

$$\Delta\Psi = 2\,BS_tN_t = A\alpha,$$

kus S_t on toroidi mõõtepooli keeru pindala,
N_t - toroidi mõõtepooli keerdude arv.

Viimasest valemist

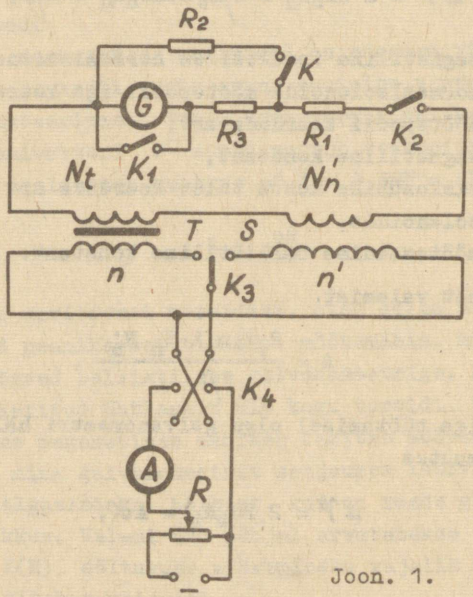
$$B = \frac{A\alpha}{2 S_t N_t} = A'\alpha , \qquad (5)$$

milles

$$A' = \frac{A}{2 S_t N_t} .$$

4. Töö käik.

Mõõtmisteks ülalkirjeldatud meetodil koostame vooluringi joonisel 1 toodud skeemi kohaselt. Lüliti K_3 abil lülitatakse mõõteskeemi kord toroid (asend T), kord solenoid (asend S).



Joon. 1.

Lüliti K_4 on voolu kommuteerimiseks. R_1, R_2 ja R_3 abil saab valida galvanomeetri sobiva töörežiimi (joon. 1). Kui soovida vähendada galvanomeetri tundlikkust m korda, ilma et galvanomeetri vooluringi takistus seejuures muutuks, tuleb R_1, R_2 ja R_3 valida järgmiselt:

$$R_1 = \frac{mr_g - r_k}{m+1}\ ;\quad R_2 = \frac{m(r_g + r_k)}{m^2 - 1}\ ;\quad R_3 = \frac{mr_k - r_g}{m+1}\ ,$$

kus r_g on galvanomeetri takistus,
r_k - koormuse (mõõtepoolide) takistus.

Lüliti K_1 on galvanomeetri valgusindeksi võnkumiste summutamiseks. Galvanomeetri kahjustamise vältimiseks olgu lüliti K_1 skeemi koostamisel suletud ja K_2 avatud. Nagu näha jooniselt 1, on toroidi ja normaalsolenoidi mõõtemähised lülitatud galvanomeetri vooluringi üheaegselt. Galvanomeetri vooluringi takistuse konstantsust kogu mõõtmisprotsessi jooksul on eeldatud ka ülalesitatud valemite tuletuskäigus. Seda nõuet tuleb täita.

Esmalt kaliibrime ballistilise galvanomeetri normaalsolenoidi abil. Takistussalved R_1 ja R_2 on seejuures lühistatud ja lüliti K avatud. Kaliibrimisel juhime läbi normaalsolenoidi toitemähise voolu, mille tugevus ei tohi ületada 0,8 A. Galvanomeetri valgusindeksi maksimaalse hälbe registreerime pärast seda, kui oleme voolu lüliti K_4 abil kiiresti kommuteerinud. Ühe ja sama voolutugevuse jaoks fikseerime galvanomeetri näidu kolm korda. Analoogilisi mõõtmisi teeme viiel erineval voolutugevusel ning arvutame konstandi A'.

Muutamata galvanomeetri tundlikkust uurime diamagnetilisest ainest toroidi (must eraldusmärk). Mõõtmismetoodika on analoogiline ülalesitatuga. Viime lüliti K_3 asendisse T, juhime läbi toroidi toitemähise voolu ning pärast voolu kommuteerimist lüliti K_4 abil fikseerime galvanomeetri esimese hälbe. Mõõdame kolm korda. Voolutugevust muudame 0,1 A kaupa nullist kuni ühe amprini.

Ferromagnetilisest materjalist toroidide uurimisel peame galvanomeetri tundlikkust tublisti vähendama (pöördume juhendaja poole) ja materjali jääkmagnetismi eelnevalt likvideerima. Jääkmagnetismi kõrvaldamiseks juhime läbi toroidi magneetiva mähise antud katse tingimustes maksimaalselt võimaliku voolu (1,0 A) ja voolu pidevalt lüliti K_4 abil kommuteerides sagedusega mõni ümberlülitus sekundis vähendame ta potentsiomeetri R abil nullini. Galvanomeetri vooluring on seejuures avatud.

Olles arvutanud ja valinud sobivad R_1, R_2 ning R_3 võime asuda toroidi induktsiooni mõõtmise juurde. Alustame võimalikult nõrkadest vooludest ning peame meeles, et juba lühiajaline juhuslik tugev vool muudab oluliselt kõvera B = f(H) kulgu, mistõttu südamik tuleb uuesti demagneetida. Mõõtmiste käigus võib voolutugevust ainult suurendada - ettevaatust potentsiomeetri R käsitsemisel!

Induktsiooni määrame vähemalt 20 erineval voolutugevusel, kusjuures nõrgemate voolude puhul muudame voolutugevust väiksemate hüpete kaupa. Ühel ja samal voolutugevusel määrame induktsiooni kolm korda. Induktsiooni arvutamisel arvestame galvanomeetri tundlikkuse muutumist. Arvutame magneetiva välja tugevuse, aine suhtelise magnetilise läbitavuse. Kõik mõõtmistulemused koos mõõtmisvigadega korraldame sobivalt grafeeritud tabelisse. B ja μ sõltuvuse magnetvälja tugevusest esitame graafiliselt.

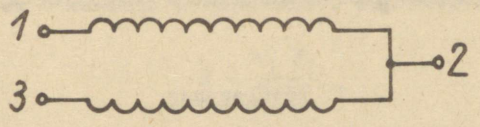
5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Selgitada diamagnetismi olemust.
b) Selgitada paramagnetismi olemust.
c) Millised on ferromagneetikute iseärasused võrreldes paramagneetikutega?
d) Selgitada ferromagnetismi olemust.
e) Kuidas iseloomustab hüstereesisilmus ferromagneetikuid?
f) Milles seisnevad magnetomehhaanilised efektid?
g) Tuletada valem toroidaalse mähise magnetvälja tugevuse

arvutamiseks?

6. Riista konstandid.

Toroidid: keskmine läbimõõt 110 cm, südamiku ristlõike pindala S_t = 0,785 cm^2, mõõtepooli keerdude arv N_t = 300; magneetiva pooli keerdude arv pikkusühiku kohta n = 17,8 1/cm, magneetiva pooli traadi diameeter 0,9 mm.



Normaalsolenoid II: mõõtepooli keerdude arv N_n' = 20, keeru pindala S_n = 14,0 cm^2; magneetiva pooli keerdude arv pikkusühiku kohta n' (klemmid 1-2) = 9,9 1/cm, n' (klemmid 1-3) = 19,8 1/cm; magneetiva pooli traadi diameeter 0,9 mm.

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.П, 1968, стр.106-116, 128-150, 163-165.
2. Курс электрических измерений. Под ред. В. П. Прыткова и А. В. Талицкого. М.-Л., 1960.
3. Под ред. В. И. Ивероновой. Физический практикум. Электричество и оптика. М., 1968, стр. 110.

17. FERROMAGNEETIKUTE HÜSTEREESISILMUSE OSTSILLOGRAFEERIMINE.

1. Tööülesanne.

Ferromagnetiliste ainete hüstereesisilmuse ülesvõtmine elektronostsilloskoobi abil ning nende ainete mõnede magnetiliste karakteristikute määramine.

2. Töövahendid.

Elektronostsilloskoop, millisumpermeeter, toitetrafo, toroidid erinevatest ferromagneetikutest südamikega, kondensaator, takistid, juhtmed.

3. Meetodi põhimõte.

Ferromagnetiliste ainete üheks iseärasuseks on hüstereesinähtus. Hüstereesinähtus seisneb selles, et ferromagneetiku induktsiooni suurus ei sõltu mitte üksnes sellest, millise tugevusega magnetväljas asetseb aine antud momendil, vaid ka sellest, milline oli aine eelnev magnetiline olek.

Ferromagneetikute hüstereesi iseloomustab hüstereesisilmus. Erinevail aineil on hüstereesikõver erinev. Silmuse pindala on võrdeline ferromagneetiku ümbermagneetimiseks vajaliku energiaga. Hüstereesisilmus on seega ferromagnetiliste ainete oluliseks karakteristikuks.

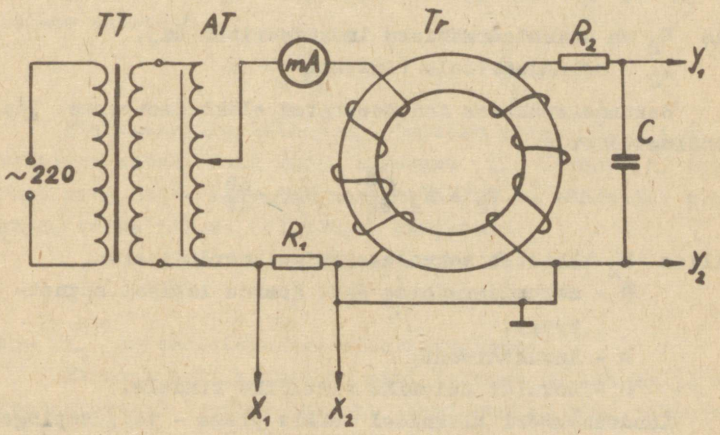
Hüstereesisilmuse määramiseks tuntakse mitmeid eksperimentaalseid meetodeid. Üheks mugavamaks ja kiiremaks nendest on hüstereesisilmuse ülesvõtmine elektronostsilloskoobi abil. Hüstereesisilmuse ostsillografeerimine võib toimu-

da joonisel 1 kujutatud skeemi alusel. Uuritavat ferromagnetilist ainet kasutatakse toroidi Tr südamikuna, mille primaarmähist toidab madaldavast trafost TT saadav siinuspinge. Primaarmähise ahel sisaldab veel milliampermeetrit ning madalaoomilist takistit R_1. Sekundaarmähise ahelasse on lülitatud kondensaator C ja kõrgoomiline takisti R_2.

Toroidi Tr südamikku magneetiva magnetvälja tugevus H on võrdeline primaarmähise amperkeerdude arvuga

$$H = \frac{i_1 N_1}{l} , \qquad (1)$$

kus i_1 tähistab voolu tugevust primaarmähises,
N_1 - primaarmähise keerdude arvu,
l - toroidi pikkust.



Joon. 1.

Pinge U_1 takistusel R_1 on faasis voolu tugevusega i_1, mistõttu Ohmi seaduse kohaselt

$$U_1 = i_1 R_1 .$$

Arvutades siit i_1 ning paigutades valemisse (1), saame

$$H = \frac{N_1 U_1}{R_1 l} , \qquad (2)$$

s.t. magnetvälja tugevus on võrdeline pingega takistil R_1.

Sekundaarmähises tarvitatav võimsus peab olema nii väike, et siin ei tekiks nimetamisväärset sekundaarvoolu ja sellega kaasaskäivat tagasimõju magnetilisele induktsioonile. Samuti peab R_2 ja C suhe olema niisugune, et $R_2 \gg 1/\omega C$. Sellisel juhul võib suurema veata kirjutada

$$i_2 = \frac{E_2}{R_2} , \qquad (3)$$

kus E_2 on sekundaarmähises indutseeritud emj,
i_2 - sekundaarvoolu tugevus.

Sekundaarmähises indutseeritud elektromotoorse jõu absoluutväärtus

$$E_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 S \frac{dB}{dt} ,$$

milles N_2 tähistab sekundaarmähise keerdude arvu,
Φ - sekundaarmähise ühte keerdu läbivat magnetvoogu,
B - induktsiooni,
S - toroidi südamiku ristlõike pindala.

Kondensaatori klemmidel tekkiv pinge - väljundpinge on arvutatav valemist

$$U_c = \frac{1}{C}\int i_2 \, dt \approx \frac{1}{R_2 C}\int E_2 dt = \frac{N_2 SB}{R_2 C} ,$$

millest

$$B = \frac{U_c R_2 C}{N_2 S} . \qquad (4)$$

Kuna kõik valemis (4) esinevad suurused peale U_c on konstandid, siis B osutub võrdeliseks väljundpingega U_c.

Ülalöeldut kokku võttes näeme, et pinge rakendamine takistilt R_1 ostsillograafi X-sisendisse, kondensaatorilt C aga Y-sisendisse sunnib elektronkiirt ostsilloskoobi ekraanil kujutama vastavas mastaabis kõvera $B = f(H)$, s.t. hüstereesisilmuse.

Peale hüstereesisilmuse ostsillografeerimist tuleb käesolevas töös määrata uuritavale ferromagneetikule vastav koertsitiivjõud, jääkmagnetism, maksimaalne magnetiline induktsioon ning seda põhjustav magnetvälja tugevus. Selleks peame graduseerima ostsilloskoobi ekraani nii X- kui ka Y-telje suhtes. Elektronkiire hälve piki X-telge a_x, nagu selgus, osutub võrdeliseks magnetvälja tugevusega, piki Y-telge, a_y aga magnetilise induktsiooniga B (hälbed a_x ja a_y on võrdsed poolega kiire kogulaotusest piki vastavaid telgi!). Võrdetegurid m_x ja m_y leiame seostest

$$m_x = \frac{H}{a_x} \quad \text{ja} \quad m_y = \frac{B}{a_y} .$$

Elektronkiire hälbe a_x tekitab pinge $U_1 = i_1 R_1$. Määrates katseliselt voolu tugevuse i_1, teades R_1 suurust ning seda, et elektronkiire hälve on võrdeline pingega, võime valemi (2) põhjal kirjutada

$$m_x = \frac{N_1 I_1 \sqrt{2}}{a_x l} ,$$

kus I_1 on voolutugevuse efektiivväärtus.

Ekraani kaliibrimiseks piki Y-telge lülime välja kondensaatori C ostsilloskoobi Y-sisendist ning rakendame selle asemele pinge takistilt R_1.

Laotuspinge tippväärtus

$$U_{1max} = \sqrt{2}\, I_1 R_1 .$$

Mõõtes laotuse pikkuse, võttes sellest poole ning kasutades valemit (4), saame

$$m_y = \frac{I_1 R_1 \sqrt{2} R_2 C}{N_2 S a_y} .$$

4. Töö käik.

a) Koostame vooluringi joonisel 1 toodud skeemi kohaselt. Madaldavast trafost TT saadava siinuspinge reguleerimiseks kasutame autotrafot AT.

b) Peale skeemi kontrollimist praktikumi juhendaja poolt lülitame toitetrafo primaarmähise 220-voldilisse vahelduvvooluvõrku.

c) Ostsilloskoobi reguleerimisnuppude abil püüame saada ekraanil selge hüstereesisilmuse kujutise (silmuse mõõtmed ärgu ületagu 2/3 ekraani läbimõõdust).

Pärast ostsillograafi väljareguleerimist ei tohi muuta X- ja Y-sisendite võimendustegurit kogu edasise katse vältel.

d) Hüstereesikõvera fotografeerime või kopeerime kalkapaberile pehme südamikuga pliiatsiga. Telgede saamiseks tuleb vaheldumisi üks ostsilloskoobi sisendisse viivatest juhtmetest lahti ühendada.

e) Ostsilloskoobi X- ja Y-telje kaliibrime nii, nagu kirjeldatud ülal.

f) Analoogiliselt fikseerime hüstereesisilmused vähemalt viiel madalamal pingel, muutes pinget autotrafo AT abil.

g) Kordame katset ülejäänud kahe toroidiga.

h) Määrame maksimaalse induktsiooni, seda põhjustanud magnetvälja tugevuse, koertsitiivjõu, jääkmagnetismi ning joonestame hüstereesisilmuse seeria järgi esialgse magneetimiskõvera.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Tõestada, et hüstereesisilmuse pindala on võrdeline ferromagneetiku ümbermagneetumiseks vajaliku energiaga.
b) Kirjeldada ferromagneetikute olulisemaid iseärasusi.
c) Selgitada para-, dia- ja ferromagnetismi olemust.
d) Selgitada sisulist erinevust magnetvälja tugevuse ning magnetilise induktsiooni vahel.
e) Tuletada valem toroidi magnetvälja arvutamiseks.
f) Defineerida magnetvälja tugevuse ja induktsiooni ühikud.

6. Riista konstandid.

$R_1 = 200\,\Omega$, $R_2 = 150\ k\Omega$, $C = 2{,}0\ \mu F$, $l = 37{,}7$ cm, $S = 1{,}0\ cm^2$, $N_1 = 800$, 1600 ja 3200 keerdu, $N_2 = 800$ keerdu.

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. II., 1968, стр. 106-116, 128-143, 163-165.

18. MAA MAGNETVÄLJA HORISONTAALKOMPONENDI MÄÄRAMINE.

1. Tööülesanne.

Määrata magnetpulga võnkeperioodi olenevus magnetvälja induktsioonist ja Maa magnetvälja horisontaalkomponent.

2. Töövahendid.

Riist Maa magnetvälja horisontaalkomponendi määramiseks, milliampermeeter, potentsiomeeter, ümberlüliti, kompass, sekundimõõtja, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Homogeenses magnetväljas avaldub väikese amplituudiga vabalt võnkuva magnetnõela võnkeperiood T valemiga

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{BP_m}}, \qquad (1)$$

kus I on magnetnõela inertsimoment, B - magnetvälja induktsioon ja P_m - nõela magnetmoment.

Muutes magnetvälja induktsiooni B muutub ka T, kuna sama magneti puhul I ja P_m jäävad konstantseks.

Mõõtmiseks võib kasutada magnetpulka, mis on riputatud vabalt võnkuvana horisontaalsesse pooli. Pooli mähisesse voolu juhtimisel tekitatakse selles homogeenne magnetväli, mis lisandub Maa magnetväljale ja muudab seega magnetile mõjuva välja induktsiooni B.

Resultantvälja induktsioon B pooli sisemuses, kui viimase telg on paralleelne Maa magnetvälja horisontaal-

komponendiga B_m avaldub valemiga

$$B = B_m + B_p, \qquad (2)$$

milles B_p on pooli magnetvälja induktsioon, kusjuures sellele suund võib olla päri- või ka vastupidine Maa magnetvälja suunaga ja seega omada kas pluss- või miinusmärki.

Kui voolu tugevus pooli mähises on i amprit, siis pooli magnetiline induktsioon

$$B_p = \mu\mu_0 i \frac{N}{l}, \qquad (3)$$

kus N tähistab pooli keerdude arvu, l - pooli pikkust, μ - õhu magnetilist läbitavust ja μ_0 - magnetilist konstanti.

Valem on kehtiv pooli kohta, mille pikkus on läbimõõduga võrreldes väga suur. Lühemate poolide puhul tuleb kasutada valemit

$$B_p = \mu\mu_0 i \frac{N}{\sqrt{l^2 + d^2}}, \qquad (3a)$$

milles d tähistab pooli diameetrit.

Seoseist (1) ja (2) saame tuletada

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{I}{P_m(B_m + B_p)}. \qquad (4)$$

Seos (4) võimaldab B_m arvutamist, kui on teada kaks paari vastavaid T ja B_p väärtusi.

Tähistades $\frac{P_m}{4\pi^2 I} = A$ ja $\frac{\mu\mu_0 N}{\sqrt{l^2+d^2}} = K$

ning kasutades seost (3a), võib valemi (4) kirjutada kujul

$$\frac{1}{T^2} = A(B_m + K i), \qquad (5)$$

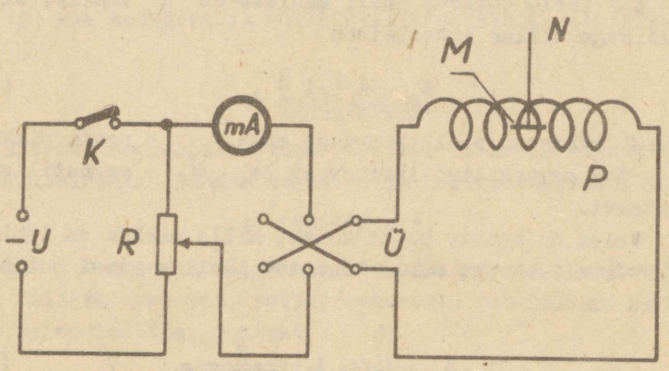
mis teljestikus $\frac{1}{T^2}$ ja i kujutab sirget.

Käesoleva töö ülesandeks on esitada graafiliselt võrrandiga (5) määratud sirge ja sobivaist T ja i väärtus-

test arvutada B_m.

4. Töö käik.

Katseseadme koostame vastavalt joonisele 1, kus P tähistab pooli, M magnetit, N torsioonivaba siidniiti, Ü ümberlülitit, R potentsiomeetrit, K lülitit ja mA milliampermeetrit.



Joon. 1.

Mõõtmiste teostamiseks seame pooli toetuskruvide abil horisontaalseks ja pooli telje paralleelseks magnetilise meridiaani tasapinnaga.

Viime kõik magnetvälja mõjustavad esemed (ferromagnetilised ained, ampermeeter) poolist võimalikult kaugele, kusjuures reostaadi telje asetame risti pooli teljega. (Miks?)

Esialgu lülitame voolu (100 mA) nii, et pooli magnetvälja suund ühtib Maa magnetvälja suunaga. (Kuidas selles veenduda?) Loeme milliampermeetrilt voolu tugevuse i ja määrame võnkeperioodi 20-st võnkest. Võnkumist saame tekitada magnetpulgale mõne raudeseme, näiteks võtme ajutise lähendamisega. Seejuures väldime pendeldavate võnkumiste tekkimist. Vähendame voolu tugevust 10 mA kaupa kuni 0-ni, määrates iga kord T. Muudame ümberlülitiga voolu suuna

poolis ja hakkame 10 mA kaupa voolu tugevust suurendama. Seni on magneti võnkeperiood kasvanud ja muutub ∞ , kui pooli magnetväli parajasti kompenseerib Maa magnetvälja. See vastab sirge lõikepunktile i-teljega. Edasisel voolu tugevuse suurendamisel pöördub magnet 180° ja võnkeperiood hakkab voolu tugevuse suurenedes vähenema. Voolu tugevuse suurendame esialgse väärtuseni. Vaatlusandmed kanname tabelisse. Joonestame graafiku.

B_m arvutamiseks osutub sobivaks kasutada maksimaalseid võrdseid i väärtusi, mil ükskord pooli magnetväljale liitub Maa magnetväli pluss-, teinekord miinusmärgiga.

Olgu samasuunaliste väljade puhul i-le vastav periood T_1, ja vastassuunaliste puhul T_2, siis seost (5) kasutades saame kirjutada

$$\frac{T_2^2}{T_1^2} = \frac{Ki + B_m}{Ki - B_m}, \qquad (7)$$

millest

$$B_m = Ki \frac{T_2^2 - T_1^2}{T_2^2 + T_1^2}. \qquad (8)$$

Kontrolliks teostame arvutusi ka väiksematele i väärtustele vastavatel T väärtustel.

i (mA)	20 T	T	T^2	$\frac{1}{T^2}$
0				
10				
20				

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Näidata, et homogeenses magnetväljas avaldub väikese amplituudiga vabalt võnkuva magnetnõela võnkeperiood valemiga $T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{P_m B}}$.

b) Tuletada valemid (3) ja (3a).
c) Kirjeldada magnetilise induktsiooni mõõtmise meetodeid.
d) Defineerida magnetvälja tugevuse ning magnetilise induktsiooni ühikud.

6. Riista andmed.

Pooli traadi diameeter d = 0,64 mm, pooli pikkus l = = 245 mm, keeru läbimõõt d = 83,2 mm.

Kirjandus.

1. J.A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 240.

19. POOLJUHTIDE UURIMINE HALLI EFEKTI MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Halli konstandi, laengukandjate märgi, kontsentratsiooni ja liikuvuse määramine.

2. Töövahendid.

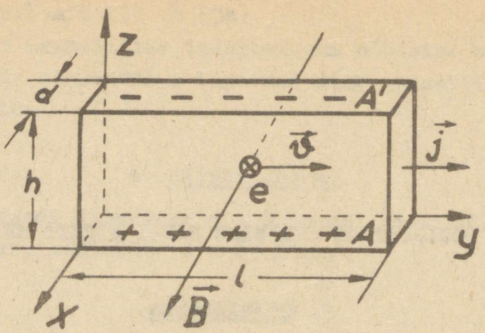
Elektromagnet koos reostaadi ning ampermeetriga, pooljuhtplaadike kinnitusraamiga (Halli andur), potentsiomeeter, milliveebermeeter, tööstuslik takistussild, reostaadid, milliampermeeter, vooluallikad, kompass, lülitid, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Kui paigutada elektrit juhtiva aine tükike, mida läbib elektrivool, magnetvälja, kaasneb sellega rida sekundaarseid nähtusi: väheneb aine elektri- ja soojusjuhtivus, tekib potentsiaalide ja temperatuuride vahe. Kõiki neid nähtusi, mis ilmnevad juhtivates ainetes elektri- ja magnetvälja üheaegsel mõjumisel, nimetatakse galvanomagnetilisteks nähtusteks.

Galvanomagnetilistest nähtustest võrdlemisi tähtsaks on Halli efekt. Efekti avastas Hall 1879.a. ning see seisneb magnetvälja paigutatud vooluga kehas magnet- ja elektriväljaga risti olevas sihis potentsiaalide vahe - Halli pinge tekkes.

Halli efekti kvantitatiivseks analüüsiks olgu uuritav aine vormitud ristkülikukujuliseks. Kulgegu selles vool tihedusega j ning asetsegu ta homogeenses magnet-



Joon. 1.

väljas nii nagu näidatud joonisel 1.

Magnetväljas liikuvatele laengutele mõjuva Lorentzi jõu mõjul nihkuvad nad Z-telje sihis, mistõttu üks tahkudest A ja A' laadub positiivselt, teine negatiivselt. Tekkinud elektriväli mõjub laengutele laenguid eraldava Lorentzi jõuga võrreldes vastassuunaliselt. Laengukandjate eraldumine ja Halli pinge suurenemine kestab seni, kuni pole rahuldatud tingimus

$$e\vec{E} + e[\vec{v}, \vec{B}] = 0, \qquad (1)$$

kus e on laengukandja laeng,

$\vec{E}$ - Halli elektrivälja tugevus,

$\vec{v}$ - laengukandjate suunatud liikumise keskmine kiirus,

$\vec{B}$ - magnetvälja induktsioon.

Viimasest valemist

$$E = vB.$$

Järelikult, tahkude A ja A' vaheline pinge

$$U_H = Eh = vBh. \qquad (2)$$

Laengukandjate suunatud liikumise keskmine kiirus ja voolu tihedus on seotud valemiga

$$j = n e v, \qquad (3)$$

kus n tähistab vabade laengukandjate kontsentratsiooni.

Kui plaadikese paksus on d ja voolu tugevus i , siis definitsiooni kohaselt

$$j = \frac{i}{dh} . \qquad (4)$$

Tuginedes valemitele (3) ja (4) võib kirjutada

$$U_H = R_H \frac{iB}{d}, \qquad (5)$$

milles kordajat $R_H = \frac{1}{en}$ nimetatakse Halli konstandiks.

Sõltuvalt vabade laengukandjate märgist võib Halli konstant olla kas negatiivne või positiivne. Viimane omakorda määrab Halli potentsiaali märgi.

Halli konstandi abil saab arvutada laengukandjate liikuvust k. Tõepoolest, kuna erijuhtivus

$$\sigma = e n k, \qquad (6)$$

siis valemist (5)

$$k = R_H \sigma . \qquad (7)$$

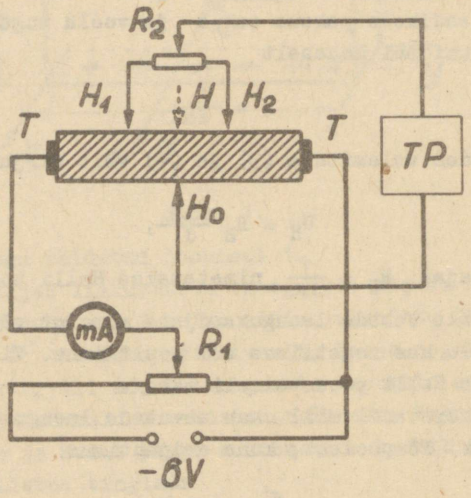
Nagu näha, võimaldab Halli efekti uurimine määrata metallide ja lisandjuhtivusega pooljuhtide vabade laengukandjate väga olulisi karakteristikuid: nende märki, kontsentratsiooni ja liikuvust.

Mõlemamärgiliste vabade laengukandjate olemasolu korral efekti ülalesitatud elementaarne teooria rakendatav ei ole.

4. Töö käik.

a) V o o l u r i n g i d.

Lülitusskeem Halli pinge mõõtmiseks on kujutatud joonisel 2.



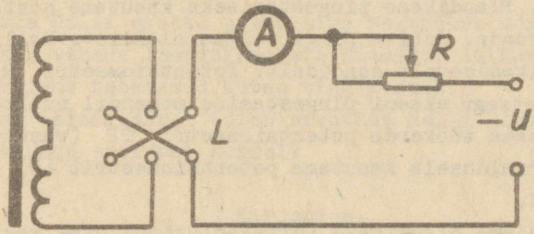
Joon. 2.

Vooluring koosneb kahest osast: uuritavast ainest plaadikese toitevooluringist (kontaktid TT) ning vooluringist Halli pinge mõõtmiseks (sondid HH).

Halli pinge mõõtmine toimub tööstusliku potentsiomeetri TP abil. Potentsiomeeter TP tuleks ühendada sümmeetriliselt asetsevate sondidega H_0 ja H. Kuna aga praktiliselt pole võimalik saavutada sondide sümmeetrilist paigutust, siis tekib nende vahel pinge ka magnetvälja puudumisel. Sellest tingitult kasutatakse Halli pinge mõõtmiseks sonde H_0, H_1 ja H_2.

