



# FÜÜSIKA PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID MITTEFÜÜSIKUTELE

II

1981

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL  
Üldfüüsika kateeder

---

# FÜÜSIKA PRAKTIKUMI TÖÖJUHENDID MITTEFÜÜSIKUTELE

II

Teine, parandatud ja täiendatud trükk

Koostanud T.Müürsepp

---

TARTU 1981

Kinnitatud füüsika-keemiateaduskonna  
nõukogus 2. septembril 1981. a.

LEN

Käesolev kogumik "Füüsika praktikumi tööjuhendid mitte-füüsikutele" on 1974.a. väljaantud analoogilise kogumiku teiseks parandatud ja täiendatud trükiks.

Kogumik sisaldab molekulaar-, elektri- ja aatomifüüsika tööde juhendeid TRÜ arstiteaduskonna, bioloogia-geograafiateaduskonna ja majandusteaduskonna üliõpilastele.

Kogumikus avaldatud tööd on üldfüüsika kateedri õppejõudude poolt läbi vaadatud, parandatud ja täiendatud.

## S I S U K O R D

---

1. Vedeliku sisehõrdeteguri määramine Stokes'i meetodil .....	5
2. Vere sisehõrdeteguri määramine viskosimeetriga BK-4 .....	12
3. Ioonide liikuvuse määramine .....	16
4. Voltmeetri gradueerimine .....	21
5. Takistuse mõõtmine Wheatstone'i sillaga ....	25
6. Elektromotoorjõu määramine kompensatsioonimeetodil .....	28
7. Elektrienergia hulga ja elektrikeedukannu kasuteguri määramine .....	32
8. Transformaatori uurimine .....	35
9. Induktiivsuse ja mahtuvuse määramine vahelduvvoolu ahelas .....	42
10. Vahelduvvoolu alaldamine .....	51
11. Transistori staatiliste karakteristikute määramine .....	66
12. Takistussidestusega võimendi uurimine .....	78
13. Elektronostsillograafiga tutvumine .....	87
14. Tutvumine radiomeetritega .....	106

## VEDELIKU SISEHÖÖRDETEGURI MÄÄRAMINE STOKES'I MEETODIL

## Tööülesanne

Tutvumine vedeliku sisehõõrdeteguri määramise Stokes'i meetodiga. Vedeliku sisehõõrdeteguri määramine.

## Töövahendid

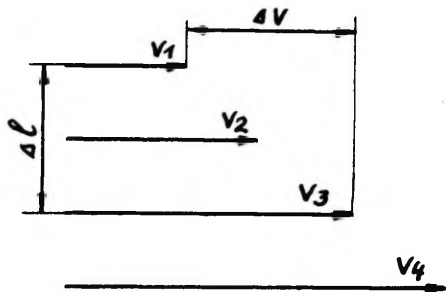
Klaassilinder uuritava vedelikuga, sekundomeeter, kullikesed ja joonlaud.

## Teoreetiline sissejuhatus

Reaalsetes vedelikes tekivad vedelikukihtide nihkumisel teineteise suhtes, laminaarsel voolamisel, hõõrdejõud, mis on tingitud vedelikuosakeste-vahelistest tõmbejõududest. Kiiremini liikuv vedelikukiht mõjutab aeglasemat kihti kiirendava jõuga. Väiksema kiirusega liikuv vedelikukiht mõjutab kiiremini liikutavat kihti pidurdava jõuga. Neid jõudu-  
sid nimetatakse sisehõõrdejõududeks.

Sisehõõrdejõud on seda suurem, mida suurem on vaadeldava pinna suurus  $S$ , ja sõltub veel sellest, kui kiiresti muutub liikumise kiirus kihtidevahelise pikkusühiku kohta, s.t. kiiruse gradiendist  $\frac{dv}{dl}$  (joonis 1):

$$F = \eta \frac{dv}{dl} \cdot S \quad (\text{Newtoni valem}) \quad (1)$$



Joon. 1. Kiiruse gradient.

Võrdetegur  $\eta$  sõltub vedelikust ja teda nimetatakse sisehõõrdeteguriks. Sisehõõrdetegurit mõõdame hõõrdejõuga, mis mõjub kahe paralleelse 1 m kaugusel asuva kihil vahel, kui nende kiiruste vahe on 1 m/s ja pindala 1 m<sup>2</sup>.

Sisehõõrdeteguri SI ühik on  $1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , CGS-süsteemis  $1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ P}$  (puuas). Praktikas kasutatakse tihti veel suhtelist sisehõõrdetegurit (vaadeldava vedeliku ja vee sisehõõrdetegurite suhet samal temperatuuril).

#### Stokes'i meetod

Sisehõõrdeteguri määramise Stokes'i meetodit (langeva kuulikese meetodit) kasutatakse suure sisehõõrdumisega vedelike sisehõõrdetegurite määramisel. Meetodi puuduseks on see, et tema rakendamisel vajatakse suurt hulka uuritava vedelikku.

Kuulikese langemisel vedelikus märgab vedelik kuulikest, mistõttu kuulikese külge kleepunud õhuke vedelikukiht liigub koos kuulikesega (sama kiirusega mis kuulikenegi). Naaberkihid pannakse liikuma sisehõõrdejõudude mõjul ja nende kiirus kahaneb kaugusega kuulikesest. Vahetult pärast vedeliku sisenemist liigub kuulike kiirenevalt. Kuna aga vedeliku takistav mõju kuulikese liikumisele kasvab kuulikese kiiruse kasvuga, siis saabub hetk, kus kuulikesele mõjuvad

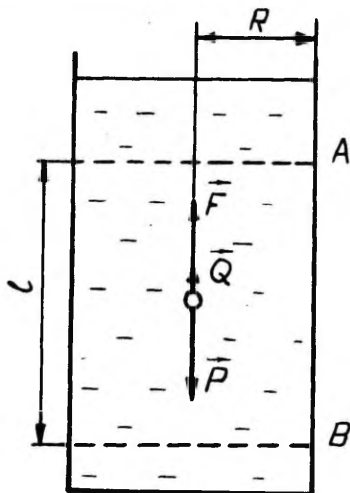
jõud tasakaalustuvad ja kuulike hakkab liikuma ühtlaselt.

Stokes näitas, et kui vedeliku maht on piiramata ja kuulike ei tekita liikumisel keeriseid (väike liikumiskiirus ja väike kuulikese raadius), siis kuulikese ühtlasel liikumisel seda liikumist takistav hõõrdejõud avaldub valemiga

$$F = 6\pi\eta rv, \quad (2)$$

kus  $\eta$  on vedeliku sisehõõrdetegur,  $r$  - kuulikese raadius,  $v$  - kuulikese kiirus.

Kuulikese langemisel vedelikus mõjuvad temale raskusjõud  $\vec{P}$ , üleslükkejõud (Archimedese seaduse alusel)  $\vec{Q}$  ja liikumist takistav hõõrdejõud  $\vec{F}$  (joonis 2).



Joon. 2. Kuulikese langemine vedelikus.

Liikumise ühtlustumisel kehtib seos

$$\vec{P} = \vec{Q} + \vec{F} \quad (3)$$

ehk

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g + 6 \pi r \eta v, \quad (3a)$$

kus  $\rho_k$  on kuulikese tihedus ning  $\rho$  - vedeliku tihedus.  
Võrrandist (3a) leiame

$$\eta = \frac{2}{9} r^2 g \frac{\rho_k - \rho}{v}. \quad (4)$$

Kuulikese ühtlase liikumise kiiruse  $v$  arvutame, jagades kuulikese teepikkuse  $l$  langemise ajaga  $t$ .

Valem (4) pole päris täpne, sest katses vedeliku ruumala ei ole piiramatult, vedelik asub silindrilises anumaa raadiusega  $R$ . Kuna aga anuma raadius  $R$  on palju suurem kuulikese raadiusest  $r$  ( $R \gg r$ ), siis kuulikese langemisel mööda anuma telgjoont võib jätta anuma seinte mõju arvestamata ning kasutada valemit (4).

#### Töö käik

Uuritav vedelik asub klaassilindris. Silindril on kaks märki - A ja B (joon. 2), ülemine märk peab olema nii sügaval arvates vedeliku pinnast, et tema niivool võib kuulikese liikumist lugeda juba ühtlaseks. Kasutatavad kuulikesed on terasest, nende läbimõõt on antud. Uuritava vedeliku tihedus on märgitud anumale.

Laseme kuulikese vedelikku võimalikult anuma telgjoonel, kasutades selleks paberist lehtrit. Kuulikese ülemise märgi läbimise hetkel käivitame sekundomeetri ja seiskame selle, kui kuulike läbib alumise märgi. Märkidevahelise kauguse  $l$  mõõdame joonlauaga.

Katset kordame vähemalt 10 korda.

Et vedeliku sisehõõrdetegur suurel määral sõltub tempe-

ratuurist, siis märgime protokollis vedeliku temperatuuri (ruumi temperatuuri). Andmed kirjutame üles koos vastava suuruse absoluutse vea ja mõõtühikuga:

$$d = (1,0 \pm 0,05) 10^{-3} \text{ m},$$

$$\rho_k = (7,8 \pm 0,05) 10^3 \text{ kg/m}^3,$$

$$g = (981,8 \pm 0,05) 10^{-2} \text{ m/s}^2,$$

$$\rho =$$

$$l =$$

$$D =$$

10 kuulikese langemise ajad märgime tabelisse:

$i$	$t_i$	$\Delta t_i$	$(\Delta t_i)^2$
1.			
2.			
.			
.			
10.			

Kuna  $r = \frac{d}{2}$  ja  $v = \frac{l}{t}$ , saame valemi (4) kirjutada kujul

$$\eta = \frac{1}{18} d^2 g \frac{(\rho_k - \rho) \cdot \bar{t}}{l}, \quad (5)$$

kus  $\bar{t}$  on 10 kuulikese keskmine langemisajad.

Valemi (5) järgi arvutame uuritava vedeliku sisehõõrdetegurit  $\eta$  keskmise väärtuse.

Sisehõõrdetegurit  $\eta$  suhtelise vea leiame lihtsustatud

valemist (eeldusel, et  $\Delta g \ll g$ ):

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{2 \Delta d}{d} + \frac{\Delta \rho_k + \Delta \rho}{\rho_k - \rho} + \frac{\Delta \bar{t}}{\bar{t}} + \frac{\Delta l}{l}. \quad (6)$$

Valemis (6) sisalduva  $\bar{t}$  absoluutse vea  $\Delta \bar{t}$  leidmiseks tuleb arvutada  $\Delta t$  ja  $(\Delta t)^2$  ning leida aritmeetilise keskmise standardhälve

$$s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t_i)^2}{n(n-1)}.$$

Ajamõõtmise piirviga avaldub

$$\Delta \bar{t} = 2,26 s + \Delta t_r,$$

kus 2,26 on Studenti tegur üsaldusnivoo 95 % korral,  $\Delta t_r$  aga mõõteriista (elektrikell, stopper) lubatud viga (vt. mõõtmistäpsuse hindamine. Koost. H. Tammet. TRÜ trükikoda, Tartu, 1978). Lõpuks leiame  $\eta$  absoluutse vea ja kirjutame välja vastuse.

#### Lisaküsimusi

1. Miks temperatuuri tõusmisel vedelike sisehõõrdumine väheneb, gaaside sisehõõrdumise aga suureneb?
2. Miks peavad Stokes'i meetodil kasutatavad kuulikesed olema küllalt väikesed?
3. Kas on võimalik määrata sisehõõrdetegurit Stokes'i

meetodil nõnda, et kuulikesed liiguksid anuma põhjast pinnale?

4. Mitu korda erineb CGS sisehõõrdeteguri ühik puaas SI-ühikust Pa·s?

5. Mis juhtub, kui Stokes'i meetodil kasutatavate kuulikeste tihedus on väiksem uuritava vedeliku tihedusest?

Kirjandus

I. Н.М. Ливенцев. Курс физики для медвузов. М., 1978, с.26-29.

## T E I N E t ö ö

### VERE SISEHÕRDETEGURI MÄÄRAMINE VISKOSIMEETRIGA BK-4

#### Tööülesanne

Vere sisehõrde teguri määramine.

#### Töövahendid

Kapillaarviskosimeeter BK-4, puhastuslahused, vatt, uuritav veri.

#### Teoreetiline sissejuhatus

Viskoosse vedeliku voolamisel torus kulub osa vedeliku rõhu potentsiaalsest energiast sisehõrde jõudude ületamiseks ja staatiline rõhk torus langeb voolu suunas. Voolaku viskoosne mittekokkusurutav vedelik laminaarselt silindrilises torus raadiusega  $R$ , mille seinu vedelik märgab. Sel juhul tekib torus vedelikuosakeste voolu kiiruste parabolne jaotus - vedelikuosakeste kiirus kaugusel  $r$  toru teljest avaldub valemiga

$$v = \frac{\Delta p}{4 \eta l} (R^2 - r^2), \quad (1)$$

kus  $\Delta p$  on rõhu muutus toru pikkuse  $l$  ulatuses,  $\eta$  on vedeliku dünaamiline sisehõrde tegur. Ajavahemiku  $t$  jooksul voolab sellisest torust läbi vedeliku hulk ruumalaga

$$V = \frac{\pi R^2 \Delta p t}{8 \eta l} . \quad (2)$$

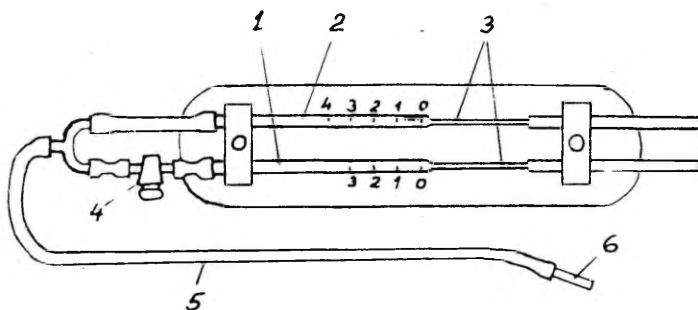
Valemit (2) nimetatakse Poiseuille'i valemiks. Et suurused  $V$ ,  $R$ ,  $\Delta p$  ja  $l$  on kõik eksperimentaalselt mõõdetavad, saab seda valemit kasutada  $\eta$  määramiseks. Tavaliiselt lastakse  $\eta$  määramisel vedelikku voolata läbi hästi peene toru (kapillaari), vastavaid seadmeid nimetatakse kapillaarviskosimeetriteks. Kapillaarviskosimeetrit on mugav kasutada suhtelise sisehõõrdeteguri määramiseks.

Valemist 2 nähtub, et kahe vedeliku puhul nende voolamisel läbi ühesuguste kapillaaride (võrdsete siseraadiuste ja pikkustega), võrdsetel rõhulangudel samas ajavahemikus kapillaare läbinud vedelike ruumalad on pöördvõrdelised nende sisehõõrdeteguritega:

$$\frac{V_0}{V} = \frac{\eta}{\eta_0} . \quad (3)$$

Antud töös kasutatav viskosimeeter BK-4 (joon. 1) koosneb kahest gradueeritud pipetist 1 ja 2, millel on ühesuguse pikkuse ja ristlõikega kapillaarid 3. Pipett 1 on ühendatud kraaniga 4. Mõlema pipetiga on ühendatud klaasotsikuga 6 varustatud kummivoolik 5.

Kapillaarviskosimeeter BK-4 on ette nähtud vere sisehõõrdeteguri määramiseks. Vere sisehõõrdeteguri määramine kõrvuti teiste vere analüüsidega võimaldab määrata õiget diagnoosi rea haiguste puhul.



Joon. 1. Kapillaarviskosimeeter BK-4.

#### Töö käik

Kuna kapillaaride siseseinte puhtus mõjutab oluliselt vedeliku liikumist nendes, seega ka mõõtmise täpsust, siis peavad kapillaarid olema väga puhtad. Pipette pestakse kontsentreeritud nuuskpiiritusega, imedes seda pipetti. Siis loputatakse nad piiritusega ja lõpuks kuivatatakse, puhudes neist õhku läbi. Seejuures peab jälgima, et vedelikud ei satuks kummitorudesse.

Mõõtmiste teostamiseks avame kraani 4, pipeti 1 otsa pistame destilleeritud vee anumasse ja imedes suuga otsiku 6 (eelnevalt desinfitseerida piiritusega) kaudu õhku, tõmbame pipetti vett märgini "0". Selle järele suleme kraani 4.

Nüüd imeme verd pipetti 2 samuti märgini "0". Kliinikutes võetakse veri sõrmest. Õppelaboratooriumis võtame verd anumast.

Asetame viskosimeetri lauale, avame kraani 4 ja tekitame imedes hõrenduse mõlemas pipetis. Nüüd algab mõlema vedeliku voolamine läbi kapillaaride võrdsetes tingimustes (sama rõhulang, ühesugused kapillaarid). Kui veri

jõuab märgini "1" ( $L = 1$ ), lõpetame imemise. Vee sammas teises torus on selleks hetkeks saavutanud pikkuse  $L_0$ .

Et mõlema gradueeritud toru siseristlõiked on võrdsed, siis on läbi kapillaaride voolanud vedelike ruumalad võrde- lised sammaste pikkustega, s.o.

$$\frac{V_0}{V} = \frac{L_0}{L} . \quad (4)$$

Seostest (3) ja (4) järeldub, et

$$\frac{\eta}{\eta_0} = \frac{L_0}{L}$$

ning siit

$$\eta = \eta_0 \frac{L_0}{L} . \quad (5)$$

Valemist (5) näeme, et viskosimeetrilt on võimalik ot- se lugeda vere suhtelise sisehõrdeteguri väärtust veesam- ba pikkusena  $L_0$ .

Normis vere suhteline sisehõrdetegur kõigub vahemikus 4 - 5, patoloogilistel juhtudel on see vahemik 1,7 - 22.

Lisaküsimusi

1. Miks lastakse  $\eta$  määramisel vedelikku voolata lä- bi kapillaartoru?
2. Miks peab katse teostamisel kapillaarviskosimeet- olema horisontaalselt laua peal?

Kirjandus

1. Н.М. Дивенцев. Курс физики для медвузов. М., 1978, с.26-31.

## IOONIDE LIIKUVUSE MÄÄRAMINE

### Tööülesanne

Tutvumine paberelektroforeesi meetodiga. Ioonide liikuvuse mõõtmine.

### Töövahendid

Elektroforeesi seadeldis, alalisvoolu allikas, voltmeeter, sekundkell, filterpaberist ribad, lahused.

### Teoreetiline sissejuhatus

Alalisvoolu mõju organismi kudedele on seotud ionide ja teiste laetud osakeste liikumisega kudede vedelikes, mida füüsikaliselt võib pidada elektrolüütideks. Alalisvoolu kasutatakse ka ravimite viimisel organismi läbi naha. Seepärast on elektrolüütide juhtivusega seotud küsimused olulised organismis toimuvate füüsikalise-keemiliste protsesside mõistmiseks.

Elektrolüütide elektrijuhtivus on tingitud vabade ioonide olemasolust nendes. Positiivsed ioonid (katioonid) liiguvad negatiivse elektroodi (katoodi) poole, negatiivsed (anioonid) positiivse elektroodi (anoodi) poole.

Elektrolüüti paigutatud elektrodide pingestamisel algab ionide liikumine elektrodidevahelises ruumis, kuid üksikute ionide kiirus on üsna väike. Ioonide kiirus sõltub iooni iseloomust (aine, laeng), lahuse temperatuurist

ja rakendatud elektrivälja tugevusest. Ioonide kiirus  $v$  avaldub valemiga

$$v = v_0 E, \quad (1)$$

kus  $E$  on elektrivälja tugevus ja  $v_0$  on iooni liikuvus. Valemist (1) järeldub, et iooni liikuvuseks nimetatakse iooni liikumiskiirust ühikulise elektriväljatugevuse puhul

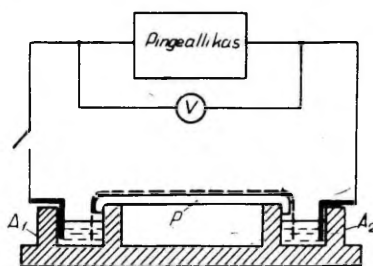
$$v_0 = \frac{v}{E}. \quad (2)$$

SI-ühikutes, kus liikumiskiirust mõõdetakse m/s, elektriväljatugevust V/m, saame liikuvuse jaoks ühiku  $1 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ .

Kuna erinevate ioonide liikuvus on erinev, siis saab neid elektriliselt eraldada. Nii eraldatakse näiteks ve-reseerumi valgufraktsioone. Seda nn. valgufraktsioonide elektroforeesi teostatakse paberelektroforeesi meetodil analoogiliselt sellega, kuidas käesolevas töös määratakse ioonide liikuvust.

Töö käik

Kasutatava seadme skeem on toodud joonisel 1.



Joon. 1. Katseseade.

Seade koosneb kahest anumast  $A_1$  ja  $A_2$ , mis täidetakse vastava elektrolüüdiga. Anumate peal paikneb plastmassist plaat P, millele asetatud filterpaberi riba (joonisel kujutatud punktiiriga) otsad ulatuvad anumatesse elektrolüüti. Anumates asuvad elektroodid ühendatakse alalisvoolu allikaga (pingega umbes 200 V).

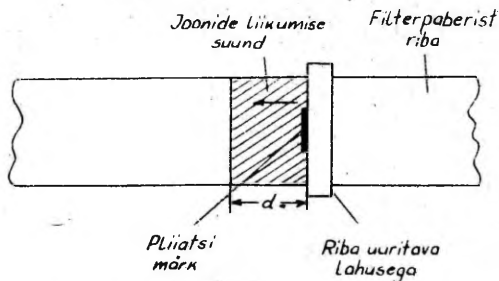
Töö teostamiseks

1) valame anumatesse elektrolüüti (nõrk soolhappelahus) kuni vastavate märkideni anuma seinal.

2) Märkime filterpaberi ribale grafiitpliiatsi abil uuritava lahuse paigaldamise kohta.

3) Niisutame filterpaberi riba elektrolüüdiga (soolhappe nõrk lahus) ja asetame selle plastmassplaadile nii, et tema otsad ulatuksid plaadi asetamisel anumatele elektrolüüdi sisse. Õige elektrolüüdi tase puhul on elektrodidevaheline kaugus (pabeririba pikkus ühest vedelikunivoost teiseni)  $l = 10,0$  cm.

4) Asetame filterpaberi ribale uuritava lahusega niisutatud kitsa filterpaberist riba, nii nagu see on näidatud joonisel 2.



Joon. 2: Uuritava lahuse paigaldamine.

Kitsast riba ei tohi palju niisutada, sest siis hakkab lahus laiali valguma, mis moonutab mõõtmistulemusi. Käesolevas töös on uuritavateks lahusteks 10 %  $\text{CuCl}_2$  lahus

( $\text{Cu}^{++}$  ioonid) ja 10 %  $\text{FeCl}_3$  lahus ( $\text{Fe}^{+++}$  ioonid).

5) Ühendame vooluallikaga elektrodid (arvestades polaarsust). Lülitame voolu sisse ja reguleerime pinge vajaliku väärtuseni (pinge  $U$  ja voolu läbilaskmise aja  $t$  määrab õppejõud).

6) Pingestame lüliti abil elektrodid ja samaaegselt lülitame sisse sekundkella. 5...15 minuti möödumisel lülitame voolu välja.

7) Kuna uuritavad ioonid on ilma värvita, siis tuleb nad "värvida". Selleks tõstame plastmassplaadi anumatele ja niisutame sellele oleva filterpaberi kollase veresoola ( $\text{K}_4/\text{Fe}(\text{CN})_6/3$ ) 5 % lahusega.  $\text{Cu}^{++}$  ioonid annavad punase,  $\text{Fe}^{+++}$  ioonid sinise värvi.

8) Mõõdame joonlaua abil ionide liikumise teepikkuse  $d$ .

