

E. KORŽ

V. OREHHOV



**FÜÜSIKA  
ÕPETAMISEST**

**X KLASSIS**

N

87.025





A-33131  
E. KORŽ, V. OREHHOV

**FÜÜSIKA ÕPETAMISEST  
X KLASSIS**

**ELEKTRODÜNAAMIKA**

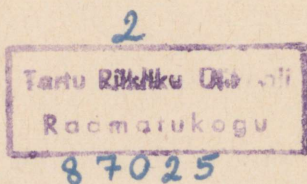
**Metoodilisi juhendeid õpetajale**

«VALGUS» TALLINN 1973

Originaali tiitel:

А. А. Ванеев, Э. Д. Корж, В. П. Орехов  
Преподавание физики в IX классе по новой программе  
Пособие для учителей  
Издательство «Просвещение»  
Москва 1971

Vene keelest tõlkinud V. Tuisk  
Kaane kujundanud J. Nikkarinen



## EESSÕNA

Käesolev raamat püüab abistada õpetajat elektrodünaamika käsitlemisel, tuginedes seejuures B. Buhhovtsevi, J. Klimonovitši ja G. Mjakiševi õpikule.

Vastavalt uue programmi põhiideele käsitleb nimetatud õpik materjali kaasaja teaduse tasemel. See nõuab õppetöö teatud ümberkorraldamist ja õpetajate vastavat ettevalmistamist.

Teoreetilise materjali sügavama analüüsimise eesmärgil pööratakse selles raamatus palju tähelepanu õpikus toodud küsimuste vastustele ja mitmesugustele ülesannetele. Ülesandeid vaadeldakse tavaliselt seoses mingi õpitava probleemi või vastava peatüki lõpus esitatud küsimuste analüüsimisega. Füüsika ülesannete lahendamise meetodika lähemaks tundmaõppimiseks võib õpetaja kasutada S. Kamenetski ja V. Orehhovi raamatut «Методика решения задач по физике в средней школе» («Просвещение», 1971).

Füüsikat tuleb õpetada eksperimentaalse teadusena. Selleta ei ole võimalik kujundada füüsikalist maailmavaadet, õpetada kaasageid looduse uurimise füüsikalisi meetodeid ja äratada õpilastes huvi füüsika vastu. Seetõttu tuleb iga teema teoreetilise materjali analüüsimise kõrval valmistada vajalikul teaduslikul ja meetodilisel tasemel ette ka vastavad katsed. Vajalike ja soovitatavate katsete kirjeldused on toodud õpikus, käesolevas raamatus või üldkättesaadavas kirjanduses, millele on tehtud viited.

Praktilistes töodes, eriti füüsika praktikumis, peavad õpilased omandama mitmesuguste töö- ja katseriistade ning tehniliste seadmete käsitlemisoskuse ja -vilumuse.

Polütehnilise õpetuse huvides tuleb õppeprotsessis kasutada ka televisiooni ja kino kaasabi, korraldada ekskursioone tööstus- ja põllumajandusettevõtetesse jne.

Antud käsiraamatu kasutamisel tuleb silmas pidada, et selles on küllaldase põhjalikkusega käsitletud ainult neid küsimusi, mis

on autorite arvates kõige aktuaalsemad. Õpikus ammendavalt käsitletud küsimustele on tehtud viited. Viidates õpikule on tavaliselt antud vastava paragrahvi number. Sedalaadi märkused, nagu [2, 4] või [15, lk. 61], tähendavad viidet kirjandusliku allika numbrile raamatu lõpus esitatud loetelus.

Iga teema lõpus on toodud ka selle teema ajalise planeerimise näidis.

Raamatu peatükid I—III kirjutas E. Korž, peatükid IV—VI, laboratoorsete tööde ja praktikumi osa V. Orehhov.

## ELEKTRODÜNAAMIKA

Elektrodünaamikas õpitakse tundma kehade ja osakeste vastastikuse mõju enamlevinud liiki — nende vastastikust elektromagnetilist mõju. Üheks tulemuseks, mille võrra rikastus füüsika vastastikuse elektromagnetilise mõju uurimisel, oli kahe omavahel seotud ja vastastikku teineteiseks muunduva materiaali — aine ja välja kindlakstegemine.

Välja all mõeldakse tavaliselt ruumi osa, mida iseloomustab mingi füüsikalise suuruse (temperatuuri, kiiruse, elastsusjõu) ruumiline jaotus.

Füüsika arengu käigus eraldus vähehaaval üks liik välju, mis ei iseloomusta enam mingi keskkonna olekut, vaid kujutab endast materiaali uut vormi. Mõnikord nimetatakse selliseid välju füüsikalisteks väljadeks.

Füüsikalist välja pole enam võimalik iseloomustada kui ruumi osa, nagu pole võimalik antud ruumiosas olevat materiaalist objekti samastada selle ruumiga. Elektromagnetväli osutub füüsikaliseks väljaks.

Elektromagnetvälja põhiliste omaduste ja elektromagnetiliste vastastikuste mõjude üldiste seaduspärasuste tundmaõppimine X klassis seisneb suure hulga nii VIII klassist tuntud kui ka esmakordselt esitatavate katseandmete üldistamises. Seejuures tuuakse järk-järgult sisse elektrodünaamika põhimõisted, suurused ja printsiibid. Sellisele baasile rajatud elektromagnetiliste nähtuste üldist teooriat kasutatakse hiljem katsetulemuste selgitamiseks, mis veelkordselt aitab kinnistada teooriat. Kõikjal kus võimalik, seostatakse nähtuste struktuurne selgitus vastava mikrofüüsikalise mehhanismiga.

### I. ELEKTROSTAATIKA

Uurides kehade ja osakeste vastastikust mõju, mis on tingitud nende elektrilaengutest, asendavad füüsikud tinglikult terminid «laetud keha» ja «laetud osake» lühema terminiga «laeng». Seda tinglikkust tuleb arvestada, rääkides seisvatest või liikuvatest laengutest, sest sisuliselt peaks jutt olema paigalseisvatest või vastavalt antud arvestussüsteemis liikuvatest laetud kehade või laetud osakestest.

Elektrilised ja magnetilised nähtused kujutavad endast kahte elektromagnetilise protsessi lahutamatu külge. Vaadeldes elektrostaatikas «seisvaid» laenguid, näib meile, et tegemist on puht-elektriliste nähtustega.

Tegelikult on aga kõik keha mikrolaengud pidevas liikumises ja nendega kaasnevad magnetväljad.

Elektrostaatikas moodustavad keha «liikumatu» laengu liigsed elektronid või ioonid. Kaootilise liikumise tõttu on keha kui terviku mikrolaengute kiiruste geomeetiline summa mistahes ajahetkel keskmiselt võrdne nulliga.

Kuna aga elektrostaatika ülesannetes mikroosakeste kogumiku resultantkiirus võrdub nulliga, siis puudub ka resultantmagnetväli.

On oluline märkida, et rääkides magnetvälja puudumisest ühes või teises punktis, peetakse silmas makroskoopilise välja, mitte aga mikrolaengute ümber oleva välja puudumist.

## 1. Elektrilaeng. Kehade elektriseerimine

Selle teema käsitlemisel tuleb tingimata pöörata tähelepanu raskustele elektrilaengu defineerimisel, peatumata seejuures üksikasjaliselt probleemi ajaloolisel arengul.

See ei ole mingi spetsiifilist laadi raskus, mis esineks ainult elektrilaengu määratlemisel: sellised raskused tekivad mistahes fundamentaalse suuruse või elementaarse mõiste defineerimisel.

Mistahes füüsikalise suuruse, nähtuse või koefitsiendi definitsioon taandub alati selle mõiste võrdlemisele teiste, üldisemate, varem õpitud mõistetega. Kuid võimalus üle minna üksikult üldisele pole piiramatu: ta kaob, kui puutume kokku mõistetega, mis füüsikaliste teadmiste antud arenguastmel ei võimalda üldistamist. Sel juhul me loobume antud mõiste elementaarsest analüüsist ja püüame avastada tema iseloomulikud jooned ning meetodi jälgimiseks, püüame iseloomustada antud suuruse ilmingut ja meetodikat tema mõõtmiseks.

Kuigi laengut pole võimalik defineerida, tuleb kindlasti näidata, milles seisneb laetud ja laadimata kehade erinevus ja milles ilmneb laengu olemasolu kehal (osakesel).

Laengu olemasolu avaldub selles, et laetud kehade ja osakeste vahel mõjub eriline jõud, mis hiiglaarv kordi ületab nende kehade vahel mõjuva gravitatsioonijõu. Laengu olemasolu kehal tähendab seda, et see keha on võimeline elektromagnetiliseks vastastikuseks mõjaks teiste kehadega. Selle vastastikuse mõju iseloomu on sobiv vaadelda laetud elementaarosakeste näitel.

Tutvustanud õpilasi elementaarosakeste mõistega, võib asuda nende laenguid iseloomustama, rõhutades, et:

1) mõningad elementaarosakesed omavad peale massi ka laengut;

2) erinevalt gravitatsioonijõust pole erinevate laetud osakeste paaride vastastikune mõju ühesugune — laetud osakesed kas tõmbuvad või tõukuvad. Seejuures tõukuvad omavahel kõik osakesed, mille vastastikune mõju antud osakesega on ühesugune. Neile kirjutatakse juurde ühesugused märgid — pluss või miinus. (Laengu märgi valik on kokkuleppeline.)

3) elektrilaeng ei eksisteeri iseseisvalt. Osake võib ka laengut mitte omada, kuid laengu kandjaks võib olla ainult osake — laeng ei eksisteeri osakesest lahus;

4) kõikide elementaarosakeste laengud on ühesuurused, nad võivad erineda vaid märgilt;

5) elementaarosakesed omavad väikseimat võimalikku elektrilaengut, seda pole võimalik vähendada ega osadeks jaotada (see on eksperimentaalne fakt, mis pole senini seletust leidnud).

Need elementaarosakeste kohta õpilastele antud andmed võimaldavad teha järelduse: elementaarosakese elektrilaeng on osakese eriline karekteristik — arvuline mõõt, mis määrab tema elektromagnetilise vastastikuse mõju teiste osakestega.

Pärast tutvumist laetud elementaarosakestega on loogiline asuda laetud kehade vaatlemisele, toetudes õpilaste teadmistele aine ehitusest, mis omandati VIII klassis.

Õpilaste tähelepanu juhitakse sellele, et jõud, mis toimivad positiivselt laetud tuuma ja tema negatiivselt laetud elektronkätte vahel, kuuluvad tuumajõududega võrreldes tunduvalt nõrgemate vastastikuste elektromagnetiliste mõjude hulka (tuumajõud on tugevad vastastikused jõud). Seetõttu on ilmne, et elektronid, eriti välised, on kõige kergemini eraldatav osa aatomist.

Tervikuna on aatom neutraalne, sest ioniseerimata olekus on prootonite arv tuumas võrdne elektronide arvuga elektronkattes. Kui elektron (või mitu elektroni) lahkuvad aatomist, osutub aatom positiivselt laetuks. Kuna «oma» aatomist lahkunud elektronid jäävad kehasse ning elektronide ja prootonite arv selles on ühesugune, siis keha tervikuna on neutraalne.

Keha on laetud, kui temas on samamärgiliste elementaarlaengute (näiteks elektronide) ülejääk.

Õpikus (§ 63) on küllalt põhjalikult vaadeldud kehalt laengu eraldamise üldtuntud viisi — elektriseerimist hõõrdel.

Selle küsimuse käsitlemisel tuleb rõhutada, et hõõrdel ei «teki» laenguid, suureneb vaid vabade elektronide tiheduse ja väljumistöö poolest erinevate kehade kokkupuutepind.

Metoodilises kirjanduses, mis sisaldab elektriosa demonstratsioonkatsete kirjeldusi, soovitatakse elektriseerimise uurimisel algul näidata, et kõik kehad elektriseeruvad, kuid elektriseeritud kehad tõmbavad kõiki elektriseerimata kehi (tahkeid, vedelaid, gaasilisi).

Seda on lihtne demonstreerida [vt. 5, katsed 1, 2 või 4, katse 1].

Selle teema algul demonstreeritavate katsete selgitamine on raske, sest õpilased tunnevad ainult laengu mõistet, laengute liigitust ja vastastikust mõju, ei tunne aga veel elektrostaatilist induktsiooni ja aine polariseerumist elektriväljas.

Seepärast on elektriseerimist hõõrdel otstarbekas demonstreerida kõige hõlpsamini seletatava katse abil, milles elektroskoobi või elektromeetriga tehakse kindlaks laengu olemasolu ühel hõõrduvatest kehadest, selgitades seejuures ka elektroskoobi (elektromeetri) ehitust [5, katse 5; 4, katse 2].

Elektroskoobi abil võib ka demonstreerida, et hõõrduvatel kehal tekivad erinimelised laengud. Huvitav on vaadelda hõõrdel tekkiva staatilise elektri esinemist tootmises. Näiteks paberirullide lahtikerimisel tekib elektriseerunud paberi ja käte vahel lahendus ning trükitöölised on seetõttu sunnitud töötama kummikinnastes.

Lõpetuseks sõnastatakse elektrilaengu jäävuse seadus, rõhutades, et säilib mitte laetud elementaarosakeste summa, vaid elektrilaengute algebraline summa. Ühele õpilastest võib anda ülesandeks koostada referaat teemal «Elektrinähtuste seletamise ajalooline areng».

## 2. Laengute vastastikune mõju. Coulomb'i seadus

Coulomb'i seadus on elektrilaengu jäävuse seaduse, elektriväljade superpositsiooniprintsiibi jt. kõrval üheks tähtsamaks empiiriliseks seaduseks, mida kasutatakse elektrodünaamika põhiliste võrrandite saamiseks.

Peale selle võib Coulomb'i seaduse põhjal tuletada terve rea elektriliste suuruste mõõtühikuid.

Selle seaduse käsitlemist on otstarbekas alustada Coulomb'i ees seisnud ülesande formuleerimisest ja katsetingimuste püstitamisest: uurida kahe liikumatu punktlaengu vastastikust mõju. Seejärel on sobiv kirjeldada Coulomb'i katseid keerdkaaludega.

Coulomb'i seaduse järkjärguline tuletamine:

1) uuritakse kaalukangil asuva laengu  $q_1$  ja sellest kaugusel  $r$  asuva liikumatu varda külge kinnitatud kuulikese laengu  $q_2$  (vt. õpikust joon. 106) vahelise vastastikuse mõjujõu  $F$  sõltuvust suurustest  $q_1$ ,  $q_2$  ja  $r$ . Kuulikeste raadiused  $r_1$  ja  $r_2$  on palju väiksemad kaugusest  $r$  ( $r_1 \ll r$ ,  $r_2 \ll r$ ).  $F = F(q_1 q_2 r)$ ;

2) jääva  $r$  ja  $q_2$  korral muudetakse  $q_1$  väärtust 2, 4, 8 korda ning leitakse sõltuvus  $F(q_1)$

$q_1$	$Q_1$	$\frac{Q_1}{2}$	$\frac{Q_1}{4}$
$F$	$F_1$	$\frac{F_1}{2}$	$\frac{F_1}{4}$

$F \sim q_1$ ;

3) jääva  $r$  ja  $q_1$  korral muudetakse  $q_2$  väärtust ning määratakse sõltuvus  $F(q_2)$

$q_2$	$Q_2$	$\frac{Q_2}{2}$	$\frac{Q_2}{4}$	$F \sim q_2;$
$F$	$F_2$	$\frac{F_2}{2}$	$\frac{F_2}{4}$	

4) jääva  $q_1$  ja  $q_2$  korral muudetakse kaugust  $r$  ning leitakse sõltuvus  $F(r)$

$r$	$r_0$	$2r_0$	$4r_0$	$F \sim \frac{1}{r^2}$
$F$	$F_0$	$\frac{F_0}{4}$	$\frac{F_0}{16}$	

Ühendades saadud tulemused, saadakse:

$$F \sim \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}. \quad (1)$$

Õpilaste tähelepanu juhitakse sellele, et mõõtühikuid võib valida selliselt, et võrdetegur osutuks dimensioonita suuruseks ja võrduks ühega.

Ühikute valikul CGSE-süsteemis nii ka toimitakse. Kuid SI-süsteemis on laengu ühik tuletatud ühik: ta määratakse põhiühiku — ampri kaudu.

Seetõttu on tegur  $k$  SI-süsteemis dimensiooniga suurus, mis ei võrdu ühega.

Laengu ühikuks võetakse siin

1 kulon (C) =  $3 \cdot 10^9$  CGSE-süsteemi laenguühikut.

$k$  arvulise väärtuse määramiseks SI-süsteemis võib õpilastele anda järgmise ülesande.

Määrata jõud, millega mõjutavad teineteist vaakumis kaks punktlaengut  $q_1 = q_2 = 1\text{C}$ , kui laengutevaheline kaugus on 1 m. (Selle ülesande tingimused on ebareaalsed, sest kehale, mida võiks kauguselt 1 m punktiks lugeda, pole võimalik koondada laengut 1 C.)

Lahendus CGSE-süsteemis.

$$q_1 = q_2 = 3 \cdot 10^9 \text{lü}$$

$$\frac{r = 100 \text{ cm}}{F = ?}$$

$$F = \frac{9 \cdot 10^{18}}{10^4} \text{ dyn} = 9 \cdot 10^{14} \text{ dyn} = 9 \cdot 10^9 \text{ N}$$

Seega kaks laengut, kumbki 1C, mõjutavad teineteist 1m kauguselt jõuga  $9 \cdot 10^9 \text{N}$ . Järelikult, selleks et valemis (1) saada jõudu njuutonites (s. t. SI-süsteemis), tuleb võtta  $k = 9 \cdot 10^9$ . See võrdetegur kirjutatakse kujul:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

Tänu sellisele kirjutusviisile langeb paljudes valemites kor-daja  $4\pi$  ära (võrrelge plaatkondensaatori mahtuvuse valemit SI- ja CGSE-süsteemis).

Kuna  $k = 9 \cdot 10^9$ , saadakse  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  SI-süsteemi ühikut.

Äsja sissetoodud füüsikaliste suuruste dimensiooni võib mää-rata ülesannete lahendamisel Coulomb'i seadusele.

Elektrilaengute vahel mõjuva jõu sõltuvust selle keskkonna omadustest, milles laengud asuvad, pole esialgu võimalik õpilas-tele selgitada ning see tuleb neile anda kui kogemuslik fakt.

### 3. Lähi- ja kaugmõju

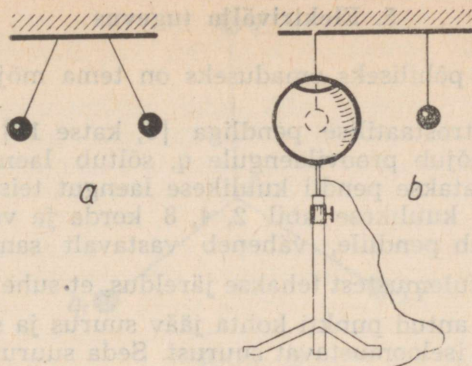
Küsimus ühe laengu mõju kandumisest teisele on vajalikuks «sillaks» üleminekul elektrilaengu mõistelt elektrivälja mõistele. Elektrostaatika seisukohalt ei oleks mingit vajadust elektrivälja käsitleda, sest kõik siin vaadeldavad nähtused on seletatavad Coulomb'i seaduse põhjal, välja mõistet kasutamata.

Ent elektromagnetilistes nähtustes saab välja olemasolu ilmsiks ja nendes nähtustes esinevaid seaduspärasusi kirjelda-takse elektrostaatikas ja magnetismis kasutuselevõetud välja karakteristikute abil. Seetõttu on tingimata vaja kõiki elektro-staatika ja magnetismi nähtusi kirjeldada lähimõju teooria põh-jal, mille olemus loob eeldused selleks, et teineteisest eemaldatud kehade vastastikune mõju toimub alati vahelülide või keskkonna kaudu, mis annab mõju punktist punkti edasi lõpliku aja vältel.

Esitades lähi- ja kaugmõju kontseptsioonide ajaloolist võitlust, on vaja avada nende kontseptsioonide puudusi igal arenguetapil, selgitada, millest need puudused olid tingitud ning rõhu-tada nende teooriate väärtusi.

Lähimõju teooria esialgne naiivne variant põhines kujutlusel, et teineteist vastastikku mõjutavad kehad peavad olema kas vahetus kontaktis või reaalses ühenduses ainelise keskkonna kaudu. Nimelt sellised kujutlused on väga omased lastele, kes ju oma esimesed kogemused vastastikusest mõjust saavad just rõhu-mise, löögi, tõmbe jne. kaudu.

Lähimõju asemele tulnud kaugmõju teooria eitas mõju edasi-andva keskkonna — aine olemasolu vajadust. Kaugmõju poolda-jad arvasid, et vastastikune mõju kehade vahel realiseerub mis-tahes vahemaa tagant silmapilkselt. Selline oletus ei osutunud õigeks, kui võrd hiljem tehti kindlaks, et elektromagnetilised protsessid levivad lõpliku kiirusega (vaakumis  $c = 3 \cdot 10^{10}$  cm/s).



JOON. 1

Seisvate laengute (elektrostaatika) puhul on väljend «vastastikuse mõju edasikandumise kiirus» mõttetu. Liikuvate laengute korral aga tähendab vastastikuse mõju levimise lõplik kiirus, et laengu  $A$  nihkumisel  $B$  suhtes ei muutu laengule  $B$  mõjuv jõud otsekohe, vaid teatud aja möödumisel, lugedes aega nihke algusest.

#### 4. Elektriväli

Niisiis, laengu  $A$  nihkumist «tunnetavad» kõik teda ümbritsevad laengud, kuid mitte üheaegselt.

Mis signaaliseerib laengule  $B$  laenguga  $A$  toimunud muutustest? Mis muutub seejuures punktis, kus asub laeng  $B$ ?

Nendele küsimustele võib anda vastuse, võttes kasutusele elektrivälja mõiste.

Vastavalt Faraday ideedele eksisteerib iga elektrilaengu ümber elektriväli. Ühe laengu väli mõjub teisele laengule, ja vastupidi. Kui muutub laengu väli, muutub ka tema toime. Elektrostaatiline väli ja laeng on lahutamatud. Elektrivälja defineerida on aga niisama raske, kui anda laengu definitsiooni. Kuid välja võib avastada tema ilmingute kaudu ja nende uurimise põhjal võtta kasutusele välja karakteristikud.

Väga efektne on hõrendatud gaaside helendumine elektroodideta torus selle asetamisel elektrivälja [5, katse 16]. Samuti võib näidata, kuidas kaks kergelt samanimeliselt laetud kuulikest õhus teineteist vastastikku mõjutavad (joon. 1, a). Asetanud aga ühe neist maandatud kerasse (joon. 1, b) enam vastastikust mõju ei ilmne, kuigi kuulikeste laengud ei muutunud (metallist kondensaator ekraaneerib välise välja).

## 5. Elektrivälja tugevus

Elektrivälja põhiliseks omaduseks on tema mõju elektrilaengutele.

Katses elektrostaatilise pendliga [5, katse 17] võib näidata, et jõud, mis mõjub proovilaengule  $q$ , sõltub laengu suurusest. Selleks vähendatakse pendli kuulikese laengut teise samasuguse, kuid laadimata kuulikese abil 2, 4, 8 korda ja veendutakse, et jõud, mis mõjub pendlile, väheneb vastavalt sama arv korda:

$F \sim q$ . Saadud tulemustest tehakse järeldus, et suhe  $\frac{F}{q}$  on laengu  $q_0$  elektrivälja<sup>1</sup> antud punkti kohta jääv suurus ja seda võib vaadelda kui välja iseloomustavat suurust. Seda suurust nimetatakse elektrivälja tugevuseks välja antud punktis. Märgitakse, et saadud suurus on vektor, mille suund määratakse proovilaengu abil. Proovilaeng, millega määratakse väljatugevuse suund, võetakse tavaliselt positiivne ja küllalt väike, et ta oma väljaga ei kutsuks esile laengu ümberjaotumist kehas, mille välja uuritakse. Esiialgu piirdume selliste elektriväljade vaatlemisega, mille tugevus mistahes punktis on ajas muutumatu.

Nüüd on lihtne tuletada punktlaengu elektrivälja tugevuse valem.

$$E = \frac{q_0}{4\pi\epsilon_0\epsilon R^2} \text{ (SI) või } E = \frac{q_0}{\epsilon R^2} \text{ (CGSE).}$$

Õpilaste tähelepanu juhatakse sellele, et saadud valemi järgi on punktlaengu väljatugevus välja antud punktis võrdeline selle laengu suurusega ja pöördvõrdeline selle punkti kauguse ruuduga laengust.

Seda järeldust võib katseliselt kontrollida tasakaalustatud elektrostaatilise pendli abil [5, katse 17].

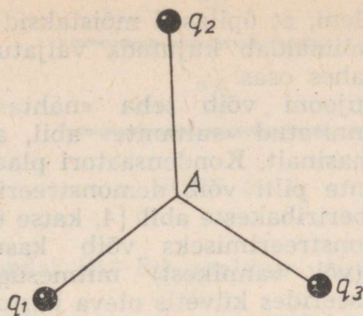
Õpitud materjali kinnistamiseks on otstarbekas lahendada õpilastega mõned ülesanded (tüüpülesandeks ül. nr. 855, V. P. Demkovitš «Füüsika küsimuste ja ülesannete kogu keskkoolile»).