Toiteringi elementide otstarve selgub jooniselt 2.

Plaadike ise on kinnitatud orgaanilisest klaasist raamile. Raami abil saab uuritava detaili paigutada elektromagneti pooluste vahele sobivas asendis. Elektromagneti vooluring on kujutatud joonisel 3.



Joon. 3.

b) T ö ö o p e r a t s i o o n i d e j ä r j e k o r d.

Enne mõõtmiste juurde asumist eemaldame käe- või taskukella.

- Reguleerime šablooni abil paralleelseks elektromagneti pooluskingade otsatahud ning fikseerime nende asendi kinnituskruvide abil. Koostame magneti vooluringi.
- Demagneedime magneti. Selleks juhime läbi mähise 1,5 A tugevuse voolu ning pidevalt kommuteerides ümberlüliti L abil selle suunda, vähendame reostaadi takistuse sisseviimisega voolu tugevust.
- Leiame seose voolu tugevuse ning elektromagneti magnetilise induktsiooni vahel. Magnetilise induktsiooni suuna määramiseks kasutame kompassi, selle suuruse määrame milliveebermeetri M119 abil vähemalt kümnel erineval voolu tugevuse väärtusel läbi elektromagneti mähise (0,1 - 1,5 A). Iga mõõtmist teostame vähemalt kolm korda. Mõõtmised viime läbi kooskõlas M119 kasutamisjuhendiga, millega oleme eelnevalt tutvunud. Tulemused esitame graafikuna.
- Paigutame ettevaatlikult magneti pooluste vahele

raami koos plaadikesega. Raami käsitsemisel peame meeles, et uuritav materjal on äärmiselt habras ning puruneb vähimagi põrutuse korral. Samal põhjusel pole lubatud iseseisvalt pingutada plaadikese kinnitussonde. Sondide halva kontakti korral tuleb pöörduda juhendava õppejõu poole.

- Koostame plaadikese toitevooluringi Halli pinge mõõtmiseks. Plaadikese pingestamiseks kasutame horisontaalseid elektroode. Sobiva pinge valime alaldist. Halli pinge saame vertikaalsetelt sondidelt. Potentsiomeetri R_1 liugkontakt asetsegu skeemi pingestamise momendil nullseisus.

- Seame töökorda potentsiomeetri TP (vastavalt juhendaja korraldusele kasutame potentsiomeetrit ПП , Р306 või Р375).

- Suleme plaadikese toitevooluringi ning reguleerime voolu tugevuse selles võrdseks 10 mA (magnetväli puudub). Reostaadi R_2 liugkontakti abil saavutame Halli sondide paigutamise ühele ja samale ekvipotentsiaalpinnale.

- Täielikult sisseviidud reostaadi R juures suleme elektromagneti vooluringi reguleerides selles voolu tugevuse 0,6 A suuruseks. Mõõdame Halli pinge. Analoogiliisi mõõtmisi sama magnetväljaga teostame veel 4, 5, 6, 7, 8 ja 9 mA voolu tugevusel läbi uuritava detaili. Tulemused esitame graafikuna teljestikus U_H-i.

- Hoiame konstantsena voolu tugevuse läbi anduri i= = 3 mA, ning mõõdame Halli pinget erinevate magnetväljade juures. Teostame vähemalt 10 mõõtmist, muutes voolu tugevust i_m intervallis 0,1 - 1,5 A. Joonistame graafiku $U_H=f(B)$.

- Tööstusliku takistussillaga mõõdame pooljuhi takistuse ning arvutame erijuhtivuse.

- Arvutame Halli konstandi. Määrame laengukandjate märgi, kontsentratsiooni ning liikuvuse.

5. Riista konstandid.

Veebermeetri mõõtepooli keerdude arv N = 25, pooli diameeter D = 20,5 mm; plaadi pikkus l = 30,3 mm, kõrgus h = 10,5 mm, paksus d = 1,05 mm.

6. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Selgitada juhtivusmehhanismi pooljuhtides.
b) Esitada energianivoode pilt elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhi jaoks.
c) Mida nimetatakse Fermi nivooks?
d) Kirjeldada veebermeetri tööprintsiipi.
e) Nimetada Halli efekti praktilise rakenduse võimalusi.
f) Arvutada vabade laengukandjate suunatud liikumise keskmine kiirus teostatud katse tingimustes.
g) Millise valemi järgi tuleb arvutada Halli konstanti omajuhtivusega pooljuhi korral?

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 173-182, 337-345, 409-412.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. II, 1968, lk. 148--150, 184-208.
3. Potensiomeetrite ПП, Р 306, Р 375, tööstusliku alalisvoolu silla ja milliveebermeetri М 119 tehnilised kirjeldused.

20. ELEKTRONI ERILAENGU MÄÄRAMINE MAGNETRONIMEETODIL.

1. Tööülesanne.

Elektroni erilaengu määramine.

2. Töövahendid.

Magnetron aluslaual koos magnetvälja tekitava pooliga, trafo magnetroni kütteks, alalisvooluallikad, milliampermeeter, ampermeeter, voltmeeter, kaks reostaati, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Tähtsamateks elementaarosakesi iseloomustavateks suurusteks on nende laeng ning mass. Elektroni laengu e või siis laengu ja massi m suhte e/m, s.t. erilaengu määramiseks tuntakse tänapäeval väga mitmeid meetodeid. Üheks levinumaks meetodiks on elektri- ja magnetväljas liikuva elektroni trajektoori uurimine. Elektroni trajektoori määrab nii elektri- kui magnetvälja konfiguratsioon, samuti aga e/m väärtus.

Elektroni erilaengu võib arvutada, kui on ette antud elektri- ja magnetvälja struktuur, trajektoor aga leitud katseliselt. Sellel üldisemal kaalutlusel põhinebki rida konkreetseid meetodeid e/m määramiseks. Üheks nendest on magnetronimeetod.

Lihtsam magnetron kujutab enesest õhutühja klaasballooni paigutatud kahte erineva raadiusega koaksiaalset silindrit. Väiksema raadiusega silindrit kuumutatakse elektrivooluga. See elektrood on katoodiks. Anoodiks on väli-

silinder. Ballooni ümbritseva solenoidi abil tekitatakse silindritevahelises ruumis aksiaalne magnetväli.

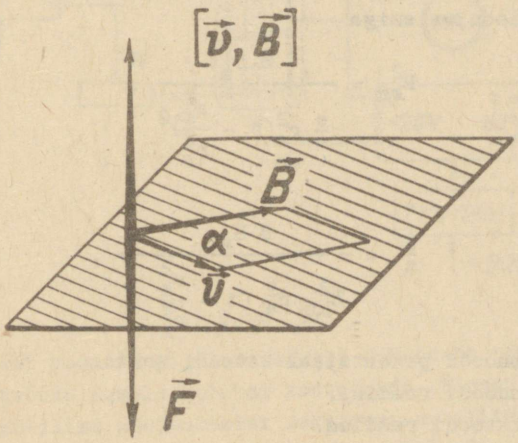
Magnetvälja puudumisel liiguvad kõik katoodist väljuvad elektronid radiaalselt positiivse potentsiaaliga anoodi suunas. Pärast solenoidi vooluahela sulgemist mõjub igale elektronile Lorentzi jõud

$$\vec{F} = e\left[\vec{v}, \vec{B}\right], \qquad (1)$$

kus $\vec{v}$ on elektroni liikumise kiirus,
$\vec{B}$ - magnetvälja induktsioon.

See jõud on risti $\vec{v}$ ja $\vec{B}$ poolt määratud tasapinnaga, suund aga alluv parema käe kruvireeglile (joon. 1). Kuna käesoleval juhul $\vec{v} \perp \vec{B}$, siis

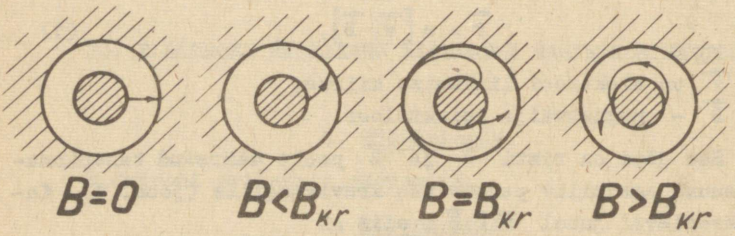
$$F = e\,v\,B. \qquad (1')$$



Joon. 1.

Lorentzi jõu mõjul muutub elektroni radiaalne liikumissuund. Mida suurem on magnetvälja induktsioon, seda suurem on kõrvalekalle esialgsest liikumissuunast.

Induktsiooni teatud väärtustel elektronid anoodile ei jõuagi. Magnetvälja induktsiooni, millest alates anoodvool magnetronis järsult väheneb, nimetatakse kriitiliseks induktsiooniks B_{kr} (joon. 2).



Joon. 2.

Nagu arvutused näitavad (vt. lisa), väljendub kriitiline induktsioon valemiga

$$B_{kr}^2 = \frac{8\,U_a}{\frac{e}{m}\,r_a^2\left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2},$$

millest

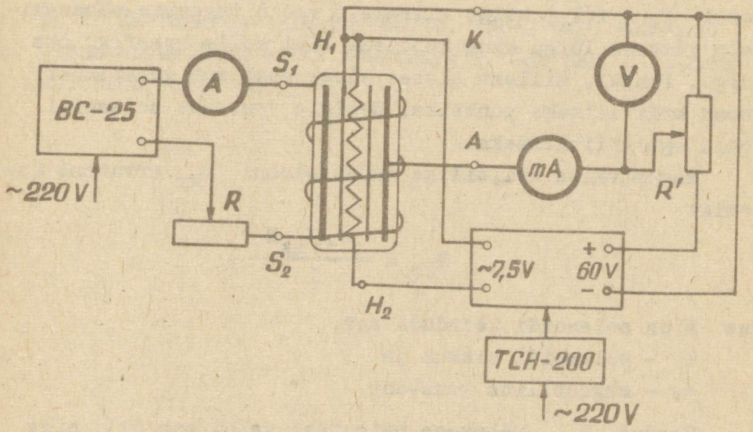
$$\frac{e}{m} = \frac{8\,U_a}{B_{kr}^2\,r_a^2\left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2}, \qquad (2)$$

kus U_a on anoodi potentsiaal katoodi suhtes,
r_a - anoodi raadius,
r_k - katoodi raadius.

Valemist (2) järeldub, et elektroni erilaengu arvutamiseks on küllaldane mõõta anoodpinge, anoodi ja katoodi raadius ning määrata B_{kr}.

4. Töö käik.

Kriitilise induktsiooni määramiseks koostame vooluringi joonisel 3 toodud skeemi kohaselt. Magnetron on paigutatud erilisele hoidjale, elektroodidega ühendatud juhtmed aga toodud aluslaua klemmideni. Ka solenoid on kinnitatud aluslauale. Magnetroni katoodi toiteks kasutame 7,5-voldilist vahelduvvoolu. Magnetroni anoodpinge saame üle potentsiomeetri alalispingeallikast. Potentsiomeetri liugkontakt olgu algul "nullseisus". Solenoidi toiteks kasutame pingeallikat BC-25.



Joon. 3.

Pärast vooluringi ülevaatamist juhendaja poolt lülitame vooluvõrku esmalt katoodi küttetrafo. Pärast katoodi kümneminutilist soojendamist rakendame anoodile pinge 30 volti ning registreerime milliampermeetri näidu. Nüüd suleme ka solenoidi vooluringi ning reguleerime potentsiomeetri abil voolu tugevuse selles 0,1 ampri suuruseks. Üheaegselt jälgime voltmeetri näitu. Anoodpinge potentsiomeetri abil hoiame selle alati konstantsena. Alles siis võime

fikseerida milliampermeetri lugemi. Edasi suurendame pidevalt solenoidi läbiva voolu tugevust ning iga 0,1 A järele määrame vastava anoodvoolu tugevuse. Anoodvoolu järsu vähenemise piirkonnas võtame milliampermeetri lugemeid lühemate solenoidvoolu intervallide järgi. Mõõtmisi teostame seni, kuni anoodvool lakkab. Analoogilisi mõõtmisi teostame veel vähemalt neljal teistsugusel anoodpinge väärtusel (näit. pingetel 32,5; 35,0; 37,5; 40 volti; U_a ärgu ületagu ühelgi juhul 50 volti). Kõik mõõtmistulemused korraldame tabelitesse. Iga konstantse anoodpinge U_a jaoks joonestame millimeeterpaberile sõltuvuse $I_a = f(I_s)$, kus I_s on voolu tugevus solenoidis. Graafikute abil määrame kriitilise solenoidvoolu I_{sk}. Selle saame siis, kui valime kõveral $I_a = f(I_s)$ kõige kiiremale voolu tugevuse vähenemisele vastava lõigu ning kujutame läbi selle graafiku osa sirge. Punkti, millest alates sirge eemaldub graafikust, loeme kriitiliseks punktiks. Sellele vastavat solenoidi voolu aga kriitiliseks.

Magnetvälja kriitilise induktsiooni B_{kr} arvutame valemist

$$B_{kr} = \frac{\mu_0 I_{sk} N}{l},$$

kus N on solenoidi keerdude arv,
l - solenoidi pikkus ja
μ_0 - magnetiline konstant.

Saadud B_{kr} väärtuse paigutame valemisse (2) ning arvutame e/m. Leiame katsevea. Analoogiliselt määrame elektroni erilaengu ülejäänud graafikute põhjal. Lõppresultaadiks arvutame üksikute mõõtmiste aritmeetilise keskmise ja lisame katsevea.

5. Lisaülesandeid.

a) Miks ei katke anoodvool magnetronis järsult, vaid esineb küllalt lai voolu tugevuse kiire vähenemise piirkond?

b) Miks tuleb B_{kr} väärtuseks lugeda just kõvera kiire languse osa algpunkt?

c) Selgitada mõistet "aksiaalne magnetväli solenoidi sees".

d) Kirjeldada teisi meetodeid elektroni erilaengu määramiseks.

6. Riista konstandid.

r_a = 5,3 mm, r_k = 2,7 mm, N = 1543 keerdu, l = 30,0 cm, $U_a \leq$ 50 V, soojenemisaeg 10 min.

Kirjandus.

1. С. Г. Калашников. Электричество. 1964, стр. 435–451.
2. Специальный физический практикум I. Под ред. Г. Спивака. 1960, стр. 526.

21. VAAKUM- JA POOLJUHTSUUNAJATE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Uurida suunajat läbiva voolu tugevuse sõltuvust suunajale rakendatud pingest.

2. Töövahendid.

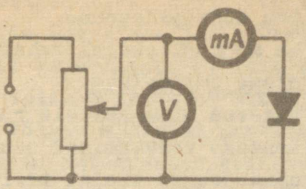
Kenotron 1Ц1С paneeli ja alusega, seleensammas ABC-6-420 alusega, germaaniumdiood Д7Ж, reostaat takistusega 300 - 2000 Ω, reostaat takistusega 20 - 100 Ω, milliampermeeter mõõtepiirkonnaga 200 - 500 mA, milliampermeeter mõõtepiirkondadega 0,2 mA, 5 mA ja 50 mA, voltmeeter mõõtepiirkondadega 0,5 V, 20 V ja 200 V.

3. Töö käik.

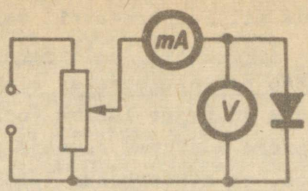
Suunajaks nimetatakse vooluahela elementi, mille takistus sõltub oluliselt voolu suunast ja mis võimaldab seetõttu suunajat kasutada vahelduvvoolu alaldamiseks. Suunajaid on väga mitut tüüpi. Enam levinud on vaakumsuunajad, gaaslahendussuunajad ning pooljuhtsuunajad. Viimastest on tuntuimad seleen-, kuproks-, germaanium- ja ränisuunajad (germaanium- ja ränidioodid).

Suunajat iseloomustab kõige täielikumalt voltamper tunnusjoon, mis näitab suunajat läbiva voolu tugevuse sõltuvust pingest.

Voltamper tunnusjoone määramiseks on võimalik kasutada kaht lülitusskeemi (joon. 1a ja 1b).



Joon. 1a.



Joon. 1b.

Lülitusskeemi a puuduseks on asjaolu, et voltmeeter ei näita mitte suunajal langevat pinget, vaid suunaja ja milliampermeetri pingelanguste summat, mis põhjustab metoodilisi katsevigu. Lülitusskeemi b korral tekivad metoodilised katsevead voolu tugevuse mõõtmisel. Tekkiva metoodilise vea suurust tuleb enne lülitusskeemi koostamist hinnata ja valida skeemi variant, mille korral viga on väiksem.

Kui kummagi lülitusskeemi variandi korral pole võimalik saavutada olukorda, et metoodiline viga oleks mõõteriistade täpsusklassiga määratud instrumentaalsest veast vähemalt suurusjärgu võrra väiksem, tuleb skeem a korral mõõdetud pingest lahutada milliampermeetril langev pinge või skeem b korral mõõdetud voolu tugevusest lahutada voltmeetrit läbiva voolu tugevus.

Voltmeetri ja milliampermeetri sisetakistuse leidmiseks joonistame protokolli kummagi mõõteriista skeemi ning arvutame lisatakistuse väärtused, otsides mikroampermeetri nimivoolu ja sisetakistuse riista juhendist.

Katsete sooritamisel tuleb rangelt silmas pidada järgnevaid reegleid:

a. Enne voolu sisselülitamist asetada potentsiomeeter alati nullseisu.

b. Milliampermeetril valida algul mõõtepiirkond, mis vastab uuritava suunaja maksimaalsele pärivoolule.

c. Ettevaatlikult pinget suurendades veenduda, et suunaja on lülitatud õige polaarsusega! Alles siis võib

lülitada milliampermeetril vajaliku mõõtepiirkonna.

d. Igasugusel lülitamisel (ka mõõtepiirkonna vahetamisel) peab potentsiomeeter alati olema nullseisus.

Kuna suunajat läbiva voolu tugevus ning sellele rakendatav pinge muutuvad suunaja polaarsuse vahetamisel suurtes piirides, on otstarbekam leida tunnusjooned eraldi pärivoolu- ning vastuvoolurežiimi jaoks. Iga tunnusjoone leidmiseks tuleb mõõta voolu tugevus suunajas vähemalt kümne erineva pinge korral. Pinget ja voolu tugevust tuleb muuta nullist kuni antud suunaja jaoks lubatud maksimumväärtusteni või kuni väärtusteni, mida piiravad mõõteriistade mõõtepiirkonnad. Saadud mõõtmistulemused kanname tabelitesse.

Katsed on soovitatav teha järgmises järjekorras:

- germaaniumdioodi pärivoolu mõõtmine;
- seleensamba pärivoolu mõõtmine;
- kenotroni pärivoolu mõõtmine;
- kenotroni vastuvoolu mõõtmine;
- seleensamba vastuvoolu mõõtmine;
- germaaniumdioodi vastuvoolu mõõtmine.

Katse sooritamisele asudes koostame lülitusskeemi vastavalt ülaltoodud näpunäidetele. Vajaliku toitepinge saame pärivoolu mõõtmise korral 6 V ja 20 V pingega rühmast, vastuvoolu mõõtmise korral 220 V pingega rühmast.

Kenotroni uurimisel tuleb koostada veel küttevooluring. Täieliku skeemi kenotroni karakteristikute ülesvõtmiseks kanname protokolli. Kütteniiti toidame 1,2 - 4 V pingega akumulaatorist, millega järjestikku tuleb tingimata lülitada reostaat ja 200 - 500 mA mõõtepiirkonnaga milliampermeeter. Küttevoolu sisselülitamisel peab reostaadi takistus olema maksimaalne. Peale sisselülitamist reguleerime küttevoolu väärtuseks 185 mA.

4. Katseandmete töötlemine.

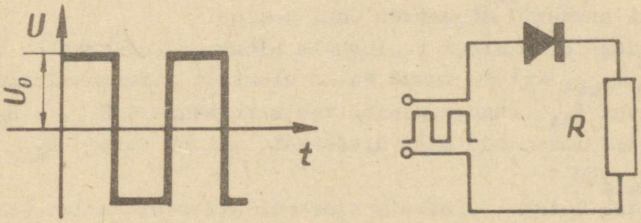
Saadud mõõtmistulemuste järgi koostame graafikud teljestikus, millel pinge väärtused kanname horisontaalteljele ning voolu tugevuse väärtused vertikaalteljele. Kõigi

kolme uuritava suunaja tunnusjooned joonistame ühes ja samas teljestikus, kusjuures vastuvoolu puhul olgu mastaap kõikide suunajate jaoks ühesugune, pärivoolu korral aga erinev ja selline, et kõik graafikud mahuksid joonisele.

Teiseks arvutame suunajate integraalse takistuse $R_{int} = \frac{U}{I}$ kõigis mõõdetud punktides ja koostame graafikud, mis näitavad integraalse takistuse olenevust pingest. Need graarikud joonistame ühises teljestikus, milles horisontaalteljele kanname pinge väärtused nii, et vasakule jääksid vastuvoolureziimis mõõdetud punktid, vertikaalteljele kanname aga $\log R_{int}$ väärtused.

Kolmandaks leiame tunnusjoontelt graafiliselt suunajate diferentsiaalse takistuse $R_{dif} = \frac{dU}{dI}$ kõigis mõõdetud punktides ning joonistame vastavad graafikud samas teljestikus, kus integraalse takistuse R_{int} graafikud.

Neljandaks arvutame uuritud suunajate kasutegurid ristkülikukujulise graafikuga vahelduvvoolu alaldamisel alltoodud skeemis.



Joon. 2.

Kasuteguri määramise teostame järgmistel tingimustel:

Suunaja	U_o	Alaldatud voolu tugevuse amplituud
1Ц 1С	200 V	1 mA
АВС-6-420	200 V	5 mA
Д7Ж	200 V	50 mA

Kasuteguri arvutamisel tuleb leida täisperioodi jooksul tehtud kasulik töö A_1, mille määrab takistis R eralduv võimsus ning kaotatud töö A_2, mille määrab suunajas eralduv võimsus. Seejuures jätame pingelangu takistil R vastuvoolu korral ülesande lihtsustamise huvides arvesse võtmata. Kasutegur avaldub

$$\eta = \frac{A_1}{A_1+A_2}.$$

Täieliku valemi kasuteguri leidmiseks tuletame ise. Arvutusteks vajalikud andmed leiame tunnusjoontelt.

5. Täiendavad küsimusi.

a. Millise kujuga on uuritud suunajate tunnusjooned teljestikus, kus paremale kantakse pärivoolurežiimi andmed, vasakule vastuvoolurežiimi andmed?

b. Suunajate integraalse takistuse arvutamisel kasutasime seost $U = IR_{int}$. Kas see seos väljendab käesoleval juhul Ohmi seadust? Sõnastada Ohmi seadus!

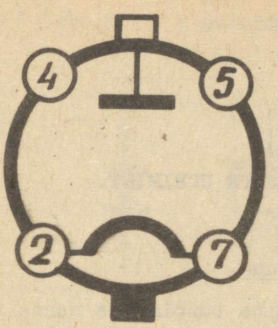
c. Kuidas leida mingi vooluahela elemendi integraalne takistus R_{int}, kui on antud selle elemendi diferentsiaalne takistus R_{dif} funktsioonina voolu tugevusest $R_{dif} = R_{dif}(I)$? Kuidas lahendada sama ülesannet, kui on antud $R_{dif} = R_{dif}(U)$?

d. Kuidas leida vooluahela elemendi diferentsiaalne takistus R_{dif}, kui on antud funktsioon $R_{int} = R_{int}(I)$ või funktsioon $R_{int} = R_{int}(U)$?

e. Miks rikneb suunaja, kui talle rakendada lubatust suuremat vastupinget või koormata lubatust suurema vooluga? Küsimust analüüsida iga suunaja jaoks eraldi!

6. Riista konstandid.

Kenotroni 1L4,1C sokeldus ja andmed: Küttepinge 0,7 V; küttevool 0,185 A; maksimaalne vastupinge 15 kV; maksimaalne alaldatud vool 1 mA.



Germaaniumdioodi Д7Ж maksimaalne lubatud vastupinge - 400 V, maksimaalne alaldatud vool - 100 mA.
Seleensamba АВС-6-420 maksimaalne lubatud vastupinge - 600 V, maksimaalne alaldatud vool - 6 mA.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 172-192.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.П, 1964, стр.208-212, 191-203, 221-227.

22. ALALDITE JA FILTRITE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

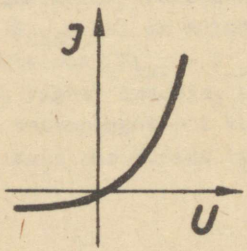
Tutvumine mitmesuguste alaldite tüüpide ja nende tööga. Tutvumine silumisfiltritega.

2. Töövahendid.

Stend transformaatori, drosseli ja 2 elektrolüütkondensaatoriga, 4 germaaniumdioodi, koormustakisti, vahelduv- ja alalisvoolu voltmeetrid, elektronostsilloskoop, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

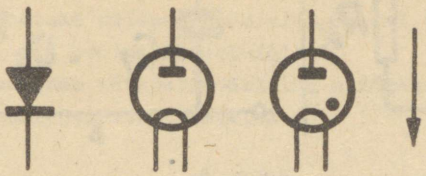
Sobiva alalispinge saamise üheks sagedamini kasutatavaks meetodiks on vastava pingeni transformeeritud vahelduvvoolu alaldamine. Alaldiks võib olla mistahes teravalt asümmeetrilise voltamper tunnusjoonega seadeldis - suunaja, s.t. seadeldis, mille juhtivus on ühes suunas palju parem kui vastupidises (joon. 1).



Joon. 1.

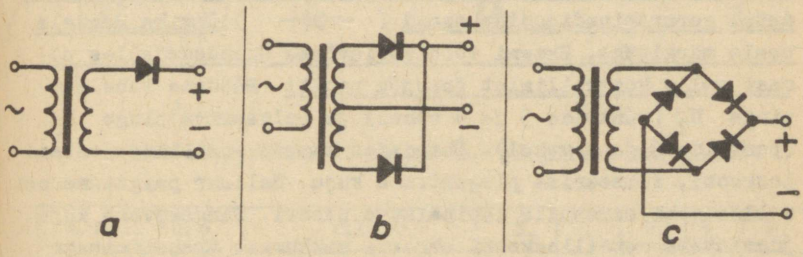
Voolu alaldamiseks kasutatakse tavaliselt vaakumsuunajaid (kenotrone), gaaslahendussuunajaid (gasotrone) ja pooljuhtsuunajaid (kuproks- ja seleenalaldit, germaanium- ja ränidioode). Joonisel 2 on näidatud pooljuht-, vaakum- ja gaaslahendussuunaja tähistus skeemidel. Nende ehitu-

sega tuleb tutvuda juhendi lõpus viidatud kirjanduse abil.



Joon. 2.

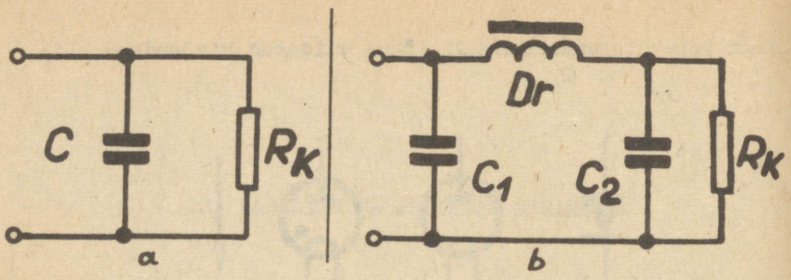
Kasutatavamad alaldite lülitusskeemid on toodud joonisel 3.



Joon. 3.

Joonisel 3a on kujutatud poolperioodalaldi, joonistel 3b ja 3c - täisperioodalaldid. Lülitust 3c nimetatakse sageli sildskeemiks.

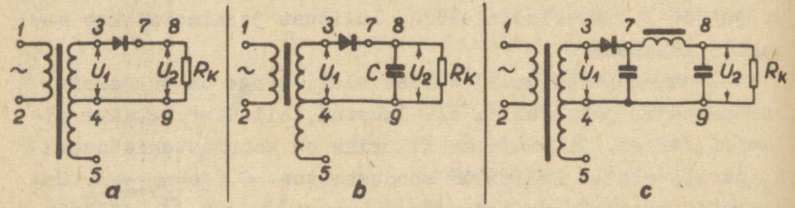
Et alaldi väljundil saadav alalispinge on pulseeriv, mis paljudel juhtudel ei ole lubatud, siis kasutatakse silumisfiltreid. Lihtsaimaks filtriks on koormustakistusega R_x paralleelselt lülitatud kondensaator C (joon. 4a). Sagedamini kasutatakse paremaid tulemusi andvat Π -filtrit, mis koosneb kahest kondensaatorist C_1 ja C_2 ning drosselist Dr (suure induktiivsusega pool) (joon. 4b). Õigesti valitud Π -filter annab praktiliselt pulsatsioonita alalispinge.



Joon. 4.

4. <u>Töö käik</u>.

a. Käesolevas töös kasutatakse germaaniumdioode Д7Ж. Koostame poolperioodalaldi skeemi ilma filtrita (joon.5a). <u>Skeemide koostamisel peame rangelt silmas, et joonistel näidatud germaaniumdioodide asend (—▶|—) ühtiks nendele peale märgituga. Skeemi võib vooluvõrku ühendada alles pärast selle kontrollimist õppejõu poolt!</u> Mõõdame vahelduvpinge U_1 (punktide 3 ja 4 vahel) ja pulseeriva pinge U_2 (punktide 8 ja 9 vahel). Ühendades samade punktidega ostsilloskoobi, fikseerime pingekõvera kuju. Selleks paigutame ost silloskoobi ekraanile läbipaistva paberi. Pingekõvera kuju joonistame ostsilloskoobi ekraani rikkumise ärahoidmiseks ettevaatlikult ning pehme pliiatsiga.



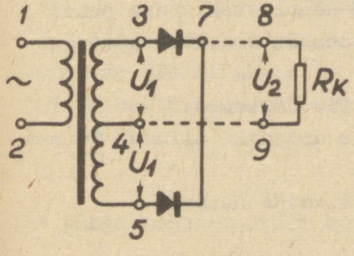
Joon. 5.

b. Lisame eelmisele skeemile kondensaatorfiltri (joon. 5b), mõõdame U_1 ja U_2 ning joonistame pingekõvera.