9) Mõõdetud suurused võimaldavad määrata elektrivälja tugevuse  $E = U/l$  ja ionide liikumiskiiruse  $v = d/t$ . Läheduses ionide liikuvuse definitsioonist (1) saame valemi

$$v_0 = \frac{dl}{Ut}, \quad (2)$$

mille järgi arvutamegi uuritavate ionide liikuvuse.

10) Töö lõpetamisel eemaldame plastmassplaadilt filterpaberi, valame anumatest elektrolüüdi välja, plaadi ja anuma loputame puhta veega.

#### Lisaküsimusi

1. Miks liiguvad ioonid elektrolüüdis elektrivälja mõjul ühtlaselt ilma kiirenduseta?

2. Milliselt elektrodilt tuleb viia kehasse läbi naha broomi?

### 3. Kuidas mõjutab temperatuur ioonide liikuvust?

#### Kirjandus

I. A.И. Ремизов. Курс физики для медицинских институ-  
тов. М., 1976, с. 40-44.

**VOITMEETRI GRADUEERIMINE**

**Tööülesanne**

Gradueerida galvanomeeter etteantud mõõtepiirkonnaga voltmeetriks.

**Töövahendid**

Gradueeritav galvanomeeter, voltmeeter, takistussalv, reostaat, vooluallikas, juhtmed.

**Teoreetiline sissejuhatus**

Mõõteriista gradueerimise all mõistetakse riistal oleva meelevaldse skaala jaotistele vastavate mõõdetava suuruse väärtuste leidmist.

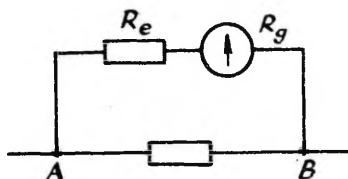
Põhiline erinevus ampermeetri ja voltmeetri ehituses seisneb selles, et voltmeetrina kasutatava riista sisetakistus on suur, ampermeetrina kasutataval riistal - väike. Galvanomeetri kasutamisel voltmeetrina on vaja tema sisetakistust suurendada. Selleks tuleb galvanomeetriga järjestikku lülitada eeltakistus  $R_e$ .

Voltmeeter lülitatakse paralleelselt vooluahela osaga AB, mille pinget  $U_{AB}$  tahetakse mõõta (joon. 1).

Arvutame eeltakistuse  $R_e$  suuruse. Kogu voltmeetri takistus

$$R = R_e + R_g, \quad (1)$$

kus  $R_g$  on galvanomeetri sisetakistus.



Joon. 1. Voltmeetri lülitamine vooluahelasse.

Tegelikult mõõdab voltmeeter voolutugevust, mis teda läbib. Ohmi seadusest vooluahela osa kohta

$$U_{AB} = I_g \cdot R. \quad (2)$$

Kui takistus  $R$  on konstantne, siis pinge  $U_{AB}$  on võrdeline voolutugevusega  $I_g$  ja galvanomeetri skaala võime gradeerida pinge ühikutes.

Kasutades valemeid (1) ja (2), kirjutame

$$U_{AB} = I_g (R_e + R_g),$$

kust

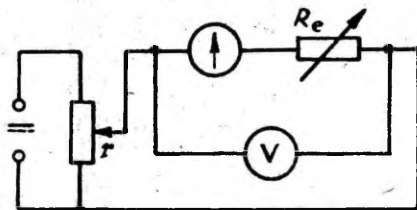
$$\frac{U_{AB}}{I_g} = R_e + R_g$$

ja

$$R_e = \frac{U_{AB}}{I_g} - R_g. \quad (3)$$

**Töö käik**

Töö tegemiseks koostame järgmise skeemi (joon. 2).



Joon. 2. Skeem voltmeetri gradueerimiseks.

Pingeallikana kasutame kohapeal valmistatud alaldit. Potentsiomeetri  $r$  liugkontakt olgu sellises asendis, et galvanomeetrit vool ei läbiks. Eeltakistusena  $R_e$  kasutame takistussalve. Võrdlusvoltmeeter  $V$  on lülitatud paralleelselt galvanomeetri ja takistussalvega.

Kõigepealt määrame pingelangu galvanomeetril. Selleks valime takistussalvest  $R_e = 0$ . Potentsiomeetri  $r$  liugkontakti nihutamise saavutame olukorra, kus galvanomeetri osuti hälvib äärmisele jaotisele. Registreerime voltmeetri näidu  $U'_{AB}$ . Valemist (3) saame leida ( $R_e = 0$ )

$$I_g = \frac{U'_{AB}}{R_g}.$$

Galvanomeetri sisetakistuse  $R_g$  suurus on märgitud riistale.

Nüüd arvutame valemi (3) abil vajaliku eeltakistuse suuruse, pidades silmas juhendaja poolt antud gradueerimispiirkonda  $U_{AB}$ .

Valime takistussalvest leitud eeltakistuse suuruse. Reguleerime võrdlusvoltmeetri näidu etteantud pingele  $U_{AB}$ . Galvanomeetri osuti peaks sel juhul olema äärmisel jaotisel. Kui see nii ei ole, sobitame eeltakistuse katseliselt täpseks.

Lineaarse skaalaga osutelektrimõõteriistade mõõtepiirkonna muutmisel või nende kohandamisel sellise suuruse mõõtmiseks, mis sõltub lineaarselt suurusest, mille mõõtmiseks antud riist on ette nähtud, taandub gradueerimine skaala lõppnäidu määramisele. Skaala teistele kriipsudele vastavad näidud arvutatakse. Ajakulu vähendamiseks piirdume antud töös ainult galvanomeetri suurte skaalakriipsudega (millele on arvud juurde kirjutatud). Tulemused esitame tabelina:

Galvanomeetri lugem (m)	Gradueeritava mõõteriista näit (V)

Koostame graafiku: lugem - mõõteriista näit.

#### Lisaküsimusi ja ülesandeid

1. Missugust tüüpi elektrivoolu mõõteriistu te teate?
2. Mis teha, kui etteantud pinge jaoks tuleb eeltakistus nii suur, et olemasolevatest takistussalvedest pole seda võimalik valida?
3. Määrata töös kasutatud mõõteriistade tüübid.
4. Dešifreerida töös kasutatud mõõteriistade skaaladel olevad märgid.
5. Mida mõistate mõõteriista täpsusklassi all?

#### Kirjandus

1. H. Temmet. Füüsika praktikum. Metroloogia. "Valgus", Tallinn, 1971, lk.22-31, 122-129 .

**TAKISTUSE MÕOTMINE WHEATSTONE'I SILLAGA**

**Tööülesanne**

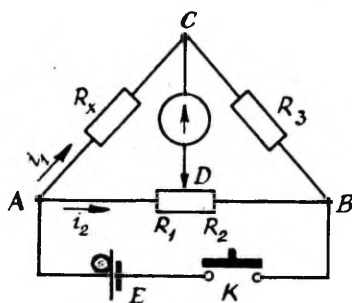
Mõõta kahe takisti takistused. Kontrollida järjestikku ja paralleelselt ühendatud takistite kogutakistuse valemid.

**Töövahendid**

Reohord, takistussalv, nullgalvanomeeter, vooluallikas, 2 mõõdetavat takistit, lüliti, juhtmed.

**Teoreetiline sissejuhatus**

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



Joon. 1. Wheatstone'i silla skeem.

Elemendist E tulev vool jaguneb punktis A kaheks: vooluks  $i_1$  läbi haru ACB ja vooluks  $i_2$  läbi haru ADB. Haru ACB koosneb tundmatust takistist  $R_x$  ja takistussalvest  $R_3$ . Haru ADB kujutavad  $R_1$  ja  $R_2$  endast ühe ja sama takistustraadi - reohordi - kahe osa takistus. Punktis D on liikuv (libisev, veerev) kontakt.

Pinge mõlema haru otstel (punktide A ja B vahel) on sama. Täheleb, mõlema vooluharu otste vahel on võimalik leida lõpmata palju selliseid punktide paare (näiteks C ja D), millel on punkti A suhtes võrdne pinge. Sel juhul punktide C ja D vahele lülitatud galvanomeeter voolu ei näita. Võime kirjutada, et

$$U_1 = i_1 R_x = i_2 R_1$$

ja

$$U_2 = i_1 R_3 = i_2 R_2$$

siit jagamise teel

$$\frac{i_1 R_x}{i_1 R_3} = \frac{i_2 R_1}{i_2 R_2}$$

ehk

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

Reohordiga silla puhul saab takistuste  $R_1$  ja  $R_2$  määramise asendada vastavate traadiosade pikkuste määramisega. Tõepoolest, ühtlase läbimõõduga traadi korral

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1}{l_2} \quad (2)$$

Asendades (2) valemisse (1), saame silla tasakaalutingimuseks

$$\frac{R_x}{R_3} = \frac{l_1}{l_2} \quad \text{ehk} \quad R_x = R_3 \frac{l_1}{l_2}. \quad (3)$$

Valem (3) ongi aluseks takistuste mõõtmisel Wheatstone'i silla abil.

### Töö käik

Koostame vooluahela vastavalt joonisel 1 toodud skeemile.

**KÕIK KLEMMID TULEB HÄSTI TUGEVASTI KINNI KEERATA.**

Seame reohordi õlad võrdseks, s.t.  $l_1 = l_2$ . Sel juhul on silla tundlikkus maksimaalne. Valime  $R_3$  takistussalve abil sellise, et galvanomeeter voolu ei näitaks. **SELLEKS ET VÄLTIDA JUHTMETE JA KONTAKTIDE SOOJENEMIST NING GALVANOMEETRI KAHJUSTUMIST, VÕIB VOOLU AHELASSE LÜLITADA AINULT HETKEKS (K on survenupplüüti).** Kui salve takistuse minimaalse võimaliku muutumise korral galvanomeetri osuti nihkub märgatavalt, tuleb tasakaalustamist täpsustada reohordi õlgade suhte  $l_1 : l_2$  muutmisega. Nüüd vahetame reohordi õlad, s.t. lülitame reohordi otsad skeemis ümber ja kordame mõõtmist.

Samasugused mõõtmised teeme ka teise takistiga.

Leiame mõlema takisti takistused. Arvutame nende takistite järjestikuse ja paralleelse ühenduse kogutakistused. Saadud tulemusi kontrollime ka katseliselt.

### Lisaküsimusi

1. Tuletada valem (2).
2. Millest oleneb juhtme takistus?
3. Millest sõltub juhtide eritakistus?
4. Miks on vaja klemmid tugevasti kinni keerata?
5. Miks on vaja vahetada reohordi õlad?

ELEKTROMOTOORJÕU MÄÄRAMINE KOMPENSATSIOONIMEETODIL

## Tööülesanne

Määrata Leclanché elemendi elektromotoorjõud lihtsaimal kompensatsioonimeetodil.

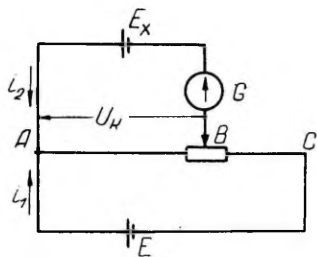
## Töövahendid

Reohord, nullgalvanomeeter, surunupuga topeltlüüti, normaalelement, uuritav element, aku, juhtmed.

## Teoreetiline sissejuhatus

Vooluallikate elektromotoorjõu mõõtmisel voltmeetriga tekib viga, mis on tingitud sellest, et voltmeeter tarbib voolu. Vastavalt Ohmi seadusele  $I = E/(R+r)$ , kus  $E$  on elektromotoorjõud,  $R$  - voltmeetri takistus ja  $r$  - vooluallika sisetakistus. Teisendades saame  $E = IR + Ir$ . Siit näeme, et voltmeetri näit, mis on võrdne pingega tema takistusel ( $U = I \cdot R$ ) erineb emj.-st pingelangu võrra vooluallika sisetakistusel. Et seda viga vältida, kasutatakse emj. määramiseks kompensatsioonimeetodit, mille põhimõtte selgub joonisel 1 esitatud skeemi analüüsist.

Aku emj.-ga  $E$  on ühendatud reohordi  $R$  otstega  $A$  ja  $C$ . Uuritav vooluallikas emj.-ga  $E_x$  ( $E_x < E$ ), aga punktiga  $A$  ja läbi galvanomeetri reohordi liugkontaktiga  $B$ , kusjuures punktiga  $A$  on ühendatud mõlema vooluallika samanimelised poolused. Tekib kaks voolukontuuri  $EABCE$  ning  $E_x A B E_x$ , millel on ühine osa  $AB$  takistusega  $R_{AB}$ . Olgu voolutugevus lõigus  $AB$   $I$ .  $I = i_1 + i_2$ , sest sõlmpunktist



Joon. 1. Kompensatsioonimeetodi põhimõtteskeem.

väljuvate voolude summa on võrdne sõlme suubuvate voolude summaga. Vastavalt Ohmi seadusele tekib takistusel pinge  $U_{AB} = I \cdot R_{AB}$ . Kui nihutame reohordi liugkontakti nii, et  $U_{AB}$  saab võrdseks elektromotoorjõuga  $E_x$ , siis kontuuris  $E_x A B E_x$  puudub vool,  $i_2 = 0$ , sest  $E_x$  ja  $U_{AB}$ , olles lülitatud järjestikku ja vastupidiselt, kompenseerivad teineteist.

Kogu mõõteprotsess taandub nüüd kompenseeriva pingelanguga  $U_k$  mõõtmisele. Seda tehakse  $U_k$  võrdlemise teel mingi tuntud etalonelektromotoorjõuga. Suurema täpsuse saavutamiseks kasutatakse etalonina Westoni normaalelemente, mille elektromotoorjõud püsib konstantsena täpsusega kuni  $10^{-3} \%$  ja ei sõltu oluliselt temperatuurist. Joonisel 1 tuleb uuritav element asendada normaalelemendiga, mille elektromotoorjõud on  $E_N$ , ja leida kompenseeriv pingelang ka tema jaoks. Eeldades, et aku elektromotoorjõud  $E$  ja sisetakistus katse jooksul ei muutu (seega  $I = \text{const}$  läbi takisti  $R$ ), võime pingelangude võrdlemise asendada takistuste  $R_{AB}$  võrdlemisega ja kui reohord on valmistatud ühtlasest traadist, siis reohordi pikkuse  $l_{AB}$  võrdlemisega.

$$\text{Seega } E_x = U_k^x = I R_{AB}^x \text{ ja } E_N = U_k^N = I R_{AB}^N. \quad (1)$$

Jagades võrrandite vastavad pooled omavahel läbi, saame

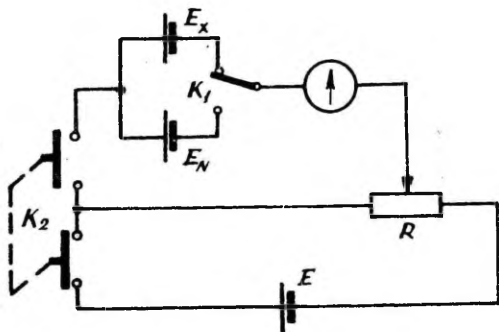
$$\frac{E_x}{E_N} = \frac{R_{AB}^x}{R_{AB}^N} \quad \text{ehk} \quad E_x = E_N \cdot \frac{R_{AB}^x}{R_{AB}^N} \quad (2)$$

Kuna  $R_{AB} = \rho \frac{l_{AB}}{S}$ , kus  $\rho = \text{const}$  ja  $S = \text{const}$ , siis

$$E_x = E_N \frac{l_{AB}^x}{l_{AB}^N} \quad (3)$$

### Töö käik

Koostame joonisel 2 toodud skeemi järgi vooluringi.



Joon. 2. Katseskeem.

Takistina  $R$  kasutame reohordi. Abipingeallikaks on aku elektromotoorjõuga  $E$ .  $K_1$  on ümberlülititi, mis võimaldab korradamööda ahelasse lülitada  $E_N$  ja  $E_x$ .  $K_2$  on surunupuga to-

peltlüliti, mis tuleb ahelasse ühendada nii, et ta lülitaks enne sisse aku ja alles siis mõõdetava või normaalelemendi.

Lülitame ahelasse normaalelemendi. Reohordi liugkontakti asukohta muutes leiame asendi, kus vool galvanomeetrit ei läbi.  $K_2$  lülitame ainult hetkeks, kuna pikemaajalise lülituse korral juhtmed soojenevad, mis muudab nende takistust; samuti võib muutuda aku elektromotoorjõud. Reohordilt loeme vastava osa pikkuse  $l_{AB}^N$ . Sama kordame uuritava elemendiga.

Aku elektromotoorjõu konstantsuse kontrolliks kordame katset normaalelemendiga.

$E_x$  arvutame valemist (3).

Normaalelemendi elektromotoorjõud on antud.

#### Lisaküsimusi

1. Miks tekib süstemaatiline viga elektromotoorjõu ja pinge mõõtmisel voltmeetriga?
2. Kuidas oleks võimalik  $E_x$  määrata etalonelektromotoorjõudu kasutamata?
3. Miks on püstitatud nõue, et  $K_2$  lülitaks ahelasse enne aku ja alles siis mõõdetava või normaalelemendi?
4. Missugune on Leclanché elemendi ja normaalelemendi ehitus?

---

**ELEKTRIENERGIA HULGA JA ELEKTRIKEEDUKANNU KASUTEGURI  
MÄÄRAMINE**

**Tööülesanne**

Määrata vee soojendamisel elektrikeedukannuga kogu tarvitatud elektrienergia hulk, vee temperatuuri tõstmiseks kulunud energia hulk ja kannu kasutegur.

**Töövahendid**

Kaks ühesugust elektrikeedukannu, millest üks on kaetud soojusisolatsioonimaterjaliga, ampermeeter, voltmeeter, termomeeter, sekundkell, juhtmed.

**Teoreetiline sissejuhatus**

Kogu tarvitatud elektrienergia hulga määramisel lähtume töö valemist

$$A = IU\tau, \quad (1)$$

kus  $I$  on voolutugevus,

$U$  - pinge,

$\tau$  - aeg.

Vee soojendamiseks kulunud elektrienergia hulk on avaldatav valemiga

$$Q = c m (t_2 - t_1), \quad (2)$$

kus  $m$  on vee mass,

$c$  - vee erisoojus,

$t_1$  - vee algtemperatuur,

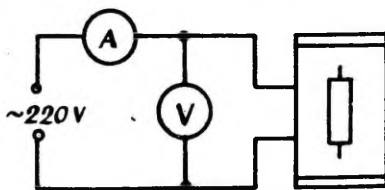
$t_2$  - vee lõpptemperatuur.

Kasutegur avaldub valemiga

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

Töö käik

Töö tegemiseks mõõdame tavalisse kannu umbes 1 liitri vett (kraanist). Koostame skeemi vastavalt joonisele 1.



Joon. 1. Katseskeem.

Mõõdame vee algtemperatuuri kannus. Lülitame voolu sisse ja käivitame sekundkella. Kogu katse vältel jälgime amper- ja voltmeetri näite ja registreerime need iga minuti järel. Katset jätkame, kuni vee temperatuur kannus on tõusnud 80-90 °C-ni, kogu katse ajal vett korralikult segades. Siis katkestame voolu, registreerime sekundkella lugemi ja vee temperatuuri.

Asendame vooluahelas tavalise kannu soojusisolatsiooniga kaetud kannuga. Kordame täpselt ülalkirjeldatud mõõtmisi.

Andmed koondame tabelisse.

Tavaline kann				Soojusisolatsiooniga kann			
$\tau$ (min)	U(V)	I(A)	$t^{\circ}\text{C}$	$\tau$ (min)	U(V)	I(A)	$t^{\circ}\text{C}$

Leiame valemite (1), (2) ja (3) abil nõutud suurused. Võrdleme saadud tulemusi.

### Lisaküsimusi

1. Miks elektrikeedukannu kasutegur on väiksem kui 100%?
2. Miks saadakse soojuslikult isoleerimata ja isoleeritud kannuga erinevad kasuteguri väärtused?
3. Miks on elektrikeedunõude välispind läikiv?
4. Sõnastada Joule-Lenzi seadus.
5. Arvutada kirjeldatud katse puhul äratarvitatud elektrienergia hind, kui 1 kWh maksab 4 kopikat.
6. Katses kasutatakse vahelduvvoolu, mille korral voolutugevuse ja pinge väärtused muutuvad ajas. Mida tähendavad siin U ja I?

### Kirjandus

1. H.M. Ливенцев. Курс физики для медвузов. М., 1978 с.54-58.

**TRANSFORMAATORI UURIMINE**

**Tööülesanne**

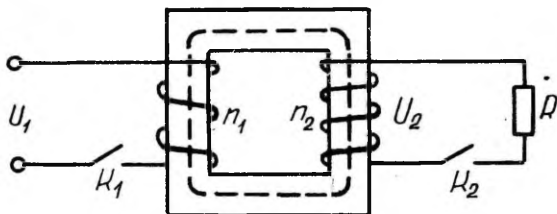
Määrata transformatori ülekandearv ja kasutegur.

**Töövahendid**

Transformaator koos ümberlülitiga alusel, kaks voltmetrit, ampermeeter, wattmeeter, reostaat, lüliti, ühendusjuhtmed.

**Teoreetiline sissejuhatus**

Transformaator e. trafo on riist vahelduvvoolu pingemuutmiseks. Ta töötamine põhineb elektromagnetilise induktsiooni nähtusel. Trafo ehitus on toodud skemaatilisel joonisel 1.



Joon. 1. Trafo ehitus.

Kõige lihtsam trafo koosneb kahest ühisel ferromagnetilisest materjalist südamikul asuvast poolist. Ühe pooli otsad ühendatakse vahelduvvoolu allikaga, mille pinge on  $U_1$ , teise pooli otstesse lülitatakse koormus. Seda pooli, mis on ühendatud pingeallikaga, nimetatakse primaarpooliks, teist, koormusega ühendatud pooli sekundaarpooliks.

Kui juhime primaarpooli vahelduvvoolu, tekitab see südamikus muutliku suuna ja suurusega magnetvoo, mille üks jõujoontest on kujutatud joonisel 1. Kuna mõlemad poolid ümbritsevad üht ja sama südamikku, siis magnetvälja jõujooned läbivad ka teist pooli ning selles indutseeritakse vahelduv pinge. Et mõlema pooli kõiki keerde läbib praktiliselt sama magnetvoog, siis on indutseeritud elektromotoorjõu suurus iga keeru kohta võrdne ja seega pooli otstes valitsev indutseeritud pinge võrdeline pooli keerdude arvuga.

Kui primaarpooli keerdude arv on  $n_1$ , sekundaarpoolil  $n_2$ , siis neis indutseeritud elektromotoorjõu suurused on vastavalt

$$E_1 = en_1,$$

$$E_2 = en_2,$$

siit

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Trafo tühijooksul, s.t. kui sekundaarpool pole ühendatud koormusega, on sekundaarpooli otstel olev pinge võrdne temas indutseeritud elektromotoorjõuga, s.t.  $U_2 = E_2$ . Primaarpoolis indutseeritud pinge  $E_1$  on suunalt vastupidine rakendatud pingele  $U_1$  ja tühijooksul temaga peaaegu võrdne.

Seega tühijooksul võime poolide otstel olevate pingete suhte lugeda võrdseks indutseeritud elektromotoorjõudude suhtega

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} .$$

Sekundaar- ja primaarpooli otstes valitsevate pingete suhet nimetatakse ülekandearvuks ja tähistatakse tähega  $K$ .

$$K = \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} . \quad (1)$$

Kui sekundaarpoolis on rohkem keerde kui primaarpoolis, siis on tegemist pinget tõstva trafoga ja  $K < 1$ . Kui sekundaarpoolis on vähem keerde kui primaarpoolis, saame pinget madaldava trafo, mille  $K > 1$ .