Selleks on soovitatav anda õpilastele väljatugevuse  $E$  ühikud mitte pärast potentsiaalide vahe õppimist ja seose loomist  $E$  ja  $\Delta\phi$  vahel, vaid kohe pärast väljatugevuse üldise valemi ja punktlaengu väljatugevuse valemi tuletamist.

**Superpositsiooniprintsiip.** Elektriväljade superpositsiooniprintsiip on järeldus jõudude mõju sõltumatuse printsiibist mehhaanikas: jõud, millega teised elektrilaengud mõjuvad proovilaengule, toimivad üksteisest sõltumata.

Superpositsiooniprintsiipi on otstarbekas tutvustada järgmist tüüpi ülesannete kaudu.

<sup>1</sup> Tavaliselt kasutatavale väljendile «laengu poolt tekitatud väli», mis ei peegelda elektrivälja materiaalsel olemusel, tuleks eelistada väljendit «laengu elektriväli».



JOON. 2

1. Määrata elektrivälja tugevus punktis, mis asub laenguid  $+10$  lü ja  $-20$  lü ühendava sirge keskpunktis, kui laengutevaheline kaugus on  $20$  cm. Kas võib nende laengute vahel leida punkti, kus väljatugevus võrduks nulliga?

2. Määrata väljatugevus punktis  $A$ , kui see punkt asub laengutega  $q_1=0,2$  C,  $q_2=0,4$  C ja  $q_3=-0,08$  C samas tasapinnas, igäühest kaugusel  $r=0,2$  m (joon. 2).

**Elektrivälja jõujooned.** Elektrivälja graafiliseks kujutamiseks on võetud kasutusele jõujoonte mõiste.

Tuleb näidata, et jõujoonte abil saab kujutada mitte ainult elektrivälja tugevuse suunda, vaid ka suurust. Selleks kujutatakse jõujooned ruumis teatud tihedusega. Kui võtta etaloniks mingit ruumiosa läbivate jõujoonte tihedus (jõujoontega risti asetatud pinnaühikut läbivate jõujoonte arv), siis ruumiosas, kus väljatugevus on  $N$  korda suurem, kujutatakse jõujooni  $N$  korda tihedamalt.

Tõepoolest, lihtsaimal juhul on punktlaengu  $q_0$  elektrostaatilise välja tugevus laengust  $r_1$  ja  $r_2$  kaugusel vastavalt

$$E_1 = \frac{q_0}{r_1^2} \text{ ja } E_2 = \frac{q_0}{r_2^2}.$$

Kui laengust on tinglikult tõmmatud  $N$  jõujoont, siis kaugusel  $r_1$  ja  $r_2$  pindalaühikut läbivate jõujoonte arvud on

$$n_1 = \frac{N}{4\pi r_1^2} \text{ ja } n_2 = \frac{N}{4\pi r_2^2}.$$

Võrreldes kõiki neid suhteid, tullakse järeldusele:

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

Neid andmeid, kui õpetaja peab vajalikuks neid anda, saavad õpilased hiljem kasutada mitmesuguse pinnakuju ja -vormiga laetud kehade väljatugevuse kujutamisel.

Tuleb jõuda selleni, et õpilased mõistaksid jõujootne all vaid abivahendit, mis võimaldab kujutada väljatugevuse suunda ja suurust välja mistahes osas.

Elektrivälja jõujooni võib teha «nähtavaks» isoleerivate statiivide külge kinnitatud «sultanite» abil, andes neile laengu elektrostaatiliselt masinalt. Kondensaatori plaatide vahel tekkiva elektrivälja jõujoonte pilti võib demonstreerida otsapidi plaadi külge kleebitud paberiribakeste abil [4, katse 6].

Jõujoonte demonstreerimiseks võib kasutada spetsiaalset riista — küvetti (või vannikest) mitmesuguste elektroodide komplektiga, projitseerides küvetis oleva kastoorõli pinnale puistatud mannaterakeste abil saadud välja jõujoonte pildi ekraanile [5, katse 16, II osa või 4, katse 6, I osa].

Soovitav oleks näidata välja jõujooni ühtlase (laetud plaadid) ja ebaühtlase (punktlaeng) jaotumise korral. Saadud väljade spektrite abil võivad õpilased määrata, kuidas antud konkreetsetel juhtudel muutub elektrivälja tugevuse suurus. Need katsed valmistavad ette üleminekut ühtlaselt laetud lõpmatu tasandi ja kera elektrivälja uurimisele.

Nende väljade uurimist on otstarbekas alustada punktlaengu ja laetud tasandi elektriväljade struktuuri analüüsimisest.

Osutamata sellele, millisest materjalist kera või tasapinnaline plaat on valmistatud (juhtide ja dielektrikute käitumist elektriväljas pole otstarbekas vahepealse teemana käsitleda), võib laengute jaotust pinnal  $S$  lugeda ühtlaseks tihedusega  $\sigma$ .

Loobudes Gaussi-Ostrogradski teoreemi sissetoomisest kooli füüsikakursusesse, pole laetud kera elektrivälja tugevuse avaldist küllalt korrektselt võimalik tuletada.

Kera väljatugevuse avaldise tuletamisel lähtume punktlaengu ja sfäärilise laengu jõujoonte pildi (topograafia) sarnasusest, millest järeldub, et valemid kummagi väljatugevuse määramiseks on ühesugused.

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2},$$

kus  $Q$  on punktlaengu või vastavalt kera laengu suurus, mis võrdub  $\sigma S$ ,  $R$  — punkti, milles väljatugevust määratakse, kaugus punktlaengust või laetud kera keskpunktist.

Tehakse järeldus: väljatugevus laetud kera ümber avaldub samuti nagu selle kera keskpunkti asetatud samasuure punktlaengu väljatugevus.

Valem ühtlaselt laetud plaadi väljatugevuse arvutamiseks saadakse ühtlaselt laetud kera väljatugevuse valemi laiendamisel juhule, mil kera raadius piiramatult kasvab ( $R_0 \rightarrow \infty$ ). Seejuures võib üksikuid pinnaelemente, mille joonmõõtmed on tunduvalt väiksemad kui  $R_0$ , lugeda ligikaudu tasapinnalisteks. Jõujooned, olles risti laetud pinnaga, on antud juhul praktiliselt paralleelsed.

•B

•A

JOON. 3

Kerapinna lähedal ( $R=R_0$ ) avaldub väljatugevus  $\varepsilon=1$  puhul selliselt:

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R^2} = \frac{\sigma S}{4\pi\varepsilon_0 R^2} = \frac{\sigma 4\pi R_0^2}{4\pi\varepsilon_0 R_0^2} = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} \text{ (SI)}.$$

Saime ühtlaselt laetud plaadi väljatugevuse valemi. CGSE-süsteemis on vastav avaldis  $E=4\pi\sigma$ . Õhukese plaadi korral, mille laeng on jaotunud ühtlaselt, on väljatugevus jääv ning avaldub valemina

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0}.$$

Tegelikuses on see valem õige, kui laetud tasandi joonmõõtmed on tunduvalt suuremad kui tema kaugus antud punktist.

Saadud tulemusi kinnistatakse ülesannete lahendamisega.

1. Laeng  $q$  on ühtlaselt jaotunud kerapinnal raadiusega  $R_0$ . a) Millega võrdub väljatugevus kerapinna lähedal? b) Kui suur oleks väljatugevus sellise kera pinna lähedal, mille  $R=2R_0$ , kui sellel keral oleks ühtlaselt jaotunud kogu eelmise kera laeng? c) Millega võrdub väljatugevus kaugusel  $4R_0$  kummagi kera keskpunktist?

2. Kui suur on väljatugevus õhukese plaadi pinna lähedal, kui laeng  $q=1,26 \cdot 10^{-8} \text{ C}$  on ühtlaselt jaotunud pindalal  $S=100 \text{ cm}^2$ ? Vastus:  $50 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ .

3. Määrata kahe ühtlaselt laetud tasaparalleelse plaadi (joon. 3) elektrivälja tugevus: 1) plaatide vahel punktis A ja 2) väljaspool plaatidevahelist ruumi punktis B juhul, kui a)  $\sigma_1 = \sigma_2$ ; b)  $\sigma_1 = -2\sigma_2$ ; c)  $\sigma_1 = -\sigma_2$ . Ülesannete lahendamisel on mõistlik kasutada selle süsteemi ühikuid, milles valemeil on lihtsam kuju. Näiteks esimeses ülesandes tuleks eelistada CGSE-süsteemi ühikuid, kolmandas ülesandes aga SI-süsteemi ühikuid.

## 6. Elektriväli keskkonnas

Arvestades selle teema suurt mahtu ja üldistavat iseloomu, on soovitatav esitada see loenguna.

Aatomid ja molekulid, mis moodustavad aine, koosnevad laetud osakestest, millele elektriväli avaldab mõju ning mis omakorda mõjutavad ka elektrivälja.

Elektrivälja mõju ainele (aine käitumine väljas) on määratud aine sisemise ehitusega.

Ainete juhtideks, dielektrikuteks ja pooljuhtideks liigitamise aluseks on nende juhtivuse erinev iseloom suures temperatuurivahemikus.

Esialgul võib jaotada ained juhtideks ja dielektrikuteks ühe tunnuse — vabade laengukandjate arvu põhjal.

Juhtideks loetakse aineid, mis sisaldavad palju vabu laengukandjaid, mis on elektrivälja mõjul võimelised nihkuma. Dielektrikutes on selliste laengukandjate hulk juhtidega võrreldes tühine.

Rõhutanud, et vabade laengute kandjateks võivad olla elektronid (metallides) ja ioonid (elektrolüütides), piirduakse ainult üht liiki juhtide — metallide vaatlemisega.

Vabade elektronide olemasolu metallides seletatakse Drude-Lorentzi klassikalise teooria põhjal järgmiselt. Metallide kristallvõre moodustavad positiivsed ioonid, s. t. aatomid, mis on kaotanud (tavaliselt) ühe elektroni. Metallide aatomites on väliste, valentselektronide side tuumaga nõrgenenud, sest nendevaheline kaugus on suhteliselt suur. Pealegi varjavad elektronkattede sisenemistes kihtides tiirlevad elektronid tuuma, soodustades nii tema sideme nõrgenemist valentselektronidega. Aatomitest eraldunud elektronid täidavad ruumvõre ning välja mõjul muutuvadki nad voolukandjateks.

Termin «metallide vabad elektronid» ei ole õnnestunud ja praegu asendatakse see väljendiga «metallide juhtivuselektronid».

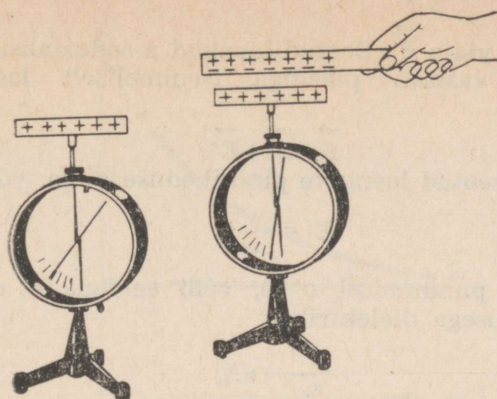
Nagu hiljem selgus, läheb «oma» aatomist lahkunud elektron üle naabrile, sealt edasi järgmisele aatomile ja võib niiviisi liikuda kogu metalli ruumalas, muutudes naaberaatomite või, õigemini, kogu ruumvõre «omandiks». Seepärast nimetataksegi metallide juhtivuselektrone «kollektiviseerunud» elektronideks. Kollektiviseerunud elektronide liikumine allub kvantseadustele nagu elektronide liikumine isoleeritud aatomiski.

**Juhid elektrostaatilisest väljast.** Üheks elektrostaatilisest (seisvate laengute) välja olemasolu tingimuseks on juhtivusvoolu puudumine. Kui asetada juht elektrivälja, siis esimesel hetkel läbib juhti väli ja tekitab selles elektrivoolu.

See vool põhjustab juhis laengute sellise ümberjaotumise, mille puhul metallis ümberpaiknenud laengute väli tasakaalustab välise välja (vastasel juhul ei lakkaks vool kunagi).

Elektrivälja puudumist juhi sees demonstreeritakse Faraday silindri või Kolbe võrgu abil, samuti võib õpilasi tutvustada elektronikiiretoru ja raadiolampide elektrostaatilisest varjetega.

Ümberjaotunud laengud on paigal, järelikult, elektrivälja tugevuse tangentsiaalne komponent  $\vec{E}_t$  võrdub nulliga. Nullist erineb vaid normaalkomponent  $\vec{E}_n$ , s. t. välja jõujooned on risti juhi pinnaga.



JOON. 4

Elektrivälja puudumine juhi sees tähendab seda, et laeng juhi sees on võrdne nulliga ja järelikult paiknevad laengud tema pinnal. Katse, mis illustreerib laengute puudumist juhi sees, on kirjeldatud õpikus § 72 [vt. samuti 4, katse 7].

Kui asetada elektrilaeng õõnsasse metallkehasse, siis indutseeritakse keha sise- ja välispinnal vastandmärgilised laengud. Nende laengute jaotus osutub selliseks, et õõnsusesse asetatud laengu väli ja juhisis indutseeritud laengute väli vastastikku kompenseeruvad ning resulteeriv väli võrdub nulliga.

Õõnsa metallkeha sisemuses väli ei võrdu nulliga (jõujooned lähevad õõnsusse asetatud laengult juhi sisepinnal indutseeritud laengutele), juhi välispinnal indutseeritud laengud tekitavad aga välise välja. Järelikult, suletud metallpind on ekraaniks vaid tema suhtes väliste laengute väljadele.

**Dielektrikud elektriväljas.** Asudes selle teema käsitlemisele, on tingimata vaja osutada dielektrikute erinevusele võrreldes metallidega. Nimelt on vabade elektronide tihedus dielektrikutes väga väike, mille tulemusena elektrivälja asetatud dielektrikutes tekitavad efektid, mis erinevad nähtustest metallides.

Dielektriku polarisatsioon elektroskoobile asetatud laetud ketta väljas [5, katse 20] veenab meid selles, et elektriväli avaldab dielektrikule mõju, mille tulemusena laadimata dielektrik tekitab oma elektrivälja (joon. 4).

Tutvustanud õpilasi kaht liiki dielektrikutega — polaarse ja mittepolaarse dielektrikutega (õpikus § 74), on otstarbekas vaadelda dielektriku elektrivälja just polaarse dielektrikute baasil, sest nende polarisatsioonimehhanism on lihtsam.

Vaadeldes plaatkondensaatori homogeenise elektrivälja  $\vec{E}_0$  mõju molekulide dipoolidele, näidatakse, et seotud pinnalaengud mis tekitavad kondensaatori katete lähedal, tekitavad väljaga  $\vec{E}_0$

vastassuunalise välja  $\vec{E}'$ . Seotud laengud moodustaksid nagu kaks kondensaatori vastava plaadiga isenimeliselt laetud pinda. Saame

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'.$$

Tähistanud seotud laengute pindtiheduse  $\sigma'$ -ga, võib kirjutada

$$E' = \frac{\sigma'}{\epsilon_0}.$$

Kuna välja puudumisel  $\sigma=0$ , võib eeldada, et  $\sigma'$  on võrdeline väljatugevusega dielektrikus:

$$\frac{\sigma'}{\epsilon_0} = \kappa E,$$

kus  $\kappa$  on võrdetegur, mida nimetatakse dielektriliseks vastuvõtlikkuseks. See võrdelisus leiab suhteliselt nõrkades väljades eksperimentaalset kinnitust enamiku dielektrikute puhul.

Asetades  $E' = \kappa E$  avaldisse  $E = E_0 - E'$ , saame

$$E = \frac{E_0}{1 + \kappa}.$$

Tähistades  $1 + \kappa = \epsilon$ , jõuame katsest tuntud tulemuseni

$$E = \frac{E_0}{\epsilon},$$

s. t. elektriväli nõrgeneb homogeenises dielektrikus  $\epsilon$  korda.

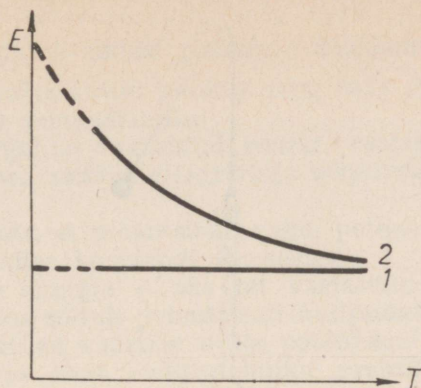
**Mittepolaarsete dielektrikute polarisatsioon.** Sellel küsimusel peatudes on vaja rõhutada, et polaarsetes dielektrikutes orienteerib väline väli «valmis» dipool, mittepolaarsetes dielektrikutes aga polariseerib väli molekule, mis välja puudumisel ei ole polaarsed.

Aatomite, molekulide ja ionide polarisatsiooni dielektrikutes liigitatakse elektroniliseks (elektronide nihkumine tuuma suhtes), iooniliseks (ioonide nihkumine ionkristallides) ja aatomiliseks (aatomite kovalentsest sidemest osavõtvate elektronide nihkumine molekulis).

Välise elektrivälja toimel muutub ka polaarsete dielektrikute dipoolmoment (elektroniline polarisatsioon esineb kõigis dielektrikutes), kuid polaarsetes dielektrikutes on dipoolsete molekulide orientatsioonist tingitud panus tunduvalt suurem kui molekulide täiendavast polariseerimisest saadav efekt.

Kaootiline soojusliikumine rikub dipoolide polarisatsiooni elektriväljas ja võiks arvata, et temperatuuri tõusuga dielektrikute polarisatsiooniaste väheneb.

Kuivõrd mittepolaarsete dielektrikute polarisatsioon on aga molekulisisene protsess, mille kulgemine ei sõltu temperatuurist, sõltub mittepolaarsete dielektrikute dielektriline läbitavus



JOON. 5

temperatuurist vähe, samal ajal aga väheneb polaarsete dielektrikute dielektriline läbitavus temperatuuri tõusmisel märgatavalt.

Õige suurt huvi ja praktilist väärtust pakub tutvumine senjettelektrikute omadustega. Selles küsimuses võib lasta õpilastel valmistada väikese referaadi.

Teema «Elektriväli keskkonnas» omandatuse kontrollimiseks on otstarbekas pühendada üks tund järgmist tüüpi ülesannete lahendamisele.

1. Öönsa isoleeritud metallkera tsentris asub laeng. Kas kera sisse paigutatud siidniidi otsas rippuv laetud koormus kaldub kõrvale, kui: a) kera ei ole maandatud; b) kera on maandatud?

2. Metallplaadile laengu pindtihedusega  $+\sigma$  on kantud õhuke dielektrikukiht. Näidake plaadi ja dielektriku elektrivälja suund. Kui suur on kihi elektrivälja tugevus ja dielektriline läbitavus, kui seotud laengu tihedus on  $\frac{\sigma}{4}$ ?

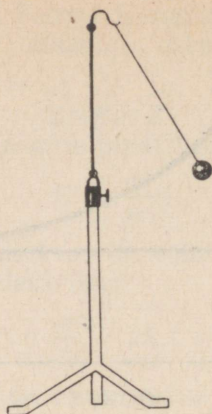
3. Milliste dielektrikute korral on saadud joonisel 5 toodud sõltuvused 1 ja 2?

4. Kui suur on laengu  $1,26 \cdot 10^{-5} \text{ C}$  keskmine tihedus kera pinnal raadiusega 2 m?

## 7. Potentsiaalide vahe

Selle küsimuse käsitlemisel tuleb ära kasutada õpilaste teadmisi kehade tööst ja potentsiaalsest energiast Maa raskusväljas.

Selle välja igas punktis mõjub kehale (näiteks kivile) Maa gravitatsioonijõud. Keha nihutamisel ruumis teeb see jõud tööd. Samuti on teada, et raskusväljas ei sõltu töö keha trajektoori kujust, vaid on määratud tema asendi alg- ja lõpp-punktiga (gravitatsiooniväli on potentsiaalne väli).



JOON. 6

Analoogilist olukorda täheldatakse laengu ümberpaigutamisel elektriväljas. Selle välja igas punktis on laeng jõu  $\vec{F} = q\vec{E}$  mõju all ja omab potentsiaalset energiat. Selle jõu mõjul vaba laeng nihkub ja välja jõud teevad seejuures tööd.

Õeldut võib illustreerida, demonstreerides elektriseeritud kuulikese tõusmist elektriväljas (joon. 6), ning seejärel arvutada töö, mida teevad elektrivälja jõud laengu nihutamisel.

Vastavalt energia jäävuse seadusele on töö  $\Delta A$ , mida teeb väli laengu  $q$  ümberpaigutamisel punktist 1 punkti 2, võrdne potentsiaalse energia vastandmargilise muuduga, s. t.

$$\Delta A = -\Delta\Pi = \Pi_1 - \Pi_2$$

Pärast meelevaldselt valitud laengu  $q$  puhul tehtud töö vaatlemist vaadeldakse välja proovilaengust sõltumatu karakteristiku saamiseks positiivse ühiklaengu nihkumisel tehtud tööd:

$$\frac{\Delta A}{q} = \frac{\Pi_1}{q} - \frac{\Pi_2}{q}$$

Suhet  $\frac{\Delta A}{q}$  nimetatakse punktide 1 ja 2 potentsiaalide vaheks ehk pingeks.

Tähistades

$$\frac{\Pi_1}{q} = \varphi_1 \text{ ja } \frac{\Pi_2}{q} = \varphi_2,$$

saadakse

$$\Delta\varphi_{1,2} = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Suhe  $\frac{\Pi}{q}$  kujutab endast positiivse ühiklaengu potentsiaalset energiat elektrivälja antud punktis ning seda nimetatakse elektrostaatilise välja potentsiaaliks.

Näitena on õpikus vaadeldud suurte, vastandmargiliselt laetud plaatide vahel tekkiva elektrivälja potentsiaali ja potentsiaalide vahet.

Tuleb rõhutada, et potentsiaal, nagu potentsiaalne energiagi, määratakse suvalise konstandi täpsusega.

Potentsiaalne energia — see on vastastikuse mõju energia, kuid tema väärtus sõltub potentsiaali nullpunkti valikust ja seetõttu omab praktilist väärtust mitte potentsiaal, vaid potentsiaalide vahe. Terves reas elektrotehnika praktilistes ülesannetes võetakse potentsiaali nullpunktiks Maa, teoreetilises füüsikas aga lõpmata kaugel punkt.

Seejärel tuleb määrata potentsiaali, aga järelikult ka potentsiaalide vahe ühikud CGSE- ja SI-süsteemis.

**Ekvipotentsiaalpinnad.** Tutvustanud õpilasi potentsiaali mõisega, tuleb näidata, et elektrivälja iseloomustamiseks võetakse välja jõujoonte pildi kõrval kasutusele veel ekvipotentsiaalpinnad — pinnad, millel välja potentsiaal on jääv. Ekvipotentsiaalpinnaks on näiteks laetud juhi pind. Laengute ümberpaigutamisel mööda selliseid pindu tööd ei tehta, s. t. piki neid pindasid välja jõujooned ei mõju (väljatugevuse puutujasuunaline komponent võrdub nulliga). Järelikult on elektrivälja jõujooned ekvipotentsiaalpinna risti.

Nüüd võib lasta õpilastel leida punktlaengu (või laetud kera) ekvipotentsiaalpinna kogumi, andes neile selleks potentsiaali valemi

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$$

Samuti võib ekvipotentsiaalpinna leida ühtlaselt laetud tasapinna puhul, mille laengu pindtihedus on  $\sigma$  ja potentsiaal avaldub valemiga

$$\varphi_2 = \frac{\sigma}{2\epsilon_0\epsilon} x,$$

kus  $x$  on antud punkti kaugus tasapinnast.

Esimesel juhul kujutavad ekvipotentsiaalpinnad endast kontsentrilisi sfääre, mille keskpunktis asub laeng, teisel juhul aga laetud tasapinnaga paralleelsete tasapinnade kogumikke.

Ühtlaselt laetud sirgjuhtme välja ekvipotentsiaalpinnaid võivad õpilased määrata iseseisvalt.

Üleminekul ühelt ekvipotentsiaalpinna teisele elektrivälja potentsiaal muutub. Nendes välja piirkondades, kus potentsiaal muutub punktist punkti liikudes kiiremini, asetuvad ekvipotentsiaalpinnaid tihedamalt.

**Elektrivälja kaks karakteristikut.** Elektrivälja iseloomustamiseks on kasutusele võetud kaks suurust: elektrivälja tugevus ja potentsiaal (või potentsiaalide vahe). Väljatugevus iseloomustab välja antud punkti asetatud positiivsele ühiklaengule mõjuvat

jõudu:  $\vec{E}(x, y, z)$  on välja selle punkti koordinaatide vektorfunktsioon. Kahe punkti potentsiaalide vahe määrab töö, mida tehakse positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise — see on kummagi punkti koordinaatide skalaarne funktsioon:  $\varphi(x_1, y_1, z_1) - \varphi(x_2, y_2, z_2)$ .

Määratakse kindlaks seos nende karakteristikute vahel.

Positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel tehtud tööd võib väikese nihke  $\vec{\Delta l}$  korral väljendada nii väljatugevuse  $\vec{E}$  kui ka potentsiaalide vahe  $\Delta\varphi$  kaudu (väikese nihke korral loetakse väljatugevust jäävaks):

$$\Delta A = \vec{E} \Delta \vec{l} = E_l \Delta l = -\Delta\varphi,$$

kus  $E_l$  on elektrivälja tugevuse vektori projektsioon suunal  $\vec{\Delta l}$  (õpikus joon. 142).