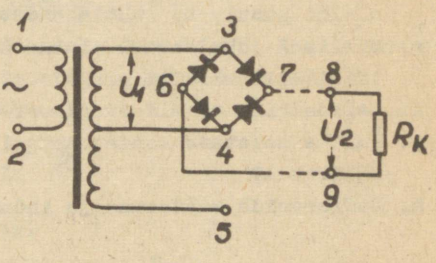
c. Lisame skeemile Π -filtri (joon. 5c) ja kordame eelkirjeldatut.

d. Koostame täisperioodalaldi skeemi (joon. 6) ja teostame sama, mis poolperioodalaldiga.

e. Koostame täisperioodalaldi sildskeemi (joon. 7) ning kordame eeskirjeldatud mõõtmisi.



Joon. 6.



Joon. 7.

f. Mõõtmistulemused paigutame järgmisse tabelisse.

Alaldi tüüp	Filter	U_1	$U_m = U_1\sqrt{2}$	U_2
Poolperiood	ilma filtrita			
- " -	kondensaator			
- " -	Π			
Täisperiood	ilma filtrita			
- " -	kondensaator			
- " -	Π			
Sildskeem	ilma filtrita			
- " -	kondensaator			
- " -	Π			

Protokollile lisame ülesjoonistatud pingekõverad. Tulemuste analüüsi põhjal võrdleme uuritud skeeme.

5. Lisaküsimusi.

a. Millisesse süsteemi kuuluva riistaga võib mõõta nii alalis- kui vahelduvpinget?
b. Millise voltmeetriga tuleb mõõta antud töös pulseerivat pinget?
c. Joonistada pool- ja täisperioodalaldite skeemid kenotronidega.
d. Kas võib pinge U_2 ületada pinget U_1: a) koormatud alaldi puhul, b) lahtiühendatud koormustakistuse puhul?
e. Millisel juhul annab lihtne kondensaatorfilter peaaegu täielikult silutud pinge?
f. Defineerida vahelduvvoolu efektiivväärtused.
g. Kuidas seletada kondensaatori ja drosseli siluvat toimet filtrites?
h. Defineerida mahtuvuse ja induktiivsuse ühikud.

Kirjandus.

1. К. Путилов. Курс физики. Т.П. 1956, стр.157, 510.
2. Н. М. Ливенцев. Курс физики для медиков. 1963, стр.182, 219.
3. Физический практикум. Электричество и оптика. Под ред. В. И. Ивероновой. М., 1968, стр. 189-209.

23. RC-VOOLURINGI UURIMINE.

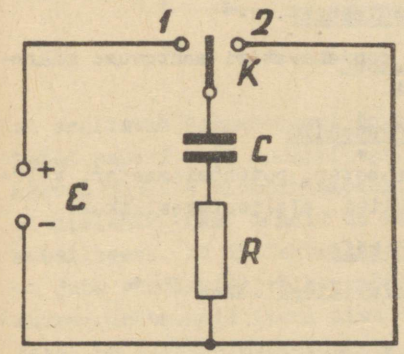
Sissejuhatus.

Kondensaatori C ühendamisel üle takisti R elektromotoorse jõu allikaga E (joon. 1) algab kondensaatori laadumine, kusjuures laadumisvool

$$i = Ie^{-\frac{t}{RC}} \qquad (1)$$

ja pinge kondensaatori katetel

$$u_c = E\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right). \qquad (2)$$



Joon. 1.

Nendes valemites on $I = \frac{E}{R}$ ning t tähistab aega, arvestatult kondensaatori pingestamise momendist [1]. Potentsiaalide vahe-ni U laetud kondensaatori tühjendamisel läbi takisti R (lüliti K viiakse asendist 1 asendisse 2) muutub tühjenemisvool ja pinge katetel järgmiselt:

$$i = Ie^{-\frac{t}{RC}}, \qquad (3)$$

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

$$u_c = Ue^{-\frac{t}{RC}}. \qquad (4)$$

Valemites (3) ja (4) arvestatakse aega t kondensaatori tühjenemise algusest.

Laadumis- ja tühjenemisprotsessi kiirus, nagu nähtub kõikidest ülalesitatud valemitest, sõltub aja dimensiooni omavast korrutisest

$$\tau = RC,$$

mida nimetatakse antud vooluringi ajateguriks ehk relaksatsiooniajaks. Ta on võrdne selle ajavahemikuga, mille jooksul pärast tühjenemise algust voolutugevus, aga samuti pinge kondensaatori katetel väheneb e = 2,71 korda.

Käesoleva töö eesmärgiks on kondensaatori laadumis- ja tühjenemisprotsesside detailne uurimine ja kondensaatori mahtuvuse määramine.

A. KONDENSAATORI APERIOODILINE TÜHJENEMINE.

1. Tööülesanne.

Vooluringi ajateguri ja kondensaatori mahtuvuse määramine tühjenemise kõvera järgi.

2. Töövahendid.

Kondensaator, mikroampermeeter, potentsiomeeter, voltmeeter, takistid, juhtmed, lüliti, alalispingeallikas.

3. Töö käik.

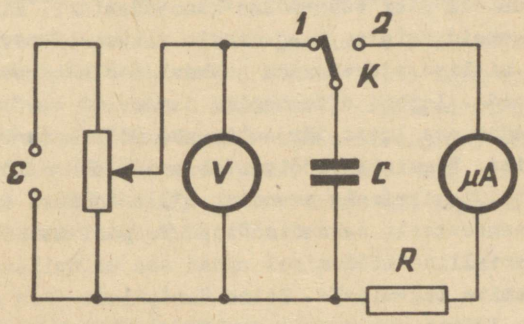
a) Funktsiooni (3) logaritmimisel saame

$$\log i = \log I - 0{,}434\,\frac{t}{RC}. \qquad (5)$$

Leitud tulemus näitab, et seos voolu tugevuse logaritmi ja aja vahel on lineaarne. Graafiliselt kujutab seda sõltuvust sirge tõusuga $-\frac{0{,}434}{RC}$.

Kui võrrandiga (5) määratud sirge on katseandmete põhjal ehitatud, võib arvutada selle tõusu, leida RC ning, teades vooluringi takistust R, määrata kondensaatori mahtuvus C. Takistuse R saab arvutada, kui on mõõdetud kondensaatori esialgne pinge ning voolu tugevus I.

Katsekorralduse elektriline skeem on kujutatud joonisel 2. Vooluringi moodustab alalispingeallikas, kondensaator C, mikroampermeeter μA, voltmeeter V ja lüliti K. Käesolevas töös kasutatakse elektrolüütkondensaatorit. See koosneb tavaliselt kahest õhukesest alumiiniumlindist, mis



Joon. 2.

on eraldatud teineteisest õhukese, elektrolüüdis läbiimmutatud paberi- või marliribaga. Üks alumiiniumlintidest on kaetud õhukese alumiiniumoksiidikihiga. See on kondensaatori dielektrikuks. Lindid on keeratud rulli ning paigutatud metallkesta. Et dielektrilise kihi paksus on väike, siis on juba võrdlemisi väikesemõõtmelistel kondensaatoritel suured mahtuvused (kuni mitu tuhat mikrofaradit). Samal põhjusel on elektrolüütkondensaatori läbilöögipinge suhteliselt madal.

On tähtis teada, et elektrolüütkondensaator võib töötada ainult kindla polaarsusega lülituses. Kondensaatori isoleeritud klemmiga seotud lint, see, millele on kantud alumiiniumoksiidikiht, võib olla ühendatud ainult voolual-

lika plusspoolusega. Teine lint ühendatakse kondensaatori korpusega. See elektrood võib olla ainult negatiivse potentsiaaliga.

b) Koostame vooluringi joon. 2 näidatud skeemi kohaselt. Eriti hoolikalt jälgime kondensaatori õiget lülitust. Pärast seda, kui juhendaja on vooluringi kontrollinud, viime lüliti K asendisse (1). Selles asendis laadub kondensaator. Et vooluahela takistus on väike, toimub laadumine kiiresti. Viies lüliti K asendist (1) asendisse (2), lülitame kondensaatori tühjenemisele. Mikroampermeetri μA abil mõõdame võrdsete ajavahemike järele voolu tugevust.

Voolu tugevuse registreerimine toimub järgmiselt: suleme vooluahela ning tühjendame kondensaatori, mikroampermeetri lugemeid esialgu kirjalikult fikseerimata. Teeme kindlaks, millise ajavahemiku jooksul voolu tugevus väheneb 10 - 15 korda. Leitud ajavahemiku jagame 10 - 20 võrdseks osaks. Saadud osa loeme järjestikuste mõõtmiste vaheliseks intervalliks. Edasistel mõõtmistel annab üks üliõpilastest käsu lüliti üleviimiseks asendist (1) asendisse (2) ning käivitab samaaegselt sekundimõõtja. Eespool mainitud ajaliste intervallide möödumisel annab see üliõpilane teisele märku lugemite tegemiseks. Teine üliõpilane viib esimese käsu peale lüliti K asendisse (2) ning loeb ja märgib üles kõik mikroampermeetri näidud.

Selliselt mõõdame iga takisti või nende kombinatsiooniga vähemalt 3 korda. Uuritavate vooluringide arvu määrab juhendaja. Fikseerime voltmeetri näidu. Kõik katsetulemused kanname tabelitesse, ka aritmeetilised keskmised ja nende logaritmid.

c) Mõõtmistulemuste põhjal ehitame graafikud log i = = f(t). (Abstsissteljele kanname aja ja ordinaatteljele voolu tugevuse logaritmid.) Sirge kujutame võimalikult lähedale kõikidele punktidele. Et voolu tugevust tühjenemise algul vahetult mõõta ei saa, siis määrame selle katselise sirge ja ordinaattelje lõikumise andmetest. Sel teel leitud I ja voltmeetri V näidu abil arvutame takistuse R.

RC leidmiseks määrame eksperimentaalse sirge tõusu. Seda võime teha nii, et sirge abstsisstelje lähedasest punktist A tõmbame horisontaalse sirge lõikumiseni ordinaatteljega punktis B. Lõikepunktist B kanname üles arvu e logaritmile vastava lõigu ning läbi saadud punkti D tõmbame horisontaalse joone DF kuni lõikumiseni sirgega. Punktidest A ja F ehitame vertikaalsirged lõikumiseni abstsisstelje ga. (Punkt F on horisontaali DF ja katseandmetel ehitatud sirge lõikepunkt.) Valemist 2 nähtub, et punktidele A ja F vastav abstsisstelje lõik fa, mõõdetult samas mastaabis kui aeg, ongi arvuliselt võrdne RC-ga.

d) Katsevea suurus sõltub peamiselt sellest, millise täpsusega saab ehitada sirge log i = f(t) läbi eksperimentaalselt leitud punktide. Äärmised võimalikud sirge asendid määravad äärmised I (lõikumine ordinaatteljega) ja RC (kalde suuruse järgi) väärtused. Siit leiame ΔI ja $\Delta(RC)$.

Teades $\Delta(RC)$ ning ΔR (voltmeetri täpsusklass on teada) võib arvutada ΔC.

B. KONDENSAATORI LAADUMIS- JA TÜHJENEMISPROTSESSIDE OSTSILLOGRAFEERIMINE.

1. Tööülesanne.

Kondensaatori pinge ja laadumis- ning tühjenemisvoolu ostsillografeerimine, vooluringi ajateguri ning kondensaatori mahtuvuse määramine.

2. Töövahendid.

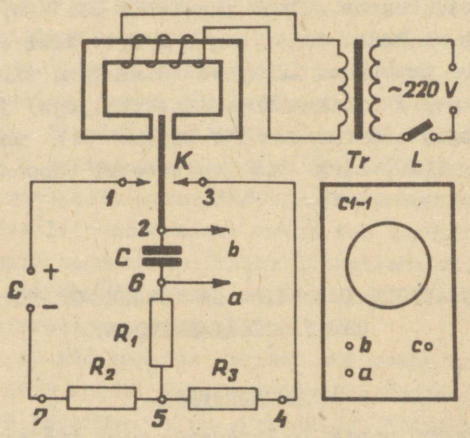
Kondensaator, 3 takistussalve, polariseeritud relee, alalispinge allikas, elektronostsilloskoop, juhtmeid.

3. Töö käik.

I. Katsekorralduse elektriline skeem on esitatud joonisel 3. Üle lüliti L ja transformaatori Tr võrgupingega toidetav polariseeritud relee õhuvahemikus tekkiva mag-

netvälja mõjul sulgub keelekese K abil toitepinge sagedusega relee vasak- ja parempoolne kontakt. Keelekese vasakpoolses asendis kondensaator C laadub, parempoolses aga tühjeneb.

Antud mahtuvusega kondensaatori laadumise ja tühjenemise kiirus sõltub takistussalvedest R_1, R_2 ja R_3 valitud takistustest. Kondensaatori pinge ostsillografeerimiseks tuleb ostsilloskoobi Y-sisendiga ühendada klemmid 2 ja 6. See juht vastab joonisel 3 esitatule. Laadumis- või tühjenemisvoolu ostsillografeerimiseks tuleb Y-sisendisse juhtida aga pinge takistussalvedelt R_1, R_2 või R_3 (miks?).

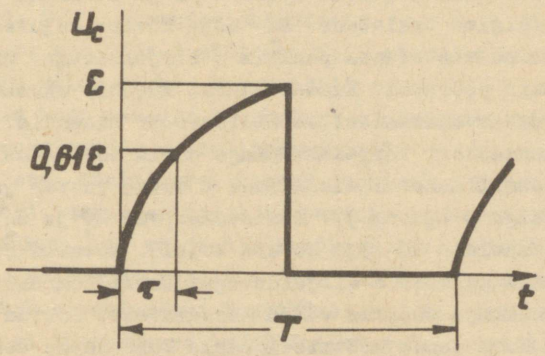


Joon. 3.

Pinge ostsillogramm takistuste R_1 ja R_3 võrdumisel nulliga vastab joonisele 4. Ostsillogrammi töötlemiseks tuleb kaliibrida ajatelg. See on arusaadav jooniselt 4, kus täistsükli pikkusele vastab võrgupinge periood T. Valemist (2) järgneb, et vooluringi ajategur $\tau = RC$ on arvuliselt võrdne ka selle ajavahemikuga, mille jooksul kondensaator jõuab laaduda pingeni $u_c = (1 - \frac{1}{e})E \approx 0{,}61\ E$.

Ajateguri määramise käik võib olla seega järgmine:

valinud takistussalvest R_2 küllalt väikese (miks?) takistuse, määratakse suhtelistes ühikutes E. Seejärel valitakse samast salvest niisugune takistus, mille puhul eksponentsiaalfunktsioon ostsillogrammil on hästi väljendatud ja kaugusel 0,61 E ühikut ajateljest tõmmatakse viimasega paralleelne sirge. Sirge lõikepunkti ostsillogrammiga lubab kaliibritud ajateljelt määrata τ (joon. 4) ja arvutada C.



Joon. 4.

II. Vaatlusi tehakse järgmiselt.

a) Koostame vooluringi vastavalt joonisele 3 ja ühendame klemmid 2 ja 6 ostsilloskoobi Y-sisendiga b ja a. Salvede R_1 ja R_3 takistused lühistame, salvest R_2 valime takistuse ca 1000 oomi.

b) Lülitame sisse ostsilloskoobi kallutuspinge generaatori ning pärast juhendajalt loa saamist lülitame vooluvõrku relee. Muutes ostsilloskoobi sisendite võimendust ja kallutuspinge sagedust püüame ekraanil saada sobiva suurusega (2/3 ekraani läbimõõdust) paigal seisva pingekõvera ühe täistsükli ulatuses.

c) Takistuse R_2 muutmisel jälgime selle mõju pingekõverale. Kõverad fotografeerime või kalkeerime vähemalt viie erineva sobivalt valitud takistuse R_2 korral. Kujutisi on otstarbekas kalkeerida ühele ja samale paberile,

viies eelnevalt kokku ajateljed ja tsüklite algused.

d) Vastavuses ülalkirjeldatuga arvutame ajateguri, kondensaatori mahtuvuse, nende aritmeetilised keskmised ja vead. Mõõtmis- ja arvutustulemused koondame sobivalt lahterdatud tabelisse.

Muutmata vooluringi parameetreid ($R_1 = 0$, $R_3 = 0$) vaatleme laadimisvoolu kõveraid. Selleks võtame lahti ostsilloskoobi sisendisse viiva juhtme klemmilt 2 ja ühendame ta klemmiga 7. Jälgime takistuse R_2 mõju kõvera kujule. Kujutised fikseerime vastavuses punktis c kirjeldatuga. Miks on ostsillogrammid pööratud? Kuidas muutub kujutis ekraanil juhtmeotste ümbervahetamisel ostsilloskoobi sisendis?

e) Kondensaatori tühjenemispinge uurimiseks eemaldame klemmilt 7 ostsilloskoobi sisendisse b viiva juhtme ja ühendame ta klemmiga 2 (joon. 3). Takistussalved R_1 ja R_2 olgu lühistatud. Vaatleme R_3 mõju kõvera kujule. Kõverad fikseerime vastavuses punktis c kirjeldatuga. Ostsillogrammide töötlemise eeskirja töötame välja iseseisvalt. Leitud τ ja C väärtused koos nende mõõtmisvigadega korraldame sobivasse tabelisse.

g) Tühjenemisvoolu ostsillografeerimiseks ühendame lahti ostsilloskoobi sisendisse viiva juhtme klemmilt 2 ja kinnitame selle klemmile 4. Vaatlusi teeme nii nagu punktis e, välja arvatud see, et nüüd on muutuvaks suuruseks R_3 ($R_1 = 0$, $R_2 = 0$).

h) Kondensaatori laadumis- ja tühjenemispinge üheaegseks ostsillografeerimiseks ühendame ostsilloskoobi sisendisse viiva juhtme klemmilt 4 klemmiga 2. R_2 ja R_3 olgu o. Muutes takistust R_1 jälgime selle mõju kõvera kujule. Sobivalt valitud viie erineva R_1 korral fikseerime kõverad vastavuses punktis c kirjeldatuga. Kõveraid töötleme nii nagu punktis d ja f. Visuaalselt jälgime kõvera kuju sõltuvust takistustest R_2 ja R_3. Määrame ajavahemiku, mille jooksul relee keeleke k liigub klemmide 1 ja 3 vahel.

i) Laadumis- ja tühjenemisvoolu üheaegseks ostsillografeerimiseks ühendame ostsilloskoobi sisendisse viiva juhtme

klemmilt 2 klemmiga 5. Esialgu olgu R_2 ja R_3 null. Kõverad fikseerime viie erineva takistuse R_1 juures. Selleks et kindlaks teha, kumb kõveratest vastab kondensaatori laadumisele, kumb tühjenemisele, muudame takistusi R_2 või R_3.

Lisaülesandeid.

1. Millist voolu nimetatakse kvaasistatsionaarseks?
2. Koostada RC ahela diferentsiaalvõrrandid ja leida valemid 1, 2, 3, 4 nende lahenditena.
3. Miks ei saa töös A mõõta voolu I otseselt mikroampermeetri näidu järgi algmomendil?
4. Kuidas saab määrata vooluringi ajategurit laadumis- või tühjenemisvoolu ostsillogrammidelt?
5. Millistel tingimustel kasvab joonisel 1 kujutatud kondensaatori laadumispinge ajas peaaegu lineaarselt?
6. Graafikut, mis väljendab kondensaatori katetel oleva pinge sõltuvust laadumis- või tühjenemisvoolust, nimetatakse vooluringi faasikõveraks. Milline on RC vooluringi faasikõvera kuju? Kuidas seda ostsillografeerida?

Kirjandus.

1. С. Г. Калашников. Электричество. 1964, стр. 170.

24. RELAKSATSIOONVÕNKUMISTE UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Relaksatsioonvõnkumiste saamine ja uurimine neoonlampi sisalda.. RC-vooluringi abil.

2. Töövahendid.

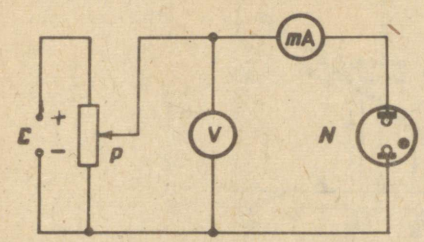
Kondensaatorid, takistid, neoonlamp, alalispingeallikas, potentsiomeeter, ostsilloskoop, heligeneraator, milliampermeeter, voltmeeter, sekundimõõtja, fotoaparaat, juhtmeid.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Kondensaatori aperioodiline tühjenemine läbi takisti on aperioodiline protsess, kuid selle võib muuta perioodiliseks taastades kindlate ajavahemike järel laengu kondensaatori katetel (vt. eelmist tööd). Tekkinud võnkumised osutuvad kahe aperioodilise protsessi - kondensaatori laadumise ja tühjenemise tulemuseks ning neid nimetatakse relaksatsioonvõnkumisteks.

Käesolevas töös kasutatakse mehhaanilise ümberlüliti asemel suhteliselt väikese inertsiga neoonlampi. Skeem neoonlambi parameetrite määramiseks on esitatud joonisel 1. Muutes neoonlambile N rakendatud pinget, muutub neoonlampi läbiva voolu tugevus. Neoonlambi voltamper tunnusjoon on esitatud joonisel 2. Jooniselt on näha, et väikestel pingetel märgatav vool läbi neoonlambi puudub. Pingel U_s neoonlamp süttib ning voolu tugevus kasvab hüppeliselt väärtuseni I_s. Pinge edasisel suurenemisel voolu tugevus kas-

vab. Kui hakata pinget vähendama, väheneb ka vool, kuid piki teist sirget (joon. 2), ja lakkab alles siis, kui on saavutatud kustumispinge $U_k < U_s$. Tänu neoonlambi süttimis- ja kustumispingete erinevusele ongi teda võimalik kasutada relaksatsioonvõnkumiste generaatoris. Ülesande lihtsustamiseks võib neoonlambi reaalse tunnusjoone joonisel 2 asendada idealiseerituga (joon. 3). Matemaatiliselt kirjeldab idealiseeritud tunnusjoont võrrand

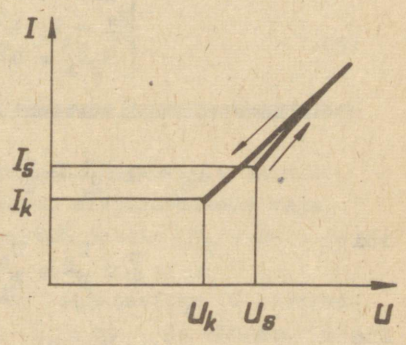


Joon. 1.

$$U = U_0 + R_i I_2 \quad \text{või}$$

$$I_2 = \frac{U - U_0}{R_i}, \qquad (1)$$

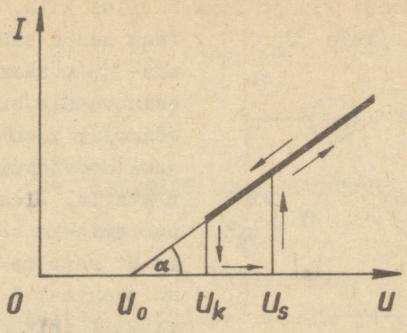
kus $R_i = \operatorname{ctg} \alpha$ - neoonlambi diferentsiaalne takistus ja I_2 - neoonlampi läbiva voolu tugevus. Siinjuures tuleb arvestada seda, et R_i on pinge U mittepidev funktsioon. Pinge kasvamisel on $R_i = \infty$ pingete intervallis $0-U_s$,



Joon. 2.

sellest suurematel pingetel on ta aga lõpliku väärtusega konstant. Pinge vähendamisel R_i = const. kuni $U = U_k$, sellest väiksematel väärtustel muutub aga lõpmatult suureks.

Relaksatsioonvõnkumiste generaatori lihtsaimat skeemi tutvustab joonis 4. Sulgenud lüliti K võib Kirchhoffi seaduste ja võrrandi (1) põhjal kirjutada



Joon. 3.

$$\begin{cases} IR + U = U_p \\ I = I_1 + I_2 \\ I_2 R_i = U - U_o . \end{cases}$$

Sellest võrrandisüsteemist järgneb

$$I_1 + U\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R}\right) = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_i} ,$$

või

$$I_1 + \frac{U}{r} = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_i} , \qquad (2)$$

kus

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R} . \qquad (3)$$

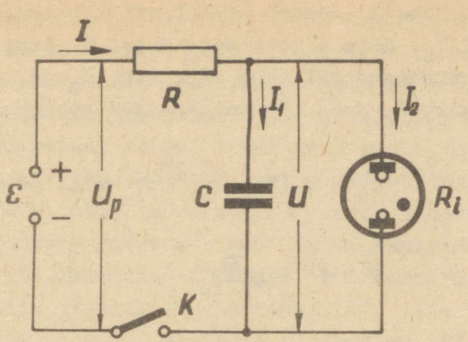
Et

$$CU = Q \quad \text{ja} \quad \frac{dQ}{dt} = I_1 ,$$

siis

$$C\frac{dU}{dt} + \frac{U}{r} = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_i} . \qquad (4)$$

Viimane diferentsiaalvõrrand koos algtingimustega kirjeldab skeemis toimuvaid protsesse. Tähelepanu tuleb siinjuures pöörata funktsiooni R_i ülalkirjeldatud mit-



Joon. 4.

tepidevusele.

Võrrandi (4) lahendiks on

$$\frac{U}{r} = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_i} + Ae^{-\frac{t}{RC}}, \qquad (5)$$

kus A on algtingimustega määratav integreerimiskonstant.

Et võrrandi lahendis esineb hüppeliselt muutuv konstant R_i, siis on protsessi kirjeldamiseks vaja kaht võrrandit - üks, mis vastab juhule $R_i = \infty$ ja teine - juhule $R_i = \text{const}$.

Lüliti K sulgemisel on kondensaator C laadimata, neoonlamp ei põle, s.t. $R_i = \infty$ ja võrrand (5), võttes arvesse valemit (3), võtab kuju

$$U = U_p + RAe^{-\frac{t}{RC}}. \qquad (6)$$

Et algmomendil $t = 0$ on $U = 0$, siis

$$A = -\frac{U_p}{R}, \quad \text{järelikult}$$

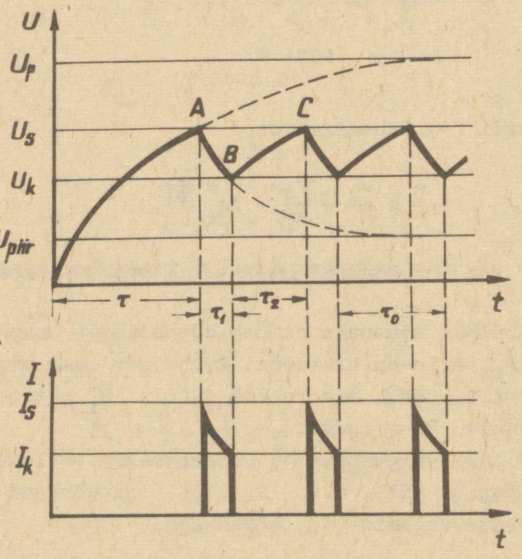
$$U = U_p(1 - e^{-\frac{t}{RC}}).$$

Viimasest valemist on näha, et pinge kondensaato-

ri katetel kasvab ja läheneb asümptootiliselt väärtusele U_p. Kui $U_s < U_p$, siis teatud momendil τ lamp süttib, kuna pinge kondensaatoril saab võrdseks U_s-ga. Selleks vajalik aeg (punkt A, joon. 5) on määratud seosega

$$U_s = U_p(1 - e^{-\frac{\tau}{RC}}), \quad \text{millest}$$

$$\tau = RC \ln \frac{U_p}{U_p - U_s} . \qquad (7)$$



Joon. 5.

Lambi süttimisel R_i väheneb hüppeliselt lõpliku väärtuseni. Selleks et määrata süsteemi edasist käitumist, tuleb võrrandit (5) analüüsida R_i lõpliku väärtuse korral koos algtingimustega ajahetkel τ. Kui ajahetkel τ muutub lõpmatult suur R_i lõpliku väärtuseni R_i = const., kasvab hüppeliselt ka voolu tugevus, saavutades kohe lõpliku väärtuse I_s. Tegelikult on igal vooluringil

teatud induktiivsus, mistõttu voolu tugevus muutub küll kiiresti, kuid siiski lõpliku kiirusega. Seega tuleb arvestada, et süsteemi energia muutub pidevalt - vastasel korral vastaksid energia momentaansetele muutustele lõplike suuruste võrra lõpmatult suured võimsused. Antud vooluringis salvestub energia kondensaatorisse C. Et kondensaatori energia on $\frac{1}{2} CU^2$, siis järelikult ka pinge kondensaatori katetel peab muutuma pidevalt, s.t. jääma muutumatuks voolu I_2 tekkimise või lakkamise momendil. Et neoonlamp süttib pingel U_s, siis järelikult ajahetkel τ $U = U_s$. Seega, kui $t_1 = 0$, siis $U = U_s$, mistõttu võrrandist (5)

$$A = \frac{U_s}{r} - \left(\frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_1} \right). \qquad (8)$$

Võrrand (5) saab nüüd kuju

$$\frac{U}{r} = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_1} + \left(\frac{U_s}{r} - \frac{U_o}{R_1} - \frac{U_p}{R} \right) e^{-\frac{t_1}{rC}}, \qquad (9)$$

milles $t_1 = t - \tau$.

Võrrandist (9) järgneb, et pinge U kondensaatori katetel läheneb asümptootiliselt teatud piirväärtusele

$$U_{piir} = r \left(\frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_1} \right). \qquad (10)$$

Kui $U_{piir} < U_k$, siis pinge kondensaatoril väheneb ja saab paratamatult võrdseks U_k-ga (punkt B joonisel 5). Sellel hetkel lamp kustub, kondensaator hakkab uuesti laaduma ja pingel U_s süttib teistkordselt (punkt C joonisel 5). Kirjeldatud protsess kordub perioodiliselt.