Energeetilisest aspektist on trafo riist, mis annab primaarmähisest energiat üle sekundaarmähisele. Energia ülekandmine on seotud teatud kadudega: soojenevad juhtmed (nn. vaseskaod), tekivad pöörivoolud ja energiat kulub ka raudsüdamiku ümbermagneetamiseks (nn. rauaskaod) .

Trafo kasuteguriks nimetatakse kasuliku võimsuse suhet koguvõimsusesse:

$$\eta = \frac{N_2}{N_1} , \quad (2)$$

kus  $N_2$  on sekundaarahelas tarbitav võimsus,

$N_1$  - primaarahelas pingesallikalt tarbitav võimsus.

Vaatleme viimast võrrandit üksikasjalikumalt. Ainult aktiivtakistuse olemasolu puhul sekundaarahelas, s.t. kui seal pole ei kondensaatoreid ega induktiivpoole, avaldub kasulik võimsus

$$N_2 = I_2 U_2 ,$$

kus  $I_2$  on koormusvool.

Kõikidel trafodel püütakse rauaskaod  $N_r$  viia minimaalseks. Selleks tehakse trafo südamik õhukestest lehekkestest, mis on üksteisest isoleeritud. Niisugune südamiku konstruktsioon võimaldab tunduvalt vähendada pöörivoole, mis massiivses südamikus on küllalt suured. Üldiselt on rauaskaadu iga konkreetse trafo jaoks praktiliselt konstantne suurus.

Vasekaod moodustavad primaar- ja sekundaarpoolis tekivad kaod:

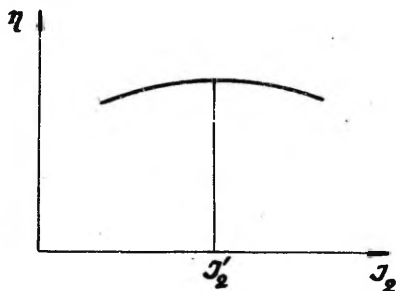
$$N_v = r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2,$$

kus  $r_1$  ja  $r_2$  on primaar- ja sekundaarpooli takistused.

Seega võib valemi (2) kirjutada kujul

$$\eta = \frac{I_2 U_2}{I_2 U_2 + N_r + (r_1 I_1^2 + r_2 I_2^2)}. \quad (3)$$

Avaldisest (3) on näha, et trafo kasutegur muutub koormusvoolu muutudes. Sõltuvuse graafiline kuju on näha jooniselt 2.



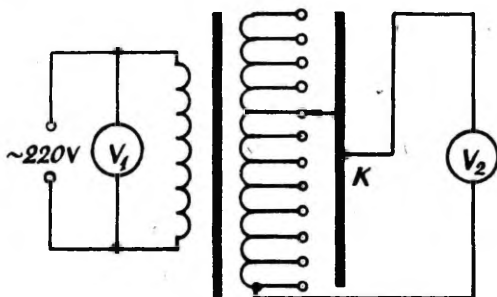
Joon. 2. Trafo kasuteguri sõltuvus koormusvoolust.

Koormusvoolu kasvades 0 kuni  $I_2^1$  kasutegur suureneb, sest kasuliku võimsuse kasv väikestel voolutugevustel on kiirem kui vaseskadude kasv. Alates mingist koormusvoolu väärtusest  $I_2 = I_2^1$  ületavad vaseskaod kasuliku võimsuse kasvu ja kasutegur hakkab vähenema.

Võimsate tööstuslike trafode kasutegur ulatub 98 - 99%-ni.

### Töö käik

1. Määrame ülekandearvu. Selleks koostame skeemi joonise 3 järgi.



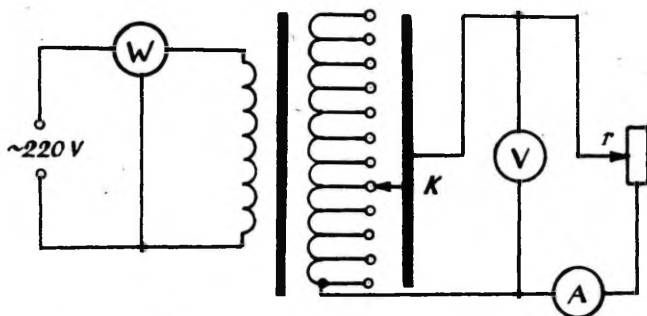
Joon. 3. Katseskeem ülekandearvu määramiseks.

Ülekandearvu määramise ümberlülitati K 3 - 5 asendi jaoks.

2. Kasuteguri määramiseks koostame skeemi vastavalt joonisele 4.

Mõõdame primaarahela võimsuse ja voolutugevuse ning pinget sekundaarahelas. Primaarahela võimsuse mõõdame vattmeetri abil. Vattmeeter on elektrodünaamiline mõõteriist, mille ühest poolist juhitakse läbi mõõdetav vool ja teisest läbi suure takistuse pingega võrdeline vool. Osutit pöörav moment on sel juhul võrdeline voolutugevuse ja pinget korutisega, s.o. võimsusega. Vattmeetril on tavaliselt neli

klemmi. Klemmide ühenduse skeem vooluvõrgu ja tarbijaga on näidatud vattmeetri skaalaplaadil.



Joon. 4. Katse skeem kasuteguri määramiseks.

Katset kordame 6 - 7 erineval voolutugevusel sekundaarahelas. Voolutugevust reguleerime reostaadiga  $r$ . Andmed koondame tabelisse.

Jrk. nr.	$N_1$	$I_2$	$U_2$	$N_2$	$\eta$

Joonestame graafiku kasuteguri sõltuvusest koormusvoolust  $\eta = f(I_2)$ .

### Lisaküsimusi

1. Sõnastada Lenzi reegel.
2. Kuidas mõjustaksid sekundaarahela võimsust sinna lülitatud kondensaator või induktiivpool?
3. Miks ei kasutata trafosid alalispinge muutmiseks?
4. Missugune on primaar- ja sekundaarahela voolutugevuste suhe?
5. Mis on tühijooksuvool ja millest ta sõltub?
6. Kuidas tekivad pöörisvoolud?

INDUKTIIVSUSE JA MAHTUVUSE MÄÄRAMINE VAHELDUVVOOLU AHELAS

Tööülesanne

Pooli induktiivsuse ja kondensaatori mahtuvuse määramine.

Töövahendid

Väljavõtetega induktiivpool, kondensaatorite patarei, reostaat, ampermeeter, voltmeeter, hertsmeeter, alalisvoolu mõõtesild, juhtmed.

Teoreetiline sissejuhatus

Vahelduvvooluks nimetatakse ajas perioodiliselt suunda või suurust ja suunda muutvat voolu. Praktikas puutume kõige rohkem kokku siinuseliselt muutuva vahelduvvooluga, mida üldjuhul võib kirjeldada võrrandiga

$$i = I_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

kus  $i$  on voolutugevuse hetkväärtus,

$I_0$  - voolutugevuse maksimaalväärtus,

$\omega$  - ringsagedus,

$t$  - aeg,

$\omega t + \varphi$  - faas,

$\varphi$  - faasinurk ajamomendil  $t = 0$ .

Sageli loetakse ahelas mõjuva vahelduva elektromotoorjõu algfaas nulliks, siis tähendab  $\varphi$  voolutugevuse aval-

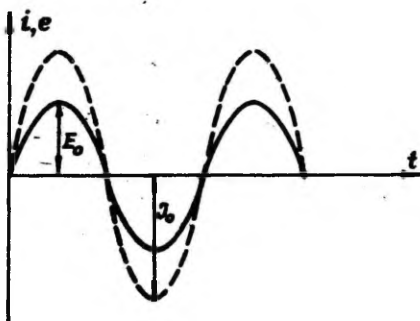
dises ühtlasi faasinurka elektromotoorjõu  $e = E_0 \sin \omega t$  suhtes.

Iga siinuseliselt muutuv suurus on määratud, kui on teada selle amplituud, ringsagedus ja algfaas. Kui aega hakata lugema momendist, mil  $i = 0$ , siis ka  $\varphi = 0$  ja võrrand (1) saab kuju

$$i = I_0 \sin \omega t.$$

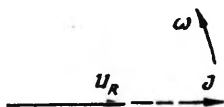
Vahelduvvoolu ahelais eristatakse kolme liiki takistusi e. koormusi: oomiline, induktiivne ja mahtuvuslik. Vahelduvvoolu teooriast tuleneb, et induktiivtakistus  $X_L = \omega L$ , mahtuvuslik takistus aga  $X_C = 1/\omega C$ .

Olgu meil vooluring, mis sisaldab ainult oomilist takistust. Sel juhul on ahelat läbiv vool samas faasis teda põhjustava elektromotoorjõuga. Graafiliselt on selline olukord kujutatud joonisel 1, kus pidev joon vastab elektromotoorjõule ja punktiirjoon voolutugevusele.



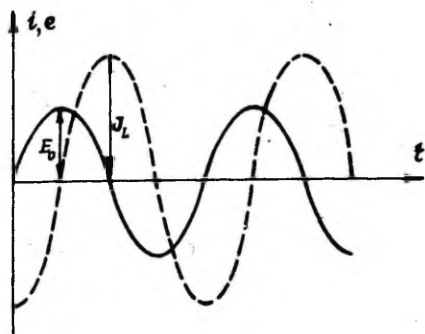
Joon. 1. Voolutugevus ja elektromotoorjõud ainult oomilist takistust sisaldava vooluahela puhul.

Vektordiagrammina kujutatakse vaadeldavat juhtu joonisel 2.

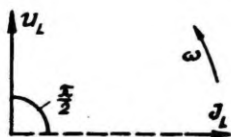


Joon. 2. Voolutugevuse ja pinge vektordiagramm oomilist takistust sisaldava vooluahela jaoks.

Vaatleme induktiivpooli sisaldavat vooluringi. Pooli läbiva voolu ja teda põhjustava elektromotoorjõu (või elektromotoorjõu allika klemmipinge) vahel tekib faasinihe, kusjuures voolu kasv jääb pinge kasvust nurga  $\varphi$  võrra maha (joon. 3). Jättes arvestamata pooli oomilise takistuse, võib kirjutada:  $\varphi = \frac{-\pi}{2}$  (joon. 4).



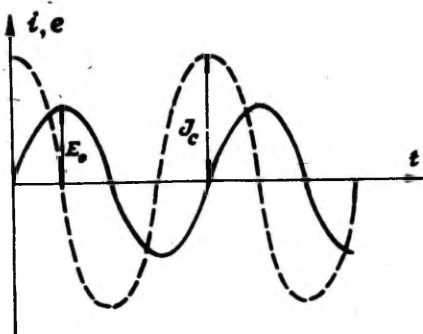
Joon. 3. Voolutugevus ja elektromotoorjõud pooli sisaldava vooluallika puhul.



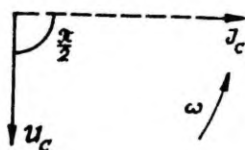
Joon. 4. Voolutugevuse ja pinge vektordiagramm pooli sisaldava vooluahela jaoks.

Kui vooluahel sisaldab kondensaatorit, toimub voolutugevuse kasv pinge kasvust kiiremini (joon. 5). Jättes arvestamata vooluahela oomilise takistuse, võib kirjutada

$$\rho = + \frac{\sqrt{K}}{2} \quad (\text{joon. 6}).$$

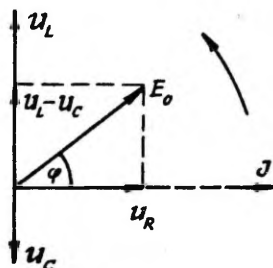


Joon. 5. Voolutugevus ja elektromotoorjõud kondensaatorit sisaldava vooluahela puhul.



Joon. 6. Voolutugevuse ja pingete vektordiagramm kondensaatorit sisaldava vooluahela jaoks.

Olgu meil vooluring, mis sisaldab aktiiv-, induktiiv- ja mahtvuslikku takistust. Sellisel juhul on faasinurga  $\varphi$  ja voolutugevuse amplituudväärtuse  $I_0$  leidmiseks sobiv kasutada pingete vektordiagrammi (joon. 7).



Joon. 7. Pingete vektordiagramm.

Jooniselt 7 on näha, et

$$E_0^2 = U_R^2 + (U_L - U_C)^2 = I_0^2 R^2 + I_0^2 (X_L - X_C)^2,$$

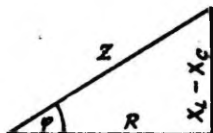
millest

$$I_0 = \frac{E_0}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (2)$$

$$\text{Suurust } Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (3)$$

nimetatakse kogu- või näivtakistuseks või impedantsiks.

Kui vähendada joonisel 7 kujutatud pingete kolmnurga külgede pikkusi  $I_0$  korda, saadakse joonisel 8 kujutatud takistuste kolmnurk.



Joon. 8. Takistuste kolmnurk.

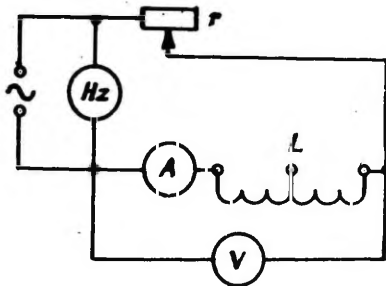
Jooniselt 8 võib leida faasinurga:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad (4)$$

### Töö käik

A. Pooli induktiivsuse määramiseks koostame vooluringi vastavalt skeemile (jooht. 9).

Uurimisobjektiks on väljavõtetega induktiivpool. Enne skeemi pingestamist asetame reostaadi  $r$  liugkontakti nii, et takistus oleks maksimaalne. Hiljem suurendame voolutugevust ahelas reostaadi takistuse vähendamisega. Üheaegselt ampermeetri lugemiga registreerime ka voltmeetri näidu. Katse teeme kahe erineva induktiivsusega, mõlemal korral



Joon. 9. Katseskeem pooli induktiivsuse määramiseks.

kolmel erineval voolutugevusel. Vahelduvvoolu sageduse  $\nu$  mõõdame hertsmeetriga. Pooli oomilise takistuse mõõdame alalisvoolu mõõtesillaga või testriga pärast kõikide ülal- kirjeldatud mõõtmiste lõpetamist ja skeemi lahtivõtmist.

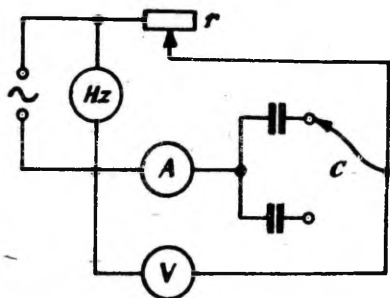
Induktiivsuse leiame valemist (tuletada!)

$$L = \frac{X_L}{2 \pi \nu} . \quad (5)$$

Faasinurga arvutamiseks kasutame valemist (4). Katse- andmed ja tulemused koondame tabelisse.

Väljavõte	Jrk. nr.	I	U	$\nu$	$R_0$	$X_L$	L	$\operatorname{tg} \rho$	$\rho$
	1.								
	2.								
	3.								
	1.								
	2.								
	3.								

B. Kondensaatori mahtuvuse määramiseks koostame vooluringi vastavalt skeemile (joon. 10).



Joon. 10. Katseskeem kondensaatori mahtuvuse määramiseks.

Uurimisobjektiks on kondensaatorite patarel. Määrame analoogiliselt tööle A voolutugevuse ja pinge väärtused kahe erineva kondensaatori jaoks.

Mahtuvuse leiame valemist (tuletada!)

$$C = \frac{1}{2\pi \nu X_C} \quad (6)$$

Tulemused koondame tabelisse.

Väljavõte	Jrk. nr.	I	U	$\nu$	$X_c$	C
	1.					
	2.					
	3.					
	1.					
	2.					
	3.					

#### Lisaküsimusi

1. Mida nimetatakse vahelduvvoolu perioodiks?
2. Tuletada  $X_L$  ja  $X_C$  ühikud.
3. Mis on pinge ja voolu amplituud- ja efektiivväärtused?
4. Defineerige induktiivsuse ja mahtuvuse ühikud.
5. Mis on oomiline takistus?
6. Miks ei kohusta tööjuhend faasinurga arvutamist mahtuvuse mõõtmisel?
7. Missugune on organismi kudede induktiivsus, mahtuvus?

#### Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Н.М. Ливенцев. Курс физики для медвузов. М., "Высшая школа", 1978, стр. 220-230.

## VAHELDUVVOOLU ALALDAMINE

### Tööülesanne

Tutvumine pooljuhtdiodi omadustega. Tähtsamate alaldiskemide koostamine. Pulseeriva alalispinge ja voolu silumine.

### Töövahendid

Stendid transformatori, diodide, drosseli ja kondensaatoritega. Koormistakistid, voltmeetrid, ostsillograaf, ühendusjuhtmed.

### Teoreetiline sissejuhatus

Pooljuhtdiodi ehituse ja tööpõhimõtte mõistmiseks on eelnevalt vaja omandada järgmised mõisted: pooljuht, doonor- ja aktseptorlisandid, omajuhtivus, lisandjuhtivus, põhilised ja mittepõhilised laengukandjad, n-pooljuht, p-pooljuht, elektriväli, potentsiaalpinge (vt. kirjandus [1], [2]).

#### 1. n- ja p-juhtivus

n-juhtivusega kristalli näiteks võib olla neljavalentne Ge, kuhu on lisatud viievalentset Sb või As (doonorlisand). Doonori aatomil läheb keemilise sideme loomiseks Ge aatomitega vaja ainult nelja elektroni, seega iga lisandiatomi kohta jääb üks elektron vabaks, mis kristallile

rakendatud pinge korral liigub elektrivälja suunale vastupidises suunas, s.t. väiksema potentsiaaliga välja punktist suurema potentsiaaliga välja punkti suunas. n-pooljuhis on põhilisteks laengukandjateks elektronid. Doonori aatom, andnud ära elektroni, jääb kristalli positiivselt laetud ioonina.

p-juhtivusega kristallina kasutatakse tihti neljavalentset Ge, kuhu on lisatud kolmevalentset In või Al. In või Al aatomil puudub üks elektron keemilise sideme loomiseks teda kristallis ümbritseva nelja Ge aatomiga. Puuduv elektron haaretakse mõnelt naabruses asuvalt Ge aatomilt, kuhu jääb elektroni puudujääk e. auk, mis on samaväärne positiivse laengukandjaga. Tekkinud auk Ge aatomi keemilises sidemes võib täituda elektroniga mõnelt teiselt Ge aatomilt, jne. p-tüüpi pooljuhtides on põhilisteks laengukandjateks augud, mis kristalli pingestamisel liiguvad elektrivälja suunas, s.t. suurema potentsiaaliga välja punktist väiksema potentsiaaliga välja punkti suunas. Elektroni haaranud lisandi aatomid esinevad p-tüüpi kristallis negatiivsete ioonidena.

Mittepõhilisteks laengukandjateks n-juhtivusega kristallis on augud ja p-juhtivusega kristallis elektronid. Neid on aga vastavate kristallide põhiliste laengukandjate arvuga võrreldes tunduvalt vähem.

## 2. Pingestamata p-n siire

Viime omavahel kontakti n- ja p-tüüpi pooljuhi. Kontaktpinna lähedast ala paksusega ca  $1 \dots 0,1 \mu\text{m}$  nimetatakse p-n siirdeks.

Puudugu väline pinge p-n siirdel. Laengukandjad kummaski pooljuhis osalevad korrapäratus soojusliikumises. Selle tagajärjel toimub nende difusioon ühest pooljuhist teise. Teame, et difusiooni korral (vt. näiteks difusioon gaasides ja vedelikes) liiguvad osakesed piirkonnast, kus nende kontsentratsioon on suurem, piirkonda, kus nende kontsentratsiooni

oon on väiksem. Niisiis, n-tüüpi pooljuhist difundeeruvad p-tüüpi pooljuhti elektronid ja p-tüüpi kristallist difundeeruvad n-tüüpi kristalli augud.

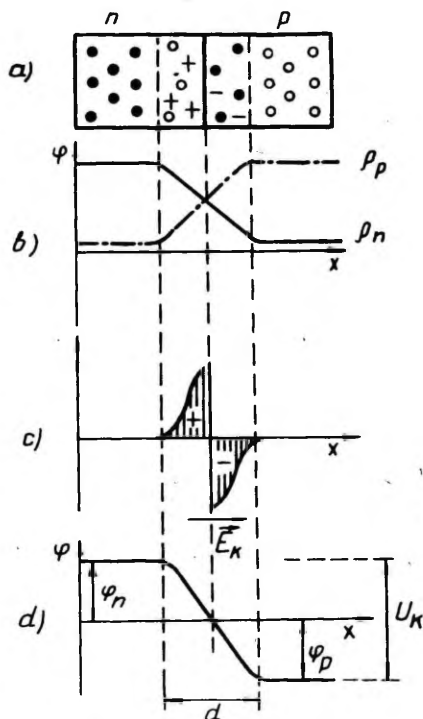
Difusiooni tagajärjel tekivad kummaski pooljuhis kokkupuutepinna lähedal erimärgilised ruumilaengud. n-piirkonnas tekib positiivne ruumilaeng, mis moodustub positiivselt laetud doonori aatomitest ning siia piirkonda difundeerunud aukudest. p-piirkonnas tekib aga negatiivne ruumilaeng, mis moodustub negatiivselt laetud aktseptori aatomitest ning n-piirkonnast siia difundeerunud elektronidest (vt. joon. 1).

Difusiooni tagajärjel moodustunud ruumilaengud tekitavad kontaktpotentsiaalide erinevuse  $U_k = \varphi_n - \varphi_p$  ja elektrivälja  $\vec{E}_k$ , mis on suunatud n-pooljuhist p-pooljuhti. p-n siirdel moodustub potentsiaalibarjäär, mis takistab põhiliste laengukandjate edasist difusiooni. Näiteks elektronid ei saa enam difundeeruda n-pooljuhist p-pooljuhti, sest elektrivälja potentsiaal on seal väiksem. Analoogiliselt on selgitatav ka aukude difusiooni katkemine.

Eri tüüpi pooljuhtide kokkupuutepinna lähedaste ruumilaengute elektriväli tõukab põhilisi laengukandjaid siirdest eemale. Selle tagajärjel on p-n siirde keskmises osas elektronide ja aukude kontsentratsioon väiksem kui siirdest kaugemates n- ja p-piirkondades (vt. joon. 1 b). Vabade laengukandjate kontsentratsioonid p-n siirde keskosas ja sellest kaugemal võivad erineda suurusjärgult  $10^4$  korda. Järelikult on p-n siirde keskmise kihi elektrijuhtivus palju väiksem kui p ja n kristalli ülejäänud osadel. Seda keskmist, suure takistusega kihti nimetatakse tõkkekihiks.

### 3. p-n siirde pingestamine (joon.2, joon. 3)

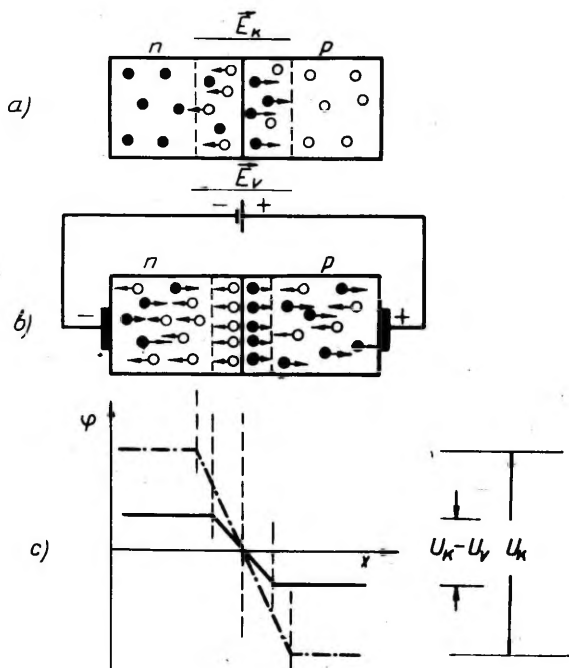
Rakendame p-n siirdele päripinge  $U_v$ , s.t. ühendame välise pingega positiivse pooluse p-pooljuhiga ja negatiivse pooluse n-pooljuhiga. Päripinge poolt tekitatud elektriväli  $\vec{E}_v$  on kontaktpotentsiaalide erinevusest tingitud



Joon. 1. Füüsilised protsessid p-n siirdel.