Siit

$$E_l = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta l}.$$

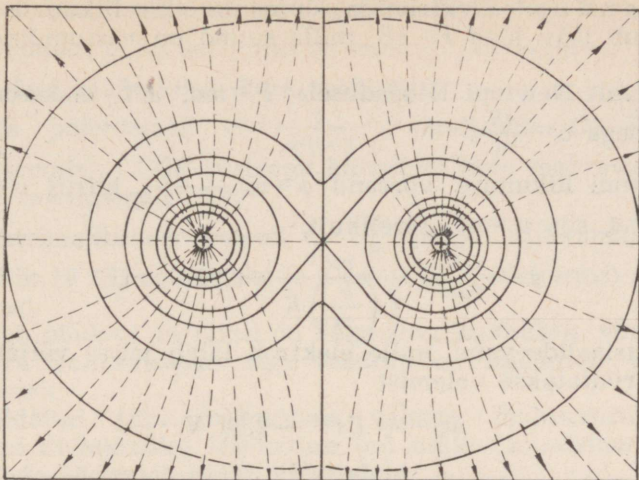
Järelikult on väljatugevuse komponent etteantud suunas võrdne punktide potentsiaalide vahe ja neid punkte läbivate ekvipotentsiaalpindade vahelise vähima kauguse suhte vastand-arvuga. Homogeenses elektriväljas kehtib toodud avaldis mis-tahes  $\Delta\varphi$  ja  $\Delta l$  puhul. Sellistes väljades asetsevad ekvipotentsiaal-pinnad üksteisest võrdsetel kaugustel.

Mitthomogeensetes väljades lähenevad ekvipotentsiaalpinnad väljatugevuse kasvamisel üksteisele, s. t. nad asetsevad tiheda-malt; nendes piirkondades, kus väljatugevus on nõrgem, aga hõredamalt (joon. 7). Sellisel juhul on tuletatud valem kehtiv vaid väikestel  $\Delta l$  väärtustel.

Vaadatud homogeense ja mitthomogeense välja ekvipotent-siaalpindasid, tuleb õpilastele meenutada nende väljade kujuta-mist jõujoonte abil. Seejärel oleks soovitatav veelkord täpsustada elektrivälja karakteristikute (jõukarakteristiku  $\vec{E}$  ja energeetilise karakteristikuga  $\Delta\varphi$ ) mõtet ja põhjendada nende kasutuselevõtmise vajadust.

Pärast esitatud materjali omandamise kontrollimist võiks ühe tunni lahendada järgmist tüüpi ülesandeid.

1. Üks plaatkondensaatori plaatidest on maandatud, teisele on antud potentsiaal 100 V. Plaatidevaheline kaugus on 4 cm. Määrata elektrivälja tugevus plaatide vahel.



JOON. 7

Selle ülesande lahendamisel tutvuvad õpilased plaatkondensaatori ehitusega, mahtuvuse mõiste tuleb alles hiljem. Meenutatakse, et Maa potentsiaal võetakse tinglikult võrdseks nulliga. Ülesande lahendamisel kasutatakse valemit  $E = - \frac{\Delta\varphi}{\Delta l}$ .

2. Keral raadiusega  $r$  on ühtlaselt jaotunud laeng  $+q$ . Leia kerapinna ja sellest väljaspool kauguse  $l$  asetseva punkti potentsiaalide vahe.

Lahendus (SI-süsteemis). Kera pinnal on potentsiaal  $\varphi_1 = \frac{q}{r}$ , pinnast kaugusel  $l$  aga  $\varphi_2 = \frac{q}{r+l}$ , seega potentsiaalide vahe

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{ql}{r(r+l)}.$$

3. Elektron hakkas liikuma homogeenses elektriväljas, mille tugevus  $E = 120 \frac{\text{V}}{\text{m}}$ , välja jõujoonte suunas algkiirusega  $v_0 = 1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$ . Kui pika vahemaa läbib elektron hetkeni, mil kiirus saab võrdseks nulliga? Elektroni laengu ja massi suhe  $\frac{e}{m}$  võrdub  $1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{C}}{\text{kg}}$ . Millise potentsiaalide vahe elektron läbis?

Sellise ülesande lahendamine on kasulik selle poolest, et siin vaadeldakse laengu tööd elektriväljas ja rakendatakse ka õpilaste teadmisi mehhaanikast.

L a h e n d u s. Elektrivälja jõujoonte sihis liikuvale elektronile mõjub jääv jõud  $F=eE$ , mille suund on vastupidine kiirusele  $v_0$ .

Vastavalt Newtoni II seadusele  $F=ma$ , s. t. elektron liigub kiirendusega  $a=\frac{eE}{m}$ .

Elektroni liikumise võrrand  $s=v_0t-\frac{at^2}{2}$ , kiirus  $v=v_0-at$ . Kuna  $v=0$ , siis  $v_0=at$ . Järelikult,

$$s = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{v_0^2}{2 \left( \frac{e}{m} \right) E} = 0,0237 \text{ m.}$$

Potentsiaalide vahe, mille elektron läbib jääva väljatugevuse korral, arvutatakse valemist

$$\Delta\varphi = -Es = -2,84 \text{ V.}$$

## 8. Elektrimahtuvus

Õppe-metoodilises kirjanduses on kasutusel kaks elektrimahtuvuse käsitlemise viisi, mida teineteisele sageli vastandatakse. Vastavalt esimesele vaadeldakse algul isoleeritud juhi mahtuvust, teisel juhul aga lähtutakse kondensaatori mahtuvusest. Esimesel juhul käsitletakse mahtuvust kui isoleeritud juhi iseloomustajat, mis võrdub tema laengu ja pinna potentsiaali suhtega, kusjuures potentsiaali nullpunktiks võetakse lõpmata kauge punkt. Teisel juhul vaadeldakse kahest võrdsete isenimeliste laengutega juhist koosneva süsteemi (kondensaatori) mahtuvust kui ühe juhi laengu suhet nende juhtide potentsiaalide vahesse.

Praktikas vaadeldakse kõige sagedamini juhtide süsteemi — kondensaatori mahtuvust.

Mahtuvuse ühikuid on sobiv tuletada, tuginedes isoleeritud juhi mahtuvuse määramisele.

**Eraldatud juhi elektrimahtuvus.** Juhi pind omab ühesugust potentsiaali, ta on ekvipotentsiaalne. Laadimata üksildase, nn. eraldatud juhi potentsiaal on võrdne nulliga. (Laadimata, kuid teistele kehadele küllalt lähedal asuva juhi potentsiaal võib elektriväljas nullist erineda.) Juhi laengu  $q$  suurendamisel suureneb ka tema potentsiaal  $\varphi$ . Seda väljendab ilmekalt katse kerakonduktoriga, mis on ühendatud demonratsioon-elektromeetriga, mille korpus on maandatud [5, katse 24; 4, katse 9]. Konduktori laengut muudetakse selles katses proovikuulikesega. Vaadeldakse laengu ja konduktori potentsiaali suhet ning konstateeritakse, et  $\frac{q_1}{\varphi_1} = \frac{q_2}{\varphi_2} = \frac{q_3}{\varphi_3} = \text{const.}$ , s. t. antud keskkonnas on eraldatud juhi laengu ja tema potentsiaali suhe jääv suurus, mida nimetatakse juhi elektrimahtuvuseks. Analoogiline

katse tehakse uuesti läbi teistsuguste mõõtmetega kerakondukto-  
riga, näidates, et ka sel juhul on suhe  $\frac{q}{\varphi}$  jääv suurus.

Seejärel määratakse kera mahtuvus.

Kera potentsiaal  $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r}$ , järelikult  $C = \frac{q}{\varphi} = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$   
(SI-süsteemis); CGSE-süsteemi korral on kera mahtuvus tühjuses  
võrdne raadiusega,  $C=r$ .

Elektrimahtuvuse valemi  $C = \frac{q}{\varphi}$  põhjal tuletatakse mahtu-  
vuse ühik 1F (SI-süsteemis) ja 1 cm (CGSE-süsteemis) ning nende  
vahekord.

Tuleb näidata, et farad on väga suur mõõtühik, võrdues sel-  
lise kera mahtuvusega, mille raadius on ligikaudu 10 miljonit  
kilomeetrit.

Eraldatud juhi mahtuvuse valemi, mahtuvusühikute ja  
vaakumi dielektrilise läbitavuse ( $\epsilon_0$ ) ühiku kindlaksmääramiseks võib  
lahendada järgmist tüüpi ülesandeid.

1. Isoleeritud kera raadius on 9 cm ja laeng  $3 \cdot 10^{-8}$  C. Kui  
suur on kera potentsiaal?

Selle ülesande lahendamisel tuleb eelistada CGSE-süsteemi,  
sest siis saab kera mahtuvuse arvutamiseks kasutada lihtsamat  
valemit.

L a h e n d u s. Kuna kera puhul  $C=r$ , siis potentsiaal  $\varphi = \frac{q}{r}$ .  
Järelikult,

$$\varphi = \frac{q}{r} = \frac{3 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^9 \text{ lü}}{9 \text{ cm}} = 10 \text{ pü} = 3000 \text{ V.}$$

2. Tuletada vaakumi dielektrilise läbitavuse  $\epsilon_0$  ühik SI-süs-  
teemis. Kera mahtuvuse valemist järeldub, et  $\epsilon_0 = \frac{C}{4\pi R}$ . Siit  
saame  $\epsilon_0$  ühikuks SI-süsteemis  $\frac{1F}{4\pi m}$ .

## 9. Kondensaatorid

Kondensaatorite õppimisel juhitakse õpilaste tähelepanu asja-  
olule, et tehnilised kondensaatorid on ehitatud selliselt, et väline  
väli neisse ei pääse. Seetõttu mõjutavad kondensaatorit ümbritse-  
vad laetud kehad tema juhtide (katete) laengut õige vähe ja  
kondensaator talletab talle antud laengu pikemaks ajaks.  
(Nimetus «kondensaator» tuleb ladinakeelsest sõnast *conden-  
sare* — koguma, tihendama.) Just see omadus määrabki konden-  
saatorite praktilise väärtuse.

Kondensaatori mahtuvus määratakse ühe katte laengu ja  
katetevahelise potentsiaalide vahe suhte absoluutväärtusega

$C = \left| \frac{q}{\Delta\varphi} \right|$ . Selle valemi abil võib saada plaatkondensaatori mahtuvuse valemi:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{l} \text{ (SI-süsteemis) ja } C = \frac{\epsilon S}{4\pi l} \text{ (CGSE-süsteemis).}$$

Analüüsides saadud mahtuvuse valemeid, tuleb veelkord rõhutada, et mahtuvus sõltub juhtide mõõtmetest ( $S$  ja  $l$ ), nende kujust ja neid ümbritseva keskkonna omadustest ( $\epsilon$ ).

Valemi  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l}$  eksperimentaalseks tõestuseks võib teha katse lahtivõetava plaatkondensaatori abil. Seejuures kasutatakse valemit  $\varphi = \frac{q}{C}$ .

Selleks registreerime elektromeetri näidud, muutes esiteks kondensaatori plaatidevahelist kaugust, kui nende vahel on õhk; seejärel jätame plaatidevahelise kauguse muutumatuks, kuid kasutame erinevaid dielektrikuid; lõpuks aga muudame plaatide kohakuti oleva pindala suurust. Näeme, et katse kinnitab sõltuvuse  $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{l}$  sisulist õigsust.

Näiteks, eemaldades plaate teineteisest, märkame elektromeetril potentsiaali  $\varphi$  suurenemist. Jääva laengu korral viitab see mahtuvuse  $C$  vähenemisele.

Selline mahtuvuse sõltuvus kondensaatori parameetritest võimaldab tema katetele koguda suhteliselt väikese potentsiaalide vahe korral suure laengu.

Seejärel tuleb vaadelda erinevat liiki jääva ja muutuva mahtuvusega kondensaatorite ehitust [5, katsed 26 ja 27 või 4, katse 11] ning asuda uurima järjestikku ja paralleelselt ühendatud kondensaatorite mahtuvust.

Saanud mahtuvuse valemi kondensaatorite kummagi ühendusviisi kohta (õpikus § 85), demonstreeritakse neid ühendusviise [5, katsed 28 ja 29 või 4, katse 12].

Tingimata tuleb rõhutada, et paralleelselt ühendatakse kondensaatorid suurema mahtuvuse saamiseks, kusjuures võib kasutada mistahes kondensaatoreid, kui need ei ole arvestatud madalamale pingele kui vooluallika pinge. Järjestikühendust kasutatakse siis, kui on tungiv vajadus saada väikest mahtuvust. Kui võrd kogupinge on võrdne pingete summaga üksikutel kondensaatoritel, võib sellise patarei ühendada ahelasse, mille pinge on suurem patareid moodustavate üksikute kondensaatorite lubatud pingest.

Kondensaatorite järjestikuse ja paralleelse ühenduse valemite kinnistamiseks võib lahendada järgmist tüüpi ülesande.

Milliseid mahtuvusi võib saada kolme kondensaatori abil, mille plaadid pindalaga  $6,3 \text{ cm}^2$  on eraldatud  $0,1 \text{ mm}$  paksuse vilgukivikihiga?

L a h e n d u s. Ühe kondensaatori mahtuvus (CGSE-süsteemis)  $C = \frac{\epsilon S}{4\pi l} = 700$  cm. Vaadelnud kõiki ühendamise võimalusi (kolm kondensaatorit järjestikku; paralleelselt; kaks paralleelselt, üks järjestikku), leitakse patareide mahtuvused kondensaatorite järjestikuse ja paralleelse ühenduse valemite järgi.

## 10. Elektrivälja energia

Määratud plaatkondensaatori elektrivälja energia  $\Pi$  sõltuvuse plaatidevahelise välja tugevusest  $E$ , plaatide pindalast  $S$  ja nendevahelisest kaugusest  $l$  (õpikus § 86)  $\Pi = \frac{\epsilon_0 \epsilon E^2 S l}{2}$ , tuleb juhtida õpilaste tähelepanu sellele, et see valem sisaldab ruumala  $V = Sl$ , millesse väli on kontsentreerunud.

Järelikult tuleb kondensaatori katetevahelise ruumala ühiku kohta energia (elektrivälja energia tihedus)

$$W = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} \text{ (SI-süsteemis) või } W = \frac{E^2}{8\pi} \text{ (CGSE-süsteemis).}$$

Saanud energia tiheduse valemi, tuleb veel kord rõhutada, et see valem ei sisalda kondensaatori parameetreid ja on seega kasutatav mistahes elektrostaatilise välja kirjeldamiseks (ta kehtib ka ajas muutuvate väljade korral).

Saadud valemite kinnistamiseks võib lahendada järgmised ülesanded.

1. 500 cm mahtuvusega kondensaatori katetele on antud potentsiaalide vahe 90 V. Määrata kondensaatori elektrivälja energia.

L a h e n d u s.

$$\Pi = \frac{C \Delta\varphi^2}{2} = \frac{500 \text{ cm} \cdot 90 \text{ V} \cdot 90 \text{ V}}{2 \cdot (300)^2} = 22,5 \text{ ergi.}$$

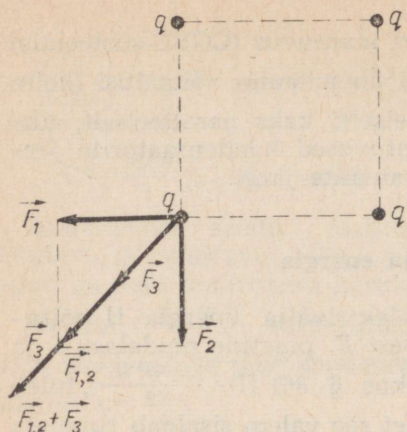
2. Kas laetud kondensaatori energia muutub, kui vähendada tema plaatidevahelist kaugust 2 korda?

L a h e n d u s. Plaatidevahelise kauguse muutumisel suureneb kondensaatori mahtuvus 2 korda ( $C_1 = \frac{S\epsilon}{4\pi l_1}$ ), potentsiaalide vahe aga väheneb kaks korda ( $\Delta\varphi = -El_1$ ;  $E = \text{const.}$ ), seetõttu kondensaatori elektrivälja energia

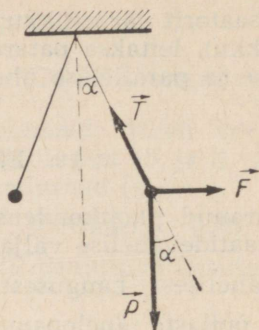
$$\Pi_1 \frac{C_1 (\Delta\varphi_1)^2}{2} = \frac{2C \left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)^2}{2} = \frac{C (\Delta\varphi)^2}{4} = \frac{\Pi}{2}$$

väheneb kaks korda.

Iseseisvaks lahendamiseks võib anda õpilastele küsimuse: «Kas muutub seejuures ka välja energia tihedus?»



JOON. 8



JOON. 9

Kasulik on lahendada ülesanne kondensaatori läbilöögi pinge arvutamisele (õpikust § 86 ülesanne nr. 2 iseseisvaks lahendamiseks), selgitades õpilastele, miks tekib dielektrikus läbilöök.

Teema «Elektrostaatika» materjali omandamise kontrollimiseks on otstarbekas lahendada kombineeritud ülesandeid.

1. Neli ühesugust positiivset punktlaengut  $q=10$  lü on asetatud ruudu tippudesse. Määrata kolme laengu mõju neljandale, kui ruudu külje pikkus on 10 cm.

L a h e n d u s. Igaüks neist neljast laengust mõjub ülejäänud kolmele, millest kaks asuvad vaadeldavast laengust kaugusel  $a$ , üks kaugusel  $a\sqrt{2}$  (joon. 8). Seepärast mõjub ükskõik millisele laengule kolm jõudu:  $F_1=F_2=\frac{q^2}{a^2}$  ja  $F_3=\frac{q^2}{2a^2}$ . Liites need jõud vektoriaalselt, saame

$$F=2F_1 \cos 45^\circ + F_3=1,91 \text{ dyn.}$$

See jõud on suunatud piki ruudu diagonaali väljapoole.

2. Kaks ühesuguse raadiuse ja massiga kuulikest on riputatud niitude abil õhku nii, et nad puudutavad teineteist. Kummalegi kuulikesele anti laeng  $q=4 \cdot 10^{-7}$  C. Pärast seda moodustasid niidid nurga  $60^\circ$ . Määrata kuulikeste mass, kui kaugus riputuspunktist kuulikesele keskmene  $l=0,2$  m.

L a h e n d u s. Kummalegi kuulikesele (joon. 9) mõjuvad kolm jõudu: raskusjõud  $P$ , kuloniline vastastikune mõju  $\vec{F}$  ja niidi elastsusjõud  $\vec{T}$ . Kuulikesele tasakaalu korral võrdub nende jõudude vektoriaalne summa nulliga (kõigi jõudude projektsioonide summa mistahes suunale on null).

Vaatleme jõudude horisontaal- ja vertikaalsuunalisi projektioone  $T\cos\alpha - P = 0$  ja  $F - T\sin\alpha = 0$ . Lahendades selle süsteemi, saame:

$$P = \frac{q^2 \cos\alpha}{16\pi\epsilon_0 l^2 \sin^3\alpha} = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{N}; \quad m \approx 6,2 \text{g}.$$

3. Leida elektrilaengu pindtihedus õõnsa metallkera välispinnal, kui kera raadius  $R = 20$  cm ning kera sees sfääri keskpunktis asub isoleerival pulgakesel kuulike laenguga  $q = +5,0$  lü.

Lahendus. Viies kuulikese laenguga  $q$  õõnsa metallkera sisse, indutseeritakse kera sisepinnal laenguga  $q$  võrdne, kuid erinimeline, välispinnal aga samanimeline laeng.

Kuna elektrostaatiline väli juhi sees on võrdne nulliga, siis kõik sfääri sees asuva kuulikese laengult lähtuvad jõujooned lõpevad kera sisepinnal indutseeritud laengutel. Seetõttu on sisepinnal indutseeritud negatiivne laeng võrdne kuulikese laenguga. Järelikult, ka suure kera välispinnale on jaotunud laeng  $q$  (sest tervikuna on suur kera neutraalne) ning laengute pindtihedus temal

$$\sigma = \frac{q}{S} = \frac{q}{4\pi R^2} = 1,01 \cdot 10^{-2} \frac{\text{lü}}{\text{cm}^2}.$$

4. Leida elektrivälja tugevus dipooli  $(+e, -e)$  telje keskrist-sirgel (joon. 10).

Lahendus. Elektrivälja tugevus punktis  $A$  on võrdne väljatugevuste  $\vec{E}_+$  ja  $\vec{E}_-$  geomeetrilise summaga, s. t.  $\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$ ;

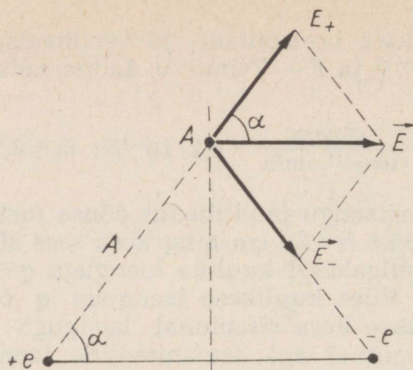
$$|E_-| = |E_+| = \frac{e^2}{R^2};$$

$$\begin{aligned} E &= E_+ \cos\alpha + E_- \cos\alpha = 2 \frac{e}{R^2} \cos\alpha = 2 \frac{e}{R^2} \frac{l/2}{R} = \\ &= \frac{el}{\left(h^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (\text{CGSE-süsteemis}), \end{aligned}$$

kus  $el$  on dipooli moment.

5. Õõnsa metallkera sees, mille raadius  $R = 1$  m ja laeng  $q_1 = +20$  lü, asub positiivse või negatiivse laenguga  $q = \pm 10$  lü väike kuulike. Määrata elektrivälja potentsiaal punktis, mille kaugus kera keskpunktist on  $r = 10$  R.

Lahendus. Elektrostaatilise induktsiooni tulemusena teki-vad kera sise- ja välispinnal võrdsed, kuid vastandmargilised laengud. Mistahes punktis kera sees on nende laengute poolt tekitatud väljatugevused võrdsed ja vastassuunalised, s. t. indut-seeritud laengute summaarne väli võrdub nulliga.



JOON. 10

Kera keskpunktist kaugusel  $r$  on elektrivälja potentsiaal võrdne laengu  $q_1$  potentsiaali  $\varphi_1 = \frac{q_1}{r}$  ja laengu  $q$  potentsiaali  $\varphi_2 = \frac{q}{r}$  summaga:

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \frac{q}{r} + \frac{q_1}{r} = \frac{q+q_1}{r} = \frac{q+q_1}{10R};$$

laengu väärtusel  $q = +10$  lü  $\varphi = 3 \cdot 10^{-2}$  pü, laengu väärtusel  $q = -10$  lü  $\varphi = 10^{-2}$  pü.

6. Plaatkondensaatori katete vahele tungib elektron kiirusega  $v = 2 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , mille suund on katetega paralleelne. Kui palju kaldub elektron kondensaatori läbimisel kõrvale oma esialgsest suunast, kui plaatidevaheline kaugus  $l = 2$  cm ja kondensaatori pikkus  $L = 5$  cm? Potentsiaalide vahe kondensaatori katete vahele on  $\Delta\varphi = 200$  V.

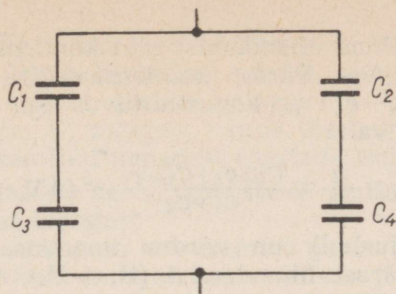
L a h e n d u s. Risti elektroni algkiirusega mõjub elektronile jõud  $F = Ee$ , kus väljatugevus kondensaatori plaatide vahel  $E = \frac{\Delta\varphi}{l}$ , seega  $F = \frac{\Delta\varphi}{l} e$ . Selle jõu mõjul saab elektron kiirenduse

$$a = \frac{F}{m} = \frac{e}{m} \frac{\Delta\varphi}{l} \text{ ja nihkub jõu mõju suunas kaugusele } x = \frac{at^2}{2}.$$

Aeg, mille jooksul elektron läbib kondensaatori,  $t = \frac{L}{v}$ . Järelikult,

$$x = \left( \frac{e}{m} \right) \frac{\Delta\varphi}{2l} \left( \frac{L}{v} \right)^2 = 5,4 \cdot 10^{-3} \text{ m.}$$

7. Kui suur elektrihulk läbib juhtmeid, mis ühendavad plaatkondensaatori katteid akumulaatori klemmidega, kui kondensaatore on asetatud petrooleumi ( $\epsilon = 2$ )? Kondensaatori plaatide



JOON. 11

pindala  $S = 150 \text{ cm}^2$ , plaatidevaheline kaugus  $l = 5 \text{ mm}$ , akumulaatori pinge  $U = 9,42 \text{ V}$ .