Võnkumiste tekketingimusi võib anda kujul

$$U_{piir} < U_k < U_s < U_p.$$

Võrrandist (10) ja viimati kirjutatud seosest järgneb

$$\frac{U_p - U_k}{R} \leqslant \frac{U_k - U_o}{R_i} . \qquad (11)$$

Võrratuse (11) parempoolne liige sõltub ainult neoonlambi omadustest samal ajal kui vasak pool sõltub ka takistusest R ja pingest U_p. Võrratusest (11) järgneb, et võnkumiste tekkimiseks antud pingel U_p peab R olema suurem teatud väärtusest, ning samuti, antud R korral peab U_p olema väiksem teatud väärtusest (loomulikult mitte väiksem kui U_s). Võrratuse (11) füüsikaline mõte peaks olema selge. Selle parempoolne liige määrab voolutugevuse läbi neoonlambi juhul, kui pinge tema klemmidel on U_k /vt. võrrandit (1) /. See on väikseim vool, mille puhul lamp veel põleb. Võrratuse (11) vasakpoolne liige määrab voolu, mis siseneb patareist RC-vooluringi siis, kui pinge kondensaatori katetel on U_k (vt. ülaltoodud võrrandisüsteemi). On mõistetav, et siis, kui viimane vool on väiksem kui esimene, osa lampi läbivast laengust annab kondensaator, mistõttu pinge tema katetel väheneb ja lamp kustub. See aga ongi vajalik võnkumiste tekkimiseks.

Kondensaator tühjeneb seni, kuni pinge tema katetel saab võrdseks U_k-ga. Tühjenemise aeg τ_1 on määratud seega võrrandiga

$$\frac{U_k}{r} = \frac{U_p}{R} + \frac{U_o}{R_i} + \left(\frac{U_s}{r} - \frac{U_o}{R_i} - \frac{U_p}{R} \right) e^{-\frac{\tau_1}{RC}}, \qquad (12)$$

millest

$$\tau_1 = rC \ln \frac{(U_s-U_o)R - (U_p-U_s)R_i}{(U_k-U_o)R - (U_p-U_k)R_i} . \qquad (13)$$

Pärast neoonlambi kustumist algab jälle kondensaatori laadumine, mille määrab nii nagu varemgi võrrand

$$U = U_p - Ae^{-\frac{t_2}{RC}},$$

kus $t_2 = t - (\tau + \tau_1)$.

Võrreldes esmakordse laadumisega on protsessi algtingimused erinevad. Tuginedes arutelule, mis on analoogiline lambi süttimise puhul tooduga, võib väita, et pinge kondensaatori katetel hüppeliselt ei muutu. Seega korduva laadumise puhul on algtingimuseks $t_2 = 0$ ja $U = U_k$. Järelikult $A = (U_p - U_k)$ ja

$$U = U_p - (U_p - U_k)\, e^{-\frac{t_2}{RC}}. \qquad (14)$$

Et laadumine kestab kuni pinge kondensaatori katetel ei ole omandanud väärtust U_s, siis on laadumisaeg määratud seosega

$$U_s = U_p - (U_p - U_k)\, e^{-\frac{\tau_2}{RC}},$$

millest

$$\tau_2 = RC \ln \frac{U_p - U_k}{U_p - U_s}. \qquad (15)$$

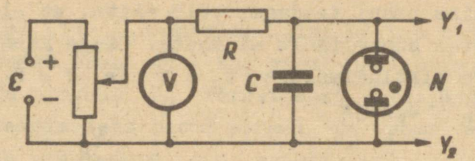
Ülalkirjeldatuga on välja selgitatud võnkumiste tekkimise tingimused /võrratus (11) /, nende periood $\tau_0 = \tau_1 + \tau_2$ /seosed (13) ja (15) / ja amplituud (määratud U_s ja U_k-ga). Ka võnkumiste kuju on üldjoontes määratletud. Voolu graafik nagu näha jooniselt 5 on katkendlik, pinge graafik on pidev - teatud punktides on katkev vaid selle tuletis.

4. Töö käik.

Neoonlambi tunnusjoone määramiseks koostame vooluringi vastavalt joonisele 1. Voolu tugevusi fikseerime vähemalt kümnel erineval pingel nii pinget suurendades kui ka vähendades. Eriti tähelepanelikult püüame määrata neoonlambi süttimis- ja kustumispinge. Mõõtmistulemused koondame tabelisse ja joonestame graafiku. Graafiku abil leiame U_s, U_k, I_s, I_k, R_i ja U_o.

Võnkumiste ülalkirjeldatud tekketingimuse kontrollimiseks ja nende perioodi määramiseks koostame vooluringi

nii nagu näidatud joonisel 6.



Joon. 6.

Võnkumiste jälgimiseks ostsilloskoobi ekraanil peavad nad olema küllalt suure sagedusega. Selleks valime võimalikult väikese RC, kuid niisuguse R, et võnkumiste tekketingimus (11) oleks täidetud. Saanud juhendajalt loa vooluringi pingestamiseks, valime potentsiomeetri abil sobiva pinge ning jälgime ostsilloskoobi ekraanil võnkumiste ajalist laotust. Muudame pinget ja jälgime selle mõju graafiku kujule. Iseloomulikumad graafikud fotografeerime või kalkeerime. Edasi asume võnkumiste perioodi määramisele. Seda saab teha otse ostsilloskoobi ekraanilt, kui eelnevalt kaliibrida näiteks võrgu- või helisagedusliku pinge abil kiire laotus piki X-telge. Täpsemalt saab võnkumiste perioodi määrata Lissajous' kujundite abil. Selleks juhime pinge võnkeringi kondensaatorilt endiselt ostsilloskoobi Y-sisendisse, lülitame välja ostsilloskoobi hammaspinge generaatori ja X-sisendi ühendame heligeneraatoriga. Olgugi et ostsilloskoobi ekraanil tekkinud Lissajous' kujundid on "moonutatud", saab nende abil hõlpsasti määrata sagedust. Eriti sobiv on seda teha valides heligeneraatori sageduse võrdseks relaksatsioonvõnkumiste sagedusega. Mõõdame antud RC jaoks vähemalt kümnel erineval pingel, alates võnkumiste ilmumisest kuni nende lakkamiseni. Analoogiliselt määrame relaksatsioonvõnkumiste perioodi veel vähemalt nelja erineva RC jaoks (kokku 5 mõõtmisseeriat). Juhul kui võnkumiste periood on liiga suur, et seda määrata ostsilloskoobi ja heligeneraatori abil, teeme seda visuaalselt luge-

des näiteks 20 täisvõnkeks kulunud aja.

Lõpuks kasutame uuritavat generaatorit ostsilloskoobi hammaspinge generaatorina. Selleks lülitame välja ostsilloskoopi monteeritud hammaspinge generaatori ja ühendame X-sisendiga neoonlambi klemmid. Ostsilloskoobi Y-sisendisse anname pinge heligeneraatorist. Tekkinud kujundi fotografeerime või kalkeerime erinevatel U_p väärtustel ja anname selgituse esinevatele moonutustele.

Kõik mõõtmis- ja arvutustulemused koondame sobivalt lahterdatud tabelitesse ning joonestame graafikud $\tau_o = f(U_p)$. Graafikult leiame maksimaalse pinge $U_{p(max)}$, mille puhul võnkumised veel esinevad. Arvutame $a = \frac{U_{p(max)} - U_k}{R}$, mis vastavalt seosele (11) peab olema ühesugune kõikide takistuste puhul. Arvutame U_o seosest

$$a = \frac{U_k - U_o}{R_1}$$

ja võrdleme seda graafikult määratuga. Vähemalt ühe kõvera korral kontrollime, millisel määral ta ühtib valemite (13) ja (15) põhjal konstrueerituga.

Kvalitatiivselt analüüsime kondensaatori laadumis- ja tühjenemisaegade suhte $\frac{\tau_2}{\tau_1}$ sõltuvust pingest U_p. Selleks kasutame graafikut joon. 5, arvestades seejuures võrrandit (10) ning oma tähelepanekuid eksperimendi sooritamisel.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a) Voolu piiramiseks läbi neoonlambi on temaga järjestikku ühendatud takisti. Arvestades takistuse suurust joonestada takistita neoonlambi tunnusjoon ning arvutada lambi diferentsiaalne takistus.
b) Kirjeldage relaksatsioonvõnkumiste kasutamisvõimalusi.
c) Millised eelised on türatroni sisaldaval relaksatsioonvõnkumiste generaatoril võrreldes ülalkirjeldatuga?

d) Milline peab olema laotuspinge ostsilloskoobis? Kuidas seda saada?

e) Kirjeldage mõnda elektriliste relaksatsioonvõnkumiste mehhaanilist analoogi.

Kirjandus.

I. С. Г. Калашников. Электричество. М., 1964, стр.170 и 538.

2. Физический практикум. Под ред. проф. В. И. Ивероновой. М., 1962, стр. 490 и 509.

25. VABADE ELEKTROMAGNETILISTE VÕNKUMISTE UURIMINE HELMHOLTZI MEETODIL.

1. Tööülesanne.

Vabade võnkumiste perioodi, sumbuvuse logaritmilise dekremendi ja kriitilise takistuse määramine.

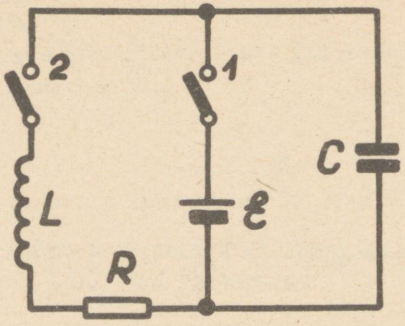
2. Töövahendid.

Helmholtzi pendel, ballistiline galvanomeeter, akuelement, induktiivpool, kondensaatorite patarei, takistussalv, oommeeter, sekundimõõtja, joonlaud, lüliti, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

On kerge näidata, et laetud kondensaatori tühjenemine võib teatud tingimustes toimuda perioodilise seaduse kohaselt. Räägitakse, et vooluringis leiavad aset vabad elektromagnetilised võnkumised - perioodiliselt muutuvad elektri- ja magnetvälja kui ka voolu iseloomustavad suurused. Olgu vooluring koostatud joonisel 1 kujutatud skeemi järgi. Lüliti 1 sulgemisel kondensaator C laadub. Pärast lüliti 1 avamist ning 2 sulgemist algab kondensaatori tühjenemine. Lugedes voolu kondensaatorit C, induktiivpooli L ja takistit R sisaldavas vooluringis kvaasistatsionaarseks võib Kirchhoffi II reegli põhjal kirjutada

$$u_c + iR = E_{oma'}$$



Joon. 1.

kus u_c tähistab pinget kondensaatori katetel mingil ajamomendil t,

i ja E_{oma} - voolu tugevust ning omainduktsiooni emj samal momendil.

Kuna $u_c = \frac{q}{C}$, kus q on kondensaatori laeng ja

$$E_{oma} = -L \frac{di}{dt} = -L\ddot{q},$$

siis

$$\ddot{q} + \frac{R}{L}\dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0. \qquad (1)$$

Saadud diferentsiaalvõrrandi lahendamiseks on mugav tähistada

$$\frac{R}{L} = 2\beta \quad \text{ja} \quad \frac{1}{LC} = \omega_o^2$$

ning võtta kasutusele uus muutuja z

$$z = q\, e^{\beta t}.$$

Pärast vajalikke teisendusi võtab võrrand (1) kuju

$$\ddot{z} + (\omega_o^2 - \beta^2)\, z = 0. \qquad (2)$$

Kui vooluringi konstandid on sellised, et $\omega_0^2 \gg \beta^2$, võib tähistada $\omega_0^2 - \beta^2 = \omega^2$, kus ω on positiine arv, mistõttu

$$\ddot{z} = -\omega^2 z. \qquad (3)$$

Proovimise teel on kerge veenduda, et viimast võrrandit rahuldab funktsioon

$$z = a \sin (\omega t + \varphi). \qquad (4)$$

Seega, kondensaatori kattel ajamomendil t olev laeng

$$q = ae^{-\beta t} \sin (\omega t + \varphi), \qquad (5)$$

s.t. muutub perioodiliselt. a ja φ on algtingimustest määratavad konstandid; nurksagedus ja võnkumiste periood sõltuvad ainult kontuuri omadustest:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \qquad (6)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \qquad (6a)$$

Üldisel juhul kirjeldab funktsioon (5) sumbuvaid võnkumisi. Sumbumise kiirust iseloomustatakse sumbuvuse logaritmilise dekremendiga δ, mis defineeritakse kui kahe samapoolse naaberamplituudi suhte naturaallogaritm :

$$\delta = \ln \frac{q_t}{q_{t+T}} = \beta T = \frac{R}{2L} T.$$

Sumbuvuse logaritmiline dekrement on võrdne nende täisvõngete arvu pöördarvuga, millede möödumisel võnkumiste amplituud väheneb e korda. Tõepoolest, kulugu viimaseks ajavahemik t_1. Sumbuvate võnkumiste amplituud momendil t valemi (5) järgi

$$q_t = a\, e^{-\beta t}$$

ja t_1 võrra hiljem

$$q_{t+t_1} = a\, e^{-\beta(t+t_1)}.$$

Viimastest seostest

$$\frac{q_t}{q_{t+t_1}} = e^{\beta t_1}.$$

Teisalt

$$\frac{q_t}{q_{t+t_1}} = e, \qquad \text{mistõttu} \quad \beta t_1 = 1.$$

Kuna $\delta = \beta T$, siis $\frac{T}{t_1} = \frac{1}{N} = \delta$,

kus N on täisvõngete arv t_1 jooksul.

Sageli iseloomustatakse kontuuri hüveteguriga $Q = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}$. Sellest järgneb, et

$$\delta = \frac{\pi}{\sqrt{Q^2 - \frac{1}{4}}}.$$

Kui kontuuri takistus R on null, siis $\beta = 0$ ja võnkumiste amplituud jääb konstantseks. Viimaste, nn. omavõnkumiste periood ja sagedus, nagu kerge näha, arvutatakse valemitest

$$T_0 = 2\pi\sqrt{LC} \quad \text{ja} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Kui $\frac{R^2}{4L^2} \gg \frac{1}{LC}$, toimub kondensaatori tühjenemine aperioodilise seaduse kohaselt. Kriitiline takistus

$$R_{kr} = 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Kondensaatori laengu perioodiline muutus tingib tema katetevahelise pinge või voolutugevuse perioodilise muutuse. Tõepoolest,

$$u_c = \frac{q}{C} = \frac{ae^{-\beta t}}{C} \sin(\omega t + \varphi) \qquad (7)$$

ja

$$i = \dot{q} = ae^{-\beta t}\left[-\beta \sin(\omega t + \varphi) + \omega \cos(\omega t + \varphi)\right] \qquad (8)$$

q, u_c või i arvutamiseks tuleb määrata konstandid a ja φ. Arvestatagu aega vooluringi sulgemise momendist. Seega, kui $t = 0$, siis $q = q_0$ ja $i = 0$. Valemitest (5) ja (8)

$$\begin{cases} q_0 = a \sin \varphi \\ \omega \cos \varphi = \beta \sin \varphi , \end{cases}$$

millest

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{\frac{4L}{R^2C} - 1} \quad \text{ja} \quad a = \frac{q_0}{\sqrt{1 - \frac{R^2C}{4L}}}.$$

Omavõnkumiste korral

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \quad \text{ja} \quad a = q_0, \quad \text{mistõttu}$$

$$(9) \quad \begin{cases} q = q_0 \cos \omega_0 t \\ u_c = \frac{q_0}{C} \cos \omega_0 t = U_c \cos \omega_0 t \\ i = q_0 \omega_0 \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_c \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}), \end{cases}$$

kus

$$I_c = \frac{q_0}{\sqrt{LC}} = \frac{U_c}{\sqrt{\frac{L}{C}}} .$$

Viimased valemid näitavad, et voolutugevuse ja pinge vahel on $\frac{\pi}{2}$ suurune faasinihe ning voolutugevuse ampli-

tuudväärtus arvutatakse Ohmi seadust meenutavast valemist. Suurust $\sqrt{\frac{L}{C}}$, mille dimensioon ühtib takistuse dimensiooniga, nimetatakse kontuuri lainetakistuseks.

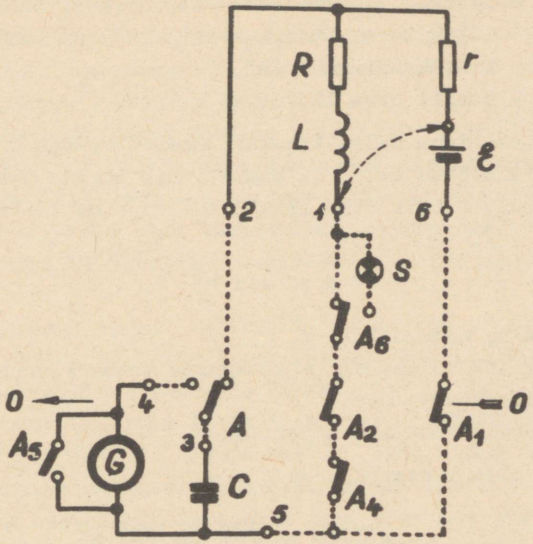
Real juhtudel on otstarbekohane võnkeprotsessi kirjeldada sõltuvuse $u_c = f(i)$ kaudu. Viimast sõltuvust väljendavat kõverat nimetatakse faasikõveraks. Sumbuvuse puudumisel on faasikõveraks ellips. Selles on kerge veenduda elimineerides võrrandites (9) aja. Sumbuvuse korral võnkumiste amplituud väheneb ning faasikõveraks on spiraal.

4. Töö käik.

Vabade elektromagnetiliste võnkumiste katselisel uurimisel on vaja pidevalt mõõta kondensaatori katetevahelist pinget või selle laengut. Tavalisel viisil, tavaliste magnetelektriliste riistadega see teostatav harilikult ei ole - võnkumiste küllalt väikese perioodi juures piirab riistade inerts. Tekkinud raskusi võib teatud piirides ületada, kui kasutada järgmist võtet.

Olgu võnkeringi ühendatud kondensaatorile ajamomendil $t = 0$ antud laeng q_0. Aja Δt_1 möödumisel, arvestades võnkeprotsessi algusest, lülitame kondensaatori välja ning mõõdame kondensaatori laengu. Anname kondensaatorile uuesti laengu q_0, lülitame ta võnkekontuuri ning $\Delta t_2 > \Delta t_1$ möödumisel sellest välja. Ajavahemikke Δt_i pidevalt suurendades saamegi kondensaatori plaadil oleva laengu sõltuvuse ajast.

Katsekorralduse täielik elektriline skeem on esitatud joonisel 2. Joonisel kujutatud lülitite asendite juures pingeallikka E poolt tekitatud vool kulgeb läbi takistite r ja R ning pooli L, kusjuures kondensaator C laadub pingeni U_c. Pärast lüliti A_1 avamist algab kondensaatori C tühjenemine läbi R ja L ning kestab seni, kuni avatakse lüliti A_2. Lüliti A ümberlülitamisel ühendatakse kondensaator ballistilise galvanomeetriga ning mõõdetakse selle laeng. Takisti r on voolu piiramiseks, kuna R - võnkumiste sumbuvuse muutmiseks. Arvestada tuleb



Joon. 2.

viimase juures ka pooli oomilist takistust.

Lülitid A, A_1, A_2, A_4 ja A_6 on monteeritud horisontaalsele lauakesele, kusjuures lülitite A_1 ja A_2 avamine ning A ümberlülitamine toimub raske vertikaaltasandis liikuva pendli abil. Pendli liikumise suunda näitab nool O O. Kondensaatori tühjenemisaja pikkust saab muuta lülitite A_1 ja A_2 vahelise kauguse muutmise teel, mida tehakse kruvikaliibri abil. Lüliti A_5 on galvanomeetri liikuva süsteemi võnkumiste summutamiseks - selle sulgeme siis, kui valgusindeks läbib tasakaaluasendit. Punktiiriga kujutatud ühendused on montaažlaual eelnevalt olemas.

Kuna lülitite A_1 ja A_2 vaheline kaugus on suhteliselt väike, siis võib pendli liikumist vaadeldavas piirkonnas lugeda ühtlaseks, mistõttu

$$\Delta t_i = \frac{d}{v_1} ,$$

kus Δt_i on ajavahemik, mille jooksul pendel katab oma liikumisel teepikkuse lülitist A_1 lülitini A_2,

d - lülitite A_1 ja A_2 vaheline kaugus (mõõdetud kruvikaliibri abil),

v_1 - pendli otsa liikumise kiirus.

Pendli esialgne hälve tasakaaluasendi suhtes ei ole eriti suur, mistõttu selle liikumist võib lugeda peaaegu harmooniliseks. Pendli otsa liikumisvõrrand on seega

$$x = x_0 \sin \frac{2\pi}{\tau} t,$$

kus x on hälve momendil t,

x_0 - amplituud (pendli otsa kaugus tasakaaluasendist kinnituskohani),

τ - pendli võnkumiste periood.

Pendli otsa lineaarkiirus

$$v = \frac{dx}{dt} = x_0 \frac{2\pi}{\tau} \cos \frac{2\pi}{\tau} t.$$

Tasakaaluasendi lähedal

$$v_1 \simeq \frac{2\pi}{\tau} x_0,$$

mistõttu kondensaatori tühjenemisaeg

$$\Delta t_i = \frac{\tau}{2\pi x_0} d.$$

Enne mõõtmiste juurde asumist tutvume hoolikalt montaažlaua, lülitite A, A_1, A_2, pendli ja selle lukustusmehhanismi konstruktsiooniga. Eriti tähtis on veenduda nimetatud lülitite kontaktkruvide liikumatuses ning hea kontakti olemasolus. Kontaktide kvaliteeti kontrollime oommeetri abil. Galvanomeetri kahjustamise vältimiseks olgu lüliti A_5 seejuures suletud ning ümberlüliti A vasakpoolses asendis (joon. 2). Halva kontakti puhul puhastame lülitite vastavaid kokkupuutekohti piirituse või atsetooniga. Galvanomeet-

ri korrasolekus veendume sel teel, et avame lüliti A_5 ning puudutame kätega galvanomeetrisse viiva juhtmete isolatsioonivabu osi. Tekkiv termoelektromotoorne jõud on küllaldane töökorras galvanomeetri hälbe esilekutsumiseks mõnekümne jaotise võrra.

Alles nüüd teeme joonise 2 kohaselt vajalikud ühendused. Lülitid A_1 ja A_2 olgu seejuures avatud ning A vasakpoolses asendis. Mõõdame esiteks minimaalse sumbuvuse juures (takistussalv olgu lühistatud). Sobiva mahtuvuse valime kondensaatorite patareist juhendava õppejõu korralduse järgi.

Algseisus peavad lülitid A_1 ja A_2 asetsema kohakuti (d = 0). Lülitite A_1 ja A_2 paiknemist pendli käiguga risti asetsevas vertikaaltasandis võime kontrollida elektriliselt. Selleks viime lülitid A_4 ja A_6 vastavalt asenditesse "Вкл." ja "Свет". Lisajuhtme f abil teeme joonisel 2 kriipsjoonega näidatud ühenduse. Võtame kontaktlaualt pistiku ning asetame selle pendli peas olevasse avausse, millega ühendame elektriliselt ülemise ja alumise metallplaadikese. Pendli viime ettevaatlikult vabasse rippseisu. Juhul, kui lülitid A_1 ja A_2 asetsevad ühes ja samas tasandis, sulgub vooluring ning lambike S sütib. Vastasel korral tuleb see saavutada kruvikaliibri pea pööramise abil. Jõudnud soovitud tulemuseni, registreerime kruvikaliibri näidu, kõrvaldame kriipsjoonega märgitud juhtme, eemaldame pistiku ja viime lülitid A_4 ja A_6 asenditesse "Вкл.".

Nii R kui r valitakse käesolevas töös ühest ja samast takistusmagasinist. Piirava takistuse r väärtus olgu selline, et galvanomeetri valgusindeksi maksimaalne väljalöök satuks skaala lõppu.

Orienteerivalt on r väärtus mõni tuhat oomi; selle täpsem valik tuleb teha kohapeal.

Olles teostanud kõik vajalikud ülalkirjeldatud ettevalmistustööd asume mõõtmiste juurde.

Vabastame pendli ning registreerime galvanomeetri valgusindeksi esimese maksimaalse hälbe. Mõõtmisi kordame kolm korda. Juhul, kui hälbed teineteisest märgatavalt

erinevad, tuleb mõõtmiste arvu suurendada. Muudame lülititе A_1 ja A_2 vahelist kaugust pöörates kruvikaliibri pead ühe täispöörde võrra ning kordame mõõtmisi. Suurendades edaspidi samade vahemike järgi lülititevahelist kaugust jätkame mõõtmisi seni, kuni pole määratud kõvera kulg vähemalt kahe täisperioodi ulatuses. Mõõtmistulemuste paremaks jälgimiseks on soovitatav saadud hälbed otsekohe kanda punktidena millimeeterpaberile teljestikus: galvanomeetri hälve - kruvikaliibri näit.

Mõõtmisi kordame analoogiliselt eelmistega lisatakistuse R olemasolu korral võnkeringis. R suurus olgu 100 - 300 oomi.

Kolmanda seeria mõõtmisi teeme kriitilise režiimi tingimustes, olles eelnevalt arvutanud kriitilise takistuse.

Vajalike arvutuste teostamiseks määrame pendli võnkumiste perioodi τ kümnest täisvõnkest ning mõõdame kaugust x_0. Joonestame graafikud teljestikus: kondensaatori laeng - aeg.

Saadud andmetest määrame elektromagnetiliste vabade võnkumiste perioodid ja sumbuvuse logaritmilised dekremendid. Kõiki tulemusi võrdleme teoreetiliselt ettearvutatutega.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

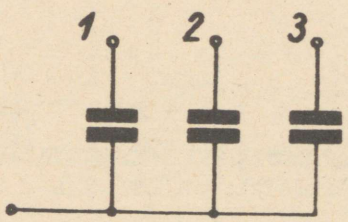
a. Kirjeldada elektromagnetilisi võnkumisi energeetilisest aspektist.
b. Kuidas on võimalik tekitada oomilist takistust sisaldavas võnkekontuuris konstantse amplituudiga võnkumisi?
c. Mida nimetatakse nihkevooluks?
d. Kas käesolevas töös mõõdetud suurused vastavad ühele ja samale või erinevatele võnkeprotsessidele?
e. Selgitada hüveteguri füüsikalist mõtet.

6. Riista konstandid.

Pooli andmed: L_{12} = 0,255 H (1%); L_{13} = 0,456 H (1%); R_{12} = 31,93 Ω (0,1%); R_{13} = 44,46 Ω (0,1%); L_{23} = 0,042 H

(1%); R_{23} = 12,56Ω (0,1%).

Kondensaatorite patarei moodustavad kondensaatorid mahtuvustega



C_1 = 3,50 μF
C_2 = 3,81 μF
C_3 = 3,79 μF

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.II, 1968, стр.281.
2. С. Г. Калашников. Электричество. 1964, стр. 517.

26. VABADE ELEKTROMAGNETILISTE VÕNKUMISTE UURIMINE ELEKTRONOSTSILLOSKOOBI ABIL.

1. Tööülesanne.

Vabade võnkumiste perioodi, sumbuvuse logaritmilise dekremendi ja kriitilise takistuse määramine mitmesuguste võnkeringide puhul.

2. Töövahendid.

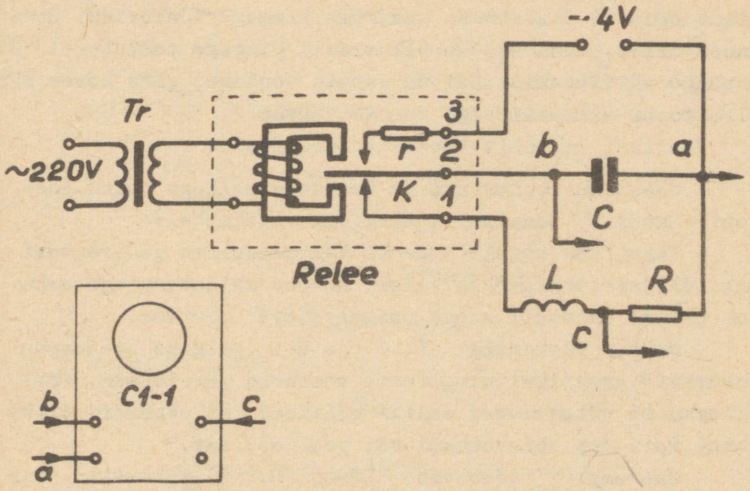
Kondensaatorite patarei, induktiivpool, takistussalv, polariseeritud relee, elektronostsilloskoop, lüliti, juhtmed.

3. Töö käik.

Töö teoreetiline osa on esitatud eelmises juhendis ning sellega tuleb eelnevalt tutvuda. Kui eelmises töös kirjeldatud meetod on võrdlemisi aegaõudev ning seda kasutades jõuab ühe praktikumi jooksul uurida vaid mõnda kontuuri, siis allkirjeldatava meetodi eeliseks on suur kiirus ning näitlikkus.

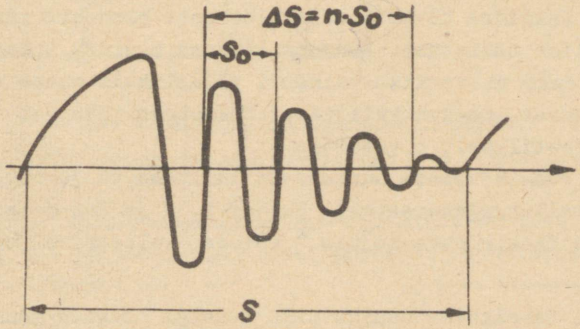
Elektriliste ühenduste skeem on esitatud joonisel 1. Üle transformaatori Tr võrgupingega toidetava polariseeritud relee õhuvahemikus tekib muutuv magnetväli, mis sunnib keelekest K sulgema kord ülemise, kord alumise vooluringi. Keelekese ülemises asendis kondensaator laadub, alumises aga tühjeneb läbi pooli L ja takistussalve R. Tühjenemise kulgu saab jälgida ostsilloskoobi C1-1 ekraanil, ühendades selle sisendid vooluringi punktidega a ,

b ja c.



Joon. 1.