- a) Kontakti viidud n- ja p-pooljuht. ● - elektron; + - ioniseeritud doonor; - - ioniseeritud aktseptor; o - auk.
- b) Põhiliste (vabade) laengukandjate tihedus.  $\rho_p$  - aukude tihedus;  $\rho_n$  - elektronide tihedus.
- c) Difusiooni tagajärjel tekkinud ruumilaeng  $\vec{E}_K$ .
- d) Potentsiaali muutus p-n siirdel.  $\varphi_n$  - potentsiaal n-pooljuhis;  $\varphi_p$  - potentsiaal p-pooljuhis;  $U_K$  - kontakt-potentsiaalide vahe.

$\vec{E}_K$  - väljatugevuse vektor;  $d = 1 \dots 0,1 \mu\text{m}$ ;  $U_K = \text{ca } 250 \text{ mV}$ .



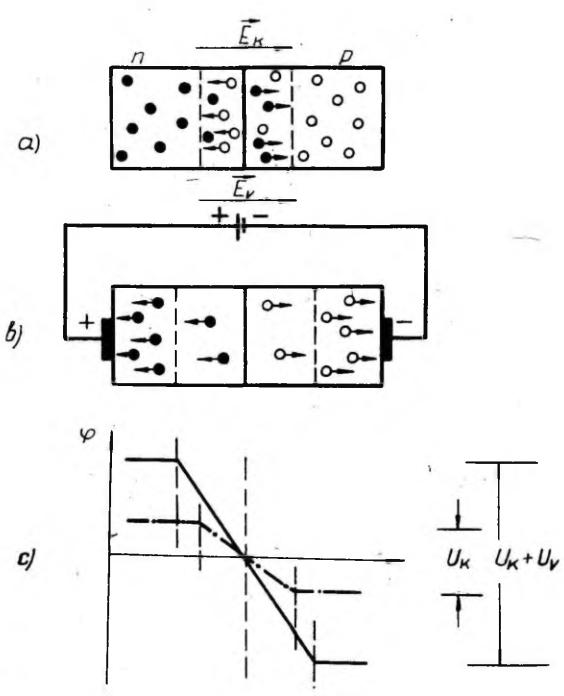
Joon. 2. Füüsilised protsessid p-n siirde päripidi pingestamisel.

a) pingestamata p-n siire ( $\vec{E}_k$  - ruumlaengute poolt tekitatud elektrivälja vektor); b) päripidi pingestatud p-n siire ( $\vec{E}_v$  - välise pingesallika poolt tekitatud elektrivälja vektor); c) potentsiaali muutus päripidi pingestamisel: — — — enne pingestamist; — — — pärast pingestamist.

elektriväljaga  $\bar{E}_k$  võrreldes vastupidise suunaga. Summaarne väli muutub nõrgemaks ja potentsiaalide erinevus siirdel väheneb, s.t. väheneb ka potentsiaalbarjääri kõrgus ja suureneb laengukandjete difusioonist põhjustatud vool. Kui jätta arvestamata pingelang n- ja p-piirkonna takistusel, siis võib pinge siirdel  $U$  lugeda ligikaudu võrdseks  $U = U_k - U_v$ . Pärripidisel pingestamisel mitte ainult ei vähene potentsiaalbarjääri kõrgus, vaid väheneb ka tõkkekihi paksus ning takistus. Kuna potentsiaalbarjääri kõrgus p-n siirdel on mõni kümnendik volti, siis sama suurusjärku pärripidisest pingest piisab, et märgatavalt vähendada potentsiaalbarjääri kõrgust ning tõkkekihi takistust. On selge, et teatud päripinge korral võib potentsiaalbarjääri p-n siirdel hoopiski kaotada. Siis muutub tõkkekihi takistus nulli-lähedaseks ja p- ning n-kristalli läbib nn. otsevool, mis koosneb elektronide suunatud liikumisest positiivsele poolusele ja aukude suunatud liikumisest negatiivsele poolusele. Otsevoolu suurus oleneb rakendatud välispingest ja vooluringi takistusest (p- ja n-kristalli takistus ning vooluallika sisetakistus). Märgime, et ühendusjuhtmetes liiguvad ainult elektronid. Nad liiguvad vooluallika miinuspooluselt n-piirkonda ja kompenseerivad seal elektronide kao, mis tekib nende difundeerumisel p-piirkonda. p-piirkonnast liiguvad elektronid vooluallika positiivsele poolusele ja p-pooljuhis tekitavad pidevalt uued augud, mis liiguvad läbi p-n siirde negatiivse pooluse suunas. Summaarne otsevool on juhtme mistahes ristlõikes antud pingel  $U_v$  muutumatu.

$$I = i_{\text{elektronid}} + i_{\text{augud}} = \text{const.} \quad (1)$$

Ühendame nüüd välise vooluallika positiivse pooluse n-pooljuhiga ja negatiivse pooluse p-pooljuhiga (vt. joon. 3). Sellel, nn. vastupidisel pingestamisel tekkiv elektriväli  $\bar{E}_v$  on samasuunaline kontaktpotentsiaalide erinevusest tingitud



Joon. 3. Füüsikalised protsessid p-n siirde vastupidisel pingestamisel.

a) pingestamata p-n siire; b) vastupidi pingestatud p-n siire; c) potentsiaali muutus vastupidi pingestamisel:  
 — . — enne pingestamist; — — pärast pingestamist.

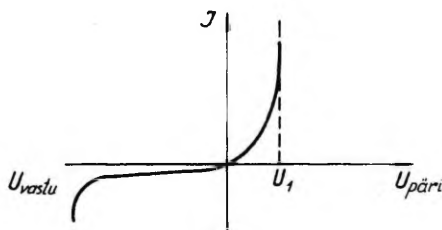
elektriväljaga  $\vec{E}_k$ . Summaarne väli tugevneb ning potentsiaalbarjääri kõrgus  $U$  suureneb.

$$U = U_k + U_v. \quad (2)$$

Põhiliste laengukandjate difusioon läbi p-n siirde lakkab. Tugevnenud elektriväli surub vabu laengukandjaid p-n siirdest veelgi rohkem eemale - elektrone n-piirkonda ja auke p-piirkonda. Tõkkekihi paksus ja takistus suurenevad, p-n siiret läbib ainult väga nõrk vastuvool, mis on tingitud mittepõhiliste laengukandjate liikumisest läbi siirde.

#### 4. Pooljuhtdiod

Pooljuhtdiodi põhiosaks on pooljuhtkristall, milles on tekitatud p-n siire. Kristalli otstele on kinnitatud mittealaldavad metallist väljaviigi kontaktid. Tänu p-n siirdele on sellise struktuuri juhtivus päripidise pinge puhul  $10^3 \dots 10^5$  korda suurem kui vastupingel. Joonisel 4 on esitatud diodi läbiva voolu sõltuvus rakendatud pingest, nn. voltamperkarakteristik.



Joon. 4. Pooljuhtdiodi voltamperkarakteristik.

Pooljuhtdiodi kasutamisel alaldajana on oluline silmas pidada järgmisi parameetreid:

1. Lubatud vastupinge. Kui vastupinge ületab maksimaalse lubatud väärtuse, siis kasvab vastuvool järsult, toimub läbilöökk ja diod rikneb.

2. Lubatud päriool. Nagu nähtub voltamperkarakteristikult, langeb ka päripinge puhul osa pingest ( $U_1$ ) diodile, mistõttu diodis eraldub teatud võimsus - diod kuumeneb. Temperatuuri tõusuga kasvab aga mittepõhiliste laengukandjate arv, suureneb vastuvool ja väheneb lubatud vastupinge. Kui soojuse äravool ei ole piisav, tekib läbilöökk.

#### 5. Vahelduvvoolu alaldamine

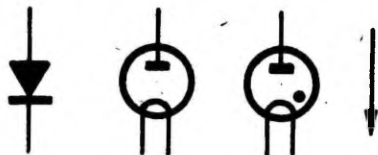
Sobiva alalispinge saamise üheks sagedamini kasutatavaks meetodiks on vastava pingeni transformeeritud vahelduvvoolu alaldamine. Alaldiks võib olla mistahes teravalt asümmeetrilise voltamper-tunnusjoonega seadeldis - suunaja, s.t. seadeldis, mille juhtivus ühes suunas on palju parem kui vastupidises (joon. 4).

Voolu alaldamiseks kasutatakse tavaliselt vaakumsuunajaid (kenotrone), gaaslahendussuunajaid (gasotrone) ning pooljuhtsuunajaid (seleenalaldit, germaanium- ja ränidiodide). Joonisel 5 on näidatud pooljuht-, vaakum- ja gaaslahendussuunaja tähistus skeemidel. Nende ehitusega tuleb tutvuda juhendi lõpus viidatud kirjanduse abil.

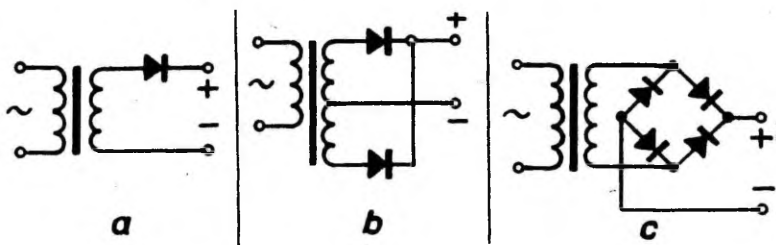
Käesolevas töös uurime vahelduvvoolu alaldamist pooljuhtsuunajate abil. Kasutatavamad alaldite lülitusskeemid on toodud joonisel 6.

Joonisel 6a on kujutatud poolperioodalaldi, joonisel 6b ja 6c - täisperioodalaldid. Lülitust 6c nimetatakse sageli sildskeemiks.

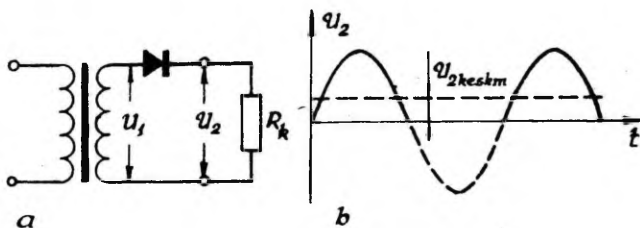
Alaldite väljundil saadav alalispinge on pulseeriv. Näiteks joonisel 7a kujutatud poolperioodalaldi koormustakistit  $R_k$  läbib pulseeriv vool ja pinge  $U_2$  selle klemmidel on



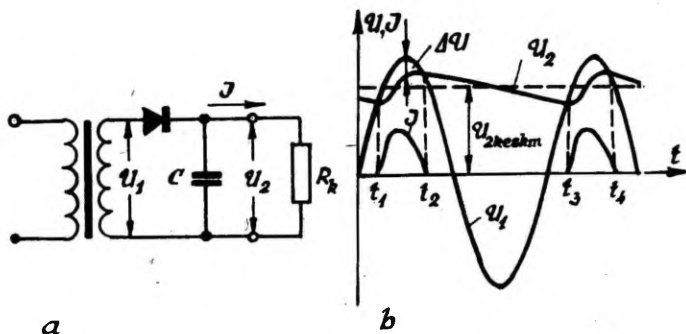
Joon. 5. Alaldavate elementide skeemitähised.



Joon. 6. Alaldite skeemid.



Joon. 7. Pulseeriva pinge saamine poolperiood-  
alaldiga.



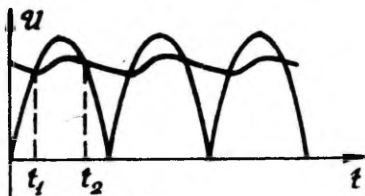
Joon. 8. Kondensaatori mõju poolperioodalaldi väljundpinge pulsatsioonile.

samuti pulseeriv (joon. 7b). Et aga paljudel juhtudel pingepulsatsioon ei ole lubatud, siis kasutatakse silumisfiltreid. Lihtsaimaks filtriks on koormustakistiga  $R_k$  paralleelselt lülitatud kondensaator  $C$  (joon. 8a). Niisugune kondensaator vähendab pulsatsiooni, kuid pinget  $U_2$  koormustakistil jääb ikka laineliseks (joon. 8b).

Nagu nähtub joonisest 8b, läbib vool diodi vaid siis, kui pinget transformatoril  $U_1$  ületab väljundklemmidel (koormustakistil  $R_k$ ) oleva pinget  $U_2$ , s.o. ajavahemikel  $t_2 - t_1$  ja  $t_4 - t_3$ . Diodis (suunajas) tekib siis pingelang  $\Delta U$ . Kondensaator  $C$  laadub. Ajavahemikul  $t_3 - t_2$  (kui diodist voolu läbi ei lähe) toimub kondensaatori tühjenemine, mille kiirus sõltub koormustakisti  $R_k$  poolt tarvitatava voolutugevuse suurusel. Väikeste voolutugevuste puhul ning väikese suunaja sisetakistuse puhul (räni- ja germaaniumdiodid) on pingelang  $\Delta U$  väga väike, mistõttu teda võib arvestamata jätta. Võib juhtuda, et väikese voolutugevuse puhul, s.t. kui kondensaator ajavahemikus  $t_3 - t_2$  tühjeneb vähe, võib keskmine alalispinge  $U_2$  (mõõdab voltmeeter)

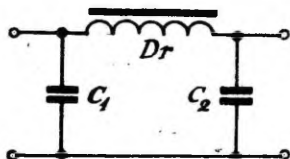
olla isegi suurem vahelduvpinge efektiivväärtusest  $U_1$  (mõõdab vahelduvvoolu voltmeeter).

Täisperioodalaldite puhul, võrreldes poolperioodalaldiga (ühesuguse koormusvoolu ja kondensaatori  $C$  ühesuguse mahtuvuse korral), on lainesus väiksem, sest kondensaatori laadimine toimub seal ka teise poolperioodi ajal (joon.9).



Joon. 9. Kondensaatori mõju täisperioodalaldi väljundpinge pulsatsioonile.

Lainesuse vähendamiseks kasutatakse silumisfiltreid, nendest kõige sagedamini  $\Pi$ -filtrit (joon. 10). Viimane koosneb kahest kondensaatorist  $C_1$  ja  $C_2$  ning drosselist  $D_r$  (suure induktiivsusega pool). Vahelduvvoolule on drossel suureks induktiivseks takistuseks, mistõttu lainesus (vaadeldav vahelduvvooluna) temast läbi ei pääse. Õigesti valitud  $\Pi$ -filter annab praktiliselt lainesusetat alaspinge.



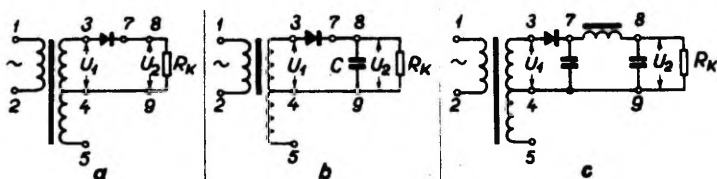
Joon. 10.  $\Pi$ -filter.

Töö käik

1. Käesolevas töös kasutatakse germaaniumdioode Д7Ж. Koostame poolperioodalaldi skeemi ilma filtrita (joon. 11a). SKEEMIDE KOOSTAMISEL PEAME RANGELT SIIMAS, ET JOONISTEL NÄIDATUD GERMAANIUMDIOODIDE ASEND (  $\rightarrow$  ) ÜHTIKS NENDELE PEALE MÄRGITUGA. SKEEMI VÕIB VOOLUVÕRKU ÜHENDADA ALLES PÄRAST SELLE KONTROLLIMIST ÕPPEJÕU POOLT! Mõõdame vahelduvpinge  $U_1$  (punktide 3 ja 4 vahel) ja pulseeriva pinge  $U_2$  (punktide 8 ja 9 vahel). Ühendades samade punktidega ostsillograafi<sup>⊠</sup>, fikseerime pingekõvera kuju. Selleks paigutame ostsillograafi ekraanile läbipaistva paberi. Pingekõvera kuju joonistame ostsillograafi ekraani rikkumise ärahoidmiseks ettevaatlikult ning pehme pliiatsiga.

Koostame skeemi vastavalt joonisele 11b. Mõõdame pinged  $U_1$  ja  $U_2$  ning kalkeerime pingekõvera.

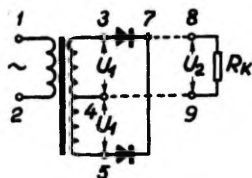
Lisame skeemile  $\square$ -filtri (joon. 11c), mõõdame pinged  $U_1$  ja  $U_2$  ning joonistame pingekõvera.



Joon. 11. Poolperioodalaldite skeemid.

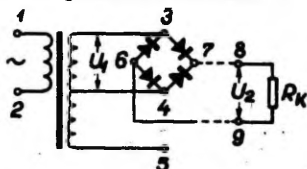
2. Koostame täisperioodalaldi skeemi (joon. 12) ja tee-  
me sama, mis poolperioodalaldiga.

<sup>⊠</sup> Erinevate lülitusskeemide uurimisel jätta ostsillograafi y-telje võimendus muutumatuks.



Joon. 12. Täisperioodalaldi skeem.

3. Koostame täisperioodalaldi sildakeemi (joon. 13) ning kordame eelkirjeldatud mõõtmisi.



Joon. 13. Sildskeem.

Mõõtmistulemused paigutame järgmisse tabelisse.

Alaldi tüüp	Filter	$U_2$	$U_m = U_1 \sqrt{2}$	$U_2$
Poolperioodalaldi	ilma filtrita kondensaator II			
Täisperioodalaldi	ilma filtrita kondensaator II			
Sildskeemalaldi	ilma filtrita kondensaator II			

Protokollile lisame ülesjoonistatud pingekõverad. Tullemuste analüüsi põhjal võrdleme uuritud skeeme.

#### Lisaküsimusi

1. Selgitada füüsikalisi protsesse p-n siirdel.
2. Millisesse süsteemi kuuluva riistaga võib mõõta nii alalis- kui vahelduvpinget?
3. Millise voltmeetriga tuleb mõõta antud töös pulseerivat pinget?
4. Joonistada pool- ja täisperioodalaldite skeemid kenotronidega.
5. Kas võib pinge  $U_2$  ületada pinget  $U_1$ : a) koormatud alaldi puhul, b) lahtiühendatud koormustakistuse puhul?
6. Millisel juhul annab lihtne kondensatorfilter pea-aegu täielikult silutud pinge?
7. Defineerida vahelduvvoolu efektiivväärtused.
8. Kuidas seletada kondensaatori ja drosseli siluvat toimet filtrites?
9. Defineerida mahtuvuse ja induktiivsuse ühikud.
10. Kuidas oleneb filtri siluv toime koormustakisti suurusest?

#### Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Н.М. Ливенцев. Курс физики для медвузов. М., "Высшая школа", 1978, с. 175-178.

---

**TRANSISTORI STAATILISTE KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE**

**Töö eesmärk**

Tutvuda transistori ehituse ja tööpõhimõttega. Määrata transistori staatilised karakteristikud ühise emitteriga lülituses ja õppida tundma nende seost transistori põhi-  
parameetritega.

**Töövahendid**

Stend transistoriga, toiteallikas, milliampermeeter, mikroampermeeter, voltmeeter, millivoltmeeter.

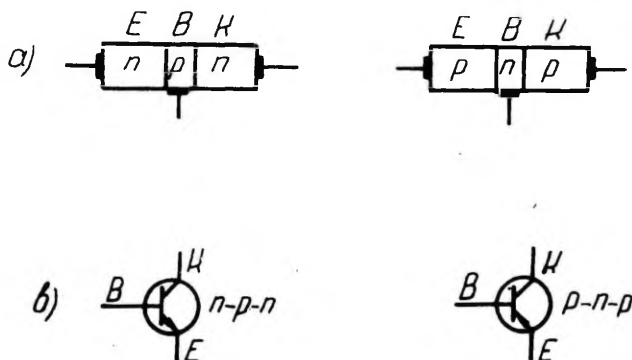
**Teoreetiline sissejuhatus**

1. Enne kui asuda transistori tööpõhimõtte uurimisele, peab tutvuma füüsikaliste protsessidega p-n siirdel ( vt. töö nr. 10).

Transistor on elektriliste signaalide võimendamiseks või genereerimiseks kasutatav elektronseade, mis põhineb laengukandjate kontsentratsioonil ja liikumisel tüürimisel.

Transistor on üheks põhiliseks elemendiks kaasaegses elektroonikas. Ka nn. mikro- e. integraalskeemide aluseks on ühte kristalli tekitatud ja omavahel sobival kujul ühendatud transistorid.

Transistori võib vaadelda koosnevana kahest järjestik-  
ku lülitatud p-n siirdest.



Joon. 1.

- a) n- ja p-juhtivusega pooljuhtide paiknemine n-p-n ja p-n-p transistoris.
- b) Transistorite skeemitähised: E - emitter; B - baas; K - kollektor.

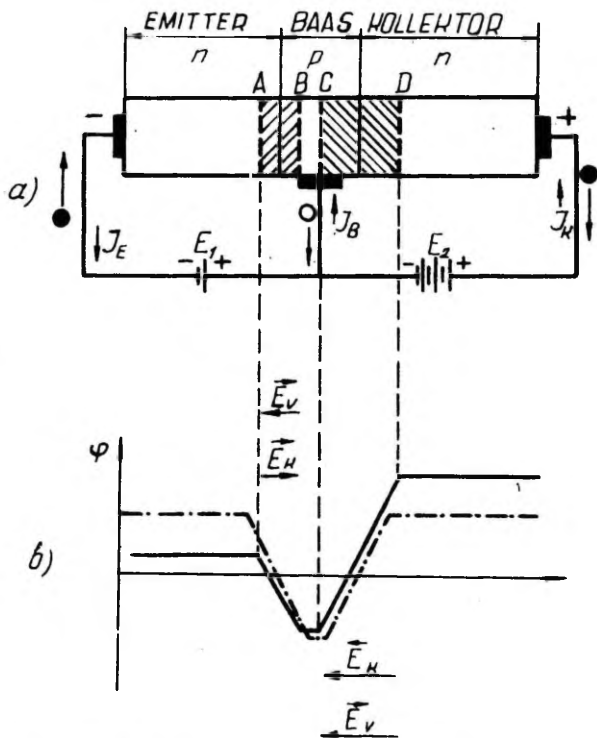
Kahe p-n siirde kokkühendamiseks on kaks võimalust. Meile võimalustele vastavalt saame n-p-n või p-n-p tüüpi transistori (vt. joon. 1). Transistori keskmist piirkonda nimetatakse baasiks. Baasiga külgnevad emitter ja kollektor. Nende nimetuste sisuline tähendus selgub transistori tööpõhimõtte uurimisel.

Emitteri- ja baasivahelist p-n siiret nimetatakse emittersiirdeks, baasi- ja kollektorivahelist p-n siiret aga kollektorsiideks. Transistor kui selline töötab ainult siis, kui emitter- ja kollektorsiidetevaheline kaugus on väga väike (mõned  $\mu\text{m}$ ). Seepärast tehakse transistorite tootmisel baasi kiht väga õhuke, võrreldes emitteri- ja kollektorikihtidega. Peale selle on tavaliselt lisandite kontsentratsioon, seega ka põhiliste laengukandjate kontsentratsioon, baasis märgatavalt väiksem kui emitteris ja kollektoris.