Lahendus. Plaatide potentsiaalide vahe  $\Delta\varphi$  on võrdne akumulaatori klemmipingega. Enne petrooleumisse asetamist on ühe plaadi laeng  $q_1 = C_1\Delta\varphi$ , kus  $C_1 = \frac{S}{4\pi l}$  on kondensaatori mahtuvus. Pärast kondensaatori asetamist petrooleumisse on plaadi laeng  $q_2 = C_2\Delta\varphi$ , kus  $C_2 = \epsilon C_1$ .

$$\begin{aligned} \text{Juhtmeid läbiv laeng } \Delta q &= q_2 - q_1 = (\epsilon - 1)C_1\Delta\varphi = \\ &= \frac{(\epsilon - 1)SU}{4\pi l} = 0,75 \text{ lü.} \end{aligned}$$

8. Neli kondensaatorit mahtuvusega  $C_1 = 3\mu\text{F}$ ,  $C_2 = 5\mu\text{F}$ ,  $C_3 = 6\mu\text{F}$  ja  $C_4 = 5\mu\text{F}$  on ühendatud joonisel 11 toodud skeemi kohaselt. Määrata patarei mahtuvus.

Lahendus. Kondensaatorid  $C_1$  ja  $C_3$ , aga ka  $C_2$  ja  $C_4$  on ühendatud järjestikku, moodustades kaks haru mahtuvusega

$$C_I = \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3} \text{ ja } C_{II} = \frac{C_2 C_4}{C_2 + C_4}.$$

Kondensaatorid  $C_I$  ja  $C_{II}$  on ühendatud paralleelselt, seetõttu kogu patarei mahtuvus

$$C = \frac{C_1 C_3}{C_1 + C_3} + \frac{C_2 C_4}{C_2 + C_4} = 4,5\mu\text{F}.$$

9. Kondensaatorid mahtuvusega  $C_1 = 1\mu\text{F}$  ja  $C_2 = 2\mu\text{F}$  on laetud vastavalt potentsiaalide vaheni  $\Delta\varphi_1 = 20 \text{ V}$  ja  $\Delta\varphi_2 = 50 \text{ V}$ . Pärast laadimist ühendati nad paralleelselt (ühendati samanimelised poolused). Määrata katete potentsiaalide vahe pärast kondensaatorite ühendamist. Kui suur soojushulk seejuures eraldus?

Lahendus. Enne ühendamist olid kondensaatorite laengud  $q_1 = C_1 \Delta \varphi_1$  ja  $q_2 = C_2 \Delta \varphi_2$ . Pärast kondensaatorite ühendamist on nende kogulaeng  $q = q_1 + q_2$ , kogumahtuvus aga  $C = C_1 + C_2$ . Otsitav potentsiaalide vahe

$$\varphi = \frac{q}{C} = \frac{C_1 \Delta \varphi_1 + C_2 \Delta \varphi_2}{C_1 + C_2} = 40 \text{ V.}$$

Eraldunud soojushulk on võrdne kondensaatorite energiatega vahega enne ja pärast ühendamist ( $\Pi_1 - \Pi_2$ ):

$$\Pi_1 = \frac{C_1 (\Delta \varphi_1)^2}{2} + \frac{C_2 (\Delta \varphi_2)^2}{2};$$

$$\Pi_2 = \frac{(C_1 + C_2) (\Delta \varphi)^2}{2} = \frac{(C_1 \Delta \varphi_1 + C_2 \Delta \varphi_2)^2}{2(C_1 + C_2)};$$

$$\Delta Q = \Pi_1 - \Pi_2 = \frac{C_1 C_2 (\Delta \varphi_1 - \Delta \varphi_2)^2}{2} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J.}$$

Teema «Elektrostaatika» kinnistamisel ja omandatud materjali kontrollimisel vaadeldakse õpilastega kvalitatiiivse sisuga ülesandeid.

1. Mille poolest ühtivad ja mille poolest erinevad elektri-laeng ja gravitatsiooni massi mõisted?

Nende mõistete sarnasus seisneb selles, et nii mass kui laeng kujutavad endast kehade (osakeste) vastastikuse mõju arvulist mõõtu.

Kuid laeng iseloomustab vastastikust elektromagnetilist, mass — gravitatsioonijõudu (massi teiseks väljenduseks on inert-suse mõõt). Peale selle seisneb erinevus veel selles, et mass on positiivne suurus, gravitatsioonijõud aga alati tõmbejõud. Elektri-laengud võivad olla nii positiivsed kui negatiivsed, mis avaldub kaht liiki vastastikuse mõju olemasolus nende vahel: tõukumises (sanimeliste laengute vahel) ja tõmbumises (erinimeliste laengute vahel).

2. Miks tõmbab laetud kamm külge elektriliselt neutraalseid paberitükikesi?

Laetud kammi elektrivälja mõjul toimub elektriliselt neut-raalse dielektriku (paberi) polarisatsioon. Dielektriku molekulid pöörduvad kammi poole poolusega, mille märk on vastupidine kammi laengu märgile.

Sel viisil tekib paberitüki kammipoolsel otsal kammi laengule vastupidise märgiga, kaugemas otsas aga samanimeline laeng. Seetõttu ületab erinimeliste laengute tõmbejõud samanimeliste laengute tõukejõu.

3. On teada, et siidriidega hõõrumisel saab klaaspulk positiivse laengu. Määrake katseliselt laengu märk siidiga hõõrutud plastmassist sulepeal.

Kui elektriseeritud klaaspulga lähendamisel plastmassist sule-peale need kehad tõukuvad, siis on sulepea laetud samanimeliselt,

s. t. positiivselt. Kui need kehad tõmbuvad, siis — negatiivselt. Kui aga sulepea lebab krobelistel pinnal, ei nihku ta seni, kuni paigaloleku hõrdejõud ületab sulepea ja klaaspulga vahelise elektrilise mõjujõu. Et märgata nende tõmbumist või tõukumist, tuleb üks elektriseeritud kehast riputada isoleeriva niidi külge.

4. Kas võib laetud keha abil saada antud laengust mitmekordselt suuremat laengut?

Antud laengu abil saab indutseerida juhis laengud ja seejärel võime temas tekkinud laengud kas eraldada (eraldades keha erinimiselt laetud osad) või maandada ühtliiki laengud.

Tehes seda mitme juhiga, võib saada summaarse laengu, mis on antud laengust suurem.

5. Kas elektriväljas vabalt liikuva laetud osakese trajektoor ühtib selle välja jõujoontega?

Üldjuhul ei ühti, sest osakese trajektoori puutujad ühtivad tema kiiruse suunaga, jõujoone puutujad aga osakesele mõjuva jõu suunaga, s. t. kiirenduse suunaga. Kiiruse ja kiirenduse suund ühtivad aga ainult sirgjoonelise liikumise korral. Järelikult ühtib laetud osakese liikumise trajektoor jõujoontega vaid tingimusel, kui jõujooned on sirged (punktlaengu, laetud kera, silindri, tasapindade välja korral).

6. Õhuke laetud metall-leht on vihikulehe mõõtmetega. Kas võib määrata elektrivälja tugevuse 0,5 cm kaugusel sellest, kasutades valemit  $E=2\pi\sigma$ ?

Koolivihiku leht on mõõtmetega 16×20 cm. Lehe servadest eemal, lehest  $r=0,5$  cm kaugusel, võib väljatugevuse arvutada valemiga, mis on toodud lõpmatu laetud tasandi kohta. Kuna  $r$  on tunduvalt väiksem lehe joonmõõtmetest, siis võib lugeda lehe lõpmatusse ulatuvaks tasandiks.

7. Kuidas saaks katseliselt tõestada, et juhi laengu pindtihedus on maksimaalne teravikul?

a) Laengute suure pindtiheduse korral hakkavad nad teravikult «ära voolama», ioniseerides teraviku läheduses olevaid õhu molekule. Tervikult lähtuvat ionide voogu (elektrituult) võib nähtavaks teha «Franklini ketta» pöörlemisega [5, katse 14, joon. 39].

b) Kui ebaühtlase pinnakõverusega juhi külge kleepida paberiribakesed, siis nendes osades, kus pinna kõverus on suurem, tõukuvad lehekese laetud juhust suurema nurga all.

8. Kondensaatorite ühendamisel järjestikku on patarei mahtuvus väiksem üksikute, teda moodustavate kondensaatorite mahtuvustest. Kas on peale mahtuvuse vähenemise veel teisi põhjusi, mis sunnivad kasutama kondensaatorite järjestikühendust?

Järjestikühendust kasutatakse ka siis, kui kondensaatorid lülitatakse ahelasse, mille pinget ületab üksikutele patarei koostisse kuuluvatele kondensaatoritele arvestatud pinget.

Näiteks kondensaatorit, mis on arvestatud pingele 220 V, ei tohi lülitada ahelasse pingega 380 V, kaht sellist järjestikku ühendatud kondensaatorit aga võib, sest sel juhul on pinge kummalgi 190 V, s. t. lubatud maksimaalsest isegi väiksem.

### 11. Teema «Elektrostaatika» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku paragrahvid
1.	Elektrodünaamika alused (sissejuhatus). Elektriliselt laetud osakesed ja elektrilaeng. Elektriseerimine hõordel. Elektrilaengu jäävuse seadus.	§ 61-64
2.-3.	Coulomb'i seadus. Elektrilaengu ühikud. Ülesannete lahendamine.	§ 65-66
4.	Lähi- ja kaugmõju. Faraday ideed. Elektromagnetilise vastastikuse mõju levimise kiirus.	§ 68, 69 (I osa)
5.	Elektriväli. Elektrivälja tugevus. Superpositsiooni printsiip.	(§ 69 II osa), § 70
6.	Ülesannete lahendamine.	
7.	Elektrostaatilise välja jõujooned.	§ 71
8.	Ühtlaselt laetud kera ja lõpmatu tasandi elektriväli. Ülesannete lahendamine.	§ 73
9.	Juhid elektrostaatilises väljas. Elektrostaatilise induktiooni nähtus (küsimusülesannete põhjal).	§ 72
10.	Dielektrikud elektriväljas. Ülesannete lahendamine.	§ 74, 75
11.	Elektrostaatilise välja potentsiaalide vahe ja potentsiaal. Potentsiaali ühikud.	§ 76, 77, 79
12.	Ülesannete lahendamine.	
13.	Elektromeetri ehitus. Potentsiaalide vahe katseline mõõtmine. Ülesannete lahendamine.	
14.	Elektrostaatilise välja kaks karakteristikut ja nende vaheline seos. Ülesannete lahendamine.	§ 78
15.	Isoleeritud juhi mahtuvus. Kera mahtuvus. Elektrimahtuvuse ühikud.	§ 81, 82
16.-17.	Kondensaatorid. Plaatkondensaatori mahtuvus. Kondensaatorite ühendamine (paralleel-, järjestik- ja segaühendus). Ülesannete lahendamine.	§ 83, 84, 85
18.	Elektrivälja energia.	§ 86
19.	Ülesannete lahendamine.	
20.	Kirjalik kontrolltöö või teadmiste kontrollimine valikvastustega ülesannete abil.	

## II. ALALISVOOL

Käesolevas peatükis tuuakse sisse fundamentaalsed mõisted: vool ja voolu tihedus, takistus ja juhtivus, vooluallika emj. ja ahela pinge ning selgitatakse välja nende suuruste vahelised seosed, ühtlasi uuritakse alalisvooluringis toimuvaid energia muundumisi.

Mõningate siin vaatluse alla võetud suuruste ja seadustega (voolutugevus, pinge, takistus, Ohmi seadus vooluringi osa kohta,

voolu töö ja võimsus) on õpilased tuttavad juba VIII klassi füüsikakursusest.

Kohe algul pole võimalik õpilastele selgitada erinevust elektrostaatilisest väljast ja vooluga juhi elektrivälja vahel, samuti kõrvaliste jõudude osa suletud vooluringis. Toetudes teadmistele, mis õpilastel on elektrostaatilisest väljast ja Ohmi seadusest vooluringi osa kohta, tuleb neile küsimustele läheneda järk-järgult ja alles seejärel uurida Ohmi seadust suletud ja hargnenud vooluringide kohta.

Käsitlenud Ohmi seadust suletud vooluringide kohta ja andnud õpilastele ettekujutuse elektrivooluringi elementidest, nende vastastikusest seosest ja ülesandest, tuleb asuda raske, kuid väga vajaliku ülesande juurde — alalisvoolu seaduste tõlgitsemisele klassikalise elektroniteooria seisukohalt (õpikus ptk. XI).

## 12. Elektrivool

Selle teema õppimist alustatakse elektrivoolu kui laetud osakeste (elektronide, ionide) korrastatud liikumise ja voolu toimete (soojusliku, magnetilise, keemilise) kordamisega. Seejärel tuuakse sisse elektrivoolu kvantitatiivsed iseloomustajad: voolutugevus ja voolutihedus ning nende mõõtühikud. Voolutugevus kirjeldab laetud osakeste voogu tervikuna, voolutihedus — protsessi juhi või voo mistahes punktis.

Elektriahelas eralduva võimsuse, ahelat läbinud elektrihulga jne. arvutamiseks kasutatakse voolutugevust; voolutiheduse kaudu väljendatakse antud ainek valmistatud juhtme, kaabli või elektroodi lubatud koormust.

Seejärel võib asuda voolude vaatlemisele vooluringi hargnemispunktidest. Näidatakse, et alalisvoolu korral laengud ei kuhju sõlmedes, seetõttu

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0,$$

s. t. vooluringi hargnemispunkti läbivate voolude tugevuste algebraline summa on null (suubuvad voolud võetakse tingilikult märgiga «pluss», väljuvad — märgiga «miinus»).

Seejärel, näidates ülesannete lahendamisel voolude suundi, ei tohi kõiki voolusid hargnemispunkti või sealt ära juhtida (see oleks vastuolus elektrihulga jäävuse seadusega).

Tunnis toodud mõisteid ja sõltuvusi kinnistatakse järgmist tüüpi ülesannete lahendamisega.

1. Määrata voolutugevus ja -tihedus, kui aja  $t=10$  s jooksul läbis juhi ristlõiget elektrihulk  $q=10$  C. Juhi ristlõike pindala  $S=5$  mm<sup>2</sup>.

Vastus.  $j = 2 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$ ;  $I = 10 \text{ A}$ .

2. Hinnata elektronide tihedust (kontsentratsiooni) vaskjuhis ning määrata elektronide ümberpaiknemise kiirus eelmise ülesande põhjal.

Selle ülesande lahendus on toodud õpikus § 91.

**Elektrivoolu tekkimise tingimused juhis.** Igas aines on teatud hulk vabu laenguid, kuid sellest ei piisa veel voolu tekkimiseks temas. Laetud osakeste liikumiseks ja selle säilitamiseks on vajalik kindlas suunas mõjuva jõu olemasolu. Niisugune jõud mõjub juhi vabadele laengutele  $e$ , kui temas on elektriväli  $\vec{E}$

$$\vec{F} = e\vec{E}.$$

Kuid elektrostaatiline väli põhjustab vabade laengute ümberpaiknemist ainult seni, kuni ümberjaotunud laengute elektriväli ei kompenseeri välist välja.

Järelikult, püsiva voolu saamiseks juhis tuleb säilitada selles elektriväli.

Mille poolest erineb see väli laetud juhi elektrostaatilisest väljast?

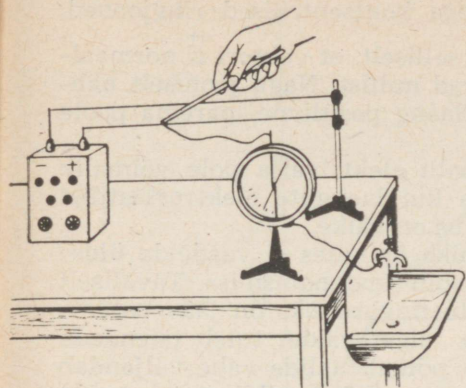
Laetud juhi elektrostaatiline väli eksisteerib ainult väljaspool juhti, juhi sees võrdub ta nulliga, laetud juhi pind on aga ekvipotentsiaalpind. Laengute ümberpaiknemiseks juhi sees peab selles olema elektriväli. Ajaliselt püsivat elektrivälja, mis tekitab juhis püsiva voolu, mille tugevus hargnemata juhi mistahes ristlõikes oleks ühesugune, nimetatakse statsionaarseks väljaks.

Statsionaarne elektriväli juhis on võrdväärne potentsiaalide vahe olemasoluga juhi otstel: vooluga juhi erinevate punktide potentsiaalid ei ole võrdsed.

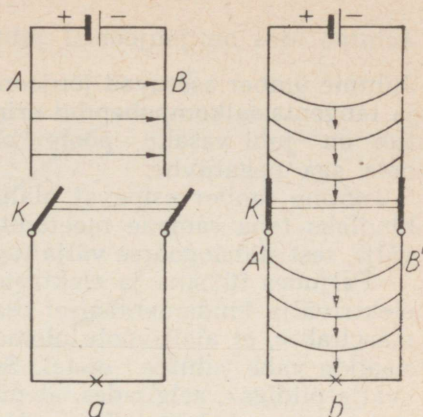
Seda võib näidata, mõõtes voolu all oleva märja niidi erinevate punktide potentsiaale (joon. 12) [5, katse 33 või 4, katse 16].

Vaatleme nüüd elektrivoolu tekkimist mingis vooluringis. Olgu vooluring katkestatud kahepoolse vinnaklüliti  $K$  abil (joon. 13, a). Ülemises osas on juhtme punktide  $A$  ja  $B$  vahel teatud potentsiaalide vahe.

Lüliti sulgemisel (joon. 13, b) kandub elektriväli liini  $A'B'$  ja levib selles kiirusega, mis on lähedane valguse levimise kiirusele. (Täpsemalt öeldes, piki liini levib elektromagnetiline laine.) Kuna väli levib suure kiirusega, siis viiakse laengud lühikese liini puhul korrapärasesse liikumisse peaaegu üheaegselt kogu liini ulatuses. Metallis on konkreetsete voolukandjate (elektronide) kiirus seejuures väga väike. Nagu eelmises tunnis (õpikus § 91) näidati, on nende ümberpaiknemise kiirus valguse kiirusest ligikaudu  $10^{13}$  korda väiksem. Pärast lühiajalist üleminekurežiimi, mille kestus sõltub liini takistusest ja teistest omadustest, moodustub vooluringi juhtmetes ja neid ümbritsevas ruumis ajas



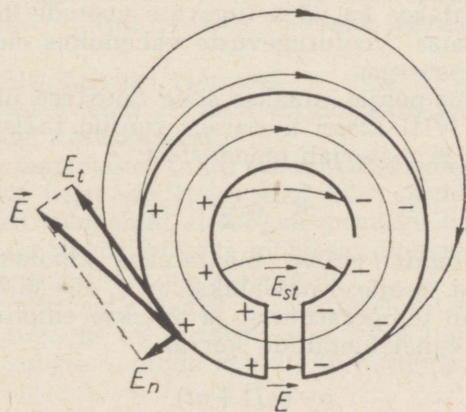
JOON. 12



JOON. 13

muutumatu väli — statsionaarne elektriväli. Elektrivälja püsi-  
vaks säilitamiseks vooluringi juhtmetes on vaja mingeid väliseid  
jõude. Seda ülesannet täidabki vooluallikas. Igas vooluallikas  
toimub pidevalt mingi energialiigi muundumine elektrieniaks.  
Vooluallika klemmidel on erimärgilised laengud, s. t. vooluallika  
klemmide vahel on potentsiaalide vahe. Tänu sellele hoiab voo-  
luallikas juhtmetes alal elektrivälja. Huvitav on märkida, et  
vooluga juhtme pind on laetud.

Joonisel 14 on piltlikult näidatud jõujoonte konfiguratsioon  
rõngakujulises vooluringis, mille pilusse on lülitatud vooluallikas.



JOON. 14

Juhtme sees on jõujooned juhtmega kontsentrilised ringjooned.

Juhtme ümber asetuvad jõujooned selliselt, et vektori  $\vec{E}$  normaal- ja tangentsiaalkomponendid erinevad nullist. Nagu jooniselt nähtub, on juhi vasaku poole pindlaeng positiivne, parema poole oma aga negatiivne.

Juhtme ümber esinevat alalisvoolu elektrivälja pole võimalik kindlaks teha samade meetoditega kui laengute elektrostaatiliselt välja, sest statsionaarse välja tugevus on väike.

Paljudes füüsika ja elektrotehnika õpikutes ei vaadelda üldse elektrivälja fundamentaalset osa voolu «mehhanismis». Tavaliselt märgitakse, et alalisvoolu olemasolu tingimuseks on jääv potentsiaalide vahe juhtme otstel. Seda õiget väidet tuleb täiendada «välja pildiga», selgitades, et püsiv potentsiaalide vahe väljendab statsionaarse elektrivälja olemasolu. Välja pildi sissetoomine määrab kindlaks õige põhjusliku seose — elektrivoolu tekitab vooluallika poolt juhitud alalhoitav statsionaarne elektriväli.

### 13. Ohmi seadus vooluringi osa kohta

Selle teema käsitlemisel X klassis toetutakse õpilaste varasematele, VIII klassis saadud teadmistele. Siin on otstarbekas korrata katseid, mis kinnitavad Ohmi seadust (vt. A. V. Pjorõškin ja N. A. Rodina «Füüsika VIII klassile», § 66, 70).

Ohmi seaduse põhjal võib õpilastele näidata, et füüsika seadused, ka kõige täpsemad, kehtivad vaid teatud kindlas füüsikaliste suuruste vahemikus. Nii ei kehti Ohmi seadus väga nõrkade voolude korral, kui hakkab avalduma voolukandjate fluktuatsiooni mõju (juhi ristlõiget läbinud elektronide arv on niivõrd väike, et statistilised seadused ei ole kasutatavad). Kõrvalekaldumisi Ohmi seadusest täheldatakse ka väga tugevate voolude korral.

Kuid väga laias voolutugevuste vahemikus on Ohmi seadus kehtiv suure täpsusega.

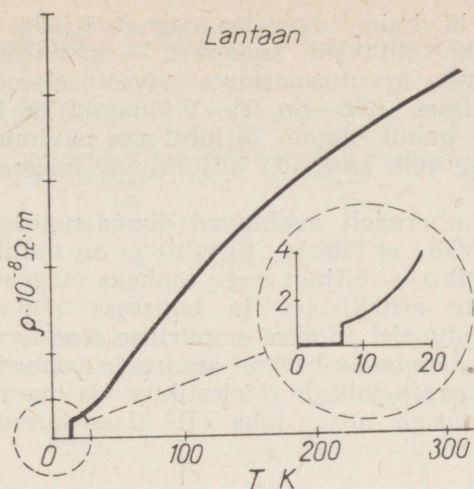
Valemi  $I = \Lambda \Delta \varphi$  põhjal tuuakse sisse takistuse ühik oom. Seejärel korratakse VIII klassi kursusest tuntud takistuse sõltuvust juhi mõõtmetest, ja materjali omadustest:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Kasutades valemit  $I = \Lambda \Delta \varphi$ , määratakse kindlaks eritakistuse  $\rho$  füüsikaline sisu. Seejärel näidatakse, et  $\rho$ , aga järelikult ka juhi takistus  $R$ , sõltub temperatuurist ja antakse empiiriliselt saadud sõltuvus  $\rho$  ja  $t$  vahel metallide korral:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t),$$

selgitades suuruste  $\rho_0$  ja  $\alpha$  füüsikalist sisu.



JOON. 15

Lõpuks vaadeldakse selle nähtuse praktilist rakendamist takistustermomeetrites.

Antud sõltuvus juhi takistuse ja temperatuuri vahel ei ole kehtiv tahke metallilise juhi temperatuurimuutuste vahemiku terves ulatuses: mõningate metallide ja sulamite jahutamisel muutub nende takistus mingis küllalt suures temperatuurivahe-  
mikus lineaarselt, seejärel lineaarne sõltuvus kaob ja absoluutse nulli lähedastel temperatuuridel väheneb takistus järsult (peaaegu nullini). Soovitav on vaadelda sõltuvuse  $\rho(T)$  graafikut, mis sisaldab kriitilist temperatuuri — temperatuuri, mille juures toimub üleminek ülijuhtivusele, näiteks, lantaantraadi puhul<sup>1</sup> (joon. 15).

Peatumata ülijuhtivuse olemusel ja aine ülijuhtivusele ülemineku iseärasustel, võib rääkida ülijuhtivate materjalide omadustest ja nende kasutamisest.

Ülijuhtivast materjalist traati kasutatakse solenoidide valmistamisel. Kui lasta neist läbi tugev vool, võib saada tugevaid magnetvälju. Sellised solenoidid ei soojene peaaegu üldse, samal ajal kui tavalise (mitteülijuhtiva) mähisega solenoididest eraldub tugevate väljade puhul tohutu soojushulk.

Kuid ka ülijuhtivast traadist valmistatud solenoidides saadud magnetväljade tugevus on piiratud, sest väga tugevates magnetväljades (väga suurte voolude korral) ülijuhtivus hävib.

<sup>1</sup> Graafik on võetud raamatust Ч. Уэрт, Р. Томсон. Физика твердого тела. М., «Мир», 1969.

Ülijuhtivuse hävimine tugevates magnetväljades annab võimaluse luua ümberlülitavaid seadmeid — krüotrone. Krüotrone kasutatakse näiteks arvutusmasinate salvestuselementidena.

Reas ülijuhtides (Nb—Sn, Ti—V sulamid) on kriitilise välja tugevus, mille puhul algab ülijuhtivuse hävimine, väga suur. Selliseid ülijuhte võib kasutada ülijuhtivate magnetite valmistamiseks.

Ülijuhtidel on eredalt avalduvad diamagnetilised omadused. Väline magnetväli ei läbista ülijuhti ja on nullist erinev vaid õhukeses pinnakihis — ülijuht nagu tõukaks magnetvälja eemale.