Käivitades ostsilloskoobi hammaspinge generaatori ning sünkroniseerides selle relee toitepinge sagedusega saadakse ekraanil kõver, mis on sarnane joonisel 2 kujutatuga. Pikkus S vastab võrgupinge perioodile, kuna S_o - kontuuris toimuvate võnkumiste perioodile T.



Joon. 2.

Faasikõvera saamiseks on küllaldane välja lülitada kallutuspinge generaator. Ostsilloskoobi horisontaalseid kallutusplaate toidetakse endiselt pingega võnkeringi kondensaatorilt, kuna aga vertikaalseid pingega takistusel R. Et pinge aktiivtakistusel on faasis vooluga, siis kõver ostsilloskoobi ekraanil ongi faasikõveraks.

Vaatlusi on sobiv teostada järgmiselt:

- Koostame vooluringi ja ühendame sellega ostsilloskoobi vastavalt joonisel 1 märgitud indeksitele.
- Käivitame ostsilloskoobi kallutuspinge generaatori ning lülitame vooluvõrku relee. Muutes kallutuspinge sagedust püüame ekraanil saada paigalseisva kujutise.
- Muutes võnkeringi L, C ja R-i jälgime sumbuvate võnkumiste graafikut ning teeme vastavad järeldused. Ostsilloskoobi võimendused valime sellised, et ekraanil oleks nähtav vaid üks täistsükkel või pool sellest.
- Määrame T sõltuvuse LC-st (R = 0) vähemalt kuue LC väärtuse abil. Selleks kalkeerime või fotografeerime vastavad kõverad. T arvutamiseks kasutame valemit

$$T = 0{,}02\,\frac{\Delta s}{ns}\,. \qquad (1)$$

Mõõtmistulemused koos veaga koondame sobivasse tabelisse, paigutades sinna ka teoreetiliselt ettearvutatud T väärtused. Lõpptulemused esitame graafikuna.

- Jälgides kõverat ostsilloskoobi ekraanil määrame kriitilise takistuse. Suurema täpsuse huvides teeme seda ostsilloskoobi vertikaalsisendi võimalikult suure võimenduse juures. Saadud kriitilise takistuse väärtust võrdleme teoreetiliselt arvutatuga.
- Faasikõverate uurimiseks lülitame välja ostsilloskoobi kallutusgeneraatori. Muutes L, C ja R-i jälgime nende mõju faasikõvera kujule.* Kõverad kalkeerime pehme

---

* Kui faasikõver osutub piki X-telge liiga kokkusurutuks, vahetame ostsilloskoobi Y- ja X-sisendisse viivate juhtmete otsad b ja c.

pliiatsi abil või fotografeerime vähemalt kuuel juhul.

- Kalkeeritud faasikõverate abil määrame võnkumiste sumbuvuse logaritmilise dekremendi antud LC korral vähemalt 6 erineva R väärtuse jaoks. Mõõtmistulemused koondame sobivasse tabelisse koos teoreetiliselt ettearvutatud δ väärtustega. Lõpptulemused esitame graafikuna δ - R teljestikus.

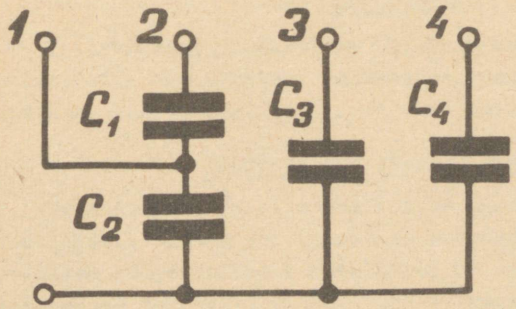
Märkus: Kõikide arvutuste juures võtame arvesse ka pooli oomilist takistust.

4. Riista konstandid.

Pooli andmed:

Tüüp P536 $L_1 = 0{,}021$ H ; $L_2 = 0{,}020$ H
$R_1 = 3{,}6\Omega$ $R_2 = 3{,}6\Omega$

Kondensaatorite patarei andmed:



$C_1 = 0{,}568\ \mu F$
$C_2 = 0{,}278\ \mu F$
$C_3 = 1{,}088\ \mu F$
$C_4 = 1{,}070\ \mu F$

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a. Milline erinevus on vabade, oma-, ise- ja sundvõnkumiste vahel?

b. Kuhu on koondunud võnkeringi omavõnkumiste energia 1/8, 1/4, 1/2, 3/4 perioodi möödumisel pärast kondensaatori tühjenemise algust?

c. Põhjendada valemit (1).

d. Milline on faasikõvera võrrand, kui R = 0?

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т.П, 1968, стр. 281.
2. С. Г. Калашников. Электричество, 1964, стр. 517.

27. VAHELDUVVOOLU ISELOOMUSTAVATE SUURUSTE MÕÕTMINE.

1. Tööülesanne.

Induktiivsuse ja mahtuvuse määramine volt- ja ampermeetri abil, Ohmi seaduse kontrollimine, võimsuse ja faasinihke määramine. Tutvumine vahelduvvoolu mõõteriistade (ampermeeter, voltmeeter, vattmeeter, sagedusemõõtja, fasomeeter) konstruktsiooni ning tööga.

2. Töövahendid.

Väljavõtetega induktiivpool, kondensaatorite patarei, 2 reostaati, ampermeeter, voltmeeter, vattmeeter, sagedusemõõtja, fasomeeter, alalisvoolu mõõtesild, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.

Vahelduvvooluks kitsamas mõttes nimetatakse ajas perioodiliselt suunda või suunda ja suurust muutvat voolu. Praktikas kõige rohkem kasutatavaks on siinuseliselt (siinuseseaduse kohaselt) muutuv vahelduvvool, mida võib kirjeldada võrrandiga

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \qquad (1)$$

kus i on voolutugevuse hetkväärtus,
I_0 - voolutugevuse maksimaalväärtus,
ω - nurksagedus,
t - aeg,

$\omega t + \varphi$ - faas,
φ - algfaas.

Teatavasti määrab võnkumiste faas (võnkumistena tuleb vaadelda voolutugevuse sõltuvust ajast funktsiooni (1) kohaselt) voolutugevuse hetkväärtuse momendil t, kuna algfaas φ - vaatluse algmomendil, kui $t = 0$.

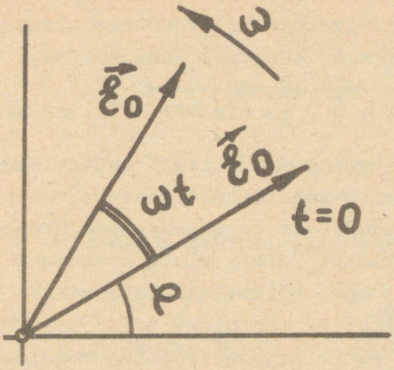
Iga siinuseliselt muutuv suurus on määratud, kui on teada selle amplituud, nurksagedus ja algfaas. Kui aega hakata lugema momendist, mil $i = 0$, siis ka $\varphi = 0$ ja võrrand (1) saab kuju

$$i = I_0 \sin \omega t.$$

Selline algmomendi valik on alati võimalik, kui jälgitakse üht siinuseliselt muutuvat suurust.

Siinuseliselt võib sõltuda ajast mitte üksnes vool, vaid ka teised elektri- ja magnetvälja või voolu kulgemist kirjeldavad suurused. Lähemalt vaadeldakse seda allpool. Vahepeal olgu aga märgitud, et võrdlemisi mugavaks osutub kujutada harmooniliselt muutuvaid suurusi vektordiagrammi meetodil. Eriti kasulik on see meetod siis, kui vooluring sisaldab mitut järjestikku ühendatud pingeallikat, mille elektromotoorsed jõud muutuvad siinuseliselt. Vektordiagrammi meetod seisneb selles, et iga ajas siinuseliselt muutuv suurus viiakse ühesesse vastavusse vektoriga, mille pikkus on võrdne selle suuruse amplituudiga tingühikutes ning mis pöörleb ühtlaselt teatud tasandis ümber oma alguspunkti. Nii näiteks võib siinuseliselt muutuvat emj $e = E_0 \sin (\omega t + \varphi)$ kujutada vektori $\vec{E}_0$ abil, mis pöörleb nurksagedusega ω kellaosuti liikumisele vastassuunas. Selle vektori algasendi määrab nurk φ ning asendi mingil teisel ajamomendil t nurk $\omega t + \varphi$. On ilmne, et $\vec{E}_0$ projektsioon vertikaalteljel muutub siinuseliselt, s.t. vastavalt funktsioonile $e = E_0 \sin (\omega t + \varphi)$.

Kahe järjestikku ühendatud pingeallika puhul, mille elektromotoorsed jõud



Joon. 1.

$$e_1 = E_{o1} \sin(\omega t + \varphi_1)$$

ja

$$e_2 = E_{o2} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

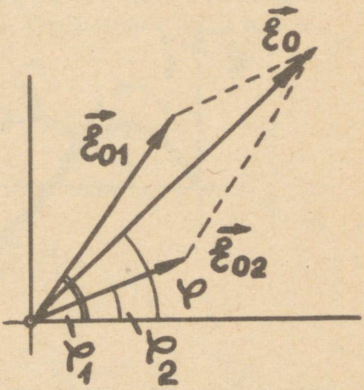
tuleb viimaseid kujutada kahe vektori $\vec{E}_{o1}$ ja $\vec{E}_{o2}$ abil, kusjuures nende algasendid on määratud nurkadega φ_1 ja φ_2.

Resulteerivat elektromotoorset jõudu kirjeldab ilmselt vektor $\vec{E}_o$, mis on saadud $\vec{E}_{o1}$ ja $\vec{E}_{o2}$ liitmise teel (joon. 2). Viimase vektori projektsioon vertikaalteljele mingil ajamomendil t on $e = E_o \sin(\omega t + \varphi)$. Seega ka resultantelektromotoorne jõud muutub siinuseliselt. Et viimane funktsioon oleks määratud, tuleb leida E_o ja φ, mida võib teha kasutades vektordiagrammi joonisel 2. Pole raske näha, et

$$E_o = \sqrt{E_{o1}^2 + E_{o2}^2 + 2E_{o1}E_{o2}\cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

ja

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{E_{o1}\sin\varphi_1 + E_{o2}\sin\varphi_2}{E_{o1}\cos\varphi_1 + E_{o2}\cos\varphi_2}.$$

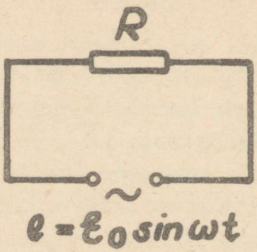


Joon. 2.

Allpool vaadeldakse eraldi takistit, induktiivpooli ja kondensaatorit sisaldavaid vooluringe ning seejärel komplitseeritumaid.

a) <u>Takistit R sisaldav vooluring</u>.

Olgu takisti R ühendatud siinuseliselt muutuva elektromotoorse jõu allikaga, nii nagu näidatud joonisel 3. Lugedes elektromotoorse jõu küllalt aeglaselt muutuvaks, s.t.

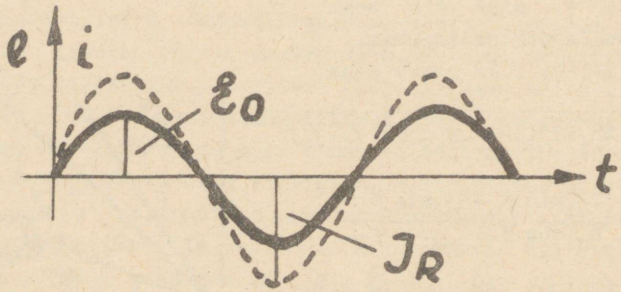


Joon. 3.

kvaasistatsionaarseks, võib voolutugevuse hetkväärtuse arvutamiseks kasutada Ohmi seadust:

$$i = \frac{e}{R} = \frac{E_0}{R} \sin \omega t = I_R \sin \omega t.$$

Seega siinuseliselt muutuv emj on siinuseliselt muutuva voolu põhjuseks, kusjuures voolutugevus on faasis elektromotoorse jõuga. Mõlemate funktsioonide graafikud on esitatud joonisel 4, kus pidev joon vastab elektromotoorsele jõule ja punktiirjoon voolutugevusele. Vektordiagrammil tuleb mõlemaid suurusi algmomendil kujutada piki horisontaaltelge suunatud vektoritega $\overrightarrow{E_0}$ ja $\overrightarrow{I_R}$ (joon. 5). Nii nagu siinuseliselt muutuv emj on siinuselise voolu põhjuseks, on läbi takistuse R kulgev



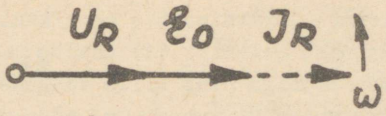
Joon. 4.

siinuseline vool siinuseliselt ning vooluga faasis muutuva pinge põhjuseks vaadeldava takisti otstel, kusjuures selle pinge amplituud

$$U_R = I_0 R.$$

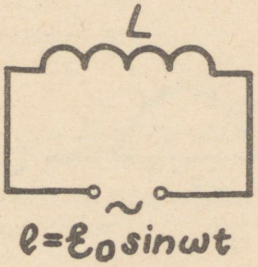
Ka vektor $\overrightarrow{U_R}$ tuleb algmomendil suunata piki horisontaal-

telge.



Joon. 5.

b) Induktiivpooli L sisaldav vooluring.



Joon. 6.

Pooli takistus R olgu tühiselt väike ning olgu ta ühendatud siinuseliselt muutuva emj allikaga (joon. 6). Ajas muutuv emj on muutuva voolu ja see omakorda omainduktsiooni emj $E_{oma} = -L\frac{di}{dt}$ tekke põhjuseks. Lähtudes kvaasistatsionaarsuse tingimusest võib Kirchhoffi II reegli põhjal kirjutada:

$$e + E_{oma} = 0 \quad \text{või}$$

$$L\frac{di}{dt} = E_0 \sin \omega t \quad \text{ja}$$

$$di = \frac{E_0}{L} \sin \omega t \, dt,$$

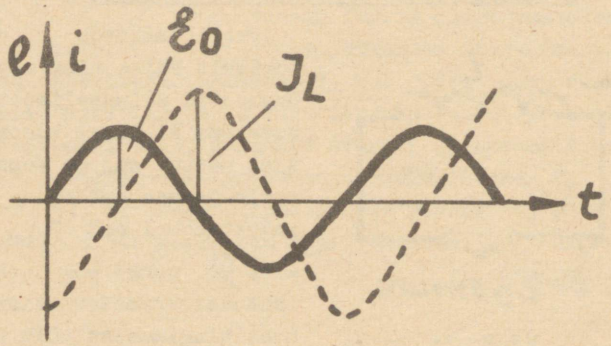
millest peale integreerimist

$$i = \frac{E_0}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = I_L \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Ka antud juhul on siinuseline emj siinuseliselt muutuva voolu põhjuseks. Selle voolu amplituud

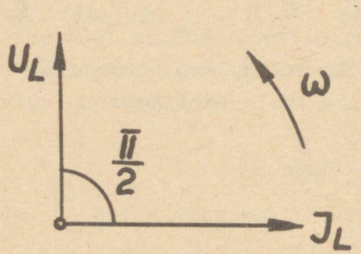
$$I_L = \frac{E_0}{\omega L} \qquad (1)$$

ning faasinihe emj suhtes: $-\frac{\pi}{2}$; vool jääb faasis emj-st $\frac{\pi}{2}$ võrra maha. Mõlemate funktsioonide graafikud on esitatud joonisel 7. Nagu näha valemist (1) ühtib ωL dimensioon takistuse dimensiooniga ning selle väärtus võib olla väljendatud seega takistuse ühikutes. Oma mõju poolest vahelduvvoolu amplituudile on viimati nimetatud suurus ekvivalentne takistusega $X_L = \omega L$. Erinevalt takistusest R



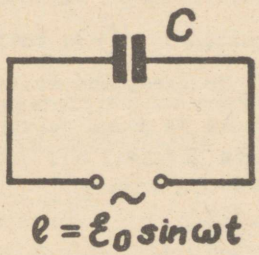
Joon. 7.

põhjustab X_L faasinihke voolutugevuse ja emj vahel. Seda nimetatakse induktiivtakistuseks. On õige ka vastupidine - läbi induktiivsuse L kulgev siinuseline vool $i = I_L \sin \omega t$ tekitab pooli otstel siinuseliselt muutuva pinge $u = U_L \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, kusjuures pinge amplituud $U_L = I_L X_L$ ja faasinihe voolutugevuse suhtes $\Delta\varphi = +\frac{\pi}{2}$. Vektordiagramm viimaste suuruste jaoks on esitatud joonisel 8.



Joon. 8.

c) Kondensaatorit C sisaldav vooluring.



Joon. 9.

Ühendades kondensaatori katted siinuseliselt muutuva emj allikaga (joon. 9) ja tuginedes Kirchhoffi II reeglile saab kirjutada

$$e = u_c,$$

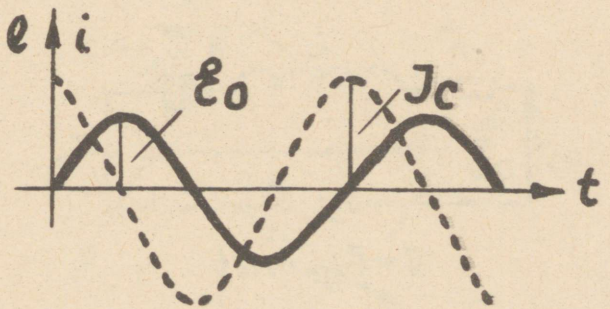
kus u_c - katetevaheline pinge momendil t. Kuna $u_c = \frac{q}{C}$, kus q on katte laeng, siis voolutugevuse definitsiooni kohaselt

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{E_0}{\frac{1}{\omega C}} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = I_c \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}).$$

Jälle tekitab siinuseline emj siinuselise voolu, kusjuures selle amplituud

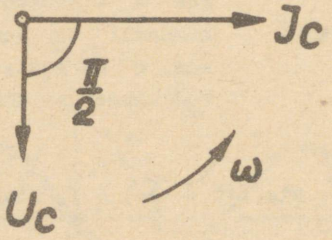
$$I_c = \frac{E_0}{\frac{1}{\omega C}} \qquad (2)$$

ning faasinihe emj suhtes + $\frac{\pi}{2}$, s.t. voolutugevus on emjst faasis + $\frac{\pi}{2}$ võrra ees. Vastavad graafikud on esitatud joonisel 10. Et mõju poolest voolutugevuse amplituudile täidab suurus $X_c = \frac{1}{\omega C}$ takistuse funktsiooni, siis nime-



Joon. 10.

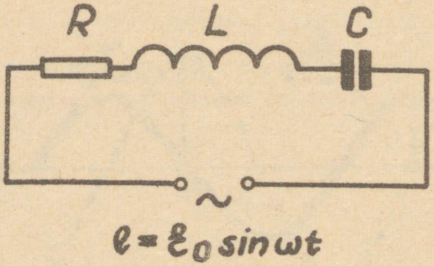
tatakse seda mahtuvuslikuks takistuseks. Õige on ka vastupidine, nagu eespoolgi: läbi mahtuvuse C kulgev siinuseline vool $i = I_c \sin \omega t$ tekitab kondensaatori katetel siinuseliselt muutuva pinge $u = U_c \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, kusjuures selle pinge amplituud $U_c = I_c X_c$ ja faasinihe voolutugevuse suhtes $\Delta\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Voolutugevuse ja pinge vektordiagrammid algmomendi jaoks on esitatud joonisel 11.



Joon. 11.

d) <u>Järjestikku ühendatud aktiiv-, induktiiv- ja mahtuvuslikku takistust sisaldav vooluring</u>.

Olgu siinuseliselt muutuva emj allikaga ühendatud takisti R, induktiivpool L ja kondensaator C nii nagu näidatud joonisel 12. On loomulik oletada, et ka niisuguses



Joon. 12.

vooluringis kulgev vool on siinuseline vahelduvvool

$$i = I_0 \sin(\omega t - \varphi).$$

(Rangemalt tuleks eespool nimetatud väidet kontrollida diferentsiaalvõrrandi $L\ddot{q} + R\dot{q} + \frac{q}{C} = E_0 \sin \omega t$ lahendamise teel.) Ülesanne seisneb selles, et määrata voolutugevuse amplituud I_0 ja algfaas φ.

Vooluallika olemasolust tingitud vool, kulgedes läbi R, L ja C, tekitab vastavates vooluringi osades pinged u_R, u_L ja u_C. Ülalesitatust

$$u_R = I_0 R \sin(\omega t - \varphi) = U_R \sin(\omega t - \varphi),$$

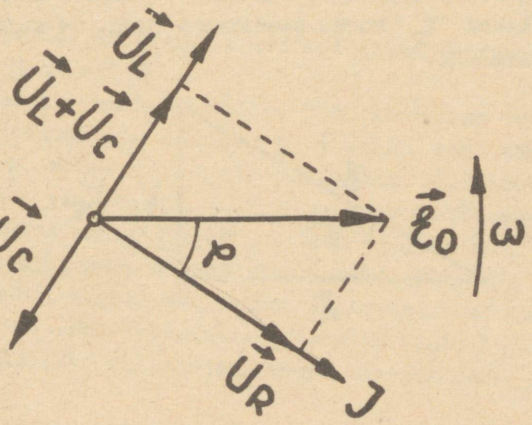
$$u_L = I_0 X_L \sin(\omega t - \varphi + \tfrac{\pi}{2}) = U_L \sin(\omega t - \varphi + \tfrac{\pi}{2})$$

ja

$$u_C = I_0 X_C \sin(\omega t - \varphi - \tfrac{\pi}{2}) = U_C \sin(\omega t - \varphi - \tfrac{\pi}{2}).$$

Joonestades pingete vektordiagrammid, nagu näidatud joonisel 13 ning tuginedes Kirchhoffi II reeglile võib kirjutada

$$e = u_R + u_L + u_C$$



Joon. 13.

ja väita, et resultantpinget kirjeldav vektor

$$\vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C = \vec{E}_o .$$

Jooniselt 13

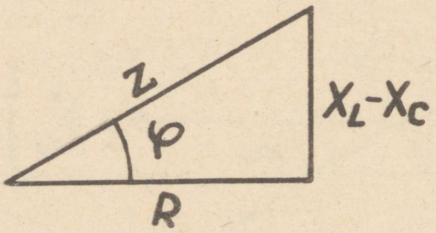
$$E_o^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I_o^2 R^2 + I_o^2 (X_L - X_C)^2 ,$$

millest

$$I_o = \frac{E_o}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} . \qquad (3)$$

Suurust $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$,

mille mõju voolutugevuse amplituudile on ekvivalentne arvuliselt niisama suure oomilise takistusega, nimetatakse kogu-, näiv- ehk ebatakistuseks ehk impedantsiks. Erinevalt viimasest ja oomilisest takistusest R moodustab induktiiv- ja mahtuvusliku takistuse vahe $X = X_L - X_C$ vooluringi reaktiiv- ehk ebatakistuse ehk reaktantsi. Vooluringi nimetatud takistuskomponendid saab leida vektoritega $\vec{E}_o$, $\vec{U}_R$ ja $\vec{U}_L + \vec{U}_C$ määratud kolmnurgaga (joon. 13) sarnasest takistuste kolmnurgast. Tõepoolest, vähendades pingete kolmnurga külgede pikkusi I_o korda saadaksegi joon. 14 kujutatud takistuste kolmnurk.



Joon. 14.

Samuti nagu takistus liigitatakse ka pinge, voolutugevus ja võimsus näiv-, tegev- ja ebakomponentideks. Näivtakistusest Z põhjustatud faasinihe emj ja voolutugevuse vahel arvutatakse vastavalt joonistele 12 ja 13 valemist:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} .$$

e) Vahelduvvoolu võimsus.

Läbi koormuse takistusega Z kulgev vahelduvvool $i = I_0 \sin \omega t$ tekitab selle äärmiste punktide vahel pinge

$$u = U_0 \sin (\omega t - \varphi).$$

Amplituud U_0 ja faasinihe φ võivad olla määratud ülalkirjeldatud viisil.

Lähtud ɜ voolu kvaasistatsionaarsuse tingimusest võib arvutada võimsuse hetkväärtuse

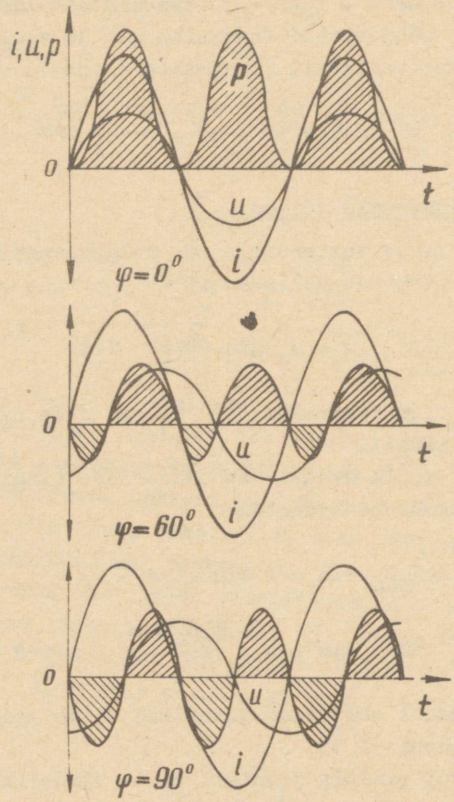
$$p = i\,u = I_0 U_0 \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) =$$

$$= I_0 U_0 \cos \varphi \sin^2 \omega t - \frac{I_0 U_0}{2} \sin \varphi \sin 2\omega t.$$

Hetkvõimsuse sõltuvuse graafikud kolme erijuhu jaoks on esitatud joonisel 15.

Viirutatud pindala joonisel 15 on võrdeline vahelduvvoolu tööga teatud ajavahemiku t jooksul. Nagu näha, võib see töö kui ka võimsus olla nii positiivne kui negatiivne. Esimesel juhul vooluallika energia muundub voolu magnet- või elektrivälja energiaks või eraldub soojuse näol või toimuvad muud energiakulu nõudvad protsessid. Võimsuse (töö) negatiivse märgi korral vooluringi (kondensaatoritesse, poolidesse) salvestatud energia tagastatakse vooluallikasse. Seega võib vooluringi välisosa olla nii energia tarbijaks kui ka allikaks.

Vahelduvvoolu keskmine võimsus perioodi jooksul (nn.



Joon. 15.

tegevvõimsus ehk aktiivvõimsus) on võrdne perioodi jooksul tehtud töö ja perioodi T suhtega:

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T iudt = \frac{1}{T} I_0 U_0 \cos\varphi \int_0^T \sin^2\omega t \, dt -$$

$$- \frac{I_0 U_0 \sin\varphi}{2T} \int_0^T \sin 2\omega t \, dt.$$

Pärast integreerimist $P = \frac{I_0 U_0}{2} \cos\varphi$, kus tegurit

$\cos\varphi$ nimetatakse võimsusteguriks.

Kuna jooniselt 14 $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$ ja Ohmi seadusest $I_o = \frac{U_o}{Z}$, siis

$$P = \frac{I_o^2 R}{2}.$$

Samasugust võimsust P arendab takistusel R alalisvool, mille tugevus I rahuldab tingimust

$$I^2 R = \frac{I_o^2 R}{2}.$$

Seda alalisvoolu $I = \frac{I_o}{\sqrt{2}}$, mis takistusel R eraldab sama aja jooksul niisama palju soojust kui vahelduvvoolgi, nimetatakse antud vahelduvvoolu efektiivväärtuseks. Analoogiliselt leitakse seos vahelduvvoolus pinge efektiiv- ja amplituudväärtuse U_o vahel, s.t.

$$U = \frac{U_o}{\sqrt{2}}.$$

Tavaliselt on kõik vahelduvvoolu mõõteriistad kaliibritud efektiivväärtuste järgi. On iseenesest mõistetav, et ülaltuletatud seosed elektromotoorse jõu, voolutugevuse ja pinge amplituudväärtuste vahel on kehtivad ka efektiivväärtuste jaoks. Voolutugevuse (pinge) efektiivväärtus I(U) moodustab seejuures voolu näivtugevuse (pinge), Icos φ (U cos φ) - tegevtugevuse (pinge), I sin φ (U sin φ) - ebatugevuse (pinge).

Teades vahelduvvoolu efektiivväärtusi arvutatakse tegevvõimsus valemist

$$P = IU \cos\varphi.$$

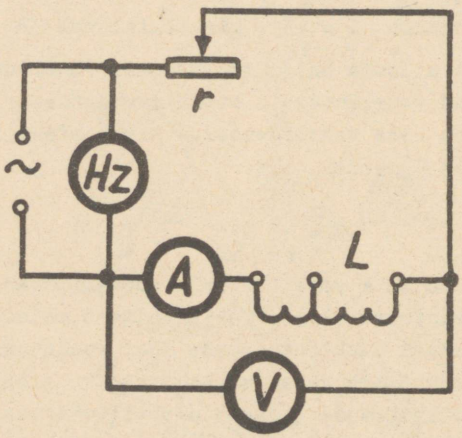
Tegevvõimsuse mõõtühikuks on vatt. Nagu selgub ülalesitatust, arendab tegevvõimsust vaid voolutugevuse (pinge) tegevkomponent. Korrutist $IU = P_n$ nimetatakse vahelduvvoolu näivvõimsuseks, korrutist $IU \sin\varphi = P_e$ aga eba- e. reaktiivvõimsuseks (viimast arendab voolu ebakomponent). Näivvõimsuse ühikuks on voltamper (VA), ebavõimsuse ühikuks voltamper-reaktiivne (VAR). Võimsuse komponentide määramiseks võib joonestada võimsuste kolmnurga, millest $P_n = \sqrt{P^2 + P_e^2}$.

4. Töö käik.

Enne mõõtmiste juurde asumist tutvume põhjalikult kõikide kasutatavate mõõteriistade tööprintsiibi ning käsitsemisjuhenditega.

a) Induktiivsuse määramine.

Uurimisobjektiks on mitme väljavõttega induktiivpool, mille ühendame vooluringi vastavalt joonisele 16.



Joon. 16.