Transistorite skeemitähistel (joon. 1b) tähistab nool alati emitterväljaviiki. Noole suund aga näitab kokkuleppelist voolu suunda emitterväljaviigis (s.o. "+"  $\rightarrow$  "-"). Võib ka meeles pidada, et nool on alati suunatud n-pooljuhi poole.

Analüüsime n-p-n transistori töötamise põhimõtet nn. aktiivses staatilises režiimis. Sellisel juhul on transistoriga ühendatud ainult alalis-toitepinge allikad  $E_1$  ja  $E_2$  ning selliselt, et emittersiirdele rakendatakse päripidine pinge, kollektorsiidle aga vastupidine pinge (vt. joon. 2). Meenutame nüüd protsesse p-n siirde päri- ja vastupidisel pingestamisel (vt. joon. 1, 2 ja 3 tööst nr.10). Päripidise pinge  $U_{BE}$  rakendamisel baasi ja emitteri vahel vähenevad emittersiidel potentsiaalbarjääri kõrgus, tõkkekahi paksus ning takistus. Läbi emittersiirde läheb emitterivool  $I_E$ , mis peamiselt koosneb emitterist (n-pooljuhist) baasi (p-pooljuhti) difundeeruvatest elektronidest. Kuna baas on väga õhuke ning põhiliste laengukandjate (aukude) kontsentratsioon temas on tunduvalt väiksem kui elektronide kontsentratsioon emitteris, siis järelikult hõivatakse baasi aukude poolt (rekombineeruvad) ainult vähesed emitterist baasi difundeerunud elektronidest. Need elektronid lahkuvad baasist väljaviigijuhtme kaudu pingevallika  $E_1$  positiivsele poolusele, tekitades baasivoolu  $I_B$ , mis tagab baasi neutraalsuse.

Enamik baasi tunginud elektronidest läbivad baasi ning satuvad kollektorsiidle elektrivälja, mis on sellise suunaga, et ta soodustab elektronide edasist liikumist baasist kollektorisse. Kollektorsiidle vastupidisel pingestamisel suureneb kollektori potentsiaal baasi suhtes (potentsiaalbarjääri kõrgus suurenes), kuid just see ongi elektronide edasist liikumist soodustav asjaolu, sest meenutame, et elektriväljas liiguvad elektronid väiksema potentsiaaliga välja punktist suurema potentsiaaliga välja



Joon. 2. Füüsilised protsessid n-p-n transistoris.

- a) Emmitter - baas pingestatakse pärisuunas, baas - kollektor aga vastupidises suunas.  $\bullet \rightarrow$  näitab elektronide liikumise suunda välises vooluringis.
- b) Emittersiidrel AB potentsiaalbarjääri kõrgus väheneb, kollektorsiidrel CD aga suureneb.

$\vec{E}_K$  on ruumlaengute,  $\vec{E}_V$  aga välise pingesallika poolt tekitatud väljatugevuse vektor.

punkti suunas (e. väljatugevuse vektori suunale vastupidises suunas).

Kollektorist liiguvad elektronid läbi juhtme pingeallika  $E_2$  positiivsele poolusele, tekitades seega kollektorivoolu  $I_K$ . Kespool toodud arutluste põhjal võib järeelda, et

$$I_E = I_B + I_K \quad (1)$$

Ülaltooduga analoogiliselt võib vaadelda p-n-p tüüpi transistori töötamise põhimõtet. Mõlemat tüüpi transistori jaoks võib tööpõhimõtet kokkuvõtlikult selgitada järgmiselt. Baasi ja emitteri vahele rakendatud väikese päripinge mõjul avatakse emittersiire ning emitterist liiguvad baasi tema suhtes mittepõhilised laengukandjad. Ainult väike osa neist rekombineerub baasi põhiliste laengukandjatega, tekitades nõrga baasivoolu; enamik neist aga siirdub kollektorsiidre piirkonda. Kollektori ja baasi vahele rakendatakse vastupinge, mis aga baasi suhtes mittepõhilistele laengukandjatele toimib päripingena, seetõttu nad liiguvad baasist kollektorisse, tekitades kollektorivoolu. Kollektorivool on peaaegu võrdne emitterivooluga ja nad mõlemad on tunduvalt suuremad baasivoolust.

Väikese võimsusega transistoritel on tavaliselt kollektorpinge  $U_{KE}$  suurusjärgult 5...20 V, baasipinge  $U_{BE} \approx 0,1 \dots 0,5$  V, kollektorivool  $I_K \approx 1 \dots 10$  mA ja baasivool  $I_B \approx 50 \dots 200 \mu A$ .

## 2. Transistori kasutamisest signaalide võimendamisel

Üheks transistori tähtsaimaks omaduseks on see, et tema kõik kolm voolu -  $I_E$ ,  $I_B$  ja  $I_K$  muutuvad ligikaudu võrdeliselt üksteisega. Olgu näiteks vooludel järgmised tugevused  $I_E = 10$  mA,  $I_B = 0,5$  mA ja  $I_K = 9,5$  mA. Kui nüüd baasivool näiteks suureneb 20 %, s.t.  $I_B = 0,5 + 0,1 = 0,6$  mA,

siis ka kõik teised voolud suurenevad 20 %, s.t.  $I_E = 10 + 2 = 12$  mA ja  $I_K = 9,5 + 1,9 = 11,4$  mA. Voolude võrdeline sõltuvus järeldub võrdusest (1), mis peab alati kehtima. Sellest võrdusest järeldub, et voolude muutuste jaoks kehtib

$$\Delta I_E = \Delta I_B + \Delta I_K. \quad (2)$$

Eespool selgitasime, et emitteri ja baasi vahelise väikese päripinge  $U_{BE}$  rakenõudamisel tekivad baasivoolust tunduvalt suurema voolutugevusega emitteri- ja kollektorivoolud. Kui muuta  $U_{BE}$  väärtust teatud piirides, siis muutuvad ka voolud  $I_E$ ,  $I_B$ ,  $I_K$ . Voolude omavahelisest võrdelisusest järeldub, et baasivoolu väikese muutusega kaasnevad tunduvalt suuremad emitterivoolu ja kollektorivoolu muutused. Niisiis selgub, et väikese sisend- e. baasivõimsusega  $P_B = I_B \cdot U_{BE}$  saame tüürida tunduvalt suuremat väljund- e. kollektorivõimsust  $P_K = I_K \cdot U_{KE}$ . Sellist nähtust nimetamegi võimendamiseks.

Transistori ja vaakumtrioodi vahel on olemas teatav analoogia: baas sarnaneb trioodi võrega, emitter katoodiga ja kollektor anoodiga. Trioodis juhitakse võimendav signaal võrele, transistoris baasile. Oluline erinevus on siinjuures see, et trioodi korral võrevoolu praktiliselt ei esine (võre ei tarbi võimsust), transistori korral on aga baasivool (kuigi väike) alati olemas, sest muidu transistor ei töötaks.

### 3. Transistori põhiparameetrid

Transistori võimendavad omadused loetakse määratuks, kui on teada voolu, pinge ja võimsusvõimenduse tegur, tõus, sisend- ning väljundtakistused. Need suurused sõltuvad transistori lülitusest, milleks on kas ühise baasiga (ÜB), ühise kollektoriga (ÜK) või ühise emitteriga (ÜE) lülitus. Kõige enam kasutatav on ÜE lülitus (vt. joon. 3).

Vooluvõimendusteguriks  $\beta$  ÜE lülituses nimetatakse kollektorvoolu väikese muutuse suhet seda esile kutsunud baasivoolu muutusse konstantsel kollektorpingel

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (3)$$

Sisendtakistus on baasipinge väikese muutuse ja sellest tingitud baasivoolu muutuse suhe konstantsel kollektorpingel

$$R_{\text{sis}} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (4)$$

$R_{\text{sis}}$  iseloomustab emitteri- ja baasivahelist takistust. Tõusuka nimetatakse kollektorvoolu väikese muutuse ning seda põhjustanud baasipinge muutuse suhet konstantsel kollektorpingel

$$S = \frac{\Delta I_K}{\Delta U_{BE}}, \text{ kui } U_{KE} = \text{const.} \quad (5)$$

Valemite (3) ja (4) põhjal on selge, et

$$\beta = S \cdot R_{\text{sis}}. \quad (6)$$

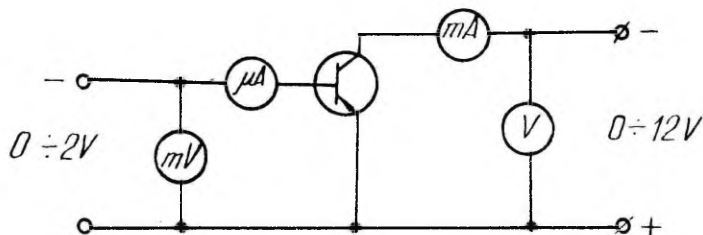
Transistori väljundtakistuseks nimetatakse kollektorpinge väikese muutuse ja tema poolt esilekutsutud kollektorvoolu muutuse suhet konstantsel baasipingel

$$R_{\text{välj}} = \frac{\Delta U_{KE}}{\Delta I_K}, \text{ kui } U_{BE} = \text{const.} \quad (7)$$

Käesolevas töös võetakse üles transistori staatilised karakteristikud, mis näitavad, kuidas muutuvad meid huvitavad pinged ja voolud koormuse puudumisel kollektorahelas. Dünaamiliste karakteristikute ülesvõtmiseks lülitatakse kollektorahelasse koormustakisti. Käesolevas töös seda ei tehta.

Töö käik

1. Karakteristikute ülesvõtmiseks teha ühendused vastavalt joonisele 3. Transistori kollektorahelaga ühendatakse vooluallika klemmid, milledevaheline pinge on muudetav 0 kuni +12 V ja baasiahelaga vooluallika klemmid, milledevaheline pinge on muudetav 0 kuni +2 V. Emitter ühendatakse toiteallika plussklemmiga (plussklemmid on toiteallikas kokku ühendatud).



Joon. 3. Skeem ÜE lülituses p-n-p tüüpi transistori põhiparameetrite määramiseks.

**NB!** Kõikidel mõõtmistel jälgida, et transistori kollektorivool ei ületaks 10 mA ja baasivool 500  $\mu$ A (miks?)

2. Sisendkarakteristikuks on baasivoolu tugevuse sõltuvus baasipingest konstantsel kollektorpingel  $I_B = f(U_{BE})$ ,  $U_{KE} = \text{const}$ .

Sisendkarakteristikute mõõtmiseks reguleerida baaspinget 0,02 või 0,04 V kaupa piirides 0 kuni 0,3 või 0,4 V, kandes tabelisse 1  $I_B$  ja  $I_K$  suurused vastavalt mikro- ja milliampmeetri näitudele. Mõõtmised teostada kollektorpingel 4,5 V ja 12 V.

Tabel 1

$U_{KE} =$		
$U_{BE}$ (V)	$I_B$ ( $\mu A$ )	$I_K$ (mA)

Tabelis 1 esitatud tulemuste põhjal joonestada millimeeterpaberil sõltuvused  $I_B = f(U_{BE})$ ,  $I_K = f(U_{BE})$  ja  $I_K = f(I_B)$  erinevate kollektorpingete  $U_{KE} = 4,5$  V ja 12 V jaoks. Graafikute abil määrata:

- sõltuvuse  $I_B = f(U_{BE})$  põhjal - sisendtakistus  $R_S$ ;
- sõltuvuse  $I_K = f(U_{BE})$  põhjal - tõus  $S$ ;
- vooluvõimendustegur  $\beta$  - sisendtakistuse ja tõusu korrutisena;
- sõltuvuse  $I_K = f(I_B)$  põhjal - voluvõimendustegur  $\beta$ .

3. Väljundkarakteristikuks on kollektorvoolu tugevuse sõltuvus kollektorpingest konstantse baaspinge (või konstantse baasvoolu) korral  $I_K = f(U_K)$ ,  $U_{BE} = \text{const}$  (või  $I_B = \text{const}$ ).

Väljundkarakteristikute mõõtmiseks reguleeritakse baaspingeks 150 mV, mis hoitakse mõõtmise käigus konstantne. Edasi mõõdetakse kollektorvool, tõstes kollektorpinget 1 V kaupa kuni 9 V (12 V). Karakteristiku algusosa saamiseks tuleb reguleerida kollektorpinget 0,2 V kaupa piirides

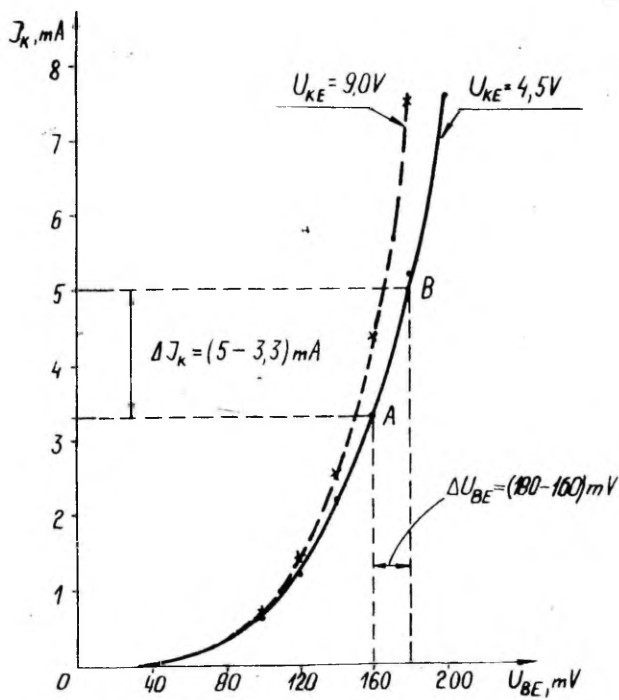
O...1 V. Samu mõõtmisi korrata baaspingel 200 mV. Mõõtmistulemused kanda tabelisse 2. Väljundkarakteristikuid võib määrata ka nii, et registreerime  $I_K$  väärtused, muutes ülal kirjeldatud viisil  $U_{KE}$ -d, kuid hoides samal ajal baasivoolu konstantse (näiteks 30  $\mu A$ , 50  $\mu A$  ja 100  $\mu A$ ). Kumba varianti kasutada - seda otsustab juhendaja.

Tabel 2

$I_B$ või $U_{BE} = \dots$	
$U_{KE}$ (V)	$I_K$ (mA)

Tabelis 2 esitatud tulemuste põhjal joonestada millimeeterpaberil sõltuvused  $I_K = f(U_{KE})$  erinevate  $U_{BE}$  konstantsete väärtuste (150 mV ja 200 mV) või erinevate  $I_B$  konstantsete väärtuste (näiteks 30  $\mu A$  ja 100  $\mu A$ ) korral. Graafikute abil määrata väljundtakistus  $R_V$ .

4. Parameetrite määramisel graafikutelt pidada silmas järgmist. Valida telgedel sobiv mastaap ja märkida ühik, millega suurust mõõdetakse; orienteeruvalt on sobivaks millimeeterpaber mõõdetega ca 20 cm x 28 cm. Kui katsetulemused hajuvad, siis tuleb sõltuvuse väljajoonestamisel neid keskmistada (siluda). Parameetrite arvutamisel graafikute põhjal tuleb sõltuvuste lineaarses osas eraldada piisavalt väike sirglõik AB (vt. joonis 4). Seile sirglõigu otspunktidele vastavate füüsikaliste suuruste väärtused ja nende muudud määrame horisontaal- ja vertikaalteljelt. Parameetrite väljaarvutamisel jälgida, et



Joon. 4. Tõusu  $S$  määramine sõltuvuse  $I_K = f(U_{BE})$  põhjal.

suurused, milledega arvutusi tehakse, oleksid avaldatud põhiühikute kaudu. Parameetrite määramise näitena on joonisel 4 toodud tõusu  $S$  määramine graafikult  $I_K = f(U_{BE})$ . Joonise 4 põhjal saame, et

$$S = \frac{1,7 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{20 \cdot 10^{-3} \text{ V}} = 8,5 \cdot 10^{-2} \frac{\text{A}}{\text{V}},$$

kui  $U_{KE} = 4,5 \text{ V}$ .

5. Mõõtmistulemuste põhjal leida, kui suur on transistori pingevõimendus ja võimsusvõimendus. Võrrelda leitud suurusi vaakumtrioodi samade parameetritega. Uurida võimalusi parameetrite teistsuguseks määramiseks (vt. näiteks  $R_V$  määramine sõltuvusest  $I_K = f(U_B)$  jt.).

#### Küsimusi

1. Selgitada mõisteid elektriväli, pinge ja potentsiaal.
2. Kuidas tuleks pingestada p-n-p tüüpi transistorit?
3. Kuidas mõjub transistori tööle tema soojenemine?
4. Kuidas kasutada transistorit elektriliste signaalide võimendamisel?
5. Kuidas tekib siiretele potentsiaalbarjäär?
6. Selgitada pooljuhtide n ja p juhtivust, lähtudes liisandite olemasolust.
7. Selgitada p-n-p tüüpi transistori tööpõhimõtet.
8. Miks ei vaadelda pooljuhis ioonide liikumist?
9. Selgitada, kuidas käitub n-p-n transistor, kui pingestada kollektor emitteri suhtes negatiivselt?

#### Kirjandus

1. Keskkooliõpik.
2. Н.М. Ливенцев. Курс физики, М., "Высшая школа", 1978, с.110-114, 175-188.

## TAKISTUSSIDESTUSEGA VÕIMENDI UURIMINE

## Tööülesanne

Tutvumine takistussidestusega võimendiga. Võimendi sageduskarakteristiku sõltuvuse määramine skeemi parameetritest. Tutvumine moonutustega.

## Töövahendid

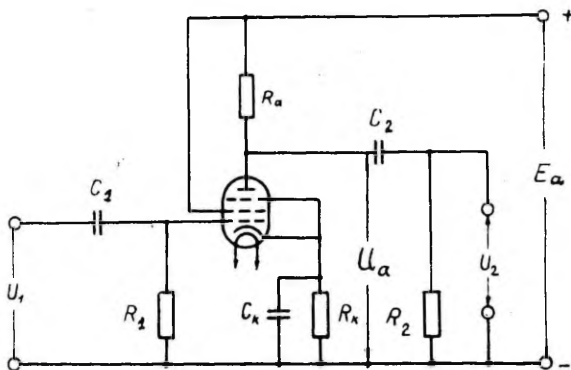
Paneel võimendiga, signaalgeneraator, lampvoltmeetrid, ostsillograaf, juhtmed.

## Sissejuhatus

Võimendi ülesandeks on suurendada välise energiaallika arvel sisendsignaali võimsust või amplituudi. Üheks levinumaks madalsageduslike võimendite tüübiks on takistussidestusega võimendi (joon. 1).

Sisendsignaali (sisendpinge  $U_1$ ) juhitakse pentoodi tüüri võrele üle kondensaatori  $C_1$ . Kondensaator laseb edasi ainult sisendsignaali vahelduvkomponendi. Võrepinge muutused kutsuvad esile lambi anoodvoolu muutusi, mistõttu hakkab muutuma pinge  $U_{R_a} = I_a R_a$  anoodkoormustakistil  $R_a$ . Kuna

$$E_a = I_a R_a + U_a = \text{const}, \quad (1)$$



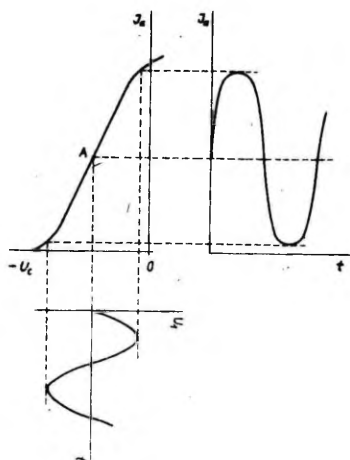
Joon. 1. Takistussidestusega võimendi ühe astme skeem.

kus  $E_a$  on toiteallika pinge, siis muutub ka lambi anoodpinge  $U_a$ . Anoodpinge muutuste vahelduvkomponendi (võimendatud pinge  $U_2$ ) võib juhtida üle kondensaatori  $C_2$  järgmise astme tüürvõrele (kui ühe astme võimendusest ei piisa).

Anoodvoolu sõltuvust võrepingest mingite, vaadeldavas protsessis muutumatute  $E_a$  ja  $R_a$  väärtuste korral nimetatakse lambi anood-võre dünaamiliseks karakteristikuks (joon. 2a). Vaatleme pingevõimendi tööd lambi anood-võre dünaamilise karakteristikuga abil. Kui sisendis puudub signaal  $U_1$ , siis tööpunkti A asukoht karakteristikul on määratud võrepingega  $U_0$  (negatiivne võre eelpinge) ning lampi läbib vastav muutumatu väärtusega anoodvool  $I_0$ . (joon. 2c).

Vahelduvpinge  $U_1$  andmisel võimendi sisendklemmidele (joon. 1) liitub vahelduvpinge  $U_1$  alalispingele  $U_0$  ning pinge pentoodi tüürvõrel (joon. 2b) hakkab muutuma samas taktis sisendisse antud vahelduvpingega. Anood-võre karak-





Joon. 3. Mittelineaarhoonutuste tekkimine.

dustegur  $K$ , mis võrdub väljund- ja sisendpinge amplituudide suhtega

$$K = \frac{U_2}{U_1}. \quad (2)$$

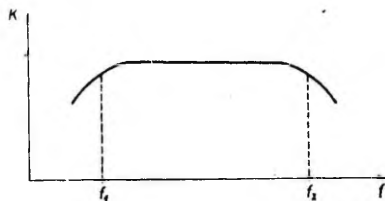
Keskmiitel sagedustel astme võimendustegur ei sõltu signaali sagedustest ja võrdub

$$K = \mu \frac{R_a}{R_a + R_1}, \quad (3)$$

kus  $R_a$  on anoodkoormustakisti takistus,  $R_1$  - lambi sisetakistus ja  $\mu$  - lambi võimendustegur.

Peale võimendusteguri on võimendi teiseks tähtsaks näitajaks tema sagedusarakteristik, s.o. võimendusteguri  $K$  sõltuvus võimendatavast sagedusest  $f$ . Joonisel 4 on toodud takistussidestusega võimendile iseloomulik sagedusarakteristik. Sageduse vahemikku  $f_1 \dots f_2$ , mille ulatuses

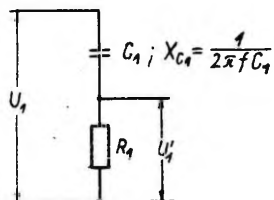
võimendustegur vähe sõltub võimendatavast sagedusest, nimetatakse võimendi läbilasakeribaks (tavaliselt nõutakse, et võimendusteguri  $K$  langus piirsagedustel  $f_1$  ja  $f_2$  ei ületaks 3 dB).



Joon. 4. Takistussidestusega võimendi sageduskarakteristik.

Võimendi valimisel tuleb jälgida, et selle läbilasakeriba vastaks sisendsignaali sagedusribale, vastasel korral tekivad sageduslikud moonutused, s.t. väljundsignaal ei ole ühtlaselt võimendatud kõik sisendsignaali sagedused.

Võimendusteguri languse piirsagedustel (suurtel ja väikestel sagedustel) põhjustavad võimendi lülituselemendid, millede parameetrid sõltuvad sagedusest (kondensaatidid, poolid, aga ka parasiitmahtuvused ja -induktiivsused). Võimendusastme sisend- ja väljundlülitus on vaadeldav potentsiomeetrina (joon. 5), kus kondensaatori  $C_1$  mahtvuslik takistus  $X_{C_1}$  sõltub sagedusest. On ilmne, et sageduse vähenedes see kasvab ja lambi võrele antav pingeline  $U_1$  (sõltub  $X_{C_1}$  ja  $R_1$  vahekorras) langeb, mistõttu väheneb ka väljundsignaali suurus (võimendus langeb). Signaaliga paralleelsed mahtuvused (näiteks parasiitmahtuvus) lühistavad signaali rohkem kõrgetel sagedustel, põhjustades seal võimenduse languse.