Elektrolüütide eritakistuse ja takistuse temperatuuriteguri sõltuvus temperatuurist antakse empiirilise seadusena.

Ülesannete lahendamisel Ohmi seadusele vooluringi osa kohta on soovitatav korrata juhtide järjestikust ja paralleelset ühendust, mis on õpilastele tuttav juba VIII klassi kursusest.

#### 14. Joule'i-Lenzi seadus

Joule'i-Lenzi seaduse vooluringi osa kohta võivad õpilased töötada läbi iseseisvalt. Soovitatav on demonstreerida järgmist huvitavat katset. Piki klassitahvlit tõmmatakse pingule traat, mis koosneb vaheldumisi ühendatud (võrdse ristlõikega) raud- ja vasktraadi lõkudest. Kui juhtida sellisesse traati vool, kuumenevad raudtraadi lõigud hõõgumiseni, vasktraadi lõigud jäävad aga tumedaks ( $Q=f(R)$ ). Voolutugevuse suurenemisel tugevneb ka hõõgumine ( $Q=f(I)$ ).

Kui vool läbib vooluringi osa, siis elektrivälja jõud teevad tööd, mis arvuliselt on võrdne juhi siseenergia muuduga, mis seejärel eraldub teatud soojushulgana. Seoses sellega tuleb vaadelda voolu soojusliku toime praktilisi rakendusi (elektrivalgustus- ja soojendusseadised, elekterkeevitus ja elektersulatus).

Seda materjali on kasulik kinnistada ülesannete lahendamiseks. Oleks soovitatav, et ülesannete lahendamise käigus õpilased veenduksid, et järjestikku ühendatud juhtmetes eralduva soojushulga või võimsuse arvutamiseks on otstarbekas kasutada valemeid  $Q=kI^2Rt$ ,  $P=I^2R$  (vool on juhtmetes ühesugune), paralleelse ühenduse korral aga

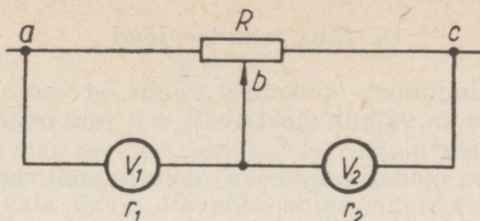
$$Q=k \frac{(\Delta\varphi)^2}{R} t \text{ ja } P=\frac{(\Delta\varphi)^2}{R},$$

sest paralleelselt ühendatud juhtide otstel on pinge ühesugune.

#### Ülesanded

1. Kas võib lülitada 220 V pingega võrku kaks lampi võimsustega  $P_1=40$  W ja  $P_2=200$  W, kui kumbki neist on arvestatud pingele  $\Delta\varphi_0=127$  V?

Lahendus. 1) Paralleelselt neid lülitada ei tohi, sest pinge on lubatust tunduvalt kõrgem.



JOON. 16

2) Järjestikusel ühendusel  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2$  — pinge on võrdne pingete summaga kummalgi lambil, aga voolutugevus  $I_1 = I_2$ , s. t.

$$\frac{\Delta\varphi_1}{R_1} = \frac{\Delta\varphi_2}{R_2} \text{ ehk } \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Lampide võimsused on pöördvõrdelised nende takistustega:

$$P_1 = \frac{(\Delta\varphi_0)^2}{R_1}; \quad P_2 = \frac{(\Delta\varphi_0)^2}{R_2}$$

ehk

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{5}{1}.$$

$$\text{Järelikult, } \Delta\varphi = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 \text{ ja } \frac{\Delta\varphi_1}{\Delta\varphi_2} = 5.$$

Lahendades need võrrandid, saame  $\Delta\varphi_2 \approx 37 \text{ V}$ ;  $\Delta\varphi_1 \approx 183 \text{ V}$ . Väikese võimsusega lamp põleb voolu sisselülitamisel kiiresti läbi, suure võimsusega lamp hakkab aga vaevu hõõguma.

2. Reostaadiga, mille takistus on  $R = 5 \text{ k}\Omega$ , ühendati kaks voltmeetrit sisetakistustega  $r_1 = 6 \text{ k}\Omega$  ja  $r_2 = 4 \text{ k}\Omega$ . Reostaadi  $R$  otstele ( $a$  ja  $c$ , joon. 16) rakendati pinge  $\Delta\varphi = 180 \text{ V}$ . Määrata voltmeetrite näidud, kui liikuv kontakt  $b$  on reostaadi keskel. Juhtmete takistus jätta arvestamata.

Lahendus. Punktide  $a$  ja  $b$  vahele paralleelselt ühendatud reostaadi  $\frac{R}{2}$  ja voltmeetri  $V$  takistus on  $R_1 = \frac{r_1 R}{2r_1 + R}$  ning vastavalt punktide  $b$  ja  $c$  vahelise osa takistus  $R_2 = \frac{r_2 R}{2r_2 + R}$ . Ahela kogutakistus ja vool on:

$$R_3 = R_1 + R_2 = \frac{R[R(r_1 + r_2) + 4r_1 r_2]}{(2r_1 + R)(2r_2 + R)}; \quad I = \frac{\Delta\varphi}{R_3}.$$

Voltmeetrite näidud on:

$$\Delta\varphi_1 = IR_1 = \frac{\Delta\varphi R_1}{R_3} = \frac{r_1(2r_2 + R)\Delta\varphi}{4r_1 r_2 + (r_1 + r_2)R} = 96 \text{ V}.$$

$$\Delta\varphi_2 = \Delta\varphi - \Delta\varphi_1 = 84 \text{ V}.$$

## 15. Elektromotoorjõud

Voolu tekketingimuste uurimisel selgus, et voolu tekitamiseks ja alalhoidmiseks on vajalik elektriväli, s. t. juhi otstel peab olema potentsiaalide vahe.

Eelnevalt juba näidati, et püsiva voolu kutsub vooluringis esile statsionaarne elektriväli, mida pidevalt hoiab alal vooluallikas. Kuna vool omab juhis teatud energiat, mis eraldub tavaliselt soojusena, on vajalik mingi energialiigi pidev muundumine elektrienergiaks. Teisiti öeldes, peale statsionaarse elektrivälja kuloniliste jõudude peavad laengutele mõjuma veel mingid mitteelektrostaatilise olemusega jõud — kõrvalised jõud.

Piisab, kui need jõud mõjuvad kasvõi suletud vooluringi ühes osas. Nende jõudude iseloomustamiseks tuuakse sisse suurus  $E_h$ , mida nimetatakse kõrvaliste jõudude elektrivälja tugevuseks.  $E_h$  on arvuliselt võrdne positiivsele ühiklaengule mõjuva jõuga. (See võib olla mistahes jõud, välja arvatud elektrostaatilise välja jõud.)

Kõrvalised jõud mõjuvad vooluringi üksikutes osades (vooluallikates) ja nende jõudude töö arvel toimub kogu elektrivoolu töö. Selle töö arvuliseks iseloomustajaks on elektromotoorjõud (emj.) — kõrvaliste jõudude töö positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel vooluringi osas, kus need jõud mõjuvad, s. t. vooluallika sees.

Sageli määratlevad õpilased emj. kui potentsiaalide vahet avatud vooluallika klemmidel (poolustel), näidates sellega emj. mõõtmise meetodit, mitte aga tema füüsikalist sisu.

Elektromotoorjõu mõiste füüsikaline sisu saab mõistetavamaks, kui selgitada, et vooluallika emj. on võrdne ühiklaengu ümberpaigutamiseks kogu kinnise vooluringi ulatuses tehtud tööga. See töö tehakse vooluallika sees ühiklaengule mõjuvate kõrvaliste jõudude arvel.

Vooluallika emj. mõistet kasutatakse Ohmi seaduse õppimisel kinnise vooluringi kohta.

## 16. Ohmi seadus kinnise vooluringi kohta

Määratud kindlaks Ohmi seaduse kujus  $I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}$  (vaata õpikust § 97), on vaja näidata ka selle valemi teist kirjutusviisi  $\mathcal{E} = IR + Ir$ , s. t. vooluallika emj. on võrdne vooluringi välis- ja siseosa pingelangude summaga.

Seejärel tehakse üldistus vooluringi kohta, milles on mitu järjestikku ühendatud vooluallikat. Sellise vooluringi üldine emj. kujutab endast kõigi ühendatud vooluallikate emj. algebralist summat:

$$\mathcal{E} = \sum_{i=1}^n \mathcal{E}_i.$$

Kasutades Ohmi seadust kinnise vooluringi kohta, võib määrata vooluallika elektromotoorjõu suuruse:

$$\Delta\varphi = IR, \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R+r}.$$

Järelikult,

$$\Delta\varphi = \frac{\mathcal{E}}{R+r} \quad R = \frac{\mathcal{E}}{1 + \frac{r}{R}},$$

Kui  $R \rightarrow \infty$ , s. t. vooluring on avatud, siis  $E = \Delta\varphi$ . Avatud välisahela korral on vooluallika elektromotoorjõud võrdne klemmipingega. Koostades kinnise vooluringi vooluallikast, muudetavast välisest takistusest, ampermeetrist ja vooluallika klemmidega ühendatud voltmeetrist, võib näidata, et välistakistuse suurenemisel vooluallika klemmipinge  $\Delta\varphi$  kasvab, takistuse vähenemisel  $\Delta\varphi$  kahaneb. Samale tulemusele jõutakse Ohmi seadust kinnise vooluringi kohta väljendava valemi analüüsimisel.

Õpitava materjali kinnistamiseks soovitatakse järgmist tüüpi ülesandeid.

1. Patarei emj.  $\mathcal{E} = 6 \text{ V}$ , sisetakistus  $r = 0,5 \text{ } \Omega$ , välistakistus  $R = 11,5 \text{ } \Omega$ . Määrata voolutugevus ning pingelang vooluringi välis- ja siseosas.

Lahendanud selle ülesande, on soovitatav selgitada elektrotehnika-alast mõistet «vooluallika koormus», mille all mõeldakse voolu tugevust vooluringis.

Sageli mõtlevad õpilased ekslikult, et vooluallika koormus on seda suurem, mida suurem on ahela takistus  $R$ . Tegelikult aga on suure takistuse korral voolutugevus väike, takistuse  $R$  vähenemisel vool kasvab ja lühise korral on vooluallika koormus maksimaalne.

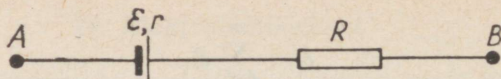
2. Vooluallikaga, mille emj.  $\mathcal{E} = 120 \text{ V}$  ja sisetakistus  $r = 50 \text{ } \Omega$ , ühendatud voltmeeter näitab  $\Delta\varphi = 118 \text{ V}$ . Määrata voltmeetri takistus. Milline on pingelang sisetakistusel?

L a h e n d u s. Vastavalt Ohmi seadusele kogu vooluringi kohta  $\mathcal{E} = \Delta\varphi + Ir$ , aga  $\Delta\varphi = IR$ , kus  $R$  on voltmeetri takistus.

Siit

$$R = \frac{\Delta\varphi r}{\mathcal{E} - \Delta\varphi} = 2,95 \text{ k}\Omega.$$

**Ohmi seadus elektromotoorjõudu sisaldava vooluringi osa kohta.** See materjal on õpikus soovitatud täiendavaks lugemiseks. Kuid ometi on selle tundmine vajalik terve rea huvitavate prak-



JOON. 17

tiliste ülesannete lahendamisel, näiteks akumulaatori ja kondensaatori laadimisprotsessi käsitlemisel jm.

Ohmi seadust ebauhtlase vooluringi osa kohta (õpikus § 98, valem (9-14)) võib väljendada sellises kujus, millest on kerge üleminna tema kasutamisele kinnise kontuuri puhul.

Näiteks, kui vooluringi osas  $AB$  on vooluallikas elektromotoorjõuga  $\mathcal{E}$  ja sisetakistusega  $r$  ning välistakistus on  $R$  (joon. 17), siis  $\varphi_A > \varphi_B$  korral avaldub Ohmi seadus selliselt:

$$\Delta\varphi_{AB} - \mathcal{E} = I(r+R);$$

$$I = \frac{\Delta\varphi_{AB} - \mathcal{E}}{r+R},$$

kus  $r+R=R_1$  on lõigu  $AB$  kogutakistus.

Emj. võetakse märgiga «pluss» (pidades silmas tingimust  $\varphi_A > \varphi_B$ ), kui  $A$ -st  $B$ -ni minnes läbime vooluallika miinuselt plussile. Vaadeldaval juhul läbime aga vooluallika plussilt miinusele ning seetõttu on  $\mathcal{E}$  negatiivne. Liikme  $IR_1$  märgi määravad liikmete  $\Delta\varphi_{AB}$  ja  $\mathcal{E}$  väärtused on nende märgid. Kui voolu suund vooluringi osas  $AB$  on vastupidine kõrvaliste jõudude väljatugevuse suunale, siis  $IR_1$  on positiivne.

Asjast huvitatud õpilastele võib anda ülesandeid lahendada.

1. Akupatarei laadimise lõpul oli sellega ühendatud ampermeetri näit  $I=4$  A, voltmeetril aga  $\Delta\varphi=4,32$  V. Jättes ühendusjuhtmete takistuse arvestamata, määrata patarei emj. Patarei sisetakistus  $r=0,08$   $\Omega$ .

L a h e n d u s. Patarei elektromotoorjõud vähendab pingelangu lõigul  $AB$  (joon. 17), järelikult

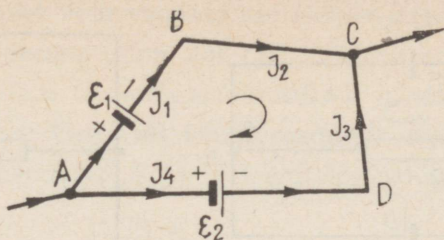
$$I = \frac{\Delta\varphi - \mathcal{E}}{r};$$

$$\mathcal{E} = \Delta\varphi - Ir = 4V.$$

2. Akupatarei laadimise lõpul vooluga  $I=3$  A oli aku klemmidega ühendatud voltmeetri näit  $\Delta\varphi_1=4,25$  V, tühjenemise algul voolutugevusel  $I_2=4$  A oli aga voltmeetri näit  $\Delta\varphi_2=3,9$  V. Määrata patarei emj. ja sisetakistus.

L a h e n d u s. Patarei laadimise lõpul võib vooluringi osa kohta kirjutada samasuguse võrrandi, nagu eelmise ülesande puhulgi:

$$1) I_1 = \frac{\Delta\varphi_1 - \mathcal{E}}{r}; \quad \mathcal{E} = \Delta\varphi_1 - I_1 r.$$



JOON. 18

Akumulaatori tühjenemisel läbi välise takisti saame:

$$2) \mathcal{E} = \Delta\varphi_2 + I_2 r,$$

kus  $I_2 r$  on pingelang akumulaatori sisetakistusel.

Lahendades mõlemad võrrandid süsteemis, saame  $r = 0,05 \Omega$ ,  $\mathcal{E} = 4,1 \text{ V}$ .

Analüüsis selle ülesande sisu, tuleb tingimata selgitada, miks on valitud just laadimise lõpp- ja tühjenemise algusmoment. Asudes arvutama keerukaid vooluringe, võib tuletada Kirchoffi seaduse kinnise kontuuri kohta.

Eraldame hargnevas ahelas kinnise kontuuri ABCD (joon. 18). Kirjutame selle kinnise kontuuri iga lõigu kohta võrrandi, mis väljendab Ohmi seadust ning liidame nende võrrandite vasakud ja paremad pooled:

$$I_1 R_1 = \Delta\varphi_{AB} - \mathcal{E}_1$$

$$I_2 R_2 = \Delta\varphi_{BC}$$

$$- I_3 R_3 = \Delta\varphi_{CD}$$

$$- I_4 R_4 = \Delta\varphi_{DA} + \mathcal{E}_2$$

$$\underline{I_1 R_1 + I_2 R_2 - I_3 R_3 - I_4 R_4 = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1, \text{ kuna } \Sigma\Delta\varphi = 0.}$$

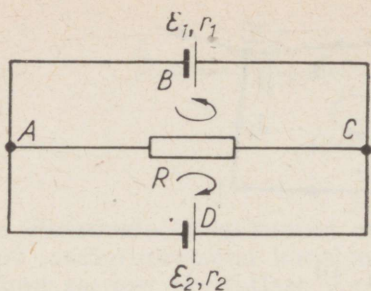
(ABCD)

Mistahes kinnises vooluringis on kõigi pingelangude algebraalne summa võrdne selles vooluringis esinevate elektromotoorjõudude algebraalse summaga.

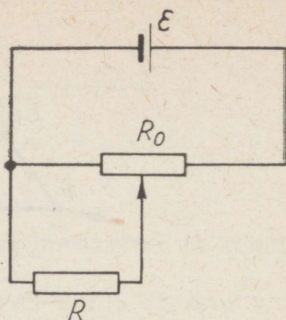
Kirchoffi võrrand on Ohmi seaduse üldistus igasuguste kinniste vooluringide jaoks. Selle koostamisel on sobiv kasutada järgmist reeglit: näidanud voolude suunad vooluringi kõikidel osadel, valitakse vabalt liikumise suund kinnises vooluringis — kellaosuti liikumise suunas või sellele vastassuunas.

1) Seejärel, kui voolu suund vooluringis ühtib valitud liikumise suunaga, asetatakse võrrandis korrutise  $IR$  ette märk «pluss», kui ei ühti — «miinus».

2) Vooluallika emj. võetakse märgiga «pluss», kui piki vooluringi liikudes läbitakse vooluallikas negatiivselt pooluselt positiivsele.



JOON. 19



JOON. 20

Kui Kirchoffi võrrandite lahendamisel osutub voolutugevus mingil lõigul positiivseks, siis tähendab see, et voolu suund ühtib valitud suunaga; kui aga negatiivseks, siis on voolu suund vastupidine valitud suunale. Liikumise suuna muutmisel vooluringis muutuvad Kirchoffi võrrandis kõigi liikmete märgid (lahendid jäävad endiseks).

Rakendame Kirchoffi võrrandeid ülesande lahendamisel.

Leida voolutugevus takistis  $R=10\ \Omega$  (joon. 19). Vooluallikate emj. ja sisetakistused on vastavalt  $\mathcal{E}_1=6\text{V}$ ,  $\mathcal{E}_2=5\text{V}$ ,  $r_1=1\ \Omega$ ,  $r_2=2\ \Omega$ .

L a h e n d u s. Valime voolude ja vooluringis liikumise suunad ning koostame Kirchoffi võrrandid.

$$\begin{array}{l} \text{Hargnemispunktis } A \quad I_1 + I_2 - I = 0. \\ \text{Vooluringis } ABCA \quad I_1 r_1 + IR = \mathcal{E}_1. \\ \text{Vooluringis } ACDA \quad I_2 r_2 + IR = \mathcal{E}_2. \end{array}$$

Lahendades need võrrandid, saame:

$$I = \frac{\mathcal{E}_1 r_2 + \mathcal{E}_2 r_1}{R(r_1 + r_2) + r_1 r_2} = 0,53\ \text{A}.$$

Kasulik on lahendada ülesandeid reostaadi potentsiomeetrilise lülituse kohta.

1. Reostaat-potentsiomeetri takistus  $R_0=100\ \Omega$  ja reostaadi keskpunkti asetatud liuguri ahelasse ühendatud takisti väärtus  $R=50\ \Omega$  (joon. 20). Reostaadi  $R_0$  äärmiste klemmidega on ühendatud vooluallikas elektromotoorjõuga  $\mathcal{E}=60\ \text{V}$ .

Kui suur pingelang  $\Delta\varphi$  tekib takistil  $R$ ? Vooluallika sisetakistus jätta arvestamata.

Tungimata ülesande sisusse, ütlevad õpilased sageli, et

$$\Delta\varphi = \frac{\mathcal{E}}{2}.$$

Seda ülesannet võib vaadata kui eksperimentaalset ülesannet, s. t. koostanud skeemi (joon. 20), saab näidata, et  $\Delta\varphi \neq \frac{\mathcal{E}}{2}$ . Pärast seda aga lahendada ülesanne analüütiliselt ja teha arvutused.

Lahendus. Vastavalt Ohmi seadusele  $\Delta\varphi = IR_1$ , kus  $R_1$  on paralleelselt ühendatud  $R$  ja  $\frac{R_0}{2}$  kogutakistus, s. t.

$$R_1 = \frac{\frac{R_0}{2} R}{R + \frac{R_0}{2}}; \quad R_1 = \frac{R_0 R}{2R + R_0}.$$

Voolutugevus vooluringi hargnemata osas (vooluallika sisetakistust arvestamata) on  $I = \frac{\mathcal{E}}{R_2}$ , kus  $R_2$  on järjestikku ühendatud  $R_1$  ja  $\frac{R_0}{2}$  kogutakistus.

$$R_2 = \frac{R_0 R}{2R + R_0} + \frac{R_0}{2} = \frac{4R_0 R + R_0^2}{2(2R + R_0)}.$$

Asetades  $R_1$  ja  $I \Delta\varphi$  avaldisse, saame:

$$\Delta\varphi = \frac{2\mathcal{E}R}{4R + R_0} = 20 \text{ V.}$$

Takistuse  $R$  suurendamisel pinge kasvab, kui aga

$$R \gg R_0, \text{ siis } \Delta\varphi \approx \frac{\mathcal{E}}{2}.$$

Juhitakse tähelepanu füüsika-, eriti aga elektrotehnika-alases kirjanduses esinevate sisult lähedaste või koguni samaväärsete terminite rohkusele: emj., pinge, potentsiaalide vahe, pingelang, pingekadu, voltaaž jne. Olukord komplitseerub veelgi, kui lisada raadiotehnika terminoloogia — «võrepinge», «anoodpinge», mille all mõeldakse potentsiaalide vahet võre (või vastavalt anoodi) ja katoodi vahel.

Füüsikaõpetaja peab rangelt jälgima nende terminite õiget kasutamist, jättes üleliigse kõrvale. Seejuures ei tohi lubada ka igasuguseid enda väljamõeldud termineid ja kõnekäände elektrike-praktikute žargoonist, mida õpilased sageli üle võtavad.

## 17. Vastused peatükis «Alalisvool» esitatud küsimustele

1. Miks kasutatakse § 90 kirjeldatud katsetes pingelangu jälgimisel puidust, mitte aga metallist keppi?

Puidust kepi takistus on märksa suurem samasuguste mõõtmetega metalljuhi takistusest. Tänu sellele saame väikese voolutugevuse juures tekitada kepi otstel suhteliselt suure potentsiaalide

vahe ( $\Delta\varphi=IR$ ), mida võib elektromeetri abil ka otseselt demonstreerida.

2. Missugused on põhilised tehnilised raskused ülijuhtivuse kasutamisel praktikas?

a) Raskused madalate temperatuuride saamisel.

b) Ülijuhtivuse hävimine tugevates magnetväljades, mistõttu ülijuhtides pole võimalik saada tugevaid voole.

3. Miks suure võimsusega elektrisoojendusriista lülitamisei võrku lampide heledus korteris algul märgatavalt väheneb, lühikese ajavahemiku jooksul aga uuesti kasvab, saavutades peaaegu esialgse heleduse?

Elektrisoojendusriista lülitamisel võrku paralleelselt teiste tarbijatega väheneb viimaseid läbiva voolu tugevus, sest pingelang ühendusjuhtmetes suureneb. Lampide heledus aga vastavalt väheneb. Riista hõõgniidi (spiraali) kuumenedes tema takistus kasvab ja teda läbiv vool kahaneb. Seoses sellega voolutugevus lampides kasvab ja nende heledus suureneb.

## 18. Teema «Alalisvool» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku paragrahvid
1.	Elektrivool. Voolutugevus ja -tihedus. Nende mõõtühikud. Voolude hargnemine.	§ 87-89
2.-3.	Elektrivoolu tekkimine. Elektriväli juhis. Ohmi seadus vooluringi osa kohta.	§ 90-92
4.	Ülesannete lahendamine.	
5.	Laboratoorne töö: «Juhi eritakistuse määramine».	
6.	Takistuse sõltuvus temperatuurist. Ülijuhtivus. Joule'i-Lenzi seadus vooluringi osa kohta.	§ 93-95
7.	Ülesannete lahendamine.	
8.	Elektromotoorjõud. Ohmi seadus kinnise vooluringi kohta.	§ 96, 97
9.	Ülesannete lahendamine. Materjali kordamine.	
10.	Laboratoorne töö: «Vooluallika emj. ja sisetakistuse määramine».	
11.	Kontrolltöö teemal «Alalisvool».	

## III. ELEKTRIVOOL MITMESUGUSTES KESKKONDADES

### 19. Elektrijuhtivus

Elektrijuhtivus (juhtivus) kujutab endast elektrilaengute ülekandmise protsessi, mis toimub välise elektrivälja toimel.

Elektrivoolu kandjate füüsikalise olemuse järgi liigitatakse elektrijuhtivust järgmiselt:

- 1) elektronjuhtivus (elektron-, auk- ja elektron-aukjuhtivus);
- 2)ioonjuhtivus (katioon-, anioon- ja katioon-aniioonjuhtivus);
- 3) segajuhtivus (elektron-ioonjuhtivus).