Reostaadi r takistus olgu seejuures täielikult sisse viidud. Pärast skeemi pingestamist suurendame reostaadi abil voolutugevust seni, kuni ampermeetri osuti hälbib lugemi võtmiseks küllaldaselt. Nii kasutame reostaati ka kõikide järgnevate ülesannete juures. Üheaegselt ampermeetri lugemiga registreerime voltmeetri näidu ning teeme seda kolme erineva voolutugevuse juures. Et pooli soojenemisel muutub selle takistus, siis sulgeme vooluringi ainult lugemite võtmise ajaks. Analoogilisi mõõtmisi teeme pooli kolme erineva osa jaoks.

Registreerime sagedusmõõtja Hz näidu ning määrame alalisvoolu mõõtesillaga pooli vastavate osade oomilised takistused R_o. Tuginedes ülalesitatud teoreetilisele ülevaatele kirjutame välja valemid Z, L ja φ arvutamiseks ning kanname tulemused tabelisse 1.

Tabel 1

Väljavõte nr.	R_o	Mõõtmise nr.	ϑ	I	U	Z	L	tg φ	φ
		1 2 3							
		1 2 3							

Joonestame takistuskolmnurgad ja esitame lõpptulemused koos mõõtmisveaga.

b) Mahtuvuse määramine.

Uurimisobjektiks on kondensaatorite patarei, mille lülitame skeemi vastavalt joonisele 17.

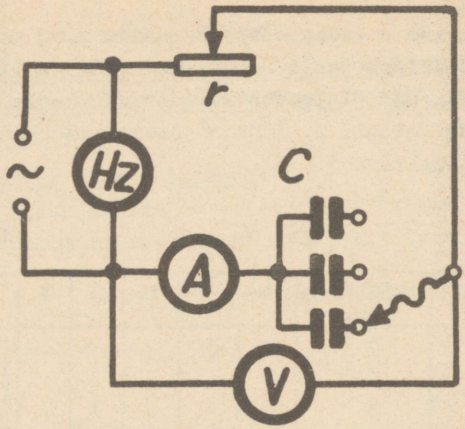
Juhendava õppejõu korralduse kohaselt määrame vooluvõtugevuse ja pinge väärtused ülesandes 1 kirjeldatud viisil vähemalt kolme erineva mahtuvuse jaoks. Arvutame Z, C ja φ ning kanname tulemused tabeliga 1 analoogiliselt grafeeritud tabelisse 2. Joonestame takistuskolmnurgad ja eraldame välja lõpptulemused koos veaga.

c) Ohmi seaduse kontrollimine.

Valemi

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}},$$

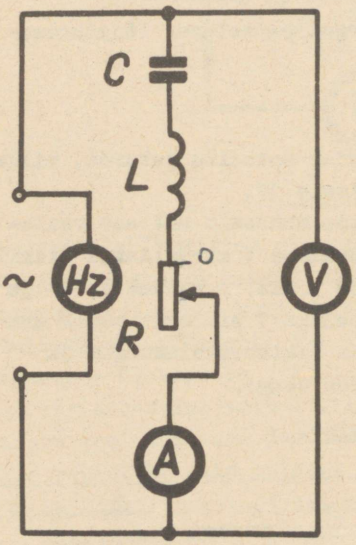
katseliseks kontrollimiseks koostame vooluringi vastavalt



Joon. 17.

joonisele 18. Vooluringi elementideks kasutame eespool uuritud kondensaatoreid ja induktiivpooli. Riistade lugemid registreerime viiel erineval voolutugevusel. Enne voolu muutmist reostaadi R abil tuleb mõõta alalisvoolu silla abil selle vooluringi lülitatud osa takistus. Voolutugevuse muutmisel L või C muutmise teel võib R mõõta töö lõpul. Mõõtmistulemused koondame tabelisse 3.

Joonestame takistuste kolmnurgad ning esitame lõppresultaadid koos katsevigadega.



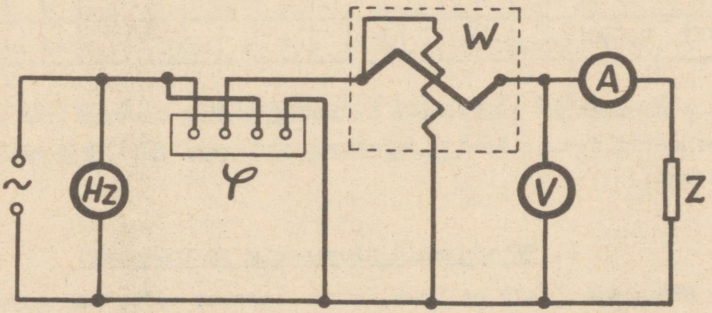
Joon. 18.

Tabel 3

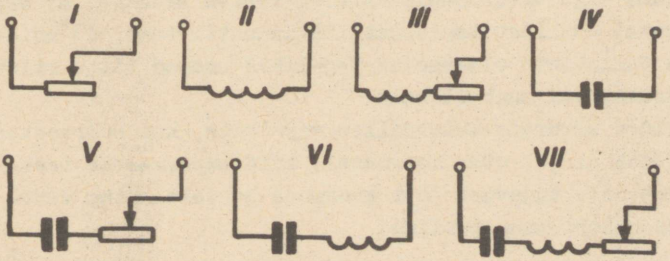
Mõõtmiste nr.	ν	I	U	R	L	C	$\frac{U}{I}$	$\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}$	tgφ	φ
1										
2										
3										
4										
5										

d) Vahelduvvoolu võimsuse ja faasinihke määramine.

Koostame vooluringi joonisel 19 toodud skeemi järgi. Vooluringi osaks Z lülitame kordamööda joonisel 20 toodud koormuste kombinatsioone juhendava õppejõu valikul.



Joon. 19.



Joon. 20.

Iga kombinatsiooni korral mõõdame I, U, P, ν, cos φ ja R. Arvutame cos φ, φ, R, Z, X, L, C (L ja C seal, kus võimalik), P_n ja P_e, olles eelnevalt kirjutanud välja vajalikud valemid. Andmed ja tulemused koondame tabelisse 4.

Tabel 4

Mõõdetud tulemused									Arvutatud tulemused								
Koormuse liik		I	U	P	ν	cos φ	φ	R	cos φ	φ	Z	X	R	P_n	P_e	L	C
I	R																
II	L																
III	L,R																
IV	C																
V	R,C																
VI	L,C																
VII	R,L,C																

Joonestame takistuste kolmnurgad ning määrame cos φ geomeetriliselt. Saadud tulemusi võrdleme tabelis 4 esitatutega.

5. Täiendavaid ülesandeid ja küsimusi.

a. Mõõteskeemidelt on näha, et voltmeeter mõõdab ka ampermeetril tekkivat pingelangu. Kuidas määrata sellest tekkinud viga arvutustulemustele, võttes arvesse: a) ampermeetri oomilist takistust, b) induktiivsust, c) mõlemate takistuste olemasolu? Vajalikud andmed võtta riista passist või numbrilaualt.

b. Kuidas arvutada metoodilist viga siis, kui voltmeeter mõõdab pinget otse koormusel, kuid ampermeeter resultantvoolu tugevust läbi koormuse ja volt- ning vatt- ja fasomeetri pingepoolide?

c. Selgitada mõõdetud ja arvutatud aktiivtakistuse erinevust. Miks on see erinevus eriti suur raudsüdamikuga pooli korral?
d. Kas mõisted "oomiline takistus" ja "tegevtakistus" on samad?
e. Milline füüsikaline sisu on ebavõimsusel?
f. Millist voolutugevust mõõdab vahelduvvoolu ringi ühendatud ja detektoriga varustatud magnetelektriline mõõteriist?
g. Mida nimetatakse logomeetriks?
h. Selgitada kõikide kasutatud riistade konstruktsiooni ja tööd.

Kirjandus.

1. J. A. Štrauf. Füüsika II. Elekter ja magnetism. Tallinn, 1965, lk. 453–470.
2. V. A. Mihelson. Füüsika II. 1948, lk. 187.
3. J. Lang, G. Mets, A. Pae. Füüsika praktikum. 1960, lk. 234.
4. Электрический измерения. Под ред. А. В. Фремке. 1963.
5. Mõõteriistade tehnilised kirjeldused.

28. PINGETE RESONANTSI UURIMINE.

1. Tööülesanne.

Pingete resonantsi uurimine mitmesugustes kontuurides, kontuuride hüveteguri määramine.

2. Töövahendid.

Kondensaatorid, induktiivpoolid, takistid, standardsignaalide generaator, lampvoltmeeter (elektronostsilloskoop), ümberlüliti, juhtmed.

3. Teoreetiline sissejuhatus.*

Nagu näidatud eelmises töös, põhjustab siinuseline emj $e = E_0 \sin \omega t$ järjestikku ühendatud oomilist, induktiiv- ja mahtuvuslikku takistust sisaldavas vooluringis siinuselise voolu

$$i = I_0 \sin (\omega t - \varphi),$$

kusjuures selle voolu amplituudväärtus

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} \qquad (1)$$

ja faasinihke tangens

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} . \qquad (2)$$

* Enne käesoleva töö juurde asumist tuleb läbi töötada tööde № 25 ja № 27 teoreetilised sissejuhatused.

Seega määrab voolutugevuse ära mitte üksnes emj. amplituudväärtus ja vooluringi parameetrid R, L ja C, vaid ka emj. sagedus. Just viimane sõltuvus pakubki erilist huvi praktikas.

On kerge näha, et sama amplituudiga emj. sageduse muutumisel $0 - \infty$ voolutugevuse amplituud kasvab 0-st teatud maksimaalse väärtuseni, vähenedes hiljem jällegi nullini. Faasinihe muutub seejuures vahemikus $-\frac{\pi}{2} - +\frac{\pi}{2}$. Voolutugevuse maksimaalse väärtuse saavutamist ja faasinihke muutumist nulliks ülalkirjeldatud viisil nimetatakse pingete resonantsiks. On ilmne, et resonantssagedus

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

s.t. pingete resonants saabub siis, kui sundiva emj. sagedus saab võrdseks võnkeringi omavõnkesagedusega ω_0. Pingete resonantsi võib tekitada ka võnkeringi parameetrite L või C muutmise teel, jättes emj. sageduse konstantseks. Seetõttu on resonantsi otstarbekohane iseloomustada I_0 (või mõne teise voolu kulgemist iseloomustava suuruse) sõltuvusena parameetrist $\gamma = \frac{\omega}{\omega_0}$.

Resonantsi korral $I_0^* = \frac{E_0}{R}$ ja $\varphi^* = 0$, s.t. vooluring avaldab ainult aktiivtakistust.

Kondensaatori katetevahelise pinge amplituudi maksimaalse väärtuse leidmiseks tuleb määrata funktsiooni

$$U_C = I_0 \frac{1}{\omega C} = \frac{E_0}{\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{QE_0}{\sqrt{\gamma^2 + (\gamma^2 - 1)^2 Q^2}} \qquad (3)$$

ekstreemumi tingimus. Siin Q on vooluringi hüvetegur, s.t. $\frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{R}$. Pole raske näha, et U_C saavutab maksimumi, kui

$$\gamma = \gamma_m = \sqrt{1 - \frac{1}{2Q^2}} \qquad (4)$$

või

$$\omega = \omega_m = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{2L^2}}. \qquad (5)$$

Paigutades saadud tulemused valemitesse (3) leiame U_c maksimaalse väärtuse

$$U_c^* = \frac{E_0}{CR\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}}. \qquad (6)$$

Küllalt väikese sumbuvuse korral, mil $Q \gg 1$

$$\omega_m \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ning

$$U_c^* \approx \frac{E_0}{CR}\sqrt{LC} = E_0 Q = U_L^*, \qquad (7)$$

kus U_L^* on pingeamplituudi maksimaalväärtus induktiivpooli otstel.

Kuna pinged kondensaatoril ja poolil on vastasfaasides ning absoluutväärtustelt võrdsed, siis ongi mõistetav, miks pingelang kogu vooluringis osutub võrdseks pingega aktiivtakistusel. Eriti märkimisväärne on see, et nii U_c^* kui U_L^* võivad olla palju kordi suuremad vooluringi lülitatud emj. amplituudväärtusest E_0. Lähtudes seosest (7) võib anda vooluringi hüveteguri definitsiooni kui kondensaatori resonantspinge amplituudi ja elektromotoorse jõu amplituudi suhte.

Katseliselt on mugav uurida pingete resonantsi funktsioonist (3) tuleneva funktsiooni

$$y = \left(\frac{U_c}{E_0}\right)^2 = \frac{1}{\omega^2 C^2 R^2 + (\omega^2 LC - 1)^2} = \frac{Q^2}{\varrho^2 + (\varrho^2 - 1)^2 Q^2} \quad (8)$$

abil. Joonestanud viimase funktsiooni graafiku, saab lihtsalt määrata võnkeringi hüveteguri. Tõepoolest, leiame parameetri $\varrho = \varrho_{1/2}$ väärtuse, mille puhul kondensaatori katetevahelise pinge amplituudi ruut moodustab poole selle väärtusest resonantsi korral. Kuna funktsiooni (8) ekstreemum saabub samal ϱ väärtusel, mil funktsioonil (3), siis tingimusest

$$\varrho_{1/2}^2 + (\varrho_{1/2}^2 - 1)^2 Q^2 = 2 - \frac{1}{2Q^2}$$

järgneb

$$\varrho_{1/2}^2 = 1 - \frac{1}{2Q^2} \pm \frac{1}{Q}\sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}.$$

Lugedes Q küllalt suureks, saame

$$\varrho_{1/2}^2 \approx 1 \pm \frac{1}{Q},$$

millest

$$\varrho_{1/2} \approx 1 \pm \frac{1}{2Q}.$$

Nii nagu võiski oodata, eksisteerib kaks $\varrho_{1/2}$ väärtust, üks kummalgi pool maksimumi, milliste juures suhe $\left(\frac{U_c}{E_0}\right)^2$ on kaks korda väiksem oma maksimaalväärtusest. Tehtud eeldusel ($Q \gg 1$) asetsevad need väärtused sümmeetriliselt maksimumile vastava $\varrho = 1$ suhtes. Olgu nad tähistatud $\varrho'_{1/2}$ ja $\varrho''_{1/2}$ -ga. Järelikult

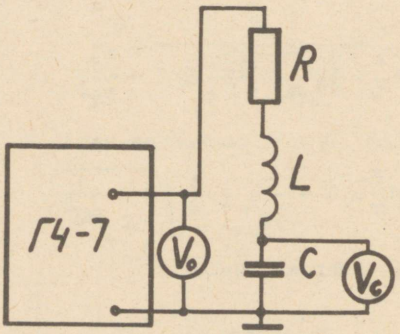
$$Q = \frac{1}{\varrho'_{1/2} - \varrho''_{1/2}}. \quad (9)$$

Funktsiooni $y(\varrho) = \left(\frac{U_c}{E_0}\right)^2$ graafikut kontuuri hüvetegu-

ri määramiseks tuleb kasutada niisiis selliselt, et tõmmatakse tasemel $\frac{1}{2}(\frac{U_c^*}{E_o})^2$ sirge paralleelselt γ-teljega, leitakse sirge lõikepunktid graafikuga, millede abstsissid ongi $\gamma'_{1/2}$ ja $\gamma''_{1/2}$ ning arvutatakse valemist (9) Q.

4. Töö käik.

Katsekorralduse elektriline skeem on esitatud joonisel 1.



Joon. 1.

Vooluringi moodustavad vahetatavad kondensaatorid C, induktiivpoolid L ja induktiivsusvabad takistid R. Siinuselise emj. allikaks on standardsignaalide generaator Г4-7. Pinget kondensaatori kaatetel ja generaatori väljundil mõõtakse kahe lampvoltmeetri abil. Enne ühenduste tegemist tutvume põhjalikult generaatori ja lampvoltmeetri käsitsemisjuhenditega.

Teinud vajalikud ühendused seame töökorda generaatori ning voltmeetrid. Esialgu me takisteid R ei kasuta. Pingestame skeemi ning hoiame seda generaatori väljundil kogu eeloleva katse jooksul konstantsena (E_o = 1,0 V). Eriti lühikeste sagedusvahemike järel tuleb mõõtmisi teostada kõvera maksimumilähedases piirkonnas. Saadud andmete järgi valime välja maksimaalse hüveteguriga kontuuri. Lü-

litades seejärel valitud võnkeringi järjest suureneva väärtusega takisteid määrame veel vähemalt 5 resonantskõverat. Funktsiooni $y(\gamma)$ graafikute joonestamiseks arvutame ω_0 generaatori sellest näidust, mis vastab takistita vooluringi resonantskõvera maksimumile.

Kõikide resonantskõverate abil määrame võnkeringide hüvetegurid ning samuti võnkumiste sumbuvuse logaritmilise dekremendi δ. Iga graafiku juures näitame ära resonantskõvera suhtelise laiuse, s.t. $\gamma'_{1/2} - \gamma''_{1/2}$. Takistitega kontuuri jaoks joonestame ka funktsiooni $f(\gamma) = (\frac{U_c}{E_0 Q})^2$ resonantskõverad, s.o. kõverad, millede kõrgus on normeeritud ühele.

5. Täiendavaid küsimusi ja ülesandeid.

a. Tuletada valem (1).
b. Leida γ, mille puhul U_L saavutab maksimumi.
c. Joonestada graafik, mis väljendab näivtakistuse sõltuvust nurksagedusest ω ning võrrelda vastava graafikuga I_0 jaoks.
d. Esitada ja selgitada rida konkreetseid näiteid pingete resonantsi rakenduste kohta.

Kirjandus.

1. И. В. Савельев. Курс общей физики. Т. II, 1968, стр.281.
2. Kasutatavate riistade tehnilised kirjeldused.

29. MÕÕTMISI VAHELDUVVOOLU SILLA MEETODIL

I. Tööülesanne.

Tutvumine vahelduvvoolu käsitluse sümboolse meetodiga. Tutvumine vahelduvvoolu sildskeemide kui elektriliste mõõtmiste meetodiga, selle meetodi üldise teooria ja praktilise teostuse rea variantidega.

II. Teoreetiline sissejuhatus.

Sildskeemid on elektriliste mõõtmiste tehnikas väga levinud, neid kasutatakse laialdaselt ka mitteelektriliste suuruste (temperatuur, väikesed nihked jne.) mõõtmisel elektriliste meetoditega. Kasutatakse nii alalis- kui vahelduvvoolul töötavaid sildskeeme.

Vahelduvvoolu sild on nii teooria kui eksperimentaalse teostuse osas alalisvoolu sillast keerulisem ja suuremate rakendusvõimalustega. Vahelduvvoolu silla teooriat on lihtne esitada nn. sümboolse e. kompleksmeetodi abil.

A. Vahelduvvooluahelate arvutuse kompleksmeetod.

See meetod on mugav selle poolest, et ühendab geomeetrilise (vektordiagrammide) ja analüütilise meetodi vahelduvvoolu käsitlemiseks. Ta võimaldab vahelduvvoolu kohta formaalselt rakendada kõiki alalisvoolu jaoks tuletatud seadusi ja valemeid, kusjuures alalisvoolu puhul opereeritakse reaalarvudega, vahelduvvoolu puhul aga kompleksarvudega.

Teatavasti võib kompleksarvu kirjutada kolmel kujul:

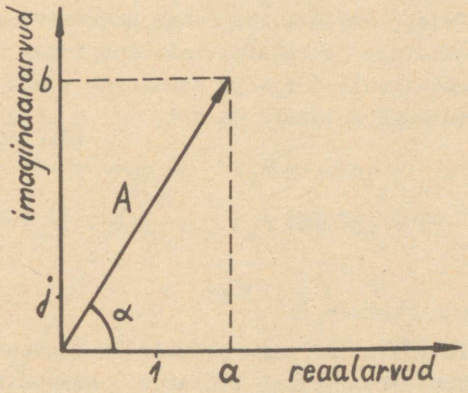
$$a + bj = A\cos\alpha + jA\sin\alpha = Ae^{j\alpha},$$

kus a ja b on vastavalt kompleksarvu reaal- ja imaginaarosa,

$A = \sqrt{a^2 + b^2}$ - kompleksarvu moodul,

$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{b}{a}$ - kompleksarvu argument,

$j = \sqrt{-1}$ - imaginaararvude ühik.



Joon. 1.

Iga kompleksarvu võib kujutada vektorina kompleksta-sandil. Vektor algab koordinaatteljestiku algusest ja suundub punkti koordinaatidega a ja jb (joon. 1). Kui kompleksarvu argument muutub ajas, s.t. $\alpha = \omega t$, siis kompleksarv $Ae^{j\omega t}$ vastab teljestiku lähtepunkti ümber vastu kella-osuti suunda nurkkiirusega ω pöörlevale vektorile.

Teatavasti võib sinusoidaalselt muutuvaid suurusi kujutada ühtlaselt pöörlevate nn. amplituudvektoritena, kusjuures selle suuruse hetkväärtuse annab amplituudvektori projektsioon. Formaalselt võib aga sellisele amplituudvektorile vastavusse seada pöörleva vektori komplekstasandil. Seega võib näit. vahelduvvoolu, mille hetkväärtus avaldub

$$i = I_0 \sin(\omega t + \psi_i),$$

kus ψ_i on algfaas (faas ajamomendil $t = 0$), kujutada kompleksarvuna

$$I_o e^{j(\omega t + \psi_i)} = I_o \cos(\omega t + \psi_i) +$$

$$+ j I_o \sin(\omega t + \psi_i).$$

Nagu näha, on kompleksarvu mooduliks voolu amplituudväärtus, argumendiks - faas; imaginaarosa annab hetkväärtuse.

Olgu vooluahelale rakendatud vahelduvpinge u ja voolaku temas vahelduvvool i ; olgu faasinihe voolu ja pinge vahel φ . Vastavad kompleksid on siis

$$I_o e^{j(\omega t + \psi_i)} \quad \text{ja}$$

$$U_o e^{j(\omega t + \psi_u)} = U_o e^{j(\omega t + \psi_i + \varphi)},$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i.$$

On lepitud kokku tähistada sinusoidaalselt muutuvate suuruste komplekse (kompleksarvulisi tähistusi) suurte tähtedega, mille kohal on katus. Et meid tavaliselt huvitavad nende suuruste efektiivväärtused ja vektorite suhteline asetus (algfaasid ja nende vahe), mitte aga hetk- ja amplituudväärtused, siis jäetakse tavaliselt argumendis muutuv suurus kirjutamata, maksimaalväärtuse asemel kirjutatakse aga efektiivväärtus. Vastavalt sellele kokkuleppele omandavad voolu ja pinge kompleksid kuju

$$\hat{I} = I e^{j\psi_i} ; \quad \hat{U} = U e^{j(\psi_i + \varphi)}.$$

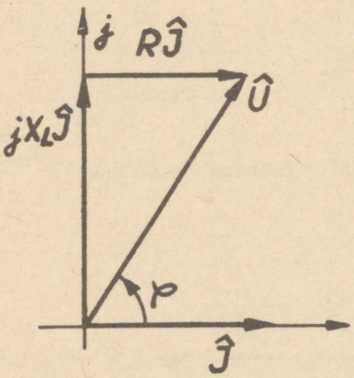
See võte võimaldab asendada pöörlevad vektorid seisvatega, vektordiagramm kujutab voolu- ja pingevektorite suhtelist asetust, s.t. faasivahesid.

Komplekskujus on Ohmi ja Kirchhoffi seadused vahelduvvoolu jaoks täpselt samasugused nagu alalisvoolu jaokski. Selleks tuleb aga ka takistus väljendada komplekskujus. Kulgegu läbi takisti R ja sellega järjestikku ühendatud in-

duktiivpooli L vahelduvvool $\hat{I} = Ie^{j\psi_i}$. Olgu $\psi_i = 0$, siis $\hat{I} = I$.

Joonestame vektordiagrammi (joon. 2). Pinge induktiivsusel on voolust ees $\frac{\pi}{2}$ võrra, teda kujutatakse puhtimaginaararvuna $j\omega L\hat{I} = jX_L\hat{I}$. Pinge tegevtakistusel on vooluga samas faasis, ta on reaalarv $R\hat{I}$. Resultantpinget kujutab summa

$$\hat{U} = R\hat{I} + jX_L\hat{I} = \hat{I}(R + jX_L) = \hat{I}\hat{Z}.$$



Joon. 2.

$\hat{Z}$ on vooluahela kogutakistus e. impedants:

$\hat{Z} = R + jX_L = Ze^{j\varphi}$,

kus argument $\varphi = \text{arctg}\,\frac{X_L}{R}$,

moodul $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$.

Impedantsi kompleksi kujutatakse tavaliselt $\hat{Z}$-ga, selle moodulit Z-ga. Kuigi impedants ei ole sinusoidaalselt muutuv suurus, paneme Z-le katuse peale, et eraldada teda impedantsi mooduli tähistusest. Impedantsi argument φ ühtib faasinihkenurgaga pinge ja voolu vahel.

Kuna pinge mahtuvusel jääb voolust faasis maha $\frac{\pi}{2}$ võrra, siis impedants järjestikku lülitatud mahtuvusest ja aktiivtakistusest koosneva vooluringi korral avaldub

$$\hat{Z} = R - jX_c = Z\,e^{-j\varphi},$$

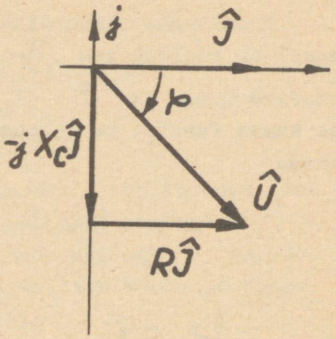
kus

$$\varphi = \text{arctg}\,\frac{X_c}{R},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2},$$

$$-jX_c = -j\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}.$$

Vastav vektordiagramm on kujutatud joonisel 3.



Joon. 3.

Järjestikku lülitatud aktiivtakistuse, mahtuvuse ja induktiivsuse korral avaldub impedants

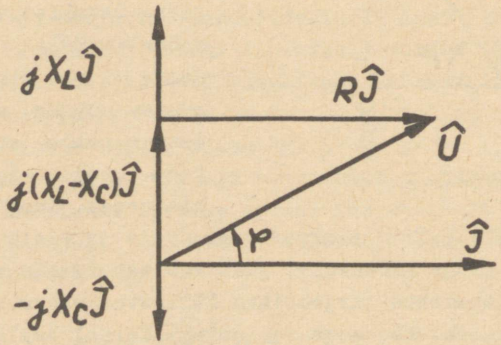
$$\hat{Z} = R + j(X_L - X_c) = Ze^{j\varphi},$$

kus

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2},$$

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{X_L - X_c}{R}.$$

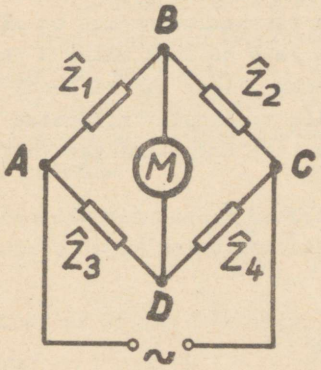
Vastav vektordiagramm on kujutatud joonisel 4.



Joon. 4.

B. <u>Vahelduvvoolu sildade üldised omadused ja teooria</u>.

Kõige laialdasemat kasutamist leiab nn. neljaõlgne sild, mille skeem on esitatud joonisel 5. Silla õlgadeks olevad impedantsid võivad koosneda kõige mitmekesisematest oomiliste takistuste, induktiivsuste ja mahtuvuste kombi-



Joon. 5.

natsioonidest. Kui silla diagonaali BD läbiv vool saab nulliks, on sild tasakaalus. Tasakaalu avastamiseks on sellesse diagonaali lülitatud tundlik vahelduvvoolu (-pinge) mõõteriist - nulli-indikaator M.

Vool $\hat{I}_M = 0$, kui potentsiaalide vahe punktide B ja D vahel igal ajamomendil on 0. Selleks peavad olema täidetud tingimused:

$\hat{I}_1\hat{Z}_1 = \hat{I}_3\hat{Z}_3$ ja $\hat{I}_1\hat{Z}_2 = \hat{I}_3\hat{Z}_4$.

Nendest seostest

$$\frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_2} = \frac{\hat{Z}_3}{\hat{Z}_4} \quad \text{või}$$

$$\hat{Z}_1\hat{Z}_4 = \hat{Z}_2\hat{Z}_3. \qquad (1)$$

Kompleksid $\hat{Z}_k$ võib avaldada algebralisel kujul:

$$\hat{Z}_k = R_k + jX_k, \qquad (2)$$

kus $k = 1, 2, 3, 4.$

Silla tasakaalu tingimuseks tuleb nüüd:

$$(R_1 + jX_1)(R_4 + jX_4) = (R_2 + jX_2)(R_3 + jX_3).$$

Kompleksarvude võrdsuse tingimusest (reaal- ja imaginaarosad peavad mõlemad olema võrdsed) tuleneb kaks võrrandit, mis peavad olema rahuldatud samaaegselt:

$$\left.\begin{aligned} R_1R_4 - X_1X_4 &= R_2R_3 - X_2X_3 \\ R_1X_4 - X_1R_4 &= R_2X_3 - X_2R_3 \end{aligned}\right\}. \qquad (3)$$

Tasakaalutingimus kahe võrrandi kujul näitab vahelduvvoolu silla põhiomadust ja tema põhilist erinevust alalisvoolu sillast. Alalisvoolu silla tasakaalutingimus on määratud ühe võrrandiga, järelikult saab sellest määrata ühe suuruse ja silla tasakaalustamiseks piisab ühe elemendi reguleerimisest. Vahelduvvoolu silla tasakaalutingimusest saab aga määrata kaks suurust ja tasakaalustamiseks tuleb muuta vähemalt kaht parameetrit.

Vahelduvvoolu silla tasakaalutingimust võib väljendada ka teisiti, kompleksarvu eksponentsiaalse kuju kaudu. Silla õlgade impedantsid:

$$\left.\begin{aligned} \hat{Z}_k &= Z_k e^{j\varphi_k} \quad , \\ k &= 1,\ 2,\ 3,\ 4. \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

Võrrand (1) võtab kuju

$$Z_1 Z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = Z_2 Z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)},$$

millest

$$\begin{aligned} Z_1 Z_4 &= Z_2 Z_3 \ , \\ \varphi_1 + \varphi_4 &= \varphi_2 + \varphi_3 \ . \end{aligned} \qquad (5)$$

Siit on näha, et silda saab tasakaalustada mitte igasuguse õlgade valiku korral. Kui näit. kahes kõrvutiolevas õlas on aktiivtakistused (s.t. näit. $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$), siis ülejäänud kahes õlas peavad olema kas induktiivsused ($\varphi > 0$) või mahtuvused ($\varphi < 0$). Kui aga kahes vastasõlas on aktiivtakistused, siis ülejäänud õlgades peab ühes olema mahtuvus, teises induktiivsus.