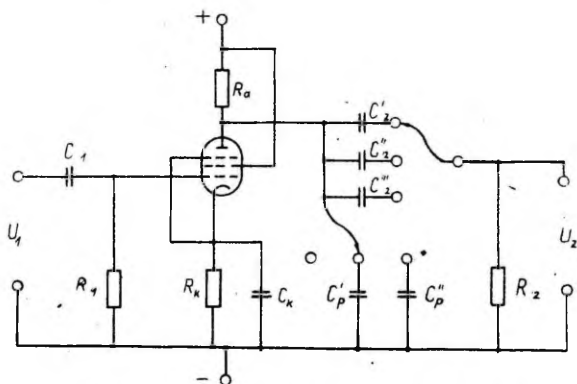
Joon. 5. Võimendusastme sisendlülitus.

Töö käik

1. Võimendi segedusarakteristikutete ülesvõtmine.

Uuritava võimendi skeem on toodud joonisel 6. Skeem on monteeritud plastmassist paneelile. Pentoodi tüüp on 6X11.

Üles võtta tuleb kaks karakteristikut, erinevatel juhendaja poolt antud  $C_2$  ja  $C_p$  väärtustel.



Joon. 6. Uuritava võimendi skeem.

Võimendi karakteristikute ülesvõtmiseks koostame katse-  
skeemi vastavalt joonisele 7. Riistade maandatavad klemmid  
ühendame võimendi miinusklemmidega.

Pärast skeemi kontrollimist juhendaja poolt lülitame riis-  
tad sisse ja laseme neil soojeneda 4...5 min. Anname gene-  
raatorist võimendisse sisendpinge ja reguleerime parajaks  
väljundsignaali kujutise ostsillograafi ekraanil. Jätame  
nüüd sisendpinge muutmatuks ja muudame generaatori sagedust  
üle terve selle sageduspiirkonna, kontrollides ostsillo-  
graafi abil, et kusagil ei tekiks moonutusi. Kui mõnel sa-  
gedusel moonutused siiski tekivad, tuleb sisendpinget vä-  
hendada. Valitud sisendpinge hoiame konstantse terve sa-  
geduskarakteristiku ülesvõtmise jooksul. Mõõdame väljundpin-  
ge suurused järgmistel sagedustel: 50, 60, 80, 100, 150,  
200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000,  
5000, 6000, 8000, 10 000, 15 000, 20 000, 30 000, 40 000,  
50 000, 60 000, 80 000, 100 000 Hz.

Mõõtandaed kanname järgmistesse tabelitesse.

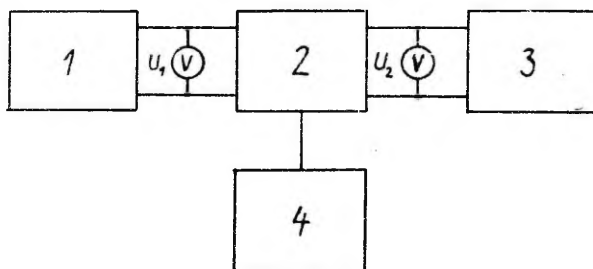
$C_2 =$		$C_p =$	
Sagedus $f$ (Hz)	Sisendpinge $U_1$ (V)	Väljundpinge $U_2$ (V)	Võimendus- tegur $K$

Saadud andmete põhjal joonestame karakteristikud (mõle-  
mad ühises koordinaadistikus) poollogaritmilisel paberil  
( $K$  - lineaarses,  $f$  - logaritmilises mastaabis).

Analüüsime tulemusi. Leiame võimendi läbilaskeriba.

## 2. Moonutuste jälgimine.

Kasutame eelmise ülesande lülitusskeemi (joon. 7). Valime mingisuguse võimendi läbilaskeriba keskel asuva sageduse ja hakkame suurendama aeglaselt sisendpinget. Jälgime võimendatud pinget kuju ostsillograafi ekraanil. Fikseerime, kui suure sisendpinge puhul hakkavad moonutused tekkima. Joonistame üles moonutamata, väikeste moonutustega ja suurte moonutustega väljundsignaali kuju. Analüüsime jälgitavate moonutuste põhjusi.



Joon. 7. Katseskeem.

1 - helisagedusgeneraator; 2 - uuritav võimendi; 3 - ostsillograaf; 4 - võimendi anood- ja küttepingeallikad. Pingeid  $U_1$  ja  $U_2$  mõõdetakse lampvoltmeetriga. Kui kasutataval helisagedusgeneraatoril on voltmeeter sisse ehitatud, siis eraldi voltmeetrit  $U_1$  mõõtmiseks vaja ei ole.

### Lisaküsimusi

1. Miks antakse võimendi lampide tüürvõredele negatiivne eelpinge?
2. Miks takistussidestusega võimendis eelmise lambi anood ühendatakse järgmise lambi võrega üle kondensaatori?

3. Kuidas tekitatakse lambi tüürvõrel negatiivne eel-  
pinge?

4. Kuidas mõjutab tööpunkti valik karakteristikul mit-  
telineaarseid moonutusi?

5. Miks triood ei kõlba kõrgete sageduste võimendamiseks?

6. Missugune on kardiograafi võimendi läbilaskeriba?

7. Missugune on läbilaskeriba raadiovastuvõtja heli-  
sagedusvõimendil?

8. Missugused parasiitmahtuvused esinevad võimendis ja  
milline on nende mõju sageduskarakteristikule?

9. Kuidas Teie arvates peaks kõlama raadioülekanne, kui  
vastuvõtjas helisagedusvõimendi asemel kasutada kardiograa-  
fi võimendit?

10. Miks võimendi võrekontensaatorite mahtuvuste vähen-  
damisel sageduskarakteristiku madalsageduslik piir nihkub  
kõrgete sageduste suunas?

11. Kuidas muutub võimendi sageduskarakteristik, kui sel-  
le lampi šunteerida kondensaatoriga (anoodi ja miinusjuht-  
me vahele lülitada kondensaator)?

12. Kuidas võib laiendada võimendi läbilaskeriba mõlemas  
suunas?

13. Miks sageduskarakteristiku ülesvõtmisel tuleb üheaeg-  
selt generaatori sagedusega muuta ka ostsillograafi hälvi-  
tussagedust?

14. Tihti lülitatakse sageduskarakteristikute korrigeeri-  
miseks võimendi anoodkoormustakistiga järjestikku pool  
(induktiivsus). Kuidas muutub sellisel juhul sageduskarak-  
teristik?

15. Kuidas saaksime võimendi sageduskarakteristiku, mil-  
le ordinaatteljel oleks antud võimendustegur dB-des line-  
aarses mastaabis?

Kirjandus

1. Н.М. Ливенцев. Курс физики, М., 1978, с. 149-162.

**ELEKTRONOSTSILLOGRAAFIGA TUTVUMINE**

**Tööülesanne**

Tutvumine elektronostsillograafi ehituse ja mõnede kasutamisevõimalustega.

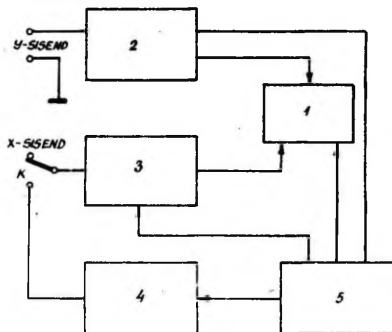
**Töövahendid**

Elektronostsillograaf C1-1, voltmeeter, trafo, autotrafo, helisagedusgeneraator, lampvoltmeeter, juhtmed.

**Ostsillograafi ehitus ja tööpõhimõte**

1. Ostsillograafi otstarve ja plokk skeem. Elektronostsillograaf on riistkiirete elektriliste protsesside jälgimiseks (vajaduse korral ka fotografeerimiseks). Ostsillograafi abil võib jälgida mingit protsessi iseloomustavate kõverate (s.t. protsessis muutuvate füüsikaliste suuruste vaheliste sõltuvuste graafikute) kuju, mõõta protsessi või selle osade kestust, protsessi sagedust. Sageli kasutatakse ostsillograafi vahelduvpinge mõõtmisel; asendamatu on ta üksikute lühiajaliste pingepulsside mõõtmisel.

Elektronostsillograafi töö analüüsimisel jagatakse see funktsionaalseteks sõlmedeks ehk plokkideks (joon.1). Ostsillograafi põhiplokkideks on elektronikiiretoru, sisendsignaalide võimendid, kallutuspinge generaator ja toiteplokk. Noolega on tähistatud plokkide vastastikused seosed.



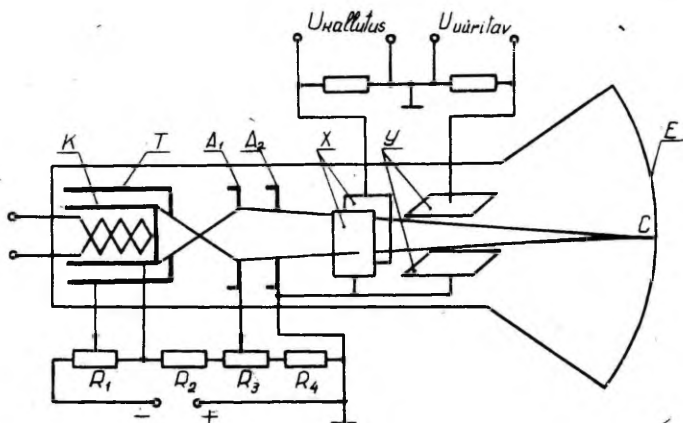
Joon. 1. Elektronostsillograafi plokk skeem.

1.- elektronkiiretoru; 2 - y-telje võimendi; 3 - x-telje võimendi; 4 - kallutuspinge generaator; 5 - toiteplokk.

2. Elektronkiiretorud võivad olla kahte tüüpi: elektrostaatiliselt või magnetiliselt. Esimest tüüpi torudes toimub kiire kallutamine elektrivälja, teistes - magnetvälja mõjul. Siin vaatleme elektrostaatiliselt kallutusega toru, sest ostsillograafides kasutatakse peaaegu eranditult selliseid.

Elektronkiiretoru ehitus on järgmine (joon. 2). Elektronide allikaks on kaudse küttega silindriline katood K, mida kuumutatakse kütteniidiga Kü. Katoodi ümbritseb avaga varustatud tüüriv elektrood T, millele antakse katoodi suhtes väike negatiivne pinge. Muutes tüüriva elektroodi negatiivset pinget, muudame väljuvate elektronide arvu, millest omakorda sõltub toru fluorestseerival ekraanil tekkiva elektronkiire jälje heledus.

Elektroodid  $A_1$  ja  $A_2$  moodustavad anoodide süsteemi, neile antakse kõrge positiivne pinge katoodi suhtes. Elektrivälja toimel, mis tekib katoodi ja tüüriva elektroodi ning esimese anoodi  $A_1$  vahele rakendatud pingetõttu, koonduvad katoodi pinnalt eraldunud elektronid punktis B esimese anoodi



Joon. 2. Elektrostaatiliselt kallutatusega elektronkiiretoru.

lähedal. Pärast punkti B elektronkiirte kimp laieneb, sest väljatugevus silindrikujulise esimese anoodi sees on lähedane nullile. Esimese ja teise anoodi vahel kõverdab elektrivälja uuesti elektronide trajektoore, lähendades neid toru teljele ja elektronkiirte kimp fookuseerub ekraanil punktis C. Ekraan E on valmistatud fluorestseerivast materjalist, mis elektronidega pommitamisel hakkab vastavas kohas helenduma (nn. katoodluminesentsi nähtus).

Elektroodide süsteeme, mis koondavad või hajutavad elektronkiirte kimpu, nimetatakse elektronoptilisteks läätseteks.

Kogu kirjeldatud süsteemi, mis koosneb katoodist, tüüri- ja fokuseerivast elektroodist ja anoodidest, nimetatakse elektronkahuriks.

Takistid  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  ja  $R_4$  moodustavad pingejagaja, millelt antakse elektroodidele vastavad pinged.  $R_1$  abil muudetakse täpi heledust,  $R_3$  abil aga fookuseeritakse kiirt.

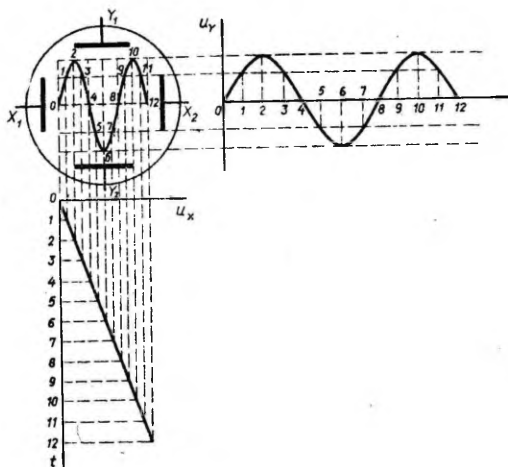
Elektronkiire tee ja seega ka fookuseerimispunkti asukohta

muutmiseks on torus kaks paari omavahel risti asetatud kallutusplaate: vertikaal- ehk X-plaadid ja horisontaal- ehk Y-plaadid. Kallutusplaatide paarid kujutavad endast taa-paralleelseid kondensaatoreid. Kui kõigile kallutusplaatidele anda anoodi  $A_2$  potentsiaal, siis plaadid ei mõjuta elektrone ja kiire jälg tekib ekraani tsesentrisse. Kui aga rakendada kallutusplaatide vahele pinge (tavaliselt vähendatakse ühe ja suurendatakse teise plaadi potentsiaali, nii et keskmine potentsiaal jääks võrdseks  $A_2$  omaga), siis kalduvad elektronid kondensaatori homogeenses elektriväljas liikudes esialgselt suunast kõrvale. Kiire jälje nihe ekraani keskpunktist osutub võrdeliseks plaatide vahele rakendatud pingega. Kahe paari kallutusplaatide vahelise pinge muutmiseega saab viia kiire jälje mistahes punkti ekraanil, kusjuures pinge muutus ja jälje nihe ekraanil vertikaal- või horisontaalsihis on üheselt (võrdeliselt) seotud. See võimaldab joonistada ekraanil kallutusplaatidele rakendatud kahe muutuva pinge (elektrilise signaali) vahelise sõltuvuse graafikut (ostsillogrammi).

3. Ostsillogrammi tekitamine. Olgu näiteks X-plaatidele antud ajas lineaarselt muutuv pinge  $U_x$ , Y-plaatidele aga ajas sinusoidsaalselt muutuv pinge  $U_y$ . Siis elektronikiire jälje X- ja Y-koordinaadid (horisontaal- ja vertikaalnihked ekraani keskpunktist) sõltuvad ajast järgmiselt:

$$\begin{cases} X = a t, \\ Y = b \sin(\omega t + \varphi). \end{cases} \quad (1)$$

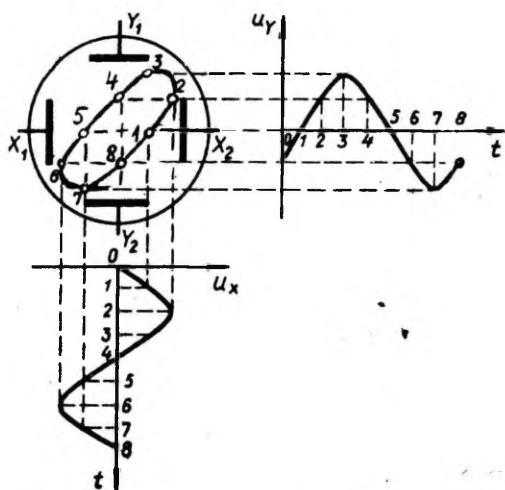
Pinge  $U_x$  nihutab elektronkiirt X-telje sihis, pinge  $U_y$  aga Y-telje sihis. Jälgides summaarse nihke muutumist ajas, saame ostsillograafi ekraanil sinusoidi, mille tekkimise protsessi ekraanil selgitab joonis 3. Et  $U_x$  oli võrdeline ajaga, siis näitab ostsillogramm  $U_y$  sõltuvust ajast.



Joon. 3. Ostsillogrammi tekkimine, kui X-telje sihis muutub pinge ajas linearselt, Y-telje sihis aga sinusoidsalselt.

Kui rakendada nii X-telje plaatidele kui ka Y-telje plaatidele ajas sinusoidsalselt muutuv pinge, siis olenevalt sageduste, amplituudide ja faaside vahekorrast ekraanil tekivad erinevad kujundid (ostsillogrammid). Näiteks võrdsete sageduste ja faaside puhul saame ekraanil sirge joone. Võrdsete sageduste, kuid erinevate faaside puhul tekib ellips (joon. 4). Erinevate sageduste puhul saadavad ostsillogrammid on komplitseeritumad, neid nimetatakse Lissajous' kujunditeks (joon. 5). Joonisel 5 vasakult paremale muutub X-telje sihilise ja Y-telje sihilise võnkumise sageduste suhe  $f_x:f_y$ . Üvalt alla muutub nimetatud võnkumiste faasivähe.

Lissajous' kujundeid kasutatakse plaatidele antavate pingete sageduste ja faaside võrdlemisel.



Joon. 4. Ostsillogrammi tekkimine, kui X-telje ja Y-telje sihis muutub pinge ajas sinusooidselt. Pingete  $U_x$  ja  $U_y$  perioodid ja amplituudid on võrdsed, kuid faasid erinevad.

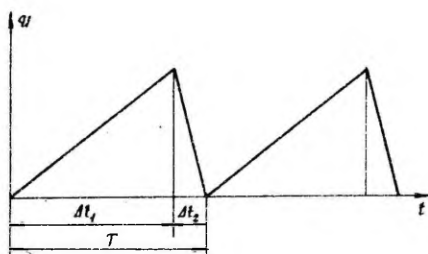
	1:1	1:2	2:3
$0^\circ$			
$45^\circ$			
$90^\circ$			
$135^\circ$			
$180^\circ$			

Joon. 5. Lissajous' kujundid.

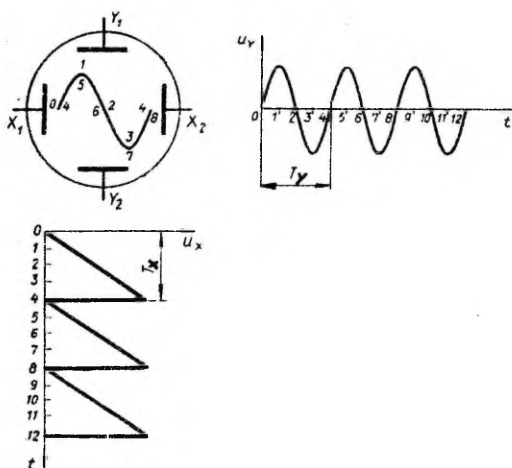
Meditisiinilises praktikas kasutatakse seda põhimõtet vektorelektrokardioskoobis, kus südame biopingeete niisuguse liitmise tulemusena saadakse elektronkiiretoru ekraanil südame seisundit iseloomustav kujund.

Eristatakse ostsillograafi kaht töörežiimi, mille valik toimub lüliti K abil (joon. 1). Ühe režiimi korral antakse kummalegi kallutusplaatide paarile väline signaal, ostsillogramm kujutab elektronkiire jälje nende signaalide mõjul toimuvat liitliikumist. Teisel juhul jälgitakse ühe signaali sõltuvust ajast. Vastavalt eelõeldule tuleb siis ühele kallutusplaatide paarile (tavaliselt vertikaalsetele plaatidele) anda ajas lineaarselt muutuv pinge (joon. 3). Ekraanil saadakse siis uuritava signaali ühekordne graafik, mis kiire protsessi korral pole hästi jälgitav. Et ekraanil tekiks perioodilise signaali graafiku püsiv kujutis, on tarvis, et ühekordne ostsillogramm korduks vähemalt 10...20 korda sekundis (nägemisaistingu kestus on ca 0,1 s) ja üksikud ostsillogrammid kattuksid täpselt. Selleks peab X-plaatide lineaarne pingemuutus perioodiliselt korduma. Pinge peab teatud aja jooksul lineaarselt kasvama, siis järsku kaduma, uuesti kasvama jne. Sellist nn. hammaspinget (joon. 6) tekitab ostsillograafis sisemine kallutuspinge generaator (plokk 4, joon. 1). Hammaspinge mõjul liigub täpp ekraanil algul ühtlaselt vasakult paremale, siis "hüppab" kiiresti algasendisse tagasi. Joonisel 6 on tähistatud vastavad ajavahemikud  $\Delta t_1$  ja  $\Delta t_2$ . Peab olema täidetud tingimus  $\Delta t_2 \ll \Delta t_1$  (ideaalne oleks  $\Delta t_2 = 0$ , see pole praktikas saavutatav). Tagasihüppe ajaks kiir kustutatakse.

Kui uuritava signaali periood  $T_y$  ja hammaspinge periood  $T_x$  on võrdsed, siis tekib ekraanil uuritava pinge ühe perioodi graafiku püsiv kujutis (joon. 7). Kui  $T_x = n T_y$  (n on

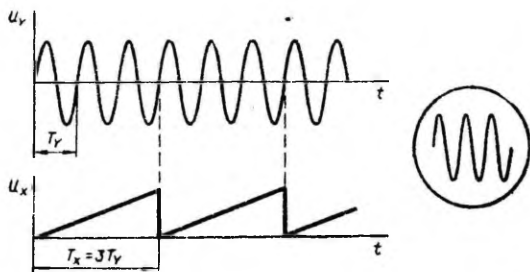


Joon. 6. Kallutuspinge ajaline sõltuvus.



Joon. 7. Ostsillogramm juhul, kui  $T_x = T_y$ .

täisarv), siis saame ostsillogrammil uuritava pinge  $n$  perioodi graafiku (joon. 8).



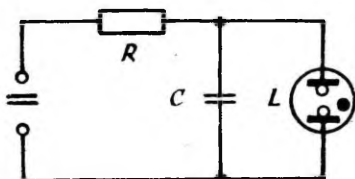
Joon. 8. Ostsillogramm juhul, kui  $T_x = 3 T_y$ .

4. **Sünkroniseerimine.** Kui tingimus  $T_x = n T_y$  pole täpselt täidetud, hakkab pilt ekraanil liikuma X-telje sihis. Nii  $T_x$  kui  $T_y$  võivad juhuslike põhjuste tõttu muutuda, seepärast on liikumatu pildi saamiseks tarvis kasutada sünkroniseerimist (sama-ajastamist). Uuritava signaali võimendi (Y-võimendi) sidestatakse kallutusgeneraatoriga; hammaspinge generaatori sagedust muudetakse automaatselt nii, et hammaspinge perioodid algaksid alati uuritava pinge sama faasi juures. Sünkroniseerimiseks antava signaali tugevus on reguleeritav. Mõnikord kasutatakse sünkroniseerimiseks kas võrgusagedusega pinget või mingit välist signaali, mis antakse eriklemmi kaudu. Sünkronisatsioonisignaali allika valik toimub vastava ümberlülitite abil.

5. Lihtsaima hammaspinge generaatori põhimõtteline elektriline skeem (joon. 9) koosneb takistist  $R$ , kondensaatorist  $C$  ja gaastäitega lambist  $L$ .

Skeemi pingestamisel hakkab kondensaator  $C$  üle takisti  $R$  laaduma. Teorisest on teada, et pinget kondensaatoril muutub eksponentsiaalse seaduse järgi. Kui pinget konden-

saatoril on jõudnud huumlambi süttimispingeni, tekib lam-  
bis L lavinitaoline lahendus ja kondensator tühjeneb  
kiiresti. Skeemi parameetrite sobiva valikuga on võimalik  
saavutada olukorda, kus teatavas sagedusvahemikus ekspon-  
entsiaalkõvera lõigud on väga lähedased sirglõikudele



Joon. 9. Lihtsaim hammaspinge generaator.