Etteantud tingimustel iseloomustab iga ainet kindel voolutiheduse  $j$  sõltuvus elektrivälja tugevusest  $\vec{E}$ :  $\vec{j} = f(\vec{E})$  (või voolutiheduse  $\vec{I}$  sõltuvus potentsiaalide vahest  $\Delta\varphi$ ), mida nimetatakse pingevoolu tunnusjooneks. Suurust  $\lambda = \frac{\Delta j}{\Delta E}$ , kus  $\Delta j$  on voolutiheduse muut, mille tekitab väljatugevuse  $E$  muut  $\Delta E$ , nimetatakse erijuhtivuseks.

Erijuhul, kui pingevoolu tunnusjooneks on sirgjoon  $j = \lambda E$  (või  $\lambda = \frac{j}{E}$ ), kehtib antud aine kohta Ohmi seadus.

Vastavalt elektrijuhtivuse väärtusele liigitatakse ained 1) juhtideks ( $\lambda > 10^4 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ), 2) dielektrikuteks ( $\lambda < 10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) ja 3) pooljuhtideks ( $10^{-10} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} < \lambda < 10^4 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ).

Kuid selline jaotus on tinglik, sest mitmesuguste faktorite (temperatuur, kiirgus, lisandid) mõjul aine erijuhtivus ja pingevoolu tunnusjoon muutuvad ning sageli küllalt oluliselt.

Metallide pingevoolu tunnusjoonele annab lihtsa ja kujuka seletuse Drude-Lorentzi klassikaline juhtivuse elektronteooria.<sup>1</sup>

Kuid metallide klassikaline elektronteooria, mille eeliseks on lihtsus ja kujukus, annab paljudel juhtudel vaid nähtuste kvalitatiivse seletuse, kusjuures mõningate arvuliste suhete põhjendamisel klassikalise füüsika raames tekib ületamatuid raskusi.

Nii näiteks ei ava Drude-Lorentzi teooria elektritakistuse ja absoluutse temperatuuri vahelise sõltuvuse olemust (võrdelise sõltuvuse asemel hoopis sõltuvus  $\sqrt{T}$ ), annab metallide soojusmahtuvuste ebaõiged väärtused.

Üheks nende raskuste põhiliseks allikaks on põhjendamatu oletus, et metallide juhtivuselektronid (elektrongaas) alluvad ideaalse gaasi seadustele (iseäranis energia jaotuvuse seadusele vabadusastmete järgi, mille kohaselt elektroni soojusliikumise keskmine energia  $\frac{1}{2} m \overline{v^2} = \frac{3}{2} kT$ ). Need raskused on rahuldavalt lahendatud metallide kvantteoorias.

Mistahes aine isoleeritud aatomit iseloomustatakse energianivoode seeriaga (energia väärtustega), vahepealseid energia väärtusi aatom ei oma. Kuid igal sellisel nivool võib olla ainult kuni kaks elektroni (vastavalt Pauli keelule).

Mõisted «energianivoo» ja «energiatsoon» ei ole seotud geometrilise ruumiosaga kristallis. Nivoodevahelise kauguse all mõeldakse erinevust elektronide energia väärtustes, elektroni üleminek ühelt nivoolt teisele tähistab aga elektroni energia muutumist teatud väärtuseni.

<sup>1</sup> Vt. С. Г. Калашников. «Электричество», М., «Наука», 1970.

Kui  $N$  aatomit lähenevad üksteisele väga lähedale (tihenduse moodustumine), siis nende väljad liituvad. Mistahes vaadeldava aatomi elektron saab tunda selle «ühise» välja mõju,  $N$  aatomi vastastikune mõju üksteisele viib iga energianivoo lõhus- tumisele  $N$  alanivooks. Niisiis, varem isoleeritud aatomi iga nivoo «valgub laiali» vööndiks (tsooniks), mis koosneb  $N$  energianivoost. Tsoonid on eraldatud energia keelatud väärtustega.

Aatomites, milles on palju elektrone, võib elektronid jaotada kahte gruppi: siseelektronid, mis moodustavad suletud katte, ning välis- ehk valentselektronid. Selliste aatomite ühinemisel kristallideks moodustavad aatomite suletud elektronkatted elektronidega täielikult täidetud lubatud energiatsoonid. Valentselektronid jaotuvad kõige kõrgemas tsoonis (valentstsoonis). See tsoon võib valentselektronidega täidetud olla kas täielikult või osaliselt.

Tsooni, mis pole elektronidega täidetud, nimetatakse juhtivustsooniks — see on kas valentstsoon või täidetud valentstsooniga piirnev täielikult «vaba» tsoon. Täidetud tsooni elektronid ei võta osa elektri- ja soojuhtivusest; juhtivus toimub väliste valentselektronide vahendusel, mis moodustavad täitmata tsooni.

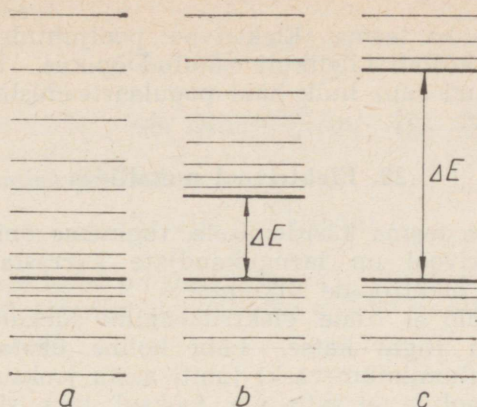
Metallides on selliseid vabu elektrone väga palju (nende tihedus on ligikaudu suurusjärgus  $10^{-23} - 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ), pooljuhtides on vabade elektronide arv toatemperatuuril väike (nende tiheduse suurusjärg on 5—10 korda väiksem juhtivuselektronide tihedusest metallides), dielektrikutes on nende arv tühine.

Kuid erinevus kolme toodud ainegrupi vahel ei piirdu ainult vabade elektronide tihedusega.

Saanud üleminekuks vajaliku energia, võivad täidetud tsoonide elektronid (nii juhtides, pooljuhtides kui ka dielektrikutes) üle minna juhtivustsooni ja võtta osa juhtivusprotsessist. Selliseks üleminekuks vajalik minimaalne energiahulk on võrdne keelatud energiavööndi laiusega, mis eraldab «viimast» täidetud tsooni juhtivustsoonist.

Metallides on täidetud tsoon ja juhtivustsoon teineteisega tihedalt ühinenud (sageli kattuvad), pooljuhtides ulatub keelatud energiavöönd ligikaudu kümnendikest elektronvoltidest kuni mõne elektronvoldini, dielektrikutes on see veelgi suurem (joon. 21). Seepärast on pooljuhtides kerge luua tingimusi sise- miste elektronide üleminekuks juhtivustsooni. Nii suureneb näiteks pooljuhi temperatuuri tõusuga juhtivuselektronide arv tunduvalt. Kvantmehhaanika seisukohalt (juhtivuse tsooniteooria) tuleks kõik tahked kehad liigitada metallideks ja pooljuhtideks, kuivõrd isolaatorid erinevad pooljuhtidest vaid kvantitatiivselt (keelatud energiatsooni laius  $E \gg kT$ ).

Sageli samastavad õpilased mõiste «energianivood» aine- mingite reaalsete pindadega, millel asuvad teatud kindla energiaga elektronid.



JOON. 21

Füüsika õpetamise antud etapil ei ole paljud õpilased veel võimalised vabanema juurdunud klassikalistest arusaamadest ja omandama kvantmehhanika mõisteid, mis ei anna näitlikku klassikalist interpretatsiooni.

Õpilaste veenmine vajaduses lahti öelda mikromaailma käsitlemisel klassikalistest kujutlustest kujutab endast rasket ja vastustusrikast pedagoogilist ülesannet, mis peab lahenema keskkooli füüsikakursuse kõigi nende eksperimentaalsete faktide kogumiku esitamise protsessis, mis pole klassikalise füüsika seisukohalt seletatavad (näiteks teemad «Aatomi ehitus», «Kiirgamine»).

Silmas pidades raskusi, mis tekivad koolis juhtivuse kvantteooria elementide käsitlemisel, tuleb pooljuhtide ja metallide omaduste vaatlemisel tugineda õpilaste varasematele teadmistele juhtivuse elektronteooria alustest, aga samuti nende keemialastele teadmistele (aatomi ehitus, aatomitevaheliste seoste liigid molekulis).

Selle erakordselt tähtsa teema õppimist alustatakse lühikese sissejuhatusega — ainete klassifitseerimisega nende juhtivuse iseloomu põhjal (juhid, dielektrikud ja pooljuhid).

Erinevusi nende ainegruppide juhtivuses võib selgitada elektronteooria põhjal, mida käsitletakse veidi hiljem, seepärast tuleb esialgu juhtivuselektronide tiheduse erinevusele ja selle sõltuvusele temperatuurist ainult viidata.

Käesolevas metoodilises juhendis peatume selle osa viiest teemast ainult kolmel: elektrivool metallides, gaasides ja vaakumis.

Teema «Elektrivool vedelikes» on välja jäetud, sest selle käsitlemise metoodika on juba ammu välja kujunenud ning olulisi muutusi selles pole.

Ei vaadelda ka teema «Elektrivool pooljuhtides» käsitlemist. See teema on küllalt täielikult esitatud õpikus. Pealegi on sel teemal avaldatud suur hulk häid populaarteaduslikke raamatuid ja artikleid [vt. 16].

## 20. Elektrivool metallides

Asudes selle teema käsitlemisele, tugineme õpilaste teadmistele, et elektrivool on laengukandjate korrastatud liikumine (metallides — elektronide liikumine).

Metalli ioonid ei osale elektrilaengute ülekandmisel. Selle kinnituseks on Righi katse. Läbi kolme üksteisele asetatud silindri (vask-alumiinium-vask) juhiti aasta jooksul elektrivoolu. Vaatamata asjaolule, et selle aja jooksul läks silindritest läbi ligikaudu 3,5 miljonit kulonit, ei avastatud aine ülekannet ühelt silindrilt teisele (nende mass säilis muutumatuna täpsusega kuni  $\pm 0,03$  mg).

Metallide elektronjuhtivuse otseseks tõestuseks on katse, milles kasutatakse elektronide inertsust. Selle katse idee, teostus ja esimesed tulemused kuuluvad meie kaasmaalastele L. I. Mandelštamile ja N. D. Papaleksile. Selle katse täiuslikumat varianti kordasid Tolman ja Stewart, saades hinnalisi kvantitatiivseid tulemusi. Tolmani-Stewarti katse skeem on kirjeldatud õpikus § 103.

Nendel katsetel saadud tulemustest õnnestus arvutada laengukandjate laengu ja massi suhe  $\frac{e}{m}$ .

Pooli järsul peatamisel Tolmani katses metalli ioonid (kristallvõre) peatuvad, juhtivuselektronid aga jätkavad inertsil mõjul liikumist ja poolis tekib vool, mille suund näitab, et voolu kandjateks metallides on negatiivse laenguga osakesed (elektronid). Tolmani katses oli pool ühendatud ballistilise galvanomeetriga, mille näit pooli pidurdamisel oli võrdeline teda läbinud laenguga. Selle laengu suuruse  $q$ , pooli keerdude joonkiiruse  $v$  (kuni pidurdamiseni), pooli traadi üldpikkuse  $l$  ja pooli, ühendusjuhtmete ning galvanomeetri kogutakistuse  $R$  põhjal võib määrata elektroni erilaengu.

Elektroni liikumishulga muudu  $m \frac{\Delta v}{\Delta t}$ , mis tekib pidurdamisel väikese ajavahemiku  $\Delta t$  jooksul, võib võrdsustada jõuga, millega tekkinud kõrvaline elektromotoorjõud mõjub elektronile:

$$eE_k = m \frac{\Delta v}{\Delta t},$$

kus  $E_k$  on kõrvaliste jõudude väljatugevus.

Teisest küljest, kogu poolis tekkinud kõrvaline elektromotoorjõud

$$\mathcal{E} = lE_k = IR,$$

kus  $I$  on keskmine voolutugevus aja  $\Delta t$  vältel.

Aja  $\Delta t$  jooksul

$$lE_h = IR = \frac{ml}{e} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

$$\text{või } IR\Delta t = \frac{ml}{e} \Delta v.$$

Kogu pidurdamise jooksul

$$(\Sigma I \Delta t)R = \frac{ml}{e} (\Sigma \Delta v).$$

Viimases võrduses omavad summad lihtsat sisu:  $\Sigma I \Delta t$  kujutab endast pooli läbinud elektrihulka  $q$ ,  $\Sigma \Delta v$  — algkiirust  $v$ , kuna lõppkiirus on null.

Seega

$$qR = \frac{ml}{e} v,$$

millest

$$\frac{e}{m} = \frac{lv}{Rq}.$$

Mõõtes laengu  $q$  galvanomeetri abil, õnnestus kindlaks teha, et  $\frac{e}{m} = 1,8 \cdot 10^{11} \frac{C}{kg}$ . See väärtus on ühesugune kõikide metallide puhul (eksperimendi vea täpsusega).

Saadud väärtus ühtib suhte  $\frac{e}{m}$  väärtustega, mis on elektronide kohta saadud teistest katsetest (eriti elektronide kõrvalekaldumisel elektri- ja magnetväljas ning Millikani katsetest).

Siit tehakse järeldus, et kõikides metallides on elektrivoolu kandjate olemus ühesugune — voolu kandjateks on elektronid.

**Ohmi seaduse selgitus molekulaarkineetilise teooria põhjal.** Ohmi seadus vooluringi osa kohta seob omavahel voolutugevuse  $I$ , voolukandjatele avalduva välismõju  $\Delta\varphi$  või  $\vec{E}$  ja juhi karakteristikku  $R$ .

Selle sõltuvuse füüsikalise olemuse selgitamiseks tuleb vaadelda kahte faktorit: välise välja mõju juhtivuselektronidele ja nende vastastikust mõju metalli kristallvõre kaootiliselt võnkuvate ioonidega.

Metalli juhtivuselektronid on vastastikusel mõjutusel ruumvõre ioonidega, mille vastu nad liikumisel tõukuvad. Välise elektrivälja puudumisel on elektronide liikumine täiesti kaootiline (korrapäratu soojusliikumine), mistõttu elektronide poolt igas suunas kantav summaarne laeng võrdub nulliga.

Juhi ühendamisel elektromotoorjõu allikaga tekib juhi sees elektrivälja tugevusega  $\vec{E}$  ja elektronidele hakkab mõjuma jõud

$$\vec{F} = -e\vec{E}.$$

Selle jõu mõjul suureneb kiiruse jõusuunaline komponent. Elektronide liikumises kerkib esile eelistatud suund: elektrone, mis liiguvad väljatugevusele  $\vec{E}$  vastassuunas, on rohkem, kui väljatugevuse  $\vec{E}$  suunas liikuvaid elektrone. Tekib elektrivool. Selle voolu tihedus  $\vec{j} = en\vec{v}$ , kus  $\vec{v}$  on elektronide korrapärase liikumise keskmine kiirus (triivi kiirus).

Jääva voolutugevuse (või -tiheduse) korral juhi lõigul on ka elektronide keskmine kiirus jääv. Järelikult peab juhtivuselektronidele mõjuv keskmine summaarne jõud võrduma nulliga.

Milline jõud mõjub elektronile veel peale jõu  $\vec{F} = -e\vec{E}$ ?

Elektronide ja ruumvõre ionide kahe teineteisele järgneva kokkupõrke vahel suureneb jõu  $\vec{F}$  mõjul elektronide keskmine kineetiline energia. Tõukumisel ionidega annavad elektronid neile oma energia (või osa sellest) — elektronide korrapärase liikumise energia muundub ionide kaootilise liikumise energiaks.

Järelikult, elektriväli juhi sees annab elektronidele kiirenduse, vastastikune mõju ionidega aga pidurdab elektronide liikumist.

Võib öelda, et ionid mõjuvad elektronidele pidurdusjõuga, mis on võrdeline ja suunalt vastupidine elektronide korrapärase liikumise keskmise kiirusega:

$$\vec{f} = -k\vec{v},$$

kus  $k$  on võrdetegur.

Varem tegime kindlaks, et alalisvoolu korral on vooluringis elektronidele mõjuvate jõudude keskvaartuste summa null, s. t.

$$\vec{F} + \vec{f} = 0.$$

Paigutades sellesse võrrandisse  $\vec{F}$  ja  $\vec{f}$  väärtused, saame:

$$\vec{v} = -\frac{e}{k}\vec{E} \text{ ja } \vec{j} = \frac{e^2n}{k}\vec{E} = \lambda\vec{E},$$

kus  $\lambda = \frac{e^2n}{k}$  on metalli erijuhtivus.

Seega on voolutihedus alalisvooluringis võrdeline elektrivälja tugevusega.

Minnes üle tiheduselt voolutugevusele, saame Ohmi seaduse vooluringi osa kohta:

$$I = \frac{\Delta\varphi}{R},$$

kus  $R = \rho \frac{l}{S} = \frac{lk}{Se^2n}$  on juhi elektriline takistus.

Tuleks veel kord meenutada, et üheks elektrilise takistuse olemasolu peamiseks põhjuseks on juhtivuselektronide kokkupõrked kaootiliselt liikuvate ruumvõre positiivsete ionidega.

Analüüsidest saadud  $\rho$  või  $R$  avaldised, võib näidata, et Ohmi seadus kehtib vaid nende juhtide puhul, kus laengukandjate arv  $n$  ruumalaühiku kohta ei sõltu väljatugevusest. Peale selle võimaldab nende valemite analüüs näidata ka seda, miks metallide elektrijuhtivus ei ole ühesugune. Juhtivuselektronide tihedused ja konstandid  $k$  on erinevad. Viimane on seletatav erinevustega metallide kristallvõre struktuuris ja aatomite ehituses.

**Metallide elektrilise takistuse sõltuvus temperatuurist.** Aine ehituse molekulaarkineetilise teooria põhjal saadud Ohmi seaduse valemi analüüsi võib jätkata takistuse ja temperatuuri vahelise sõltuvuse vaatlemisel.

Eritakistus  $\rho = \frac{k}{e^2 n}$  sõltub vaid  $k$  ja  $n$  väärtustest. Vabade elektronide kontsentratsioon muutub temperatuuri muutumisel vähe, sest «mittevabad» elektronid on ionidega väga tugevalt seotud. Järelikult määrab  $\rho$  sõltuvuse temperatuurist tegur  $k$ . Tegur  $k$  on aga seotud hõõrdejõuga, mis mõjub metalli juhtivuselektronidele.

Temperatuuri tõusuga suurenevad nii juhtivuselektronide soojusliikumise kiirus kui ka ionide võnkumise intensiivsus. See tõttu sagenevad elektronide pörked kristallvõre ionidega ja järelikult suureneb hõõrdejõud ja tegur  $k$ .

Metallide juhtivuse käsitlemisel võib lõpuks veel märkida, et metallis ümberpaiknevad elektronid kannavad edasi mitte ainult laengut, vaid ka energiat. Arvestades juhtivuselektronide suurt tihedust metallides, on selge, miks metallid on nii head elektri- kui ka soojusjuhid.

Käsitletud materjali (Ohmi seadus, juhi takistus ja eritakistuse sõltuvus temperatuurist) kinnistamiseks võib lahendada järgmist tüüpi üleandeid.

1. Pool on mähitud vaskjuhtmest massiga 1 kg ja ristlõikega  $S = 0,1 \text{ mm}^2$ . Määrata juhtme takistus. Kui suur on voolutugevus selles poolis, kui potentsiaalide vahe pooli otstel on 110 V?

Lahendus. Juhtme takistus  $R = \rho \frac{l}{S}$ , kus tema pikkus  $l = \frac{m}{\rho_0 S}$  ( $\rho_0$  — aine tihedus).

Siit

$$R = \frac{\rho m}{\rho_0 S^2} = 197 \Omega.$$

Voolutugevus

$$I = \frac{\Delta \varphi}{R} \approx 5,6 \text{ A.}$$

2. Temperatuuri määramiseks kasutati raudtraati, mille takistus temperatuuril  $t_1 = 10^\circ \text{C}$  oli  $R_1 = 15 \Omega$ . Millise temperatuuri juures sai tema takistus võrdseks  $R_2 = 18,25 \Omega$ ? Rauda takistuse temperatuuritegur  $\alpha = 0,006 \text{ deg}^{-1}$ .

L a h e n d u s. Traadi takistus temperatuuril  $t_1$  on

$$R_1 = R_0(1 + \alpha t_1),$$

aga temperatuuril  $t_2$

$$R_2 = R_0(1 + \alpha t_2),$$

kus  $R_0$  on traadi takistus temperatuuril  $t = 0^\circ\text{C}$ .

Otsitav temperatuur

$$t_3 = \frac{R_2(1 + \alpha t_1) - R_1}{\alpha R_1} = 48,3^\circ\text{C}.$$

## 21. Elektrivool gaasides

Toatemperatuurile lähedastel temperatuuridel ja atmosfääri-rõhule lähedastel rõhkudel on gaasid halvad juhid. Seletada võib seda sellega, et gaasid koosnevad neutraalsetest aatomitest ja molekulidest ning neis ei ole (või on väga vähe) laengukandjaid (elektrone ja ioone). Selles on kerge veenduda, kui jälgida laetud elektromeetri osutit (vaakumis kaotab elektromeeter oma laengu väga aeglaselt).

Kuid soojendamisel, röntgenikiirte, ultravioletse ja radioaktiivse kiirguse mõjul ioniseeritakse gaasi aatomeid ja molekule. Gaasid muutuvad juhtideks.

Kõige lihtsam ioniseerimise viis on soojendamine. Gaasi soojendamisel tema molekulide energia suureneb. Suure energiaga molekulide (või aatomite) põrkumisel lüüakse neist välja elektronid ja gaasis tekivad kaht liiki laengukandjad: elektronid ja positiivsed ioonid. Mõnikord liituvad elektronid neutraalsete aatomitega, tekitades gaasis negatiivseid ioone (inertgaasides pole see võimalik).

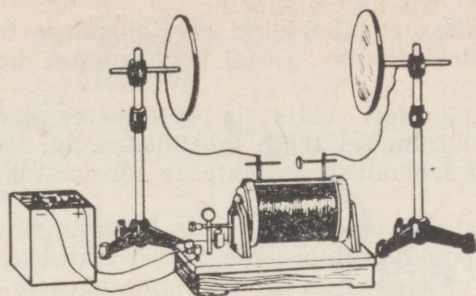
Gaaside ionisatsiooniga võib kaasneda molekulide dissotsiatsioon ja kildioonide tekkimine (sagedamini neis gaasides, mis koosnevad paljuaatomilistest molekulidest).

Üheaegselt ionisatsiooniga toimub gaasides ka vastupidine protsess — elektronide liitumine positiivsete ionidega (neutraalsete aatomite moodustumine ehk rekombinatsioon).

Rekombinatsioon kulgeb ilma väliste faktorite mõjuta ja seetõttu kaovad laetud osakesed pärast ionisaatori mõju lakkamist tänu rekombinatsioonile õige pea ja gaas muutub taas dielektrikuks.

Välise ionisaatori poolt põhjustatud ionisatsiooni ja pärast ionisaatori mõju lakkamist toimuvat rekombinatsiooni võib demonstreerida sädeinduktoriga ühendatud nihutatavate plaatidega kondensaatori kaasabil (joon. 22).

Kondensaatori plaadid asetatakse teineteisest sellisele kaugusele, et induktori sisselülitamisel nende vahel sädet ei tekiks. Seejärel viiakse plaatide vahele piirituslambi või gaasipõleti leek

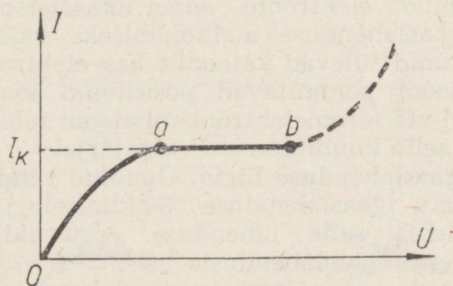


JOON. 22

(induktor on välja lülitatud). Õhkvahemikku hakkab läbima elektrivool, sest ionisaatori (leegi) mõjul toimub õhumolekulide ionisatsioon ja õhk muutub juhiks. Leegi eemaldamisel kondensaatori tühjenemine lakkab. Sellist, ainult välise ionisaatori mõjul toimuvat lahendust, nimetatakse sõltuvaks lahenduseks.

Kui elektroodidevaheline potentsiaalide vahe on väike, ei jõua kõik ionisatsioonil tekkinud laengud elektroodidele ja osa neist rekombineerub gaasis. Potentsiaalide vahe kasvamisel suureneb elektroodidele jõudvate laetud osakeste arv, suureneb voolutugevus vooluringis. Lõpuks saabub moment, mil kõik ionisatsioonil tekkinud laetud osakesed jõuavad elektroodidele. Edasisel potentsiaalide vahe tõstmisel voolutugevus enam ei kasva. Vool saavutab küllastuse.

Sõltuva gaaslahenduse käiku võib kujutada ka graafiliselt (joon. 23) ning seejärel tuleb asuda sõltumatu lahenduse vaatlemisele. Õpilastele esitatakse küsimus: «Mis juhtub gaaslahendusega, kui elektroodide potentsiaalide vahet suurendada?» Sellele küsimusele annab vastuse katse samal seadmel, millega demonstreeriti sõltuvat gaaslahendust.



JOON. 23

Eelmises katses ei täheldatud gaaslahenduse tekkimist juhul, kui kondensaatori katete teatud vahekauguse korral ionisaator puudus.

Lülitame induktori välja ja lähendame plaate teineteisele; induktori sisselülitamisel tekib lahendus, kuigi väline ionisaator puudub. Sellist lahendust nimetatakse sõltumatuks gaaslahenduseks.