Vahelduvvoolu sillad jaotatakse sagedusest sõltuvateks ja sõltumatuteks. Viimaste tasakaalutingimused ei sisalda sagedust; nende tasakaalupunkt ei sõltu sagedusest. Seepärast on nad töötamiseks mugavamad, nad ei nõua stabiliseeritud sagedusega toitepinget.

C. Vahelduvvoolu sildade tundlikkus ja koonduvus.

Sildskeemi tundlikkuseks nimetatakse silla ühe õla impedantsi muutumisel silla väljundis tekkiva voolu, pinge või võimsuse juurdekasvu ja impedantsi absoluutse või suhtelise muutuse suhte piirväärtust. Absoluutne voolutundlikkus avaldub:

$$\hat{S}_I = \lim_{\Delta \hat{Z}_k \to 0} \frac{\Delta \hat{I}_M}{\Delta \hat{Z}_k} ;$$

suhteline voolutundlikkus

$$\hat{S}_I^o = \lim_{\Delta \hat{Z}_k \to o} \frac{\frac{\Delta \hat{I}_M}{\hat{I}_M}}{\frac{\Delta \hat{Z}_k}{\hat{Z}_k}} = \lim_{\delta \hat{Z}_k \to o} \frac{\Delta \hat{I}_M}{\delta \hat{Z}_k} ,$$

siin

$$\delta \hat{Z}_k = \frac{\Delta \hat{Z}_k}{\hat{Z}_k} .$$

Täpselt samuti defineeritakse pingetundlikkus ja tundlikkus võimsuse järgi.

Sildskeemi koostamisel peab arvestama, et tema tundlikkus oleks nii suur, et silla mistahes elemendi takistuse muutus, mis on võrdne selle elemendi täpsusklassi poolt määratud veaga või sellest suurem, annaks kasutatava indikaatori näidu märgatava muutuse. Tundlikkuse lähem analüüs iga konkreetse skeemi korral ei kuulu käesoleva töö ülesannete hulka, siin toome vaid üldised juhised skeemi tundlikkuse suurendamiseks.

Valime lihtsuse mõttes juhu, kus indikaatori takistus on väga suur, võrreldes silla õlgade takistustega, nii et võib ligikaudu kirjutada:

$$\hat{Z}_M \to \infty .$$

(Vahelduvvoolu sildades laialdaselt kasutatavate elektronlampindikaatorite korral on see enamasti nii.) Olgu sild viidud tasakaalust välja ainult ühe õla takistuse muutuse $\Delta\hat{Z}_1$ tõttu. Sel juhul pinge muutus väljundis avaldub:

$$\Delta\hat{U}_M = \hat{U}_M - 0 = \hat{U}\,\frac{(\hat{Z}_1+\Delta\hat{Z}_1)\hat{Z}_4 - \hat{Z}_2\hat{Z}_3}{(\hat{Z}_1+\Delta\hat{Z}_1+\hat{Z}_2)(\hat{Z}_3+\hat{Z}_4)}.$$

Arvestades silla tasakaalu tingimust $\hat{Z}_1\hat{Z}_4 = \hat{Z}_2\hat{Z}_3$ ja seda, et $\Delta\hat{Z}_1 \ll \hat{Z}_1$, saame:

$$\Delta\hat{U}_M = \hat{U}\,\frac{\Delta\hat{Z}_1\hat{Z}_4}{(\hat{Z}_1+\hat{Z}_2)(\hat{Z}_3+\hat{Z}_4)}.$$

Suhteline pingetundlikkus avaldub nüüd:

$$\hat{S}_u^o = \frac{\Delta\hat{U}_M}{\Delta\hat{Z}_1} = \frac{\hat{U}}{\frac{\Delta\hat{Z}_1}{\hat{Z}_1}}\,\frac{\Delta\hat{Z}_1\,\hat{Z}_4}{(\hat{Z}_1+\hat{Z}_2)(\hat{Z}_3+\hat{Z}_4)} = \hat{U}\,\frac{1}{\left(1+\frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_1}\right)\left(1+\frac{\hat{Z}_3}{\hat{Z}_4}\right)}.$$

Tähistanud $\frac{\hat{Z}_2}{\hat{Z}_1} = \hat{k}$ (seega $\frac{\hat{Z}_3}{\hat{Z}_4} = \frac{1}{\hat{k}}$), saame:

$$\hat{S}_u^o = \hat{U}\,\frac{1}{(1+\hat{k})(1+\frac{1}{\hat{k}})} = \hat{U}\,\frac{1}{\hat{k}+\frac{1}{\hat{k}}+2} = \hat{U}\,\frac{\hat{k}}{(1+\hat{k})^2} = \hat{U}\hat{A}. \quad (6)$$

Et indikaatori näit sõltub peamiselt talle rakendatud pinge absoluutväärtusest, siis on tundlikkus seda suurem, mida suurem on viimases avaldises $\hat{A}$ moodul. On kerge näidata, et

$$|\hat{A}| = A = \frac{k}{1+2k\cos\theta+k^2},$$

kus $k = |\hat{k}| = \left|\frac{\hat{z}_2}{\hat{z}_1}\right|$,

$\theta = \varphi_2 - \varphi_1$ (vastavate õlgade faaside vahe),

järelikult $\hat{k} = k \cos\theta + j\, k \sin\theta$.

Funktsiooni $A = f(k, \theta)$ uurimine näitab, et tal on maksimumid, kui $k = 1$ ja $\theta = \pm\pi$. Seega tuleb maksimaalse tundlikkuse saavutamiseks kasutada nn. sümmeetrilisi sildskeeme, mille juures

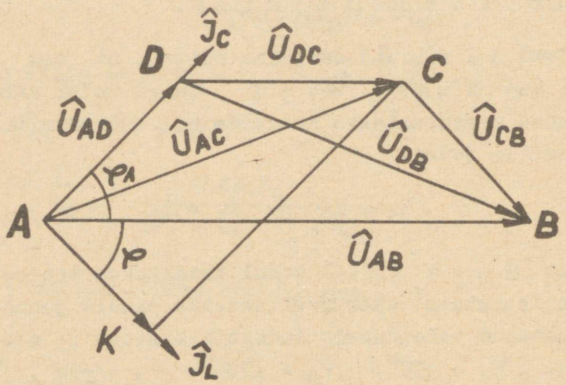
$$z_1 = z_2 \quad \text{ja} \quad z_3 = z_4.$$

Tingimust $\theta = \pm\pi$ (mille puhul tundlikkus teoreetiliselt kasvab piiramatult) saab realiseerida ainult juhul, kui õlad on moodustatud vahelduvalt induktiivsustest ja mahtuvustest (s.o. kui $\varphi_1 = \pm 90^\circ$, $\varphi_2 = \mp 90^\circ$, $\varphi_3 = \pm 90^\circ$, $\varphi_4 = \mp 90^\circ$). Täpselt pole see tingimus praktikas kunagi realiseeritav (miks?). Reaktiivseid elemente sisaldavad skeemid on aga alati tundlikumad puhtaktiivsetest; see on üks vahelduvvoolu sildade eelistest alalisvoolu sildade ees.

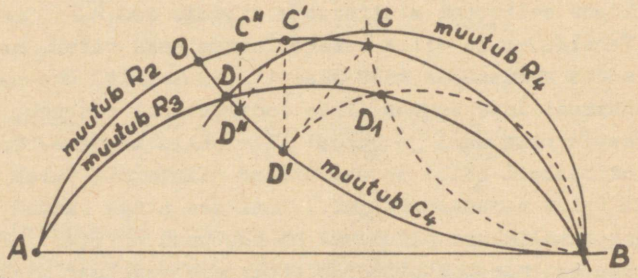
Vahelduvvoolu silla tasakaalustamiseks tuleb, nagu öeldud, muuta kordamööda kaht skeemi parameetrit. Ühe parameetri muutmisel ühes suunas pinge indikaatoril väheneb, saavutab teatud miinimumi ja hakkab siis jälle kasvama. Kui pinge (indikaatori näit) on saavutanud miinimumi, tuleb hakata muutma teist parameetrit jne., kuni see pinge (antud indikaatori tundlikkuse piirides) on muutunud nulliks. Selleks vajalike eri parameetrite järjestikuste reguleerimiste arv sõltub suurel määral muudetavate parameetrite valikust. Kui sild tasakaalustub juba mõne reguleerimisega, räägitakse, et ta koondub hästi. Ebaõnnestunult valitud reguleeritavate parameetrite korral võib silla koonduvus osutuda väga halvaks - tasakaalustamine osutub praktiliselt võimatuks.

Silla tasakaalustamise protsessi on sobiv uurida topograafilise diagrammi abil. See on komplekstasandil kujuta-

tud pingete jaotuse pilt silla elementidel, mis näitab ka pingete faasisuhteid. Vaatleme konkreetselt Maxwelli silda (joon. 14). Tema topograafiline diagramm on kujutatud joonisel 6a.



Joon. 6a.



Joon. 6b.

Kujutagu lõik AB silla toitepinget $\hat{U}_{AB}$. Vool silla harus ACB jääb maha pingest $\hat{U}_{AB}$, harus ADB on temast ees. Kui lugeda $\hat{I}_M \approx 0$ (mis on rahuldatud alati, kui $\hat{Z}_M \to \infty$ ja tasakaalule küllalt lähedal olevas seisus ka siis, kui viimane võrdus ei kehti), siis voolutugevused

haru ulatuses on const. ja neid kujutavad vektorid $\hat{I}_L$ ja $\hat{I}_c$. Pinge aktiivtakistusel R_{L_1} on samas faasis teda läbiva vooluga; seda pinget kujutab lõik AK. KC on pinge induktiivsusel L_1, ta on voolust $\hat{I}_L$ ees 90° võrra. CB on pinge R_2-l. AD kujutab pinget R_3-l, DB aga õlal $\hat{Z}_4$. Viimane jääb voolust $\hat{I}_c$ maha nurga φ_2 võrra, mis on paralleelse aktiivtakistuse tõttu väiksem kui 90°. Pinget indikaatoril kujutab lõik DC.

Silla tasakaalustamiseks tuleb viia kokku punktid C ja D. Saab tõestada, et ainult ühe parameetri muutmisel nihkub ka ainult üks punktidest C või D mööda mingisugust ringjoont (või ringjoone piirjuhuna mööda sirget). Kui lähtuda silla parameetrite mingisugusest konkreetsest seisust (näit. joonisel 6a kujutatud seis), siis vastab iga parameetri muutmisele (mida reaalses sillas muuta saab) punktide D või C nihkumise jälg - ringjoon, mis läbib kas punkti A või B (või mõlemaid) (joon. 6b). Nende nn. tasakaalustamisringjoonte keskpunktide ja raadiuste leidmiseks on olemas täpsed meetodid, kuid need nõuavad kompleksmuutuja funktsioonide teooria tundmist. Seepärast lepime siinkohal ainult silla tasakaalustamise protsessi kvalitatiivse kirjeldusega. Joonisel 6b kujutatud tasakaalustamisringjooned on joonestatud juhuslikult, ühe võimaliku näitena.

Tasakaalustada saab silda ainult selliste parameetrite muutmisega, millele vastavad tasakaalustamisringjooned lõikuvad, sealjuures mitte ainult punktides A või B. Jooniselt 6b on näha, et R_2 ja R_3 abil silda tasakaalustada ei saa. Samalt jooniselt selgub ka, miks läbib pinge U_{DC} miinimumi, kui me muudame üht parameetrit. Näit. C_4 muutmisel on pinge indikaatoril minimaalne, kui D nihkub punkti D'. Nüüd peame muutma mingit teist parameetrit, kui tahame seda pinget veel vähendada. Näit. R_2 muutmisega saame jälle miinimumi, kui C nihkub C'-sse. Edasi läheb tasakaalustamisprotsess läbi punktide D", C" jne., kuni punktis O saavutatakse tasakaal.

Kui reguleeritavad parameetrid asuvad silla ühes harus (ADB või ACB), siis muutub ühe parameetri muutmisel

mitte ainult punkti D (või C) asukoht sellele parameetrile vastaval ringjoonel, vaid ka teisele parameetrile vastava ringjoone keskpunkt. Näiteks, kasutades tasakaalustamiseks C_4 ja R_4 ja alustades C_4 reguleerimisega, läheme D'-st edasi juba mööda punktiiriga kujutatud ringjoont.

Saab tõestada (intuitiivselt on see näha ka jooniselt), et mida väiksem on nurk, mille all lõikuvad ringjooned, seda halvemini koondub sild. Näit. C_4 ja R_4 puhul on koonduvus palju parem kui C_4 ja R_2 puhul. Ülalnimetatud nurk võib muidugi muutuda, kui nihkuvad ringjoonte keskpunktid. Kuid tasakaalulähedases seisus võime ringjoonte lõikumise nurka (täpsemalt - lõikepunktis tõmmatud puutujate vahelist nurka) suure täpsusega lugeda konstantseks, sõltumatuks parameetrite väärtustest ja seega ringjoonte asendist. (Silla seisu võib pärast 1 - 2 reguleerimisoperatsiooni lugeda tasakaalulähedaseks.) Tasakaalustamisringjoonte vahelist nurka tasakaalulähedases seisus nimetatakse koonduvusnurgaks.

Ka koonduvusnurga arvutamiseks on olemas valemid. Käesolevas töös kasutatakse aga koonduvuse hindamisel hoopis töömahukamat, kuid väga piltlikku meetodit. Selleks tuleb konstrueerida topograafiline diagramm, lähtudes silla parameetrite väärtustest tasakaaluolukorras. Valinud reaalteljе suuna ühtivaks vektoriga $\hat{U}_{AB}$, punkti A komplekstasandi nullpunktiks ja $\hat{U}_{AB} = +1$, saame Kirchhoffi seaduste alusel määrata punktide C ja D asukohad. Tõepoolest, need punktid kujutavad skeemis (joon. 14) punkti A ja C ning D vaheliste pingete vektorite otspunkte. Pidades silma eeldust $\hat{I}_M \approx 0$, saame näit. (punkti D leidmiseks) pinge $\hat{U}_{AD}$:

$$\hat{U}_{AD} = \hat{U}_{AB} \frac{\hat{Z}_3}{\hat{Z}_3 + \hat{Z}_4} = +1 \cdot \frac{R_3}{R_3 + \dfrac{R_4 \dfrac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \dfrac{1}{j\omega C_4}}} =$$

$$= \frac{R_3}{R_3 + \frac{R_4}{j\omega C_4 R_4 + 1}} = \frac{R_3 + j\omega C_4 R_4 R_3}{R_3 + R_4 + j\omega C_4 R_4 R_3} =$$

$$= \frac{R_3^2 + R_4 R_3 + \omega^2 C_4^2 R_3^2 R_4^2 + j\omega C_4 R_3 R_4^2}{(R_3 + R_4)^2 + \omega^2 C_4^2 R_3^2 R_4^2} .$$

Saadud avaldise reaal- ja imaginaarosa (valitud mastaabis avalduvad nad arvudena < 1) on punkti D koordinaatideks komplekstasandil. Samal meetodil leiame punkti C.

Koonduvuse uurimiseks ja muudetavate parameetrite õigeks valimiseks tuleb nüüd analüütilisel teel konstrueerida tasakaalustamisringjooned. Selleks tuleb määrata igal ringjoonel vähemalt 3 punkti. Lähtume tasakaaluolukorrast, kus C ja D on kokku langenud. Seega saame töö juures tasakaaluolukorras üles kirjutatud parameetrite väärtusi kasutades arvutada eeltoodud valemite abil kõikide ringjoonte ühise punkti koordinaadid. Andes nüüd ühele reaalses skeemis muudetavale parameetrile tasakaaluolukorrast erinevaid väärtusi, arvutame veel 2 punkti koordinaadid, konstrueerime geomeetriliselt ringjoone (või selle osa). Samuti ehitame kõigile teistele parameetritele vastavad ringjooned. Ehitame lõikepunktis puutujad, mõõdame malliga koonduvusnurgad.

Vahelduvvoolu sildskeemide praktilisel kasutamisel on väga mugav, kui kumbki määratavatest parameetritest sõltub ainult ühest reguleeritavast parameetrist. Sellisel juhul võib kummagi reguleeritava parameetri igale väärtusele seada vastavusse ühe määratava parameetri väärtused. Võime ehitada 2 gradueeritud skaalat ja tulemused saame siis otseste näitudena, ilma arvutusteta. Tööstuslike sildade korral valitakse skeem alati nii, et see lahutatud näidu nõue oleks rahuldatud.

D. Vahelduvvoolu sildade kaitsmine moonutavate mõjude eest.

Mõõtmistulemusi moonutavateks mõjudeks vahelduvvoolu sildades on peamiselt elektrilised (mahtuvuslikud) ja magnetilised (induktiivsed) seosed (juhtivused) skeemi elementide ja neid ühendavate juhtmete vahel (sisemised seosed) ning skeemi elementide ja ümbritsevate esemete vahel (välised seosed). Need parasiitjuhtivused võivad olla lülitatud paralleelselt skeemi elementidega, sel juhul nad muudavad otseselt nende elementide takistust ja põhjustavad mõõtmisvigu. Mõnel juhul võivad nad tekitada parasiitvoolusid läbi indikaatori ja põhjustada skeemi näilist tasakaalustamatust või voolu puudumist indikaatoris mittetasakaalu-olukorras.

Parasiitseosed on enamasti väga muutlikud, seepärast nende arvessevõtmine arvutustes on võimatu ja nad tuleb kas kõrvaldada või nende mõju vähendada. Tavaliselt on ohtlikumad mahtuvuslikud seosed, kuna induktiivsed seosed on nõrgemad. Kaitseks mahtuvuslike mõjude eest kasutatakse põhiliselt skeemi elementide ja juhtmete elektrostaatilist ekraneerimist ning skeemi sobiva punkti maandamist. Sealjuures tuleb püüda:

- vähendada mahtuvust skeemi elementide vahel ja elementide ning maa (ümbritsevate esemete) vahel või vähemalt muuta selle mahtuvuse väärtus konstantseks, sõltumatuks välismõjudest;

- vähendada potentsiaalide vahet parasiitmahtuvustel. Selle ideaalseks juhuks on ekvipotentsiaalne ekraneerimine - kõik antud elemendi parasiitmahtuvused asendatakse mahtuvusega elementi ümbritseva ekraani suhtes, kusjuures ekraan on elemendiga samal potentsiaalil;

- paratamatult säilivad parasiitmahtuvused lülida paralleelselt väikese takistusega elementidega; väikesed parasiitjuhtivused (suured -takistused) mõjutavad vähe paralleelsete väikeste takistuste väärtust.

Lähemalt käsitletakse konkreetsete sildskeemide kaits-

mist allpool. Siin märgime veel, et ekraani võib ühendada kas elemendi ühe klemmiga (ühepooluseline ekraneerimine) või mõne muu punktiga skeemis. Ekvipotentsiaalseks ekraneerimiseks tuleb kasutada jaotatud ekraneerimist - kogu element koostatakse mitmest järjestikku lülitatud osast, iga osa ekraneeritakse eraldi. Tööstuslikult toodetavail seadmeil (reaktiivsusvabad takistussalved jne.) on sageli kaks teineteisest isoleeritud elektrostaatilist ekraani; see võimaldab kahekordset ekraneerimist - sisemine ekraan ühendatakse elemendi ühe klemmiga, välimine aga skeemi mõne punktiga, nii et ekraanidevaheline mahtuvus šundiks väikese takistusega elementi.

Eriti tundlik on parasiitvoolude suhtes indikaator, kuna teda läbivad voolud ise on väikesed. Indikaatorit on aga lihtne ekvipotentsiaalselt ekraneerida, kuna tema ja kõik indikaatoridiagonaali juhtmed on tasakaaluolukorras sama potentsiaali abil.

Suuri moonutusi võib põhjustada väline võrgu- või raadiosageduslik elektromagnetiline väli, mis indutseerib skeemi elementides voolusid, põhjustades silla näilist tasakaalustamatust. Võrgusageduslik väli on rohkem lokaalne, tema mõju saab vähendada skeemi elementide paigutamisega eemale võrgujuhtmetest ja trafosid sisaldavatest seadmetest. Raadiosageduslik väli on märgatav raadiosaatjate läheduses, tema vastu saab võidelda kogu skeemi hoolika ekraneerimisega. Nii ühel kui teisel juhul aitab tublisti resonantsi häälestatav indikaator.

Tugeva raadiosagedusliku välja olemasolu korral ei ole silla maandamine alati kasulik, kuna mitte küllalt väikese takistusega ja pika maandusjuhtme korral võib viimane etendada antenni osa ja suurendada häireid. Maanduse mõju tehakse kindlaks katseliselt. Kindlasti tuleb aga ühendada skeemides maandatuna näidatud punkt ümbritsevate juhtidega, esmajoones eksperimentaatori endaga (on kasulik hoida reguleerimisoperatsioone tehes teise käega mõne juhtme varjest, mis on ühendatud selle punktiga).

E. Vahelduvvoolu sildades kasutatavad indikaatorid.

Lihtsaimaks indikaatoriks on telefon. Telefoni puuduseks on mitte eriti suur tundlikkus ja subjektiivsus, s.o. kuuldava heli valjuse miinimumipunkti hindamise täpsuse olenevus eksperimentaatori kõrva omadustest. Suurimaks puuduseks on praktiliselt kõrvaldamatu mahtuvus telefoni ja eksperimentaatori pea vahel (telefon tuleb suruda vastu kõrva), mis tingib selle, et heli telefonis ei kao täiesti kunagi, saame leida vaid selle enam või vähem täpse miinimumi.

Kasutatakse ka vibratsioongalvanomeetreid. Viimaste tundlikkus pole samuti mitte eriti suur, kuid nende eeliseks on terav resonants, s.o. reageerimine ainult ühele, resonantssagedusele. Sagedusest sõltuvates sildades aitab see vältida kõrgemate harmooniliste mõju. Vibratsioongalvanomeetreid saab aga kasutada ainult madalatel sagedustel.

Mainitud riistad reageerivad ainult pinge amplituudile, faasivahet nad ei näita. Tänapäeval kasutatakse põhiliselt elektronlamp-indikaatoreid (lampvoltmeetreid või ostsilloskoope), mille tundlikkuse võib teha küllaldaseks eelvõimenduse abil, mis on kasutatavad laias sageduste diapasoonis ja mida võib ehitada faasitundlikena.

Käesolevas töös kasutame vibratsioongalvanomeetrit.

III. Praktiline töö.

Allpool kirjeldatud variantidest tuleb üliõpilasel sooritada juhendaja valikul 2 tööd, üks mahtuvuse ja teine induktiivsuse määramiseks. Topograafiline diagramm konstrueerida juhendaja valikul ainult ühes töös.

A. Hea isolatsiooniga kondensaatori mahtuvuse määramine.

1. Tööülesanne.

Hea isolatsiooniga kondensaatorite mahtuvuse mõõtmine.

2. Töövahendid.

Kaks mõõdetavat kondensaatorit alusel, mahtuvussalv P 513, vibratsioongalvanomeeter M 501, 2 võrdset madalaoomilist püsivtakistit alusel, toitetrafo 220/6 V, tavalised ja varjestatud juhtmed.

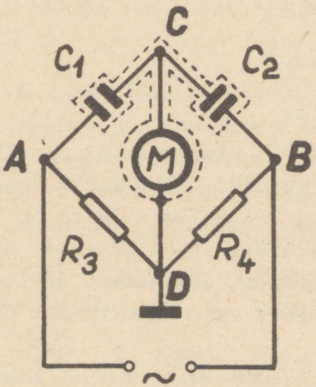
3. Töö käik.

Kasutame joonisel 7 kujutatud skeemi. Et kondensaatorite isolatsioonitakistust võib lugeda praktiliselt lõpmata suureks, on kahes õlas puhtreaktiivsed takistused: $\hat{Z}_1 = \frac{1}{j\omega C_1}$ ja $\hat{Z}_2 = \frac{1}{j\omega C_2}$. Teised kaks õlga on madalaoomilised aktiivtakistused. Lähtudes silla tasakaalutingimuse üldkujust (valem 1)

$$\hat{Z}_1 \hat{Z}_4 = \hat{Z}_2 \hat{Z}_3$$

on kerge näha, et antud juhul taandub tasakaalutingimus üheks võrrandiks

$$C_1 = C_2 \frac{R_4}{R_3} . \qquad (7)$$



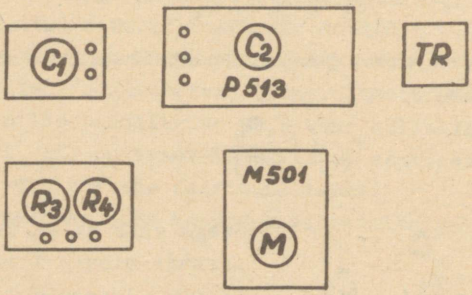
Joon. 7.

Seega saab silda tasakaalustada ainult 1 parameetri (C_2) reguleerimisega.

Punktiiriga ümbritsetud elemendid ja juhtmed on ekraneeritud. Kõik ekraanid on ühendatud omavahel ja skeemiga indikaatori maandatud klemmi juures. Kasutatud ekraneerimise ja maandamise moodus tagab a) ekraneerimist vajavate juhtmete minimaalse arvu, b) indikaatoridiagonaali

juhtmete ja indikaatori enda ekvipotentsiaalse ekraneerimise silla tasakaaluolukorras, c) säilivate parasiitmahtuvuste lülitamise paralleelselt toiteallika ja madalaoomiliste takistitega R_3 ning R_4. Mahtuvussalvel ja indikaatoril on varjed olemas, mõõdetava elemendi varjestamiseks kasutame kõrget pealt lahtist plekk-kasti. Klemmide varjestamiseks on tööstuslikel seadmeil vastavad metallkatted.

Seadmed on soovitatav paigutada joonisel 8 kujutatud plaani kohaselt. Toiteallikana kasutame valgustusvõrku läbi pinget madaldava transformaatori (Tr). Lülitame skeemi ühe uuritavatest kondensaatoritest. Null-indikaatorina kasutame vibratsioongalvanomeetrit. Vibratsioongalvano-



Joon. 8.

meetri tundlikkus tuleb enne skeemi pingestamist reguleerida minimaalseks (nupp "ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ" 0-le!). Seejärel suurendame tundlikkust, kuni valguslaigu laius on 10 - 20 jaotist kummalegi poole 0-jaotist. Tasakaalustame silla indikaatori antud tundlikkuse juures, suurendame jälle tundlikkust jne., kuni indikaatori näit tema maksimaalse tundlikkuse juures on viidud 0-le.

Mõõdame teise kondensaatori mahtuvuse, samuti kahe järjestikku ja paralleelselt ühendatud kondensaatori kogumahtuvused. Arvutame nende kombinatsioonide mahtuvused teoreetiliselt, tulemusi võrdleme.

Arvutame tulemuste vead. Tuleb silmas pidada, et siin meil pole võimalik arvesse võtta säilivatest parasiitseostest põhjustatud vigu. Mõõtmise tõelise täpsuse hindamiseks tuleks võrdluseks mõõta samad elemendid mõne täpsema töötusliku silla abil.

Joonestame sissejuhatuses toodud reeglite järgi topograafilise diagrammi. Põhjendame diagrammi järgi, miks saab antud juhul tasakaalustada silda ainult ühe reguleeritava elemendi ja ühe reguleerimisoperatsiooni abil.

4. Lisaküsimusi.

a) Miks on valitud $R_3 = R_4$?

B. Kondensaatorite mahtuvuse ja kaonurga määramine.

1. Tööülesanne.

Kondensaatorite mahtuvuse ja kaonurga määramine.

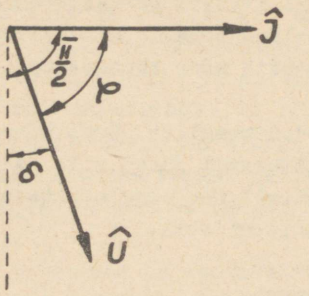
2. Töövahendid.

2 uuritavat kondensaatorit alustel, mahtuvussalv P513, takistussalv P517M, 2 võrdset madalaoomilist püsivtakistit alusel, vibratsioongalvanomeeter M501, toitetrafo 220/6 V, tavalised ja varjestatud juhtmed.

3. Töö käik.

Reaalsed kondensaatorid, eriti tahke või vedela dielektrikuga, ei ole kunagi ideaalselt reaktiivsed elemendid, vaid nendes hajub suuremal või vähemal määral energiat, mis eraldub dielektrikus soojusena. Faasivahe voolu ja pinge vahel sellistel kondensaatoritel erineb $\frac{\pi}{2}$ -st väikese nurga δ võrra, mida nimetatakse kondensaatori kaonurgaks; kadudega kondensaatori impedantsi argument avaldub siis $\varphi = -(\frac{\pi}{2} - \delta)$ (joon. 9). Kaonurk on ilmselt seotud kondensaatori dielektriku juhtivusega.

Kadudega kondensaatorit võib ekvivalentskeemis kujuta-



Joon. 9.

da puhta mahtuvusena C, millega on kas paralleelselt või järjestikku lülitatud takistus (vastavalt R või R'). Järjestikuse ekvivalentskeemi korral saame impedantsi argumendiks (tuletada!):

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{X_c}{R'} = -\frac{1}{\omega CR'} =$$

$$= \operatorname{tg}\left[-\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)\right],$$

millest

$$\operatorname{tg}\delta = \omega CR'.$$

Paralleelse ekvivalentskeemi korral saame:

$$\operatorname{tg}\varphi = -\omega CR = \operatorname{tg}\ -\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)$$

ja

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{1}{\omega CR}\ .$$

Joonisel 10 on kujutatud silla skeem kondensaatori mahtuvuse ja kaonurga määramiseks. Mõõdetavat kondensaatorit kujutab paralleelne ekvivalentskeem C_1R_1. Kuigi järjestikuse ekvivalentskeemi korral lihtsustuksid arvutusvalemid tunduvalt, kasutame paralleelset skeemi, sest siit määratav takistus R_1 on interpreteeritav (madalatel sagedustel) kondensaatori dielektriku isolatsioonitakistusena (on mõõdetav näiteks ka alalisvoolu sillaga). C_2 ja R_2 on vastavalt mahtuvus- ja takistussalv, R_3 ja R_4 - madalaoomilised püsivtakistid.