(joon. 6). Samuti on parameetrite suuruse varieerimisega  
võimalik saada erineva sagedusega hammaspinget. C on ta-  
valiselt muudetav astmeliselt, R aga pidevalt.

6. Sisendsignaali võimendid on selleks, et vajaduse  
korral nõrka signaali enne kallutusplaatidele juhtimist  
võimendada. Liiga tugevaid signaale saab enne võimendis-  
se juhtimist astmeliselt nõrgendada.

7. Toiteplokk on vajalik elektronkiiretoru ja kõikide  
lampide kütmiseks ja pingestamiseks. Ta koosneb alaldist  
lampide toiteks ja kõrgepingealaldist toru pingestamiseks.

Ostsillograafi põhiparameetrid

1. Tundlikkuseks nimetatakse helenduva täpi kõrvale-  
kallet ekraanil vastavatele siseklemmidele rakendatud ühi-  
kulise pinge mõjul. Tundlikkus määratakse eraldi X- ja Y-  
teljel; tavaliselt on see reguleeritav. Kui tundlikkuse  
 $\nu$  määramiseks rakendatakse kallutusplaatidele sinusoi-  
daalne pinge, siis arvutatakse  $\nu$  valemist

$$\gamma = \frac{L}{k \cdot 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U}; \quad (2)$$

kus L on helendava joone pikkus ekraanil, k - sisendpinge nõrgenemise koefitsient (k väärtus on 1, 0,1 või 0,01, olenevalt lülitit 15 asendist; vt. joon. 10), U - pinge efektiivväärtus (mõõdetakse voltmeetriga).

Tundlikkuse teadmine võimaldab kasutada ostsillograafi pinge mõõtmiseks.

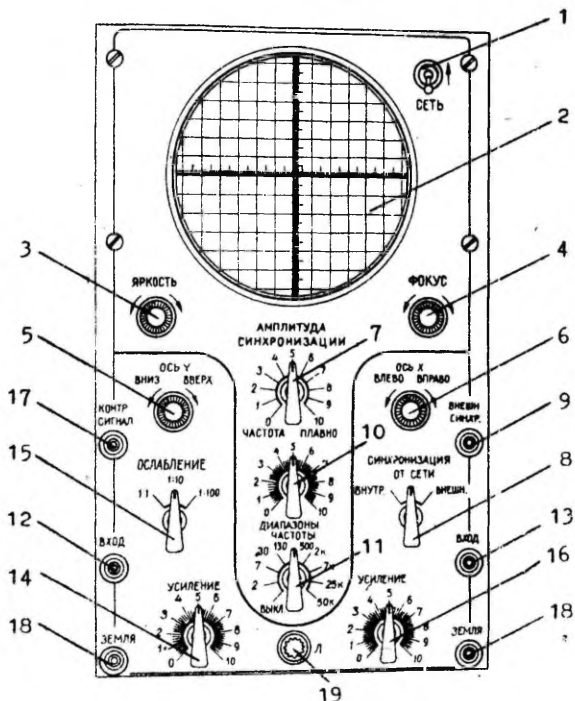
2. Läbilaskeriba. Ostsillograafi tundlikkus sõltub sagedusest. See on sisendsignaali võimendi omadus. Sagedusvahemikku, mille ulatuses tundlikkus pole vähenenud rohkem kui  $\sqrt{2}$  korda maksimaalsest tundlikkusest, nimetatakse läbilaskeribaks. Läbilaskeriba määratakse vastava sisendi sageduskarakteristikult, s.o. graafikult, mis näitab tundlikkuse sõltuvust sisendpinge sagedusest. Mõnedel ostsillograafidel on läbilaskeriba altpoolt piiramat, neid nimetatakse alalpinge ostsillograafideks.

3. Kallutusgeneraatorit iseloomustavad hammaspinge perioodi maksimaalne ja minimaalne väärtus.

Töö käik

1. Ostsillograafi käsitsemine. Elektronostsillograafi C1-1 detailid on monteeritud metallkastis asuvale šassiile ja juhtimisseadmed on välja toodud esiplaadile. Esiplaadil on järgmised lülitid ja regulaatorid (joon. 10):

- 1) võrgulülitit;
- 2) elektronkiiretoru ekraan;
- 3) helendava täpi (kujutise) heleduse regulaator (muudab pinget tüürival elektroodil);
- 4) kiire teravustaja;



Joon. 10. Ostsillograafi C1-1 esipaneel.

- 5) kiire nihutaja Y-teljel;
  - 6) kiire nihutaja X-teljel;
  - 7) sünkroniseeriva pinge amplituudi regulaator;
  - 8) sünkroniseerivate pingeallikate ümberlüüti;
  - 9) klemm välise sünkronisatsiooni ühendamiseks;
  - 10) kallutuspinge sageduse pidev regulaator;
  - 11) kallutuspinge generaatori sageduse astmeline lüüti
- 2 Hz kuni 50 kHz; kui lüüti on näiteks asendis 7, siis kallutuspinge pidev regulaator katab vahemiku 7 Hz kuni 30 Hz; asendis "Вкл." (see vastab lüüti K ülemisele asen-

dile plokk skeemil joon. 1) on kallutuspinge generaator välja lülitatud ja X-telje sisendklemmidele antav signaal antakse võimendi kaudu X-kallutusplaatidele;

- 12) Y-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;
- 13) X-telje sisendklemm uuritava pinge ühendamiseks;
- 14) Y-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlikkuse regulaator Y-teljel);
- 15) Y-telje võimendi sisendsignaali astmeline nõrgendi;
- 16) X-telje võimendi võimenduse regulaator (tundlikkuse regulaator X-teljel);
- 17) kontrollsignaali klemm (50 Hz, 2,5 V maandusklemmide suhtes);
- 18) maandusklemmid;
- 19) signaallamp.

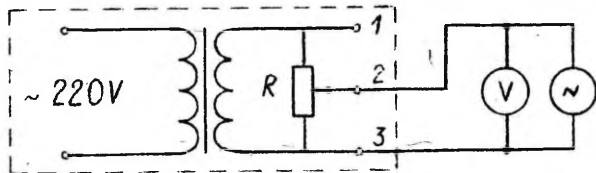
Ostsillograafi tagaseinal on klemmlaud, mille klemmid on otseühenduses kallutusplaatidega. Normaalses tööolukorras on kallutusplaadid ühendatud võimendi väljunditega. Samal klemmlaual asuvad klemmid kiire heleduse moduleerimiseks (vajaduse korral). Normaalses tööolukorras on modulaator välja lülitatud, heledust tüüriv elektrood ühendatud heleduse regulaatoriga.

Tutvume kõigi juhtimisorganite paigutusega. Pöörame tundlikkuse regulaatorid nullasendisse (maksimaalselt vasakule). Ühendame ostsillograafi valgustusvoolu võrku ja lülitame võrgulüliti sisse. Süttib signaallamp; umbes minuti möödudes peab ekraanil ilmuma helenduv täpp. Kui seda ei juhtu, suurendame kiire heledust. Kui ka see ei mõju, nihutame kiirt piki X- ja Y-telge, kuni täpp asetub ekraani tsentrisse. Paigalseisva täpi heleduse reguleerime nüüd minimaalseks, muidu kõrbeb ekraani luminofoor. X-telje võimenduse suurendamisega (kallutuspinge generaator ei ole välja lülitatud!) tekitame ekraanil horisontaalse joone.

Alljärgnevalt loetletud tööülesannetest 2 - 6 võib juhendaja valikul mõned täitmata jätta.

2. Võrgupinge kuju jälgimiseks ühendame klemmi "КОНТРОЛЬНЫЙ СИГНАЛ" Y-sisendi ülemise klemmiga. Sagedusdiagrammide astmelise lüliti (11) (joon. 10) paneme asendisse 30, sünkroniseerivate pingeallikate ümberlülitit 8 asendisse "Внутр" või "Синхронизация от сети", nupu "Ослабление" asendisse 1:10. Nupu "Усиление Y" (14) abil reguleerime kõvera amplituudi parajaks, nuppude "Частота плавно" (10) ja "Амплитуда синхронизации" (7) abil saame ekraanile paigalseisva kujutise. Muutes kallutuspinge generaatori sagedust astmelise lüliti (11) abil, püüame ekraanile saada ühe, kaks, kolm jne. siinusfunktsiooni täisperioodi.

3. Tundlikkuse määramine Y-teljel, Ostsillograafi tundlikkuse määramiseks kasutame trafost ja potentsiomeetrist



Joonis 11. Skeem tundlikkuse määramiseks.

koostatud stendi (joon. 11). Äärmised klemmid 1 ja 3 stendil on trafo väljundklemmid, milledega on paralleelselt ühendatud takisti R. Keskmine klemm 2 on ühendatud liugkontaktiga. Ostsillograafi Y-sisendi peab ühendama klemmidega 1 ja 2 või 2 ja 3. Reguleerides liugkontakti asendit, võime muuta ostsillograafi antavat sisendpinget 0-st kuni trafo väljundpingeni. Sisendpinge väärtuse määrame voltmestriga. Kallutuspinge generaatori lülitame välja.

Määrame tundlikkuse Y-teljel võimenduse regulaatori nupu 14 (joon. 10) asendites 1...10. Sisendpinge astmeline nõrgendi peab olema asendis 1:100 (miks?). Anname sisendisse pinge  $U_y$  ja mõõdame vertikaalse helenduva joone pikuse  $l_y$  ekraanil, kasutades ekraani ees olevat millimeetriskaalat. Andmed kanname tabelisse, kuhu on jäetud ruumi

ka arvutustulemuste jaoks.

Tundlikkuse  $\delta_y$  arvutame valemist (2). Suhteline piirviga  $\frac{\Delta \delta_y}{\delta_y}$  on  $U_y$  ja  $l_y$  suhteliste piirvigade summa. Et  $l_y$  absoluutne viga ei olene joone pikkusest, siis on ilmselt kasulik valida joon võimalikult pikem. Elektronkiiretoru ekraani kumeruse tõttu on ekraani äärtel mõõtmisel võimalik suur parallaktiline viga. Seepärast reguleerime helenduva joone pikkuseks alati ligikaudu  $2/3$  ekraani läbimõõdust. Selleks vajaliku sisendpinge mõõtmisel valime voltmeetri piirkonna nii, et  $U_y$  suhteline piirviga oleks minimaalne võimalik.

Piirvead  $\frac{\Delta \delta_y}{\delta_y}$  ja  $\Delta \delta_y$  arvutame ainult tabeli kolme rea jaoks - alguses, lõpus ja keskel.

#### 4. Y-telje võimendi sageduskarakteristika määramine.

Ühendame Y-telje sisendklemmidega helisagedusliku vahelduvpinge generaatori (helisagedusgeneraatori) väljundpinge klemmid. Kui helisagedusgeneraatoril puudub väljundpinge mõõtmiseks voltmeeter, siis ühendame samadele klemmidele lampvoltmeetri, mille normaalsagedusvahemik sisaldab helisagedusi (20 Hz - 20 kHz). Reguleerime helisagedusgeneraatori väljundpinge väärtuse selliseks, et see langeks lampvoltmeetri mingi skaalapiirkonna lõpuossa ja helenduva joone pikkus ostsillograafi ekraanil võimenduse regulaatori mingis (eelmises punktis gradueeritud) asendis oleks umbes  $2/3$  ekraani läbimõõdust. Mõõdame joone pikkused ekraanil sisendpinge mitmesugustel sagedustel  $f$  (näiteks 20, 70, 200, 700, 2000, 7000 ja 20 000 Hz), hoides sisendpinge väärtuse konstantsena. Selleks tuleb helisagedusgeneraatori väljundpinget sageduse igakordsel muutmisel järele reguleerida. Andmed kanname tabelisse.

Joonestame sisendkarakteristika graafiku teljestikus log  $f - y$ . Milleks on antud juhul tarvilik kanda X-teljele

log  $f$  (mitte  $f$ )? Märgime ka läbilaskeriba piirid, kui need jäävad uuritud sagedusvahemiku piiridesse.

5. Lissajous' kujundite jälgimiseks anname X-sisendisse pinge vastavalt joonisele 11, Y-sisendisse aga helisagedusgeneraatorist. Kallutuspinge lülitati (11) (joon. 10) asendisse "ВННМ.". Ekraanil saame jälgida kujundeid, mis tekiavad kahe ristisihhilise erineva sagedusega siinuselise võnkumise liitumise tulemusena. X-sisendisse antava pinge sagedus on 50 Hz, helisagedusgeneraatorist anname Y-sisendisse pinge sagedusega 50, 75, 100, 150 ja 200 Hz. Visandame saadud kujundid protokollis.

Lissajous' kujundite abil määratakse praktikas sageli uuritava signaali sagedust tuntud (reguleeritava) sagedusega võrdlemise teel.

6. Kallutuspinge generaatori gradueerimine. Tuleb leida nuppude (11) ja (10) (joon. 10) kindlatele asenditele vastavad kallutuspinge generaatori sagedused hertsides. Kallutuspinge generaatori sagedus on võrdne helisagedusgeneraatori sagedusega siis, kui ostsillograafi ekraanil on sinusoidi üks täisperiood.

Lülitame helisagedusgeneraatori Y-sisendile. Asetame lülitati "ДИАПАЗОНН ЧАСТОТ" mingisse kindlasse asendisse. Nupu "ЧАСТОТА ПЛАВНО" kõigi asendite jaoks püüame helisagedusgeneraatorist tuleva signaali sageduse muutmise teel saada ekraanil ühe sinusoidi. Vastavad sagedused registreerime. Katse ajal peab nupp (8) olema asendis "ВНЕШН." (miks?). Andmed koondame tabelisse.

Protokolli vormistamisest

Protokolli algusesse joonestame ostsillograafi plokk-skeemi, esitame plokkide nimetused koos nende otstarbe lähikirjeldusega. Esitame tundlikkuse ja selle piirvea arvutusvalemid koos tähiste selgitusega.

Tööülesande 1 täitmist kajastame protokollis otsillograafi sisselülitamise ja täpi ekraani tsentrise seadmise protseduuri lühikirjeldusena. Kirjeldame, kuidas saab ekraanil tekitada horisontaalse joone. Ülesande 2 täitmisel joonestame (skitseerime) võrgupinge graafiku, mida näeme ekraanil.

Edasi joonestame tundlikkuse määramisel kasutatava lülituse skeemi (koos tähistuste selgitusega). Tundlikkuse määramiseks vajalikud mõõtmis- ja arvutustulemused esitame tabelis järgmise vormi järgi:

T a b e l 1

Y-võimendi nupu asend	$U_y(V)$	$l_y(mm)$	$\delta_y(\frac{mm}{V})$	$\Delta\delta_y(\frac{mm}{V})$	$\frac{\Delta\delta_y}{\delta_y}$

Y-võimendi sagedusarakteristika määramiseks vajalikud mõõtmistulemused kanname tabelisse vormi 2 järgi. Ehitame poollogaritmilisel paberil sagedusarakteristika graafiku, määrame läbilaskeriba.

Y-võimendi nupp asendis....

Sisendpinge  $U_y = \dots V$

T a b e l 2

$f(Hz)$	$l_y(mm)$	$\delta_y(\frac{mm}{V})$

Kui läbilaskeriba piirid ei jää kasutada olnud sagedusvahemikku, tuleb see tõsiasi kirjalikult protokollis esitada.

Edasi järgnevad Lissajous' kujundite skitsid. Igale kujundile märgime juurde sagedused  $f_x$  ja  $f_y$ . Esitame Lissajous' kujundite kasutamisel põhineva sageduse mõõtmise protseduuri lühikirjelduse.

Kallutuspinge generaatori gradueerimise andmed esitame tabelis vormi 3 järgi.

T a b e l 3

Kallutusgeneraatori sageduse astmelise regulaatori nupp asendis ....

Kallutusgeneraatori sageduse pideva regulaatori nupu asend	Helisagedusgeneraatori sagedus $f(\text{Hz})$

Joonestame graafiku, kandes horisontaalteljele kallutuspinge pideva regulaatori nupu asendid, vertikaalteljele helisagedusgeneraatori vastavad sagedused, märkides juurde ka kallutuspinge generaatori sageduse astmelise lüliti asendi.

Lisaküsimusi

1. Selgitage vahelduvvoolu iseloomustavaid suurusi: pinge (voolu) ajaline sõltuvus, pinge amplituud ja efektiivväärtus, sagedus, ringsagedus, periood, faas jt.

2. Kuidas saab helenduvat täppi ekraanil kustutada ost-silloograafi välja lülitamata?

3. Kuidas tuleb pingestada elektronkiiretoru X-plaate ja Y-plaate, et täpp ekraanil nihkuks ülesse vasakule?

4. Mitu 50 Hz vahelduvpinge perioodi näeme ekraanil, kui hälvituspinge sagedus on 12,5 Hz?

5. Missuguse ostsillogrammi saame ekraanil, kui uuritava siinuselise vahelduvpinge sagedus ja hälvitussagedus suhtuvad nagu 1:2? Tekitage niisugune pilt.

6. Missugune Lissajous' kujund tekib, kui Y-pinge sagedus on 160 Hz, X-pinge sagedus 80 Hz ja faasinähe nende vahel  $\pi$ ?

7. Kuidas tuleb ühendada patsiendi elektroodid ostsillograafiga, et tekitada selle ekraanil kardiogramm?

8. Ekraanil on uuritava pinge 6 täisperioodi; mis tuleb teha, et perioode oleks vaid 2?

9. Miks valemis (3) on nimetajas kordajad 2 ja  $\sqrt{2}$ ?

10. Ostsillograafi tundlikkus on 0,5 mm/mV. Kas see ostsillograaf sobib 20  $\mu\text{V}$  amplituudiga biopingete uurimiseks?

11. Konstrueerida joon. 4 eeskujul Lissajous' kujund juhu jaoks, kui mõlemale sisendile on antud sama sagedusega sinusooidaalne pinge, kusjuures ajamomendil  $t = 0$  on mõlemas sisendis pinge null (siinused on samas faasis). Pingete amplituudväärtused võtta võrdsed.

#### Kirjandus

- I. Н.М. Ливенцев. Курс физики, М., "Высшая школа", 1978, с. 169-172.

TUTVUMINE RADIOMEETRITEGA

Tööülesanne

Tutvumine radiomeetrite ehk osakeste loendurite töötamise põhimõttega. Tutvumine radiomeetrilise aparatuuriga. Fooni mõõtmine. Kiirguse lineaarse nõrgenemisteguri määramine aines (metallis).

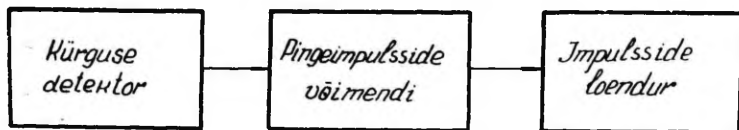
Töövahendid

Radiomeetrilise aparatuuri komplekt (stsintillatsioon-detektor, toiteallikas ja impulsside loendur ИСО2-2eM, radiomeeter "TWCC", kiirgusallikas, metallplaatide komplekt.

Sissejuhatus

Radiomeetrite ehk osakeste loendurite abil registreeritakse radioaktiivsel lagunemisel kiiratavaid elementaarosakesi või  $\gamma$ -kvante. Järelikult võib nende abil määrata radioaktiivse kiirgusallika aktiivsust. Meditsiinis kasutatakse neid peamiselt radioaktiivsete indikaatorite ("märgistatud aatomite") uurimismeetodi rakendamisel. Levinumad loendurid on gaaslahendus-, stsintillatsioon- ja pooljuhtloendurid. Mistahes radiomeeter koosneb järgmistest põhiplokkidest: kiirguse detektorist, pingepulsside võimendist ja impulsside loendurist (joon. 1).

Meditsiinilises praktikas kasutatakse praegu põhiliselt



Joon. 1. Radiomeetri plokk skeem.

stsintillatsioonidetektoreid, vanemates aparaatides ka gaaslahendusdetektoreid. Pooljuhtdetektorid pole meditsiinilises aparatuuris veel laia kasutamist leidnud.

Mistahes loendurit iseloomustavad selle lahutusvõime ja efektiivsus. Põhiliselt neid näitajaid määrab kasutatav detektoritüüp.

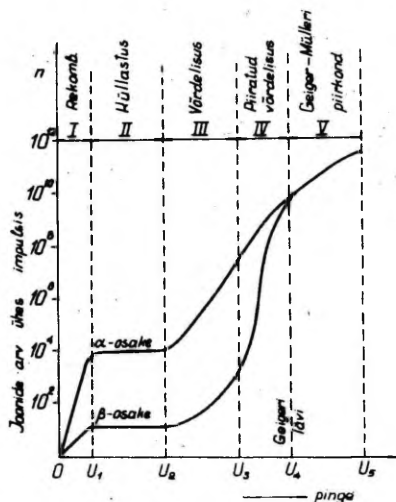
Lahutusvõime on määratud suurima impulsside arvuga, mis võivad kiirguse detektoris ühes ajaühikus tekkida. Lahutusvõime sõltub nn. "surnud ajast", mille jooksul järgmine osake ei saa veel tekitada detektoris uut impulssi.

Detektori efektiivsuse all mõeldakse ühes ajaühikus detektoris impulsse tekitanud ja detektorisse sattunud osakeste koguarvu suhet. Tavaliselt antakse see protsentides. Efektiivsus sõltub kiirguse liigist ja selle osakeste energiast, samuti detektori liigist ja konstruktsioonist.

1. Gaaslahendusdetektorid. Gaaslahendusdetektorite töötamine põhineb kiirguse ionisatsiooniefektil. Detektoriteks on siin gaaslahendustorud. Olenevalt registreeritava kiirguse liigist ja detektori rakendusalaast võib nende konstruktsioon, suurus ja kuju olla vägagi erinev. Kuid igal niisugusel torul on kaks elektroodi, anoodiks on peenike traat, katoodiks seda traati ümbritsev silindriline elektrood. Toru on täidetud hõrendatud gaasiga, rõhuga 7 ... 20 kPa<sup>ⓧ</sup>.

<sup>ⓧ</sup> 50...150 mm Hg.

Tutvume gaaslahendusdetektoris toimuvate protsessidega joonise 2 abil. Joonisel on toodud ühe detektorisse sattunud osakese ( $\alpha$  - või  $\beta$ -osakese) poolt tekitatud ionide arvu  $n$  sõltuvus detektorile rakendatud pingest  $U$ . Väikeste pingete puhul piirkonnas I (nn. rekombinatsioonipiirkonnas) osa osakese poolt tekitatud ionidest rekombineerub enne elektroodidele jõudmist. Pinge kasvamisel

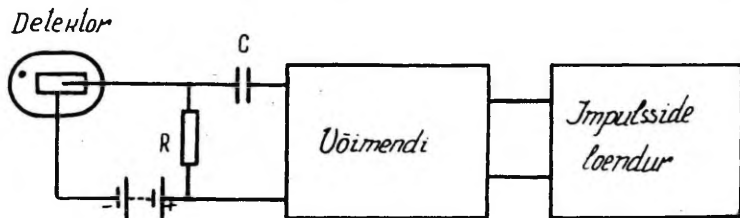


Joon. 2. Ionide arvu sõltuvus pingest.

saabub olukord, kus kõik osakese poolt tekitatud ionid jõuavad elektroodidele, nende arv ei sõltu enam rakendatud pingest, tekib küllastusvool (piirkond II). Suurema ioniseerimisvõime tõttu tekitab  $\alpha$ -osake rohkem ioone kui  $\beta$ -osake. Pinge edasisel kasvamisel ionide liikumiskiirus kasvab (eriti peenikese anoodtraadi juures, sest väljatugevus on seal suurim), tekib tõukeionisatsioon, ionide hulk kasvab mitmekordselt. Kuid ikka on nende hulk võrdelises sõltuvuses osakese esialgsest ionisatsiooniefektist

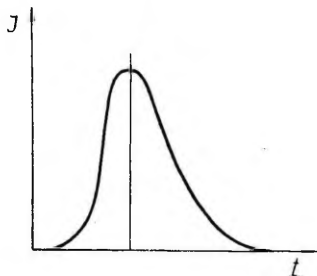
(piirkond III). Niisuguses režiimis töötavad detektorid nn. proportsionaalsetes loendurites. Veel suuremate pingete puhul saabub piiratud võrdelisuse piirkond IV, kus tõukeionisatsioonil tekkinud ionide hulk pikkaööda lakkab sõltumast esialgsest ionisatsiooniefektist. Alates pingest  $U_4$ , nn. Geigeri lävest, see sõltuvus kaob hoopis, ei ole enam vahet  $\alpha$ - ja  $\beta$ -osakeste poolt tekitatava ionisatsiooni vahel. Niisuguses režiimis (piirkond V) töötavad levinumad, Geiger-Mülleri loendurid. Alates pingest  $U_5$  tekib detektoris pidev lahendus, mis viib detektori rivist välja.