Seejärel analüüsitakse, mis muutus katse tingimustes. Kondensaatori katete potentsiaalide vahe  $\Delta\varphi$  jäi endiseks, kuid nüüd oli ta rakendatud väiksemal vahemaal. Samasugusele õhkvahemikule oli eelmisel juhul rakendatud väiksem potentsiaalide vahe ja elektrivälja tugevus temas oli väiksem. Sõltumatu gaaslahenduse tekkimisele eelnes seega väljatugevuse suurenemine gaasis.

Miks väljatugevuse suurenemine põhjustas gaasi ionisatsiooni? See on seletatav pörkeionisatsiooniga neutraalsete aatomite pörkumisel kiirete elektronidega, milliseid, tänu välistele ionisaatoritele, esineb vähesel määral igas gaasis.

Kui elektroni kineetiline energia on suurem kui töö  $A_i$ , mis on vajalik neutraalse aatomi ioniseerimiseks, s. t.

$$\frac{mv^2}{2} > A_i,$$

siis elektroni pörge aatomiga põhjustab aatomi ioniseerimise.

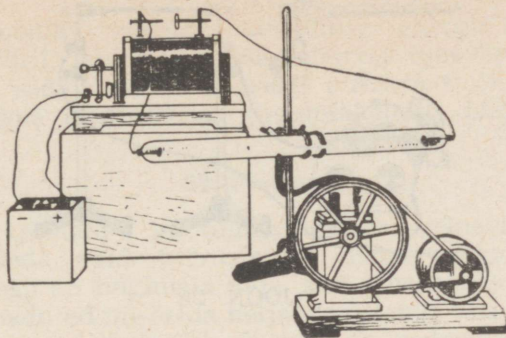
Võiks arvata, et elektriväljalt kiirenduse saanud positiivsed ioonid, nagu elektronidki, peaksid gaasi neutraalsete ionidega (molekulidega) pörkumisel esile kutsuma nende ionisatsiooni. Tegelikult aga ei põhjusta positiivsete ionide pörked gaasi osakeste viimaste ioniseerumist isegi sadade elektronvoltideni ulatuva energiavahemiku korral. See on seletatav sellega, et positiivse iooni pörkel neutraalse aatomi elektroniga antakse elektronile tõukavate osakeste masside suure erinevuse tõttu väga väike osa iooni energiast (pörge on elastne).

Kui elektriväli gaasis tugevneb, siis kasvab ka elektronide energia enne järjekordset pörget aatomitega. Järelikult kasvab ioniseeritud aatomite, koos sellega aga ka ionisatsiooni põhjustavate elektronide arv, tekib nn. elektronide laviin (õpikus § 108). Anoodile jõudnud elektronid enam ionisatsioonist osa ei võta, järelikult on gaaslahenduse alalhoidmiseks vaja uusi elektrone.

Uued elektronid tulevad katoodilt kas elektronide sekundaar-emissiooni (katoodi pommitavad positiivsed ioonid löövad sealt välja elektrone) või termoelektroniemissiooni (elektronide eraldumine katoodilt selle kuumutamisel) tagajärjel.

**Sõltumatu gaaslahenduse liigid.** Öppinud tundma põhjusi, mis viivad sõltumatu gaaslahenduse tekkimisele ja alalhoidmisele, asutakse vaatlema selle lahenduse erinevaid liike: huum-, koroona-, kaar- ja sädelahendust.

Tuleb rõhutada, et sõltumatu gaaslahenduse iseloomu määravad gaasi olek ja omadused, rakendatud pinge suurus ja jao-



JOON. 24

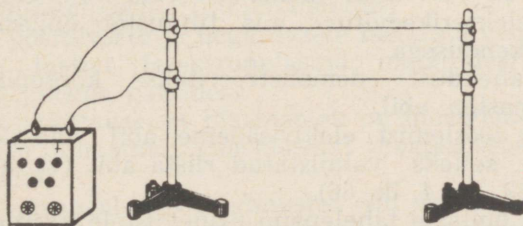
tus, elektrootide kuju ja paigutus, ning seejärel uurida, millist osa etendavad need tegurid igas lahenduse alaliigis.

Selle materjali esitamisel demonstreeritakse pimendatud klassis järgmisi katseid.

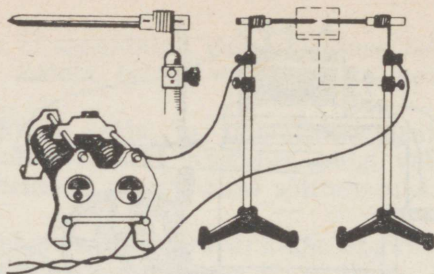
1. Huumlahendust demonstreeritakse elektrootide ja lühikese jätkega klaastoru abil. Toru klemmid ühendatakse sädeinduktoriga, mida toidab akumulaatorite patareid. Jätke ühendatakse kummivooliku abil Komovski pumbaga (joon. 24). Lülitanud sisse induktori, konstateeritakse, et torus gaaslahendust ei ole. Öhu väljapumpamisel võib teatud hõrenduse korral märgata torus gaasi helendumist, mis viitab lahenduse algusele.

Algul kujutab see peenikesi helenduvaid niidikesi, mis järkjärgult laienevad, hõlmates peaaegu kogu toru. Öpilaste tähelepanu tuleb juhtida helenduva samba «struktuurile» (katodi pimeruum ja positiivne helendav samm). Muutes polaarsust, demonstreeritakse nende alade muutumist.

2. Koroonalahendus saadakse isoleerivate statiivide külge pingutatud peenikeste paralleelsete traatide vahel, mille otsad on ühendatud kõrgepingealadi, induksioonpooli või elektrofoorimasina poolustega (joon. 25).



JOON. 25



JOON. 26

Alaldi sisselülitamisel on traatide juures märgata nõrka helen-  
dust, millega kaasneb särin ja praksumine.

3. Kaarlahendust võib demonstreerida endavalmistatud elekt-  
rikaare abil — kaks süsielektroodi, mis kinnitatakse traadist  
hoidjate abil isoleerivatele statiividele (joon. 26). Hoidjad valmis-  
tatakse vasktraadist diameetriga 2 mm. Hoidja ja söe puutekoha  
kuumenemise vältimiseks vasetatakse hoidja elektrolüütiliselt.

Reostaadiga järjestikku ühendatud kaart toidetakse võrgust  
või jaotuskilbist. Kuna elektrikaart toitva voolu tugevus on 5—  
10 A, tuleb ühendusjuhtmed võtta suhteliselt jämedad.

Kaar eraldatakse õpilastest läbipaistmatu ekraaniga ning  
kaare projitseerimiseks ekraanile seatakse üles statiiv projekt-  
sioonilaterna objektiiviga.

Viinud süte otsad kokkupuutesse, reguleeritakse reostaadi  
takistus  $\approx 10 \Omega$  ja seejärel ahel suletakse, hoides pinget 50—60 V.

Kui süte kokkupuutekohad hõõguvad, eemaldatakse nad  
vähehaaval teineteisest ning nende otste vahele tekib elektrikaar.

Eemaldades söed, võib samaaegselt vähendada reostaadi takis-  
tuse 7—8 oomini, mis tagab elektrikaare intensiivse põlemise.

Tänapäeval on paljude koolide füüsikakabinetides optilised  
pingid, mille komplektis on ka kaarleek-latern. Selle laterna abil  
võib optilisel pingil demonstreerida mehhaaniliselt reguleeritavat  
elektrikaart.

Pärast alalisvoolul töötanud kaare jahutamist võib õpilastele  
näidata anoodsõel tekkinud kraatrit.

Seejärel on soovitatav demonstreerida kümneminutilist filmi  
«Metallide elekterikeevitus», mis tutvustab õpilasi elektrikaare  
tehnilise rakendusega.

4. Sädelahendust demonstreeritakse kõrgepingealaldi või  
elektrofoormasina abil.

Metallide töötlemist elektrisädeme abil võib demonstreerida  
spetsiaalselt selleks valmistatud riista abil (vt. ajakiri «Fizika  
v škole» 1953, nr. 4, lk. 66).

Juhtinud õpilaste tähelepanu erinevustele käsitletud sõltuma-  
tute gaaslahenduste tekkimise tingimustes, tuleb rõhutada, et

pörkeionisatsiooniks vajaliku kineetilise energia võib elektron saada kahel viisil: läbides väikese vahemaa tugevas elektriväljas (koroona- ja sädelahendus gaasides atmosfäärirõhul) või suure vahemaa nõrgas elektriväljas (huumlahendus hõrendatud gaasides).

## 22. Plasma

Teemale «Aatomi- ja tuumafüüsika» eelnevas osas tuleks plasmata käsitleda vaid tutvustavalt. Kuid tutvustada õpilasi plasma mõistega on tingimata vaja, sest viimastel aastatel köidavad ainete omadused nii-öelda neljandas olekus üha rohkem teadlaste tähelepanu, mis kajastub nii populaarteaduslikus kui ka ajakirjanduses.

Temperatuuri järkjärgulisel tõstmisel (alates absoluutsest nullist) läbivad peaaegu kõik ained järjekorras järgmised olekud: tahke, vedel, gaasiline ja plasma. Sageli kujuneb õpilastel vale ettekujutus plasmast kui aine olekust, mis esineb väga kõrgetel temperatuuridel, s. t. temperatuuridel, mille juures toimub gaasi aatomite või molekulide termiline dissotsiatsioon. Just selle piiratud arusaamise kummutamiseks tulebki õpilasi plasma mõistega lähemalt tutvustada.

Süsteem, mis sisaldab võrdses kontsentratsioonis elektrone ja positiivseid ioone, nimetatakse elektron-ioonplasmaks.

Kui süsteemis esineb laetud osakeste kõrval ka neutraalseid, nimetatakse seda osaliselt ioniseeritud plasmaks. Plasmata, mis koosneb ainult laetud osakestest, nimetatakse täielikult ioniseeritud plasmaks.

Suure laetud osakeste kontsentratsiooniga ioniseeritud gaas, mis sisaldab praktiliselt võrdse arvu positiivseid ja negatiivseid laenguid, kujutab endast gaasplasmata.

Seni on praktikas kõige rohkem tegemist gaasplasmaga, mistõttu just selles osas on plasmateooria kõige kaugemale arenenud.

Positiivsete ja negatiivsete laengukandjate (elektronide ja aukude) süsteem tahketes kehaes moodustab plasma tahketes kehaes. Kristallvõre laengud sellesse süsteemi ei kuulu!

Plasma koosseisu kuuluvate laengute iseloomu järgi liigitatakse plasmataid järgmiselt: elektron- (metallid ja mõned pooljuhid), auk- (pooljuhid), elektron-auk- (pooljuhid ja mõned sulamid), elektron-ioonplasma (huumlahendus).

Sõltuvalt positiivsete ja negatiivsete laengute vahekorrast võib plasma olla laetud (elektronplasma metallides) ja laadimata (elektron-ioonplasma gaasides).

Tavaliselt arvatakse, et plasmaolek on haruldane nähtus. See puudutab võib-olla ainult gaasplasmata maapealsetes tingimustes (jahtunud keha).

Kuid ka maapealsetes tingimustes on õpilased sageli näinud gaasplasmata: välku, sädet lühiühenduse korral, huumlahendust reklaamvalgustuslampides või, lõpuks, virmalisi.

Maa atmosfääri ülemised, Päikese kiirgusest ioniseeritud kihid kujutavad endast samuti plasmat (ionosfäär). Põhiline mass universumi ainest on ioniseeritud: tähtedes on ionisatsioon tingitud kõrgest temperatuurist, hõredates udugogudes ja tähtedevahelises keskkonnas — tähtede kiirgusest.

Plasma tehnilise kasutamise perspektiivid on erakordselt laiad. Esikohal on looduses laialt levinud kergete elementide tuumadesse koondunud tohutute energiavarude valdamine.

### 23. Elektrivool vaakumis

Gaasidega täidetud torus võib tekkida elektrivool, kui seal on moodustunud laengukandjad (elektronid või ioonid). Kui aga hõrendatud gaasis jääb aatomeid nii väheseks, et nad liiguvad elektrodidele üksteisega kokku pörkamata (olek, mida nimetatakse vaakumiks), siis juhib selline gaas voolu ainult sel juhul, kui torusse viia laetud osakeste allikas. Enamikus kaasaegsetes elektronvaakumseadistes on selleks allikaks kuumkatoode, mis saadab välja elektrone (termoelektroniemissioon).

Eelnevalt võiks korrata elektronide termoemissiooni mehhanismi, kasutades analoogiat vedelike aurumisega, selgitamaks fakti, et katoodi temperatuuri tõusuga suureneb temast väljalendavate elektronide arv.

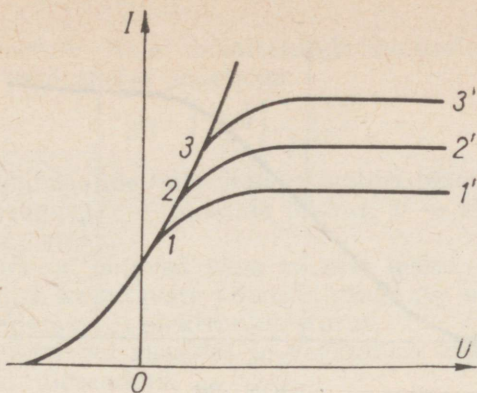
Seejärel selgitatakse kahe elektrodiga elektronlambi — diodi ehitust. Kuna elektrivälja suund on anoodilt katoodile, suunduvad katoodi ümber tekkinud elektronpilve elektronid selle välja mõjul katoodilt anoodile. Pooluste vahetamisel lambis voolu ei ole, vooluring on katkestatud.

Vaakumi isoleerivate omaduste ja diodi töö (ühepoolne juhtivus) demonstreerimiseks võib kasutada üht ja sama seadet.

Diod asetatakse demonstratsioonpaneeli keskele, millele on skemaatiliselt kujutatud anood, katood koos kütteahelaga ja neli klemmi: üks anoodiga ühendamiseks, teine — katoodiga ja kaks tükki — kütteallika ühendamiseks hõõgniidiga. Paneeli tagaküljel ühendatakse need klemmid lambi vastavate väljaviikudega. Voolu olemasolu anoodvooluringis fikseeritakse sinna ühendatud demonstratsioongalvanomeetri abil. Ühendades vooluallika positiivse pooluse anoodiga ja negatiivse katoodiga, konstateeritakse voolu puudumist avatud kütteahela korral.

Seejärel fikseeritakse voolu olemasolu anoodvooluringis suletud kütteahela korral. Lülitades anoodpatarei poolused ümber, demonstreeritakse diodi ühepoolset juhtivust [5, katse 59 või 4, katse 42].

Seadme skeem tuleb joonistada tahvlile (või kasutada varem ettevalmistatud plakati) ja selgitada selle skeemi abil demonstreeritud seadme tööd.



JOON. 27

Pinge-voolu tunnusjoont on tunnis raske saada ja seepärast võib näidata vaid anoodvoolu tugevnemist pinge tõstmisel anoodvooluringis (kütteniidi jääva hõõgumise korral) ja rääkida mitte-lineaarsest sõltuvusest  $I=f(U_a)$ , küllastusvoolust ja selle tekkimise põhjustest.

Käsitletud materjali kinnistamisel võib vaadelda ühe ja sama diodi kahte pinge-voolu tunnusjoont erinevate küttevoolude korral, määrata kindlaks erinevuse nende vahel ja anda sellele selgitus (joon. 27).

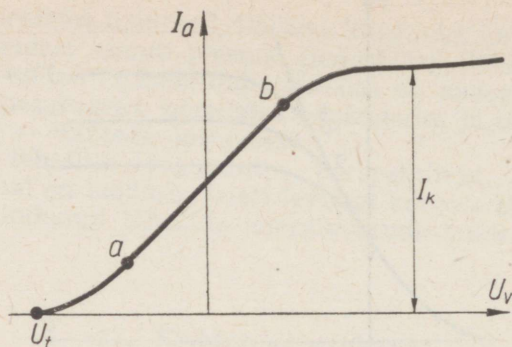
**Triood.** Kolme elektroodiga elektronlampi käsitlemise soovivad mõned meetodikud üle viia peatüki «Elektromagnetilised võnkumised ja lained» juurde, kus vahetult kirjeldatakse ja demonstreeritakse tema kasutamist.

Kuid on sama tugevaid argumente, mis räägivad trioodi käsitlemise kasuks kohe pärast diodi (neist tuleb juttu veidi hiljem). Tuginedes äsja vaadeldud diodi lülitusskeemile ja tööle ning tema pinge-voolu tunnusjoonele, näidatakse, et anoodvoolu võib juhtida lisaelektroodi (või elektroodide) abil, mis asub katoodi vahetus läheduses — ruumlaengu (elektronpilve) piirkonnas.

Lihtsaim, ühe juhtiva elektroodiga (võrega) elektronlamp on triood. Võre ja katoodi potentsiaalide vahe  $U_v$  avaldab oluliselt mõju anoodvoolu suurusele. Kui võre potentsiaal on katoodi potentsiaalst kõrgem, saavad elektronpilve elektronid võre suunas lisakiirenduse, läbivad võre ja jõuavad anoodile.

Katoodi suhtes negatiivse võrepotentsiaali korral saavad elektronid lisakiirenduse katoodi suunas, anoodvool nõrgeneb ja võib täielikult katkeda.

Võre juhtivat osa võib demonstreerida seadme abil, mille skeem on toodud õpikus joonisel 224.



JOON. 28

Selle seadme abil võib saada ka tõkkepinget — võrepinge väärtust, mille puhul anoodvool katkeb.

Seadme skeem tuleb joonistada tahvlile ja selgitada selle põhjal trioodi töötamist.

Sageli kerkib õpilastel küsimus: «Kas on otstarbekas elektronlampide ehitust keerukamaks teha, viies neisse uusi elemente, kui anoodvoolu võib reguleerida ka anoodpinge või küttevoolu abil?»

Võre tunnusjoonel  $I_a(U_v)$  (joon. 28) on pikk sirgjooneline osa ( $ab$ ), kus ühesugustele võrepinge juurdekasvudele  $\Delta U_v$  vastavad ühesugused anoodvoolu muutused  $\Delta I_a$ . Kui tahaksime muuta anoodvoolu anoodpinge muutmisega konstantsel võrepingel samas ulatuses  $\Delta I_a$ , tuleks anoodpinget suurendada  $\Delta U_a \gg \Delta U_v$  võrra.

Niiviisi kasutame trioodi käsitlemisel õpilaste äsja omandatud teadmisi diodist ja loome aluse küllalt keeruka ja uutelt mõistetelt rikka teema «Elektromagnetilised võnkumised» omandamiseks.

## 24. Elektronkiired. Elektronkiiretoru

Elektronkiire saamine ja muutused, mida nad keskkonnas esile kutsuvad (kuumenemine, röntgenikiirgus, helendumine), on kirjeldatud õpikus § 114.

Koolis uuritakse elektronkiiri, mis saadakse lahendustorudes, kus positiivsed ioonid löövad katoodilt elektrone välja (nähtus, mis on õpilastele juba tuttav).

Jälgides kiire kõrvalekaldumist elektriväljas, mis tekib elektrostaatiliselt masinaga ühendatud kondensaatori plaatide vahel, võib kiire kalde põhjal määrata ka masina polaarsuse.

Seejärel võib uurida, mis juhtub elektronkiirega, kui muuta kondensaatori polaarsust, ja millest sõltub kiire kalde suurus. Selle juures saab ära kasutada varem (teemas «Elektrostaatika») lahendatud ülesannet, milles vaadeldi plaatkondensaatori laetud plaatide vahel liikuva elektroni kõrvalekaldumist. Faktiliselt

saab sealt vastuse äsja püstitatud küsimusele. Elektronikiire kalde suurus määratakse valemiga:

$$\Delta l = \left( \frac{e}{m} \right) \frac{\Delta \varphi L^2}{2v^2 l},$$

kus  $\Delta \varphi$  on potentsiaalide vahe kondensaatori plaatidel;  $l$  — plaatidevaheline kaugus;  $L$  — plaatide pikkus;  $v$  — elektroni kiiruse horisontaalkomponent.

Kuna elektronid omavad väga väikest massi, on elektronikiir äärmiselt tundlik kallutatavate plaatide pinge  $\Delta \varphi$  muutusele. Seda omadust rakendataksegi elektronikiiretorus.

Teema «Elektrivool gaasides ja vaakumis» kohta soovitatakse järgmist tüüpi ülesandeid.

1. Määrata elektronkahurist väljalendavate elektronide kiirus, kui nad läbivad kahuris potentsiaalide vahe 500 V. Mitu heeliumi aatomit võib ioniseerida üks sellistest elektronidest, kui kogu tema energia läheb heeliumi aatomi ühekordseks ioniseerimiseks. Ionisatsioonenergia  $A = 24,6$  eV.

L a h e n d u s. Elektronkahurist väljalendava elektroni kineetiline energia on võrdne tööga, mida teevad elektrivälja jõud, kui elektron läbib potentsiaalide vahe  $\Delta \varphi$ :

$$\frac{mv^2}{2} = e\Delta \varphi \approx nA,$$

kus  $n$  on ioniseeritud heelumiaatomite arv. Järelikult,

$$v = \sqrt{\frac{2e\Delta \varphi}{m}} = 13300 \frac{\text{km}}{\text{s}}, \quad n = 20.$$

2. Kõrgepingeallikaga on läbi takisti  $R = 1000 \Omega$  ühendatud kondensaator mahtuvusega  $C = 8$  cm ja plaatidevahelise kaugusega  $l = 3$  mm. Õhk ioniseerub kondensaatori plaatidevahelises ruumis, kusjuures  $1 \text{ cm}^3$  moodustub  $n = 10^4$  ioonipaari sekundis. Iga iooni laeng võrdub elektroni laenguga. Leida pingelang takistil  $R$ , arvestades, et kõik ioonid jõuavad kondensaatori plaatidele vahepeal rekombineerumata.

L a h e n d u s. Pingelang takistil

$$\Delta \varphi = IR,$$

kus  $I$  on voolu tugevus juhul, mis võrdub kondensaatori plaatide vahel tekkinud voolu tugevusega, s. t.

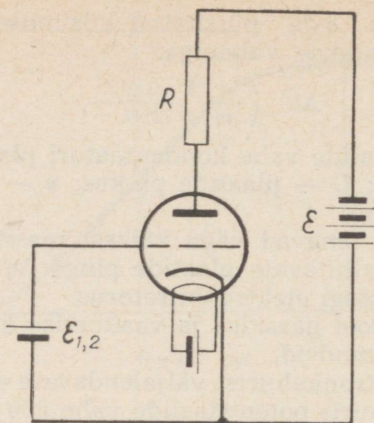
$$I = enSl,$$

kus  $e$  on elektroni laeng,  $S$  — kondensaatori plaadi pindala.

Plaatkondensaatori korral

$$C = \frac{S}{4\pi l}$$

või  $S = C4\pi l$ .



JOON. 29

Järelikult

$$\Delta\varphi = en4\pi Cl^2 R \approx 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ V.}$$

Juhime tähelepanu raskustele, mis tekivad tavaliselt seoses ioonipaaride arvu määramisega. Võttes õigesti voolukandjate kontsentratsiooniks paaride kahekordse arvu, s. t. positiivsete ja negatiivsete ionide koguarvu ruumalaühikus, asetavad õpilased selle väärtuse voolutugevuse valemisse (meie näites  $2n$ ). Seda viga võib vältida, olles selgitanud järgmist. Oletame, et mingis lahendusvahemikus tekkis ioonipaar. Positiivneioon liigub tekkkohast välja suunas, negatiivne — väljale vastassuunas. Joonise abil on kerge näidata, et selline ioonipaari liikumine on samaväärne ühe iooni kulgemisega ühelt plaadilt teisele.

Antud ülesande lahendamisel CGSE-süsteemis tuleb tähelepanu juhtida oomi teisendamisele selle süsteemi ühikuteks ( $1\Omega = \frac{1\text{V}}{1\text{A}} = \frac{1}{300 \cdot 3 \cdot 10^9} \text{ CGSE-süsteemi takistuse ühikut}$ ).

Ühikute süsteemide kinnistamiseks võib soovitada selle ülesande lahendamist ka SI-süsteemis. Seejuures  $\Delta\varphi = \frac{enCl^2R}{\epsilon_0}$ , kus  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $n = 10^{10} \text{ m}^{-3}$ ,  $C = \frac{8}{9 \cdot 10^{11}} \text{ F}$  ja  $l = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

3. Elektronlamp on ühendatud patarei (emj.  $\mathcal{E} = 250 \text{ V}$ ) vooluringi järjestikku takistiga  $R = 10\,000\Omega$  (joon. 29). Lambi võre on ühendatud patarei ( $\mathcal{E}_1 = 6\text{V}$ ) negatiivse poolusega, katood aga selle positiivse poolusega. Takistil  $R$  tekib seejuures pingelang  $\Delta\varphi = 60\text{V}$ .

Kui patarei  $\mathcal{E}_1$  asemel lülitada patarei  $\mathcal{E}_2$ , mille emj. on  $3\text{V}$ , tekib takistil  $R$  pingelang  $\Delta\varphi = 95\text{V}$ . Millega võrdub anoodvool ja potentsiaalide vahe anoodi ja katoodi vahel, kui võre ühendada katoodiga? Vaadeldavas osas on lambi võre tunnusjoon sirge.