Silla õlgade impedantsid avalduvad:

$$\hat{Z}_1 = \frac{R_1 \frac{1}{j\omega C_1}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}} = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1}\ ;$$

$$\hat{Z}_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}\ ;\quad \hat{Z}_3 = R_3\ ;\quad \hat{Z}_4 = R_4.$$

Lähtudes jälle silla tasakaalutingimuse üldkujust (1), saame kaks võrrandit, millede kombineerimisel jõuame võrranditeni:

$$\begin{cases} R_1R_2\omega^2C_1C_2 = 1\ , \\ R_1R_4C_2 = R_2R_3C_2 + R_1R_3C_1. \end{cases}$$

Siit saame avaldada:

$$(8)\qquad \begin{cases} \operatorname{tg}\delta_1 = \dfrac{1}{\omega C_1R_1} = \omega C_2R_2\ , \\ C_1 = \dfrac{R_4C_2}{R_3(1 - R_2^2\omega^2C_2^2)}\ , \\ R_1 = \dfrac{1}{\operatorname{tg}\delta\, j\omega C_1}\ . \end{cases}$$

On näha, et sild on sagedusest sõltuv. Antud juhul osutub, et (mitte eriti suurte mahtuvuste - $C \leqslant 1\,\mu F$, mitte eriti väikeste isolatsioonitakistuste ja mitte väga suurte sageduste korral) C_1 avaldises sagedusest sõltuv liige nimetajas on väga väike arv, võrreldes 1-ga. Tähistanud

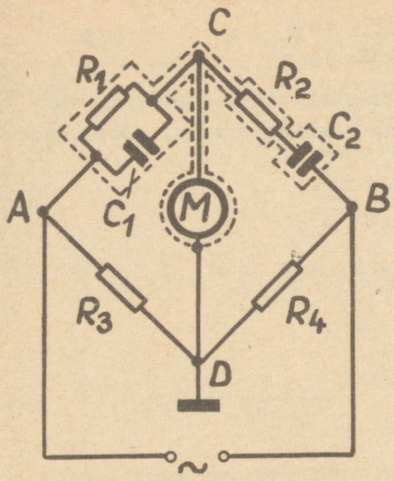
$$\alpha = R_2^2\,\omega^2\,C_2^2$$

ja kasutades $\frac{1}{1-\alpha}$ reaksarenduse kaht esimest liiget, saame

$$\frac{1}{1-\alpha} = 1 + \alpha\ ;$$

$$C_1 = \frac{R_4}{R_3}\,C_2(1 + R_2^2\omega^2\,C_2^2). \qquad (8a)$$

Koostame skeemi (joon. 10). Varjestuse ja maanduse põhimõte ühtib siin täpselt töös A tooduga. Takistussalve

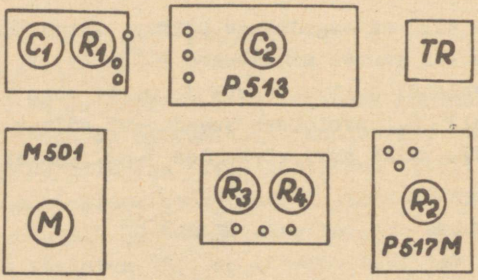


Joon. 10.

mõlemad ekraanid ühendame kokku. Seadmed on soovitatav paigutada joonisel 11 toodud plaani kohaselt.

Kuna toodetavate kondensaatorite kaonurk madalatel pingetel ja sagedustel on väga väike, siis on selle kunstlikuks suurendamiseks kondensaatoritega paralleelselt joodetud suure takistusega takistid.

Nulli-indikaatorina kasutame vibratsioongalvanomeetrit. Tema kasutamisest loe lähemalt töö A juhendist.



Joon. 11.

Reguleeritavad on C_2 ja R_2. Enne skeemi pingestamist tuleb mõlema salve kõik ümberlülitid pöörata keskmisse asendisse, et oleks võimalik nende abil R_2 ja C_2 nii suurendada kui ka vähendada. Esimene reguleerimisoperatsioon tehakse selle parameetriga, kumma suhtes sild juhuslikult valitud algseisus tundlikum on (tehakse katseliselt

kindlaks).

Arvutame C_1, $tg\delta_1$ ja R_1, samuti nende vead. Tulemuste täpsuse kohta kehtib töös A öeldu. Tuleb märkida, et vahelduvvoolu sillaga mõõtmisel saab, kui pole rakendatud eriabinõusid, hea täpsusega mõõta tavaliselt ainult impedantsi reaktiivkomponenti (C või L), kuna aktiivkomponendi määramise täpsus on väike. See on tingitud sellest, et enamasti moodustab aktiivkomponent impedantsist vaid väikese osa, temale langeb väike osa koguvõimsusest.

Topograafilise diagrammi konstrueerimiseks vajalikku pingevektorit AD on leida väga lihtne. AC määramine on aga tülikas. Seepärast toome punkti C koordinaatide avaldised valmiskujul (nendeks on pingevektori $\hat{U}_{AC}$ reaal- ja imaginaarosa), eeldusel, et $U_{AB} = 1$:

$$Re(\hat{U}_{AC}) = \frac{\omega^2 R_1C_2(R_1C_2+R_1C_1+R_2C_2)}{(1-\omega^2R_1R_2C_1C_2)^2 + \omega^2(R_1C_2+R_1C_1+R_2C_2)^2};$$

$$Im(\hat{U}_{AC}) = \frac{\omega R_1C_2(1-\omega^2R_1C_2R_2C_1)}{(1-\omega^2R_1R_2C_1C_2)^2 + \omega^2(R_1C_2+R_1C_1+R_2C_2)^2}.$$

Joonestame tasakaalustamisringjooned R_2 ja C_2 jaoks. Selleks leiame kummagi jaoks veel 2 punkti lisaks tasakaaluolukorrale vastavale punktile, andes R_2-le ja C_2-le tasakaaluolukorrast erinevaid väärtusi. Arvutamisel on sobiv pikkade kirjutuste vältimiseks eelnevalt leida järgmiste avaldiste väärtused:

$$P = R_1C_2 + R_1C_1 + R_2C_2,$$

$$S = \omega^2R_1R_2C_1C_2,$$

$$T = \omega R_1C_2.$$

Joonestanud nende ringjoonte kaared ja R_3 ning R_4-ga tasakaalustamisele vastava sirge, kontrollime, kas regu-

leeritavad parameetrid on valitud õigesti.

4. Lisaküsimusi.

a) Milline on dielektriliste kadude mehhanism ja miks ning kuidas sõltub kadude suurus sagedusest?
b) Miks ei saa skeemis (joon. 10) kasutada etaloonmahtuvusega paraleelselt lülitatud takistusmagasini? Kas see on põhimõtteliselt võimatu?

C. Pooli induktiivsuse määramine etalooninduktiivsuse abil.

1. Tööülesanne.

Poolide induktiivsuse, oomilise takistuse ja hüveteguri määramine.

2. Töövahendid.

2 pooli alusel, induktiivsussalv MИ , 2 takistussalve - P58 ja P517M, 2 madalaoomilist püsivtakistit alusel, vibratsioongalvanomeeter M501, toitetrafo 220/6 V, tavalised ja varjestatud juhtmed.

3. Töö käik.

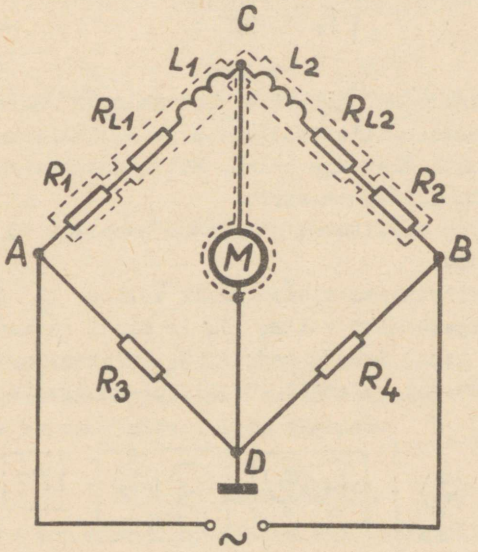
Puhtinduktiivse pooli valmistamine on praktiliselt võimatu, sest kasutataval traadil on tingimata ka oomiline takistus. Seepärast on induktiivsuse määramisel sillas alati vajalik kahe elemendi reguleerimine ja koos induktiivsusega määratakse alati ka oomiline takistus. Mida suurem on pooli oomiline takistus, seda rohkem hajutab ta energiat. Energiakadude iseloomustamiseks on võetud tarvitusele hüveteguri Q_p mõiste. Ta avaldub:

$$Q_p = \frac{\omega L}{R_L} .$$

Suurus $\frac{Q_p}{2\pi}$ näitab, mitu korda on vahelduvvoolu perioodi jooksul poolile antud koguenergia suurem sama aja jooksul

pooli oomilisel takistusel hajunud energiast (ülejäänud energia annab pool vooluringi tagasi).

Käesolevas töös kasutatava silla skeem on kujutatud joonisel 12. Poolid on ekvivalentskeemis asendatud järjestikku lülitatud puhta induktiivsuse ja oomilise takistusega.



Joon. 12.

L_1, R_{L_1} vastab uuritavale poolile, L_2, R_{L_2} induktiivsussalvele, R_1 ja R_2 on takistussalved, R_3 ja R_4 - madalaoomilised püsivtakistid. Järelikult:

$$\hat{Z}_1 = R_1 + R_{L_1} + j\omega L_1,$$

$$\hat{Z}_2 = R_2 + R_{L_2} + j\omega L_2,$$

$$\hat{Z}_3 = R_3, \quad \hat{Z}_4 = R_4.$$

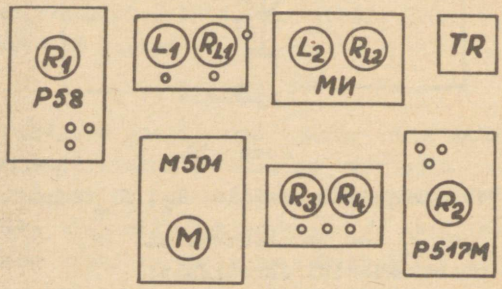
Silla tasakaalutingimuse üldkujust (1) on siin väga lihtne tuletada arvutusvalemid:

$$(9)\quad \begin{cases} L_{L_1} = L_2 \dfrac{R_3}{R_4}\ , \\ R_{L_1} = \dfrac{R_3}{R_4}(R_2 + R_{L_2}) - R_1\ , \\ Q_p = \dfrac{\omega L_1}{R_{L_1}}\ . \end{cases}$$

Teeme ühendused vastavalt joonisele 12. Ekraneerimise põhimõte on analoogiline töödega A ja B. Takistussalvede mõlemad ekraanid ühendame kokku. Nulli-indikaatorina kasutame vibratsioongalvanomeetrit.

Seadmed on soovitatav paigutada joonisel 13 toodud plaani kohaselt.

Reguleeritavateks elementideks valime L_2 ja R_2. Enne skeemi pingestamist valime R_1-le mingi väikese väärtuse, alla 100 oomi. See on vajalik R_{L_1} määramise täpsuse suurendamiseks, et valemist (9) ei tuleks tavaliselt väike



Joon. 13.

R_{L_1} kahe suure arvu vahena. Kõik ümberlülitid seame keskmisse asendisse, R_2 valime selliselt, et $R_2 \approx R_1$, kõik väiksemate piirkondade lülitid seame jälle keskasendisse. Esimese reguleerimisoperatsiooni teeme selle parameetriga, mille suhtes sild antud momendil on tundlikum (määrame katseliselt). Mõõdame 2 pooli eraldi, seejärel lülitame nad paralleelselt ja järjestikku. Arvutame vead. Tulemuste täp-

suse kohta kehtib töödes A ja B öeldu.

Topograafilise diagrammi konstrueerimisel on pingevektori $\hat{U}_{AD}$ otspunkti D lihtne leida. $\hat{U}_{AC}$ arvutamiseks esitame valemid (tuletada need!) eeldusel, et $\hat{U}_{AB} = 1$:

$$Re(\hat{U}_{AC}) = \frac{R'(R'+R'')+ \omega^2 L_1(L_1+L_2)}{(R'+R'')^2 + \omega^2(L_1+L_2)^2},$$

$$Im(\hat{U}_{AC}) = \frac{\omega (L_1R'' - L_2R')}{(R'+R'')^2 + \omega^2(L_1+L_2)^2},$$

kus

$$R' = R_1 + R_{L_1},$$

$$R'' = R_2 + R_{L_2}.$$

Konstrueerime tasakaalustamisringjooned L_2, R_2 ja R_1 jaoks, võttes kõigi ühiseks punktiks tasakaalupunkti. Hindame reguleeritavate parameetrite valiku õigsust.

4. Lisaküsimusi.

a) Selgitada energiakadude mehhanismi poolis. Kas oomilised kaod on ainukesed?
b) Milleks on vajalik takistussalv R_1 ja kas ta on alati vajalik?

D. Induktiivsuse mõõtmine Maxwelli sillaga.

1. Tööülesanne.

Poolide induktiivsuse, oomilise takistuse ja hüveteguri määramine, kasutades etaloonmahtuvust.

2. Töövahendid.

2 uuritavat pooli, mahtuvussalv P513, 2 takistussalve - P58 ja P517M, 50-oomiline püsivtakisti, vibratsioongalva-

nomeeter M501, toitetrafo 220/6 V, tavalised ja varjestatud juhtmed.

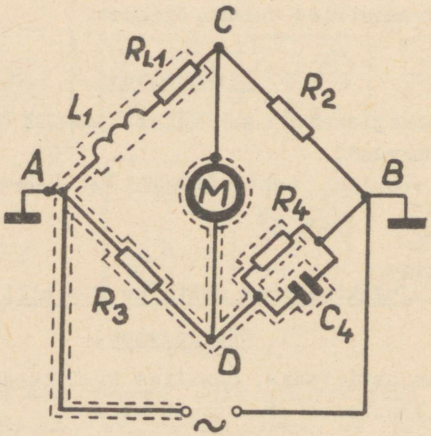
3. Töö käik.

Kuna etaloonmahtuvused on odavamad ja üldiselt täpsemad kui etalooninduktiivsused, siis on Maxwelli sild induktiivsuse mõõtmisel laialdaselt kasutusel. Silla skeem on toodud joonisel 14. L_1, R_{L_1} vastab uuritavale poolile, R_3 ja R_4 on takistussalved, R_2 - 50-oomiline takisti, C_4 on mahtuvussalv. Õlgade impedantsid avalduvad:

$$\hat{Z}_1 = R_{L_1} + j\omega L_1,$$

$$\hat{Z}_2 = R_2, \quad \hat{Z}_3 = R_3,$$

$$\hat{Z}_4 = \frac{R_4 \frac{1}{j\omega C_4}}{R_4 + \frac{1}{j\omega C_4}} = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}.$$



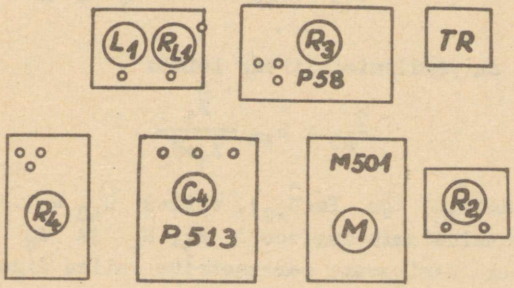
Joon. 14.

Silla tasakaalutingimuse üldkujust (1) saame arvutusvalemid (tuletada!):

$$\begin{cases} L_1 = C_4 R_2 R_3, \\ R_{L_1} = \dfrac{R_2 R_3}{R_4}, \\ Q_p = \dfrac{\omega L_1}{R_{L_1}} = \omega C_4 R_4. \end{cases}$$

Koostame skeemi (joon. 14), kasutades toiteallikana valgustusvoolu võrku läbi transformaatori ja nulli-indikaatorina vibratsioongalvanomeetrit. Kuna puudub madalaoomiline haru, ei saa kasutada eelmistes töödes antud varjestusmeetodit. Siin tuleb maandada punkt B; L_1 ja R_3 varjed ühendatakse omavahel ja ühe toitejuhtme varjega ning maandatakse. Indikaatoridiagonaali ja R_4 ning C_4 varjed ühendatakse skeemiga punktis C. Niiviisi on garanteeritud indikaatoridiagonaali ekvipotentsiaalne varjestus; kõik parasiitmahtuvused on lülitatud paralleelselt kas toiteallikaga või R_2-ga, mis on valitud väike ja võib olla varjestamata.

Seadmed paigutame joonisel 15 toodud plaani kohaselt.



Joon. 15.

Reguleeritavaiks valime R_4 ja C_4 (nende üks poolus on maandatud, mistõttu eksperimentaatori- ja skeemivahelised mahtuvused mõjutavad tulemust kõige vähem). Enne skeemi

pingestamist valime R_3 väärtuseks 100 - 1000 oomi, R_4 ja C_4 ümberlülitid asetame kõik keskseisu. Tuleb jälgida, et indikaatoridiagonaali varjed ei puutuks kokku maandatud varjetega, sest sel korral lühistatakse R_2 ja uuritav pool saab täispinge ning võib läbi põleda.

Silla tasakaalustamise protsessi kohta loe töödest A ja B. Tasakaalustamine ja näitude võtmine tuleb teha võimalikult kiiresti, sest voolu mõjul pooli traat soojeneb, R_{L_1} suureneb ja silla tasakaal "triivib" pidevalt. Mõõdame 2 pooli andmed, seejärel ühendame nad paralleelselt ja järjestikku. Arvutame vead. Mõõtmistäpsuse kohta kehtib töödes A ja B öeldu.

Ühe pooli mõõtmise andmete järgi joonestame topograafilise diagrammi. Pingevektor $\hat{U}_{AD}$ on arvutatud sissejuhatuses. Toome tema otspunkti koordinaadid.

$$\mathrm{Re}(\hat{U}_{AD}) = \frac{R_3(R_3 + R_4) + \omega^2 C_4^2 R_3^2 R_4^2}{(R_3 + R_4)^2 + \omega^2 C_4^2 R_3^2 R_4^2};$$

$$\mathrm{Im}(\hat{U}_{AD}) = \frac{\omega C_4 R_3 R_4^2}{(R_3 + R_4)^2 + \omega^2 C_4^2 R_3^2 R_4^2}.$$

$\hat{U}_{AC}$ on võrdlemisi lihtne leida:

$$\hat{U}_{AC} = \hat{U}_{AB} \frac{\hat{Z}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2}.$$

Leiame $\mathrm{Re}(\hat{U}_{AC})$ ja $\mathrm{Im}(\hat{U}_{AC})$, võttes $\hat{U}_{AB} = 1$. Konstrueerime tasakaalustamisringjooned R_3, R_4 ja C_4 jaoks, kontrollime reguleeritavate parameetrite valiku õigsust.

IV. Kirjandus.

1. J. A. Strauf. Füüsika II. Tallinn, 1965, lk. 435-475.
2. И. В. Савельев. Курс общей физики. Том 2. М., 1968, стр. 266-280.

3. С. Г. Калашников. Электричество. М., 1964, стр. 568–577.

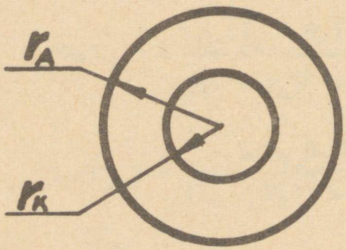
4. Электрические измерения. Общий курс. Под ред. А. В. Фремке. М.–Л., 1963, стр. 273–283.

5. К. Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. М., 1963, стр. 152–252, 323–343.

Lisa tööle № 20.

Kriitilise magnetvälja induktsiooni arvutamine.

Olgu magnetron risti joonise tasandiga, s.t. tasandiga xy. Silindrite raadiused olgu r_a ja r_k. Elektroni liikumist vaatleme tasapinnas xy. Elektrivälja tugevuse komponendid olgu selles tasandis E_x ja E_y.



$$E_x = -\frac{\partial U}{\partial x},$$

$$E_y = -\frac{\partial U}{\partial y}.$$

Katoodi potentsiaali võtame võrdseks nulliga, anoodil olgu selle väärtus aga U_o, s.t.

$$U(r_k) = 0,$$

$$U(r_a) = U_o.$$

Katoodi pinnal olgu elektronide kiirus null ($\dot{x} = \dot{y} = 0$). Magnetväli olgu suunatud piki z-telge. Elektronile mõjuv jõud on niisugusel juhul

$$\vec{F} = e \operatorname{grad} U - e. \begin{vmatrix} i & j & k \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} \\ o & o & B_o \end{vmatrix},$$

millest liikumisvõrrandid

$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{e}{m}\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{e}{m} B_0 \dot{y} \\ \ddot{y} = \frac{e}{m}\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{e}{m} B_0 \dot{x} \\ \ddot{z} = 0 \end{cases} \qquad (1)$$

Tähistame $\frac{e}{m} B_0 = \omega_0$, korrutame saadud süsteemi esimest võrrandit x-ga, teist aga y-ga ning liidame nende mõlemad pooled.

$$\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} = \frac{e}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial x}\dot{x} + \frac{\partial U}{\partial y}\dot{y}\right).$$

Et $\dot{x}\ddot{x} + \dot{y}\ddot{y} = \frac{1}{2}\frac{d}{dt}v^2$, kus $v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2$ ja $\frac{\partial U}{\partial x}\dot{x} + \frac{\partial U}{\partial y}\dot{y} = \frac{dU}{dt}$, siis

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}v^2 = \frac{e}{m}\frac{dU}{dt}.$$

Pärast leitud võrrandi integreerimist saame

$$\frac{1}{2}v^2 = \frac{e}{m}U + C.$$

C määrame algtingimustest. Kui $U = 0$, siis $v = 0$; järelikult $C = 0$ ning

$$v^2 = 2\frac{e}{m}U(r). \qquad (2)$$

Nüüd korrutame võrrandisüsteemi (1) esimest võrrandit -y-ga, teist aga x-ga, ning jällegi liidame võrrandite mõlemad pooled.

$$x\ddot{y} - y\ddot{x} = \frac{e}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial y}x - \frac{\partial U}{\partial x}y\right) + \omega_0(\dot{x}x + \dot{y}y)$$

või

$$\frac{d}{dt}(x\dot{y} - y\dot{x}) = \frac{e}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial x}x - \frac{\partial U}{\partial x}y\right) +$$

$$+ \frac{1}{2}\omega_0 \frac{d}{dt}(x^2 + y^2). \qquad (3)$$

Kasutame silindrilist koordinaatide süsteemi. Seos Descartes'i koordinaatide ning silindriliste koordinaatide vahel väljendub valemitega

$$\begin{cases} x = r\cos\Theta \\ y = r\sin\Theta \end{cases}.$$

Siit

$$\begin{cases} \dot{x} = \dot{r}\cos\theta - r\sin\theta \\ \dot{y} = \dot{r}\sin\theta + r\cos\theta \end{cases}$$

ja

$$\begin{cases} x\dot{y} = r\dot{r}\sin\Theta\cos\Theta + r^2\dot{\Theta}\cos^2\Theta \\ y\dot{x} = r\dot{r}\sin\Theta\cos\Theta - r^2\dot{\Theta}\sin^2\Theta, \end{cases}$$

millest pärast lahutamist

$$x\dot{y} - y\dot{x} = r^2.$$

Samuti

$$v^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 = \dot{r}^2\cos^2\Theta - 2\dot{r}r\sin\Theta\cos\Theta +$$
$$+\dot{\Theta}^2 r^2\sin^2\Theta + \dot{r}^2\sin^2\Theta + 2\dot{r}r\dot{\Theta}\cos\Theta\sin\Theta +$$
$$+\dot{\Theta}^2 r^2\cos^2\Theta = \dot{r}^2 + \dot{\Theta}^2 r^2.$$

Teisalt $r^2 = x^2 + y^2$, millest

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{ja} \quad \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}, \quad \frac{\partial r}{\partial y} = \frac{y}{r}.$$

Seetõttu

$$\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial r}\cdot\frac{y}{r} \quad \text{ja}$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial r}\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial r}\frac{x}{r}.$$

Pärast asendamist võtab võrrand (3) kuju

$$\frac{d}{dt} r^2\dot{\theta} = \frac{e}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial r}\frac{y}{r}x - \frac{\partial U}{\partial r}\frac{x}{r}y\right) + \frac{1}{2}\omega_0 \frac{d}{dt} r^2$$

ja edasi

$$\frac{d}{dt} r^2\dot{\theta} = \frac{1}{2}\omega_0 \frac{d}{dt} r^2.$$

Tähistame $\frac{1}{2}\omega_0 = \omega_1$ ning integreerime võrrandi mõlemaid pooli:

$$r^2\dot{\theta} = \omega_1 r^2 + C.$$

Kuna $r = r_k$ puhul $\dot{x} = \dot{y} = 0$, siis

$$C = -\omega_1 r_k^2$$

ning

$$r^2\dot{\theta} = \omega_1(r^2 - r_k^2),$$

millest

$$\dot{\theta} = \omega_1\left(1 - \frac{r_k^2}{r^2}\right).$$

Paigutades valemisse (2) äsjaleitud v väärtuse $\dot{r}^2 + \dot{\theta}^2 r^2$, saame

$$\dot{r}^2 + \dot{\theta}^2 r^2 = 2\frac{e}{m}U(r),$$

millest

$$\dot{r}^2 = 2\frac{e}{m}U(r) - \dot{\theta}^2 r^2 = 2\frac{e}{m}U(r) - \omega_1^2 r^2\left(1-\frac{r_k^2}{r^2}\right)^2.$$

Seose leidmiseks U_{kr} ja B_{kr} vahel pole tuletatud võrrandi edasine integreerimine vajalik. Kriitiline režiim saabub siis, kui elektroni trajektoor puudutab anoodi, s.t. kui $r = r_a$. Sellisel juhul $U = U_{kr}$, $B = B_{kr}$ ja $\dot{r} = 0$. Paigutades need väärtused valemisse (4), saame

$$2\frac{e}{m}U_{kr} = \omega_1^2 r_a^2\left(1-\frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2$$

või

$$\omega_1^2 = \frac{2e}{r_a^2 m}\,\frac{U_{kr}}{\left(1-\frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2},$$

millest

$$\boxed{B_{kr}^2 = \frac{8\,U_{kr}}{\frac{e}{m}r_a^2\left(1-\frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2},}$$

sest $\omega_1 = \frac{e}{2}\frac{B}{m}$.

S i s u k o r d.

Eessõna 3
1. Elektrostaatilise välja uurimine (V.Kornel) 4
2. Elektrostaatilise voltmeetri kaliibrimine (K. Kudu) 23
3. Elementaarlaengu määramine Millikani meetodil (K. Kudu) 30
4. Elektrimõõteriistade kaliibrimine (E. Tamm) 38
5. Juhtide takistuse mõõtmine (E. Tamm) 47
6. Tahkete elektrijuhtide takistuse sõltuvus temperatuurist (E. Tamm) 58
7. Mõõtmisi alalisvoolu kompensatsioonimeetodil (E. Tamm) 62
8. Voolualliika omaduste uurimine (K. Kudu) ... 73
9. Termoelemendi valmistamine ja kaliibrimine (E. Tamm) 77
10. Faraday elektrolüüsiseaduste uurimine (V. Kornel) 87
11. Termoemissiooni uurimine ja elektroni väljumistöö määramine (K. Kudu)..... 94
12. Termoelektronide jagunemine kiiruste järgi (K. Kudu)..... 100
13. Peegelgalvanomeetri uurimine (A.Pae,K.Kudu) 105
14. Kondensaatori mahtuvuse määramine ballistilise galvanomeetri abil (E. Tamm)..... 118
15. Magnetilise induktsiooni mõõtmine piki solenoidi telge (K. Kudu) 124
16. Keskkonna mõju magnetvälja iseloomustavatele suurustele (K. Kudu) 132

17. Ferromagneetikute hüstereesisilmuse ostsillografeerimine (K. Kudu) 140
18. Maa magnetvälja horisontaalkomponendi määramine 146
19. Pooljuhtide uurimine Halli efekti meetodil (K. Kudu) 151
20. Elektroni erilaengu määramine magnetronimeetodil (K. Kudu) 158
21. Vaakum- ja pooljuhtsuunajate uurimine (H. Tammet) 164
22. Alaldite ja filtrite uurimine (V. Kark)..... 170
23. RC-vooluringi uurimine (K. Kudu) 175
24. Relaksatsioonvõnkumiste uurimine (K. Kudu) .. 184
25. Vabade elektromagnetiliste võnkumiste uurimine Helmholtzi meetodil (K. Kudu) 195
26. Vabade elektromagnetiliste võnkumiste uurimine elektronostsilloskoobi abil (K. Kudu) 206
27. Vahelduvvoolu iseloomustavate suuruste mõõtmine (K. Kudu) 211
28. Pingete resonantsi uurimine (K. Kudu) 230
29. Mõõtmisi vahelduvvoolu silla meetodil (E.Tamm)236
Lisa tööle № 20 268

75-42
3-186

РУКОВОДСТВО К ПРАКТИКУМУ

ПО ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

Издание третье, дополненное

Составитель К. Куду

Тартуский государственный университет

ЭССР, г. Тарту, ул. Юликооли, I8

Vastutav toimetaja K. Kudu

Korrektor A. Norberg

TRÜ rotaprint 1970. Paljundamisele antud 30. VI 1970. Trükipoognaid 17,13. Tingtrükipoognaid 15,93. Arvestuspoognaid 12,1. Trükiarv 800. Paber 30x42. 1/4. MB 04177. Tell. nr. 516.

Hind 60 kop.

Hind 60 kop.

A
30834
5125689

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00512568 9