Geiger-Mülleri loendurite detektorid on tavaliselt täidetud mingi inertse gaasi ja orgaanilise aine auru hõrendatud seguga (näiteks argooni ja piiritusega). Niisuguse loenduri põhimõtteline skeem on toodud joonisel 3. Detektori elektrootodidele on rakendatud Geigeri lävest suurim pinge. Osake,



Joon. 3. Gaaslahendusloenduri plokskeem.

sattudes gaaslahendusdetektorisse, tekitab selles ionisatsiooni. Elektrivälja mõjul ionid ja elektronid hakkavad liikuma elektrootodidele. Peenikese moodtraadi ümber on elektrivälja tugevus väga suur, mistõttu on seal suur ka laetud osakeste liikumiskiirus, tekib tõukeionisatsioon. Ioonide hulk kasvab kiiresti, s.t. vool läbi toru kasvab järsult. Kuna toru vool läbib suureoomilist takistit  $R$ , siis voolu kasvamisel kasvab ka pingelang sellel, pinge toru elektrootodidel langeb, mistõttu lahendus torus kustub. Niisugused vooluimpulsid (joon. 4) tekivad detektoris iga sinna sattu-



Joon. 4. Vooluimpulsi kuju detektoris.

nud ionisatsiooni põhjustava osakese puhul. Nende kestus on 10...500  $\mu$ s (impulsi fronti kestus 0,1...10  $\mu$ s).

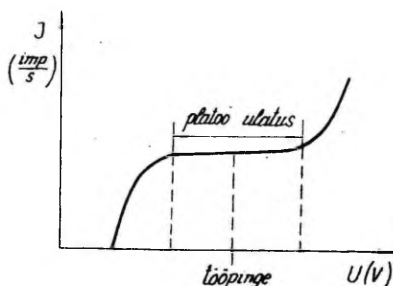
Pingeimpulsid takistilt R antakse kondensaatori C kaudu võimendisse ja sealt võimendatud impulsid impulsside loendurisse. Vaadeldud loenduri skeemis toimus vooluimpulsside kustumine pingelangu kasvamise tõttu takistil R. Kasutatakse ka nn. sisemise kustumisega detektoreid. Nendesse on lisatud paljuaatomiliste molekulidega gaasi, mille ioonid takistavad lahenduse arengut detektoris. Niisuguseks gaasiks võib olla piirituse aur, nagu eespool oli juba mainitud.

Geiger-Mülleri loenduri karakteristik (loenduskiiruse I sõltuvus detektorile rakendatud pingest U) on toodud joonisel 5. Karakteristiku piirkond, kus loenduskiirus praktiliselt ei sõltu pingest, on nn. platoo. Gaaslahendusdetektori tööpinge valitakse platoo keskmises osas.

Geiger-Mülleri loenduri lahutusvõime ei ole suhteliselt pika impulsside kestuse, seega ka pika "surnud aja" tõttu kuigi suur. Saavutatav maksimaalne loenduskiirus  $10^5$  imp/min.

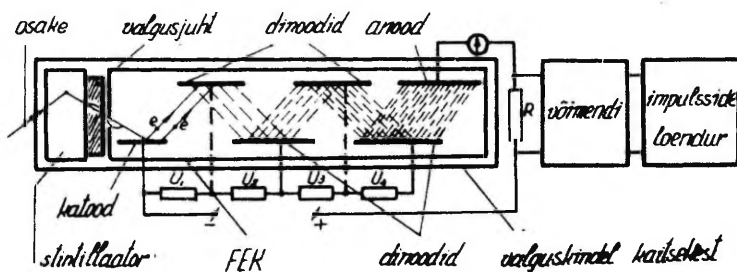
Efektiivsus  $\alpha$ - ja  $\beta$ -osakeste loendamisel läheneb 100 %,  $\gamma$ -fotonite puhul on aga kõigest 0,1...1 %.

2. Stsintillatsioonidetektorid. Stsintillatsioonloenduri detektor koosneb stsintillaatorist ja fotoelektronkordistist



Joon. 5. Geiger-Mülleri loenduri karakteristik.

(joon. 6). Stsintillaatoriks on luminesseeriv aine, erinevates seadmetes võib selleks olla kristall, plastmass või lehus.



Joon. 6. Stsintillatsioonloenduri plokk skeem.

Stsintillaatorisse sattunud osake või energiakvant ergastab selle aatomeid, missugused, minnes uuesti väiksema energiaga niivoole, kiirgavad valguse footonid. Stsintillaatoris tekkinud valgussähvatus intensiivsus on võrdeline osakese poolt stsintillaatoris kaotatud energiaga. Valguse footonid, langedes fotoelektronkordisti fotokatoodile, löövad sellest välja elektrone. Elektrivälja mõjul elektronid hakkavad liikuma esimesele dinoodile. Esimese ja ka järgnevate dinoodi-

de pind on kaetud aine kihiga, mis emiteerib elektrivälja poolt kiirendatud elektronidega pommitamisel sekundaarelektrone. Iga järgneva dinoodi potentsiaal on eelmise omast 100 ... 300 V kõrgem. Kuna iga elektron lööb dinoodi pinnalt välja rohkem kui ühe elektroni, siis elektronide arv dinoodilt dinoodile kasvab (kordistub) ja anoodile sattuvate elektronide arv võib ületada fotokatoodist väljunud elektronide arvu  $10^5 \dots 10^{10}$  korda (erinevatel fotoelektronkordistitel).

Pinge impulsid stsintillatsioonidetektori väljundilt registreeritakse nagu gaaslahendusloenduriteski. Erinevate stsintillaatorite puhul on impulsside kestus  $10^{-3} \dots 10 \mu\text{s}$ .

Põhilised stsintillatsioonloendurite eelised võrreldes gaaslahendusloenduritega on järgmised:

- 1) kõrge efektiivsus kõikide kiirgusliikide puhul, sealhulgas ka  $\gamma$ -kiirguse puhul;
- 2) hea lahutusvõime (kuni  $10^{-9}$  s);
- 3) võimalus eristada osakesi nende energia järgi (pingeimpulsi suurus sõltub osakese energiast).

3. Pooljuhtdetektorid. Pooljuhtdetektorid on suhteliselt uued detektorid. Tänapäeval on välja töötatud ja on kasutusel mitut tüüpi pooljuhtdetektorid. Enamikus nendest kasutatakse p-n-siiret, millele on rakendatud pinge inversses suunas. Ioniseeriva kiirguse osakese või kvandi sattumisel tõkekihti tekib piki selle liikumisteed ionisatsioon, s.t. tekivad elektron-auk paarid. Elektrivälja mõjul liiguvad tekkinud laengukandjad elektroodidele, sealjuures tekkinud laengu suurus on võrdeline osakese poolt detektoris ionisatsioonile kulutatud energiaga. Pooljuhtdetektorite põhiliseks puuduseks praegusel ajal on suhteliselt madal signaali-müra suhe. Selle näitaja parandamiseks tuleb detektor jahutada üsna madala temperatuurini (näiteks paigutatakse see vedela lämmastikuga täidetud anumasse). See on ka põhjus, miks pooljuhtdetektorid ei ole seni meditsiinis suurt kasutamist leidnud. Kuid uute paremate näitajatega materjalide ja uute

konstruktsioonide otsingud jätkuvad.

4. Aparatuur. Vaadeldavas töös kasutatav radiomeetrilise aparatuuri komplekt koosneb:

- 1) detekteerimisplokist БДЭГ2-34 (või 6931-17);
- 2) kõrgepingeplokist EHB3-05;
- 3) madalpinge toiteplokist 591-89 või 591-101;
- 4) impulsside loendurist integraalskeemidel ПСО2-2eM.

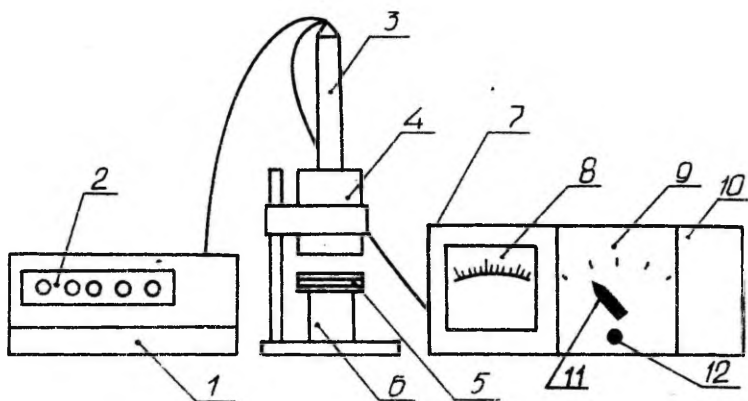
Detekteerimisplokis on stsintillaator (NaJ kristall), fotoelektronkordisti ja transistorvõimendi. Kõrgepingeplokk toidab detekteerimisploki fotoelektronkordistit. Madalpinge toiteplokk toidab transistorvõimendit. Võimendatud pingepulssid suunatakse impulsside loenduri sisendisse. Loenduris on vajaliku ekspositsiooni valimiseks taimer. Luge-mise tulemus saadakse numberindikaatoritega tabloolt. Seda tulemust on võimalik sisestada ka spetsiaalsesse number-printerisse. Kasutatavad seadmed on kujutatud joonisel 7.

Töö teises osas tutvume universaalse radiomeetriga "ТМСС", mida kasutatakse radioloogilistes laboratooriumides riietuse, käte ja muude pindade  $\alpha$  - või  $\beta$ -aktiivsete ainetega saastumise mõõtmiseks. Selle radiomeetri  $\beta$ -kiirguse detekteerimisplokis on kolm gaaslahendusdetektorit CTC-6. Radiomeeter võimaldab loendada osakesi sisseehitatud elektromagnetilise impulsside loenduriga ja mõõta keskmist loenduskiirust osut mõõteriista abil. Peale selle on aparati sisse ehitatud signaalseadeldis, mis võimaldab kiiresti eristada saastatud esemed puhastest. Riista plokk-skeem on toodud joonisel 8.

Töö käik

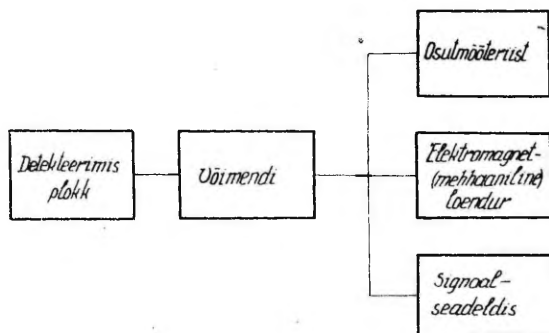
1.  $\gamma$ -kiirguse neeldumise uurimine metallis radiomeetrilise aparatuuri komplektiga.

1) Ühendame komplekti võrgujuhtme elektrivõrguga. See-juures peavad süttima signaallambid kõrgepinge ja madalpin-



Joon. 7. Katseseadme üldvaade.

1 - impulsside loendur; 2 - numberindikaatorite tablo; 3 - detekteerimisplakk; 4 - detekteerimisploki pliikaitse; 5 - metallplaadid; 6 - konteiner radioaktiivse preparaadiga; 7 - toiteplokk; 8 - kõrgepinge voltmeeter; 9 - kõrgepinge plokk; 10 - madalpinge plokk; 11 - kõrgepinge jämeregulaator; 12 - kõrgepinge peenregulaator.



Joon. 8. Universaalse radiomeetri "TWCC" plokk skeem.

ge toiteplokkide paneelidel. Reguleerida välja vajalik kõrgepinge, see on märgitud voltmeetri-le. Laseme aparaatuu- ril soojeneda 30 minutit, mis on vajalik stabiilse töö- režiimi saavutamiseks.

2) Ühendame impulsside loenduri samuti võrguga, kuid kuna selle soojenemiseks kulub kõigest 1 minut, siis lüli- tame ta sisse (punane klahv "СЕТЬ") vahetult enne mõõt- misi.

3) Kui radiomeetriline aparaatuur on soojenenud, lü- litame sisse impulsside loenduri, seejuures süttivad loen- dusdekaadide numberindikaatorid. Vajutame klahvile "СБРОС".

4) Selleks, et mõõta impulsside arvu etteantud aja jooksul, peavad loenduri paneelil järgmised klahvid olema allavajutatud asendis: impulsside polaarsuse ümberlüti ( $\sim$ ); režiimide ümberlüti (N); ekspositsiooniklahv 30 s.

5) Enne mõõtmisi kontrollime impulsside loenduri kor- rasolekut. Selleks vajutame alla klahvi "ИПОВЕРКА" ja va- jutame klahvile "ИЛЧК". Loendur hakkab lugema temasse sisseehitatud sisemise generaatori poolt tekitatud impuls- se. Ekspositsiooni puhul 30 s numberindikaator peab näita- ma arvu 3000. Veendudes, et see nii on, vabastame klahvi "ИПОВЕРКА" ja viime klahvi "СБРОС" abil riista lähte- seisundisse. Riist on töökorras.

6) Mõõdame fooni, s.o. loenduskiiruse (impulsside ar- vu ajaühikus), mida põhjustab radioaktiivsete ainete ole- masolu pinnases, õhus, hoone seintes jne., aga ka kosmili- sest ruumist tulev kiirgus. Fooni mõõtmise ajaks asetame kaanega suletud konteineri radioaktiivse preparaadiga või- malikult kaugele detekteerimisplokist. Käivitame loenduri klahvi "ИЛЧК" abil ja mõõdame impulsside arvu (30s jook- sul). Kordame mõõtmisi ja kirjutame saadud tulemused üles 10 korda. Arvutame välja fooni keskmise väärtuse (imp/s).

7) Kiirguse neeldumist metallis uurime järgmiselt. Asetame detekteerimisploki alusele konteineri radioaktiiv- se preparaadiga (joon. 7), eemaldame konteinerilt kaane.

Detekteerimisploki ja konteineri teljed peavad ühtima. Vahemaa ploki pliist kaitsme ja konteineri vahel peab olema küllaldane kõigi uuritavate plaatide (10 tk.) mahutamiseks.

Käivitage loenduri ja mõõdame impulsside arvu ilma plaatideta. Asetame ettevaatlikult esimese metallplaadi konteineri avale ja mõõdame uue impulsside arvu. Lisame veel ühe plaadi ja loeme impulsside arvu, lisame kolmanda plaadi jne. Plaatide paksus millimeetrites on nendele märgitud. Saadud tulemustest arvutame loenduskiiruse, millest lahutame fooni keskmise väärtuse.

Tulemused paigutame järgnevasse tabelisse.

Neelav aine	Neelava kihi paksus d mm	Impulsside arv n imp.	Loenduskiirus $I_1$ imp/s	Loenduskiirus ilma foonita $I = I_1 - I_f$ imp/s <sup>2</sup>

Tabeli andmete järgi joonestame graafiku  $I = f(d)$ . Leiame graafiku abil neelava aine "poolkihi"  $d_{1/2}$  paksuse (kihi paksus, milles neeldub pool sinele langevast kiirgusest) ja kiirguse lineaarse nõrgenemisteguri  $\mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}}$ .

Mõõtmiste lõpetamisel lülitame impulsside loenduri välja (klahviga "CETB") ja lahutame kogu aparatuuri toitevõrgust.

## 2. Tutvumine radiomeetriga "TACC".

Aparaadi sisselülitamine ja kontroll.

1) Asetame radiomeetri skaalapiirkondade ümberlüli-

ti asendisse "3T".

2) Tumblersi "МЭХ. СЧЕТ" viime asendisse "ВКЛ.".

3) Tumblersi "КОМПЛЕКСИЦА ФОНА" aparaadi tagaküljel viime asendisse "РУЧН.".

4) Tumblersi "ПРОВЕРКА-РАБОТА" aparaadi tagaküljel viime asendisse "ПРОВЕРКА".

5) Ühendame aparaadi toitejuhtme elektrivõrguga.

6) Lülitame aparaadi sisse, selleks viime tumblersi "СЕТЬ" asendisse "ВКЛ.". Laseme aparaadil soojeneda 20 minutit.

7) Tumblersi "УСТ. НУЛЯ-РАБОТА" viime asendisse "УСТ. НУЛЯ" ja viime signaalpaneeli all asuva nupu "УСТ. НУЛЯ" abil mõõteriista osuti nulljaotusele. Viime tumblersi "УСТ. НУЛЯ-РАБОТА" asendisse "РАБОТА".

8) Pöörame mehaanilise loenduri osutid nullasendisse. Viime tumblersi "МЭХ. СЧЕТ" asendisse "ИУС" täpselt üheks minutiks (aega mõõdame samaaegselt käivitatava sekundomeetriga). Märgime üles mehaanilise loenduri näidu. See peab olema  $3000 \pm 150$  ja peab ühtima mõõteriista näiduga.

9) Lülitame skaalade ümberlüüti asendisse "ВМС. НАИР", mõõteriist peab näitama 350 V (gaaslahendusdetektorite CTC-6 tööpinge).

10) Aparaat on kontrollitud ja tööks valmis. Tumblersi "ПРОВЕРКА-РАБОТА" viime asendisse "РАБОТА".

#### Mõõtmine.

1) Kui aparaat on sisse lülitatud, soojenenud ja on teostatud eespool kirjeldatud kontroll, viime tumblersi "КОМПЛЕКС. ФОНА" aparaadi tagumisel küljel asendisse "АВТ." Peab süttima signaal "ТОТОВ".

2) Skaalade ümberlüüti viime asendisse, mille puhul ruumi  $\gamma$  -foonist tingitud impulsside arv ei ületaks 4/5 skaala nominaalväärtusest. Kui nüüd asetada detektorploki-le radioaktiivse ainega saastamata ese, nii et ploki kaanel olev lülitusnupp\* oleks sisse surutud, siis peab mõõ-

\* Allavajutatud nupu puhul ruumi  $\gamma$  -foon kompenseeritakse automaatselt.

teriista osuti peatuma nullil. 12 sekundi möödumisel süttib signaali "ТОТОБ" asemel signaal "ЧИСТО".

Kui detektorplokile asetatakse  $\beta$  - või  $\gamma$  -aktiivse ainega saastatud ese, siis mõõteriista osuti hakkab liikuma ja peatub kohas, kus impulsside arv minutis vastab eseme kiirguse aktiivsusele. Kui see kiirus ületab lubatud normi, siis 12 sekundi möödudes süttib signaal "ПРАЗНО". Signaalseadeldise tundlikkus on reguleeritav.

Peale uuritava eseme eemaldamist võib uut mõõtmist alustada alles pärast signaali "ТОТОБ" süttimist.

3) Uuritaval radiomeetril on signaalseadeldise reageerimise lävi valitud hästi madal, et see töötaks juba nõrkade, ohutute kiirgusallikate puhul.

Signaalseadeldise töötamisega tutvumiseks asetame detektorplokile kää (saastamata ese) ja siis eelmiste mõõtmiste juures kasutatud kiirgusallika (saastatud ese).

#### Lisaküsimusi

1. Miks on mõned elementide isotoobid radioaktiivsed, teised mitte?
2. Mis on radioaktiivse elemendi poolestusaeg (-periood)?
3. Mis on radioaktiivse elemendi lagunemistegur (konstant)?
4. Mida kujutab endast  $\alpha$  -,  $\beta$  - ja  $\gamma$  -kiirgus?
5. Missugustes ühikutes<sup>≡</sup> mõõdetakse radioaktiivsete ainete aktiivsust?
6. On kindlaks tehtud, et radioaktiivne kiirgus tuleb aatomi tuumast, kus teatavasti vabu elektrone ei ole. Kust

<sup>≡</sup> Vastavalt VMAN riikide standardile 1052-78 kehtivad ka NSVL-s alates 1. jaanuarist 1980 ainult SI ühikud. Kuna aga rea aastate vältel tuleb veel kasutada ka vanu andmeid käibelt kõrvaldatud ühikutes, siis nende ümberarvutamiseks SI ühikuteks on vaja hästi tunda nendevahelisi seoseid.

saadakse  $\beta$ -kiirgusel  $\beta$ -osakesi (elektrone)?

7. Tooriumi radioaktiivne isotoop  $^{230}_{90}\text{Th}$  kiirgab  $\alpha$ -osakesi, missuguseks elemendiks ta seejuures muundub?

8. Kuidas muutub radioaktiivse elemendi järjekorranumber, kui ta kiirgab lagunemisel  $\beta$ -kiirgust?

9. Miks patsiendile uuringutel sisseviidavad radioaktiivsed isotoobid peavad olema lühikese poolestusajaga?

10. Missugused on  $\alpha$ -,  $\beta$ - ja  $\gamma$ -kiirguse läbitungimisvõimed ja missugune neist pakub suurimat ohtu?

11. Miks säilitatakse mõningaid radioaktiivseid preparaate paksuseinalistes pliist konteinerites?

12. Miks on gaaslahendusloenduritel väga väike efektiivsus  $\gamma$ -kiirguse puhul?

13. Miks jäävad gaaslahendusloenduris registreerimata teineteisele kiiresti järgnevad osakesed?

14. Miks tekib gaaslahendusdetektoris tõukeionisatsioon traadikujulise anoodi piirkonnas?

15. Milleks on mõnel gaaslahendusdetektoril väga õhukestest vilgukivist aken?

16. Osakeste ionisatsioonivõimet iseloomustatakse tihti nn. ioonide joontiheduse kaudu. Mida selle all mõeldakse?

17. Miks on fooni lugemisel saadavad lugemid erinevad?

18. Nimetage, kus ja kuidas rakendatakse meditsiinis radioaktiivseid isotoope?

19. Missuguseid ohutustehnika reegleid tuleb täita radioaktiivsete preparaatidega töötamisel?

#### Kirjandus.

1. V. Kark. Füüsika loengud arstiteaduskonna ravi-, pediatria- ja stomatoloogiaosakonna üliõpilastele III. Tartu, 1973, lk. 87...95; 99...102; 111...116.
2. Н.М. Ливенцев. Курс физики. Атомная и ядерная физика, основы медицинской электроники и основы медицинской кибернетики. М., "Высшая школа", 1978, с.73-92, 98-112.

РУКОВОДСТВА ПРАКТИКУМОМ ПО ФИЗИКЕ  
ДЛЯ НЕФИЗИКОВ II.  
Издание 2-е, испр. и доп.  
Составитель Тоомас Мюурсепп.  
На эстонском языке.  
Тартуский государственный университет.  
ЭССР, 202 400, г.Тарту, ул.Кликооли, 18.  
Vastutav toimetaja T. Muursepp.  
Korrektor M. Kingsepp.  
Põljundamisele antud 23.09.1981.  
Formaat 30x42/4.  
Rotaatoripaber.  
Masinakiri, Rotaprint.  
Tingtrükipoognaid 6,95.  
Arvestuspoognaid 5,79. Trükipoognaid 7,5.  
Trükiarv 1000.  
Tell. nr. 1045.  
Hind 20 kop.  
TRÜ trükikoda, ENSV, 202400 Tartu, Pälsoni t. 14.

20 kop.

53

M 98  
11