Lahendus.  $\mathcal{E}_1 = -6\text{V}$  korral anoodvoolu tugevus  $I_1 = \frac{\Delta\varphi_1}{R}$ ,  
 $\mathcal{E}_2 = -3\text{V}$  korral aga vastavalt  $I_2 = \frac{\Delta\varphi_2}{R}$ .

Võrepotentsiaali tõstmine  $\Delta\mathcal{E} = \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1 = 3\text{V}$  võrra kutsub esile anoodvoolu muutuse

$$\Delta I = I_2 - I_1 = \frac{\Delta\varphi_2 - \Delta\varphi_1}{R} = 3,5 \text{ mA.}$$

Kuna võre tunnusjoon vaadeldavas vahemikus on sirge, siis võrepotentsiaali tõstmine veel  $3\text{V}$  võrra ( $-3\text{V}$  kuni nullini suletud võre ja katoodi korral) kutsub esile anoodvoolu uue kasvu  $3,5 \text{ mA}$  võrra.

Seejuures suureneb pingelang takistil  $R$  veel

$$\Delta\varphi = R\Delta I = 35 \text{ V võrra,}$$

s. t. saab võrdseks  $\Delta\varphi_3 = \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi = 130 \text{ V}$ , otsitav potentsiaalide vahe anoodi ja katoodi vahel aga väheneb kuni  $\mathcal{E} - \Delta\varphi_3 = 120 \text{ V}$ .

Selle ülesande analüüsimisel on väga kasulik vaadelda põhjuslike seoste järjestikust ahelat, mis ilmneb trioodis võrele antava negatiivse potentsiaali vähendamisel.  $|U_v|$  vähendamine viib anoodvoolu kasvule, mis põhjustab pingelangu suurenemise välis- takistusel, see omakorda kutsub vooluallika jääva emj. korral esile pinge langemise trioodis. Raadiotehnikas räägitakse sel juhul tinglikult lambi takistuse vähenemisest, millega ongi seotud pinge ümberjaotumine lambi ja välis- takistuse vahel.

## 25. Vastused peatükis «Elektrivool erinevates keskkondades» esitatud küsimustele

1. Kas anoodi paigutamisel katoodi pimeruumi tekib huumlahendus?

Huumlahendusel löövad positiivsed ioonid katoodilt elektrone välja. Positiivsed ioonid omakorda tekivad aga elektronide põrkumisel gaasi aatomitega. Anoodi paigutamisel katoodi pimeruumi jõuavad elektronid anoodile peaaegu ilma gaasi aatomitega põrkumata ning huumlahendust ei teki.

2. Mis juhtub põleva elektriikaarega, kui negatiivset söepulka tugevasti jahutada? Mis juhtub siis, kui jahutada positiivset söepulka?

Katoodi jahutamisel elektronide termoemissioon katoodilt peaaegu lakkab ja kaar kustub. Anoodi jahutamisel põleb kaar edasi.

3. Paljude dielektrikute aatomid on seotud kaksiksidemega nagu pooljuhtideski. Miks ei muutu need dielektrikud temperatuuri tõusmisel pooljuhtideks?

Dielektrikutes on kaksiksideme energia tunduvalt suurem kui pooljuhtides, seepärast muutub nende juhtivus oluliselt palju

kõrgematel temperatuuridel kui pooljuhtidel (sellistel temperatuuridel dielektrik sulab).

4. Mis juhtub elektroni kohtumisel auguga?

Elektroni kohtumisel auguga taastub molekulis kaksikside (toimub rekombinatsioon).

5. Miks on pooljuhtdetailide valmistamiseks vaja keemiliselt peaaegu absoluutselt puhtaid pooljuhte?

Pooljuhtdetailide (diodide, trioodide) valmistamisel on vaja keemiliselt ülipuhtaid lähtematerjale seepärast, et oleks võimalik sisse viia rangelt doseeritud aktseptor- või doonorlisandeid.

## 26. Teema «Elektrivool erinevates keskkondades» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku pa- ragrahid
1.-2.	Mitmesuguste keskkondade elektrijuhtivus. Elektrivool metallides. Ohmi seaduse molekulaarkineetiline selgitus.	§ 102-104
3.	Ülesannete lahendamine.	
4.	Elektrivool elektrolüütides. Faraday seadused. Elektrolüüsi praktilisi rakendusi.	§ 105-106
5.	Ülesannete lahendamine.	
6.	Laboratoorne töö «Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine».	
7.	Elektrivool gaasides. Sõltuv gaaslahendus.	§ 107-108 (I osa)
8.-9.	Sõltumatu gaaslahendus. Sõltumatu gaasiahenduse liigid. Elektronide termoemissioon. Plasma.	§ 108 (II osa)
		§ 109
		§ 110
10.	Ülesannete lahendamine.	
11.	Elektrivool vaakumis. Diodi ehitus.	§ 111-112
12.	Trioodi ehitus.	§ 113
13.	Elektronkiired. Kondensaatori elektriväljas liikuva elektroni kõrvalekaldumine (ülesande lahendamise). Elektronkiiretoru.	§ 114
14.	Ülesannete lahendamine.	
15.-17.	Pooljuhtide elektrilised omadused. <i>p-n</i> -siire.	§ 115-117
18-19.	Pooljuhtseadised. Kokkuvõtte teemast «Elektrivool erinevates keskkondades. Ülesannete lahendamine.	§ 118, 119

## IV. VOOLU MAGNETVÄLI

Antud teema õppimist alustatakse põhikatsetega, millest selgub, et liikuvate laengute vahel tekivad jõud, mis erinevad paigalseisvate laengute vahel mõjuvatest jõududest. Need jõud avastati esmakordselt nende mõju järgi magnetnõelale ja nimetati see-tõttu magnetjõududeks. Vaadeldes aga magnetismi olemusele

tänapäeva teaduse seisukohalt, tuleks neid jõude nimetada elektrodünaamilisteks.

Kogu selle teema kohta käiva materjali võib jagada kahte suurde ossa. Esimese osa moodustaks liikuvate laengute magnetvälja ja selle karakteristiku — induksioonivektori  $\vec{B}$  tundmaõppimine, teise ossa kuuluks aga liikuvatele laengutele (voolule) antud magnetväljas mõjuvate jõudude uurimine (Ampère'i seadus, Lorentzi jõud).

Elektromagnetismi nähtuste kirjeldamiseks kasutatakse füüsikas kahte suurust: magnetvälja tugevust  $\vec{H}$  ja magnetilist induksiooni  $\vec{B}$ . Isotroopse keskkonna jaoks kehtib SI-süsteemis valem  $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$ .

Kuna magnetvälja kõik välised tähtsamad ilmingud aines (välja mõju voolule, elektromagnetiline induksioon) määratakse induksiooniga  $\vec{B}$ , on otstarbekas kasutada keskkoolis elektromagnetismi õppimisel ainult magnetilise induksiooni  $\vec{B}$  mõistet. See asjaolu kergendab tunduvalt materjali käsitlemist ja muudab selle kaasaegsemaks.

Pidades silmas magnetvälja mõiste komplitseeritust, tuleb pöörata erilist tähelepanu sellele, et õpilastel tekiks selge ettekujutus magnetvälja omadustest ja ilmingutest. Selleks tuleb kasutada võimalikult palju füüsikalist eksperimenti. Muidugi on tähtis ka teoreetiline analüüs ning magnetvälja ja elektrivälja omaduste vastandamine. Seejuures tuleb aga kindlasti silmas pidada, et elektri- ja magnetväli kujutavad endast ühtse elektromagnetvälja erinevaid komponente.

## 27. Magnetiline vastastikune mõju. Magnetväli

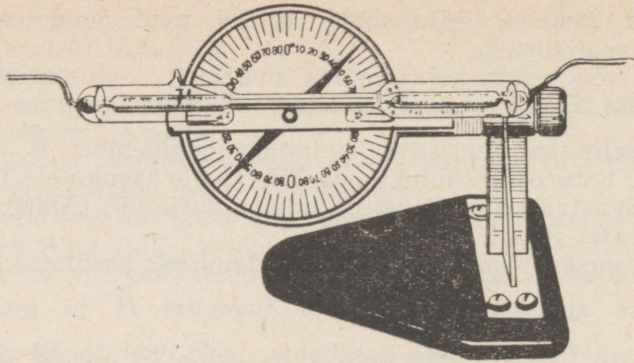
Esmakordselt tutvuvad õpilased magnetvälja mõistega VIII klassis, mida tuleb arvestada ja kasutada ka selle teema edasisel õpetamisel. Seoses sellega on kasulik õpilastele meelde tuletada põhilisi elektromagnetismi iseloomustavaid mõisteid.

1. Iga vooluga juhi (nii tahke, vedela kui ka gaasilise) ümber on magnetväli.

2. Eriti tugev magnetväli on vooluga poolil.

3. Magnetilised omadused on magnetrauamaagil ja magneeditud terasesemetel (püsimagnetid). Nende magnetism on tingitud molekulaarvooludest.

Tunni sissejuhatavas osas tuleb rääkida elektromagnetismi õpetuse suurest teaduslikust ja praktilisest tähtsusest (magnetväljade kasutamine aine omaduste uurimisel, nende rakendamine mitmesugustes elektro- ja raadiotehnilistes seadmetes jne.). Võib meenutada ka seni veel lõpuni lahendamata magnetismi



JOON. 30

saladusi. (Millest on tingitud Maa magnetväli? Miks Kuul magnetväli puudub? Kas magnetväli mõjub ka elusorganismidele? jne.)

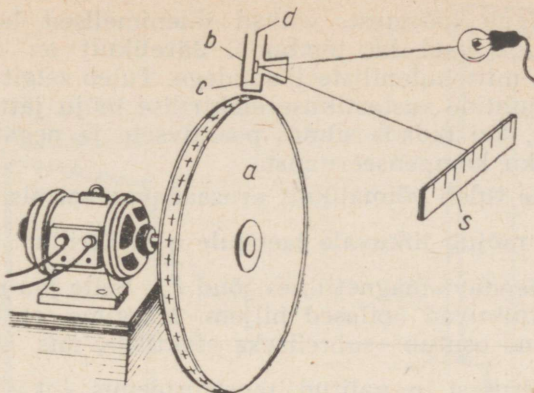
Edasi, sõltuvalt õpilaste ettevalmistusest ja õpetaja käsutuses olevast ajavarust, võib magnetilise vastastikuse mõju käsitlemist alustada kooskõlas õpiku § 120 materjaliga või vaadelda põhjalikumalt Oersted'i põhikatset (joon. 34). Siinjuures võib lasta õpilastel endil mõelda katse skeem, mille põhjal saaks kindlaks teha voolu magnetvälja elektrolüüdis ja gaasis.

Katse elektrolüüdiga erilisi raskusi ei valmista. Samasugune katse magnetvälja kindlakstegemiseks gaasis on juba keerukam. Selleks võib kasutada elavhõbelampi ППК-2 [5, lk. 221] või mõne helendava gaasiga täidetud toru. See toru (joon. 30) ühendatakse sädeinduktoriga ИВ-100, mis on seatud torust 1,5 — 2 m kaugusele. Sädeinduktor ИВ-100 tekitab gaasitorus (näiteks neoniga täidetud torus) voolu, mille tegevus ühes suunas on tunduvalt suurem kui teises suunas. Seda põhjustab asjaolu, et sekundaarmähises on pinge primaarse vooluringi katkestamise momendil suurem kui selle sulgemisel.

Algul tehakse magnetvälja olemasolu kindlaks voolu juhtivate metalljuhtide ümber (Oersted'i katse), seejärel ka gaasiga täidetud toru ümbruses.<sup>1</sup>

Katse õnnestub hästi tundliku ja küllalt suure osutiga inklinatsiooni-deklinatsiooni näitava seadise abil, mis horisontaalsele pinnale asetamisel kaldub 5 — 10° võrra. (Et teha osuti pöördumine hästi nähtavaks, võib kasutada kaldpeeglit või koguni variprojektsiooni.) Katse efektiivsuse tõstmiseks võib kasutada ka järgmist võtet. Muutes induktsioonpooli lüliti abil voolu suunda osuti võnkumise taktis, võib osuti kaldenurka suurendada 50 — 60 kraadini.

<sup>1</sup> Esimesena tegi taolise katse A. F. Joffe 1912. a. Peterburis.



JOON. 31

Tutvustavas plaanis võib õpilastele näidata ka Rowlandi-Eichenwaldi<sup>1</sup> katse skeemi (joon. 31).

Selles katses tekitavad pöörleval kettal *a* asuvad elektrilaengud magnetvälja, mille olemasolu tehakse kindlaks galvanomeetriga *b*. Galvanomeetri tundliikuks elemendiks on püsomagnet *c*, mis pöörab riputusniiti *d*. Magneti pöördenurga suuruse üle otsustatakse riputusniidi külge kinnitatud peegilt peegeldunud valguskiire liikumise järgi skaalal *s*. Kõigi antud katsete põhjal peab õpilastele selgeks saama, et liikuvate laengute ümber eksisteerib «magnetväli».

Selle mõiste sisu avatakse õpikus § 120 esitatud materjali edasisel käsitlemisel. Seejuures pääratakse tähelepanu just neile erinevustele ja iseärasustele, mille poolest magnetväli erineb varem õpitud elektriväljast. Sel eesmärgil tehakse katse, mille käigus analüüsitakse kahe paralleelse vooluga juhtme ja kahe staatilise laenguga juhi vastastikust mõju.

Juhtidena on kõige parem kasutada pehmeid isoleeritud telefonijuhtmeid või stanniolribasid.

Juhid kinnitatakse klemmidele vabalt. Umbes 5 A voolu korral, kui juhtide kaugus teineteisest on umbes 1 cm, on hästi nähtav ühesuunaliste voolude tõmbumine ja vastassuunaliste voolude tõukumine.

Voolu olemasolu indikaatoritena on soovitatav ühendada vooluringi üks või mitu hõõglampi (lampreostaat), mis on arvestatud mõneamprisele voolutugevusele.

Katse põhjal tehakse järeldus: elektrilaengute liikumisel esineb nende vahel, erinevalt paigalseisvatest laengutest, magnetiline vastastikune mõju.

<sup>1</sup> A. A. Eichenwald tegi oma katsed Moskvas aastail 1901—1904.

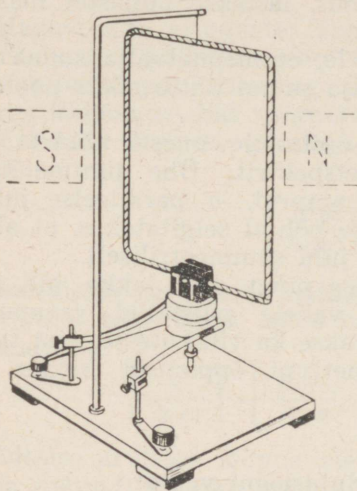
Nagu selgub katsetest, võivad ühenimelised laengud mitte ainult tõukuda, vaid ka tõmbuda. Järelikult on siin tegemist teistsuguste, mittekuloniliste jõududega. Tuleb selgitada, et antud juhul võib juhtide vastastikuse elektrilise mõju jätta praktiliselt arvestamata, kui pidada silmas positiivsete ja negatiivsete laengute täielikku kompenseerumist.

Õpilastele tuleb võimalikult arusaadavas vormis selgeks teha, et üldjuhul mõjub liikuvale laengule  $q$  elektriline jõud  $\vec{F}_h = q\vec{E}$  ja teatud täiendav «magnetiline» jõud  $\vec{F}_m$ . Selle jõu matemaatilise avaldisega tutvuvad õpilased hiljem. Märkime, et «magnetilise» jõu tekkimine osutub «suhteliseks efektiks», mis sõltub laengu liikumise kiirusest  $\vec{v}$  valitud taustsüsteemis (vt. lk. 81 ja 84). Antud juhul on laengute kiirus juhtide (Maa) suhtes väike ja ulatub vaid millimeetri osadeni sekundis. Mida väiksem on kiirus (õigemini suhe  $\frac{v^2}{c^2}$ ), seda nõrgem on magnetiline vastastikune mõju. Kui kiirus võrdub nulliga, siis vastastikune mõju katkeb. Järelikult tuleb magnetvälja omaduste tundmaõppimiseks uurida tema mõju liikuvatele elektrilaengutele. Seejuures on sobiv kasutada väikest vooluga raami.

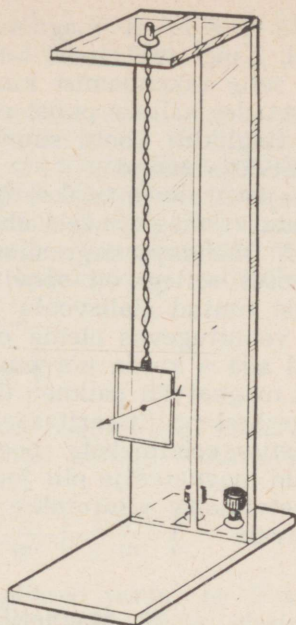
Selle mõtte selgitamiseks võib esialgu kasutada Hozanovi voolukontuuri (joon. 32), näidates, et see võtab püsिमagnetite väljas alati kindla asendi. Edasi selgitatakse, et magnetvälja uurimiseks ruumi erinevates punktides tuleb valida võimalikult väikeste mõõtmetega raam. Sellise küllaltki tundliku kontuuri võib valmistada ise, mähkides mingile alusele, näiteks vahtplastitükile mõõtmetega  $40 \times 40$  mm 50 — 100 keerdu lakkisolatsiooniga juhet diameetriga 0,08—0,13 mm. Raamike tuleb riputada puust või pleksiklaasist karkassile umbes nii, nagu seda on tehtud peegelgalvanomeetrites (joon. 33). Raami keskele, risti selle tasapinnaga, kinnitatakse vahtplasti külge puust varras (normaal).

Selle seadeldise töötamise selgitamiseks juhitakse raami voolu ja näidatakse selle pöördumist Maa magnetväljas. Küllalt tugeva voolu korral asetub raam nii, et tema tasapinna normaali suund ühtib magnetnõela suunaga. Erinevus raami normaali ja magnetnõela suuna vahel seletub riputusjuhtmete elastsusega. Analooiline katse on soovitatav korraldada universaalse koolitransformaatori pooliga. Pärast seda paigutatakse järjekordselt vooluraam ja magnetnõel vooluga juhtme ja püsिमagneti lähedal mitmesugustesse ruumipunktidesse ning täheldatakse, et raami normaal asetub peaaegu samuti nagu magnetnõel. Järelikult avaldab magnetväli vooluga raamile orienteerivat toimet.

Õpitud materjali kinnistamiseks lahendatakse järgmine ülesanne: «Hoburaudmagneti pooluste vahele on riputatud vabalt mingi juht. Kas magnetväli kallutab juhi kõrvale, kui anda talle positiivne laeng?»



JOON. 32



JOON. 33

Üsna tihti arvavad õpilased, et juht tõukub põhjapoolusest eemale ja kaldub lõunapooluse poole, sest ühenimelised laengud ju tõukuvad ja erinimelised tõmbuvad. Kontrolliks läbiviidud katse lubab teha nende jaoks ootamatu järelduse, et magnetväli paigalseisvatele laengutele ei mõju. Selle juhi saab panna magnetväljas liikuma ainult siis, kui juhime temast läbi voolu.

Kokku võttes peaksid õpilased selle materjali õppimise lõpuks teadma, et valitud taustsüsteemis liikuva laengu ümber eksisteerib alati magnetväli. See väli mõjub omakorda teistele samas süsteemis liikuvatele laengutele. Harilikult vaadeldakse laengute või voolu liikumist taustsüsteemis, mis on seotud Maaga.

Magnetväli on materiaalne. Ta mõjutab paljusid füüsikalisi nähtusi, protsesse ja kehade omadusi.

Seepärast ongi magnetismi õppimisel põhiülesandeks uurida magnetvälja mõju liikuvatele laengutele.

## 28. Magnetvälja suund

Pöördudes tagasi varem näidatud katsete juurde (joon. 31 ja 32), rõhutatakse magnetvälja orienteerivat toimet vooluga raamile ja seega ka magnetjõudude kindlat suunda. Seejuures tule-

tatakse meelde, et magnetvälja suund määratakse krüvireegli põhjal. Kuigi see reegel on õpilastel teada juba VIII klassist, tuleb selle rakendamist kindlasti uuesti harjutada.

Asetades näiteks puust raami ühte või teise asendisse ja määrates tinglikult voolu suuna raamis, lastakse õpilastel määrata magnetvälja suund.

Seejärel meenutatakse õpilastele, et magnetvälja suuna võib määrata ka magnetnõela abil. Välja suund ühtib nõela pooluseid  $S$  ja  $N$  ühendava sirge suunaga.

Seoses sellega on soovitatav õpilastele uuesti näidata VIII klassist tuntud alalisvoolu magnetspektrit. Ühe juhtme korral peab voolutugevus olema mõned amprid,  $n$  paralleelse juhtme korral aga  $n$  korda nõrgem. Katse põhjal selgitatakse, et alalisvoolu magnetväli paikneb ümber juhi sümmeetriliselt.

Seejärel projitseeritakse optilise pingi abil lakke pilt püsimagnetite erinimeliste pooluste vahele puistatud rauapurust. Saadud magnetvälja pilt joonistatakse ka vihikutesse, sest taolise magnetväljaga puututakse magnetismi õppimisel kokku veel korduvalt.

## 29. Magnetilise induksiooni vektor

VIII klassi füüsikakursusest on õpilastel teada, et jooni, mille puutujate suunas asetuvad kõik magnetnõelad, nimetatakse jõujoonteks. Õpilastele on tuntud ka elektrivälja jõujoonte ja tema jõukarakteristiku — väljatugevuse  $\vec{E}$  mõiste. Seepärast peaks olema neile täiesti arusaadav, et ka magnetväljal peab olema oma vektoriaalne jõukarakteristik. Ilmselt võib magnetvälja iseloomustada vooluraami või magnetnõela pöördumise järgi. Seda mõistet selgitatakse edasi katse varal. Raam (joon. 33) paigutatakse magnetite erinimeliste pooluste vahele ja juhitakse temasse vool, mida mõõdetakse demonstratsiooniampermeetriga. Katseriista pöörates tehakse kindlaks, et riputusjuhtmed keerduvad kõige suurema nurga võrra, kui raami normaal asetub risti välja jõujoontega.

Katse abil näidatakse, et raami maksimaalne pöördenurk on võrdeline voolutugevusega raamis. Ühtlasi teatatakse, et pöördenurk sõltub võrdeliselt ka raami pindalast. Kui õpetajal jätkub aega, võib nimetatud fakti demonstreerida, võrreldes erineva suurusega raamide pöördenurki ühe ja sama voolutugevuse korral. Seejuures tuleb silmas pidada, et erineva pindalaga raamid oleks võrdne arv juhtmekeerde. Katsetest järeldub, et raamile mõjuv pöördemoment  $M$  on võrdeline raami pindalaga  $S$  ja voolutugevusega  $I$ ;

$$M_{\max} \sim IS^2$$

<sup>1</sup> Suurust  $IS$  nimetatakse raami magnetiliseks momendiks.

Võrdetegurit nimetatakse antud juhul magnetiliseks induktsooniks ja tähistatakse harilikult tähega  $B$ . Ilmselt

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}$$

Magnetvälja erinevates kohtades on magnetiline induktsoon  $B$  erinev, sest pöördemoment  $M_{\max}$  pole igal pool sama. Välja ühes ja samas punktis on aga induktsoon  $B$  alati ühesugune. See suurus iseloomustabki magnetvälja selles ruumpunktis.

Valemist järgneb, et magnetilise induktsooni mõõtühik on järgmine:

$$\left[ \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right]$$

Soovitav on anda õpilastele ka magnetilise induktsooni mõõtühiku teine kuju, mida nad võivad kohata vastavasisulisel kirjanduses:

$$\left[ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} \right] = \left[ \frac{\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{J} \cdot \text{s}}{\text{C} \cdot \text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right]$$

Edasise arutluse käigus saavad õpilased teada, et  $\text{V} \cdot \text{s}$  (volt korda sekund) kannab nimetust veeber (Wb). Selle järelduseni võivad õpilased jõuda ka ülesannete iseseisval lahendamisel.

Vektori  $\vec{B}$  suund langeb ühte prooviraami normaali suunaga ja see määratakse eespool mainitud kruvireegli abil.

Tähtsaks mõisteks, mis aitab õpilastel luua mingi piltliku kujutluse magnetväljast, on magnetilise induktsooni jooned. Õpikus on nad määratletud joontena, mille puutujad on samasuunalised induktsoonivektori  $\vec{B}$  suunaga samas punktis. Ringvoolu ja solenoidi magnetilise induktsooni joonte näite põhjal (õpiku joonised 270 ja 271) tuleb selgitada, et induktsoonijooned, erinevalt elektrivälja jõujoontest, on kinnised. Magnetväli on pöörisväli ja selle mõiste olemus on õpilaste jaoks uus, võrreldes sellega, mida nad õppisid magnetväljast VIII klassis.

Materjali kinnistamiseks on kasulik läbi arutada järgmine küsimus.

Milles seisneb elektrivälja tugevuse  $\vec{E}$  ja magnetilise induktsooni  $\vec{B}$  sarnasus ja milles erinevus?

L a h e n d u s .

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}; \quad \vec{B} = \frac{\vec{M}_{\max}}{IS}$$

Suurused  $\vec{E}$  ja  $\vec{B}$  on vastavalt elektri- ja magnetvälja vektoriaalsed jõukarakteristikud. SI-süsteemis on  $\vec{E}$  arvuliselt võrdne

jõuga, mis mõjub laengule  $1C$ ,  $\vec{B}$  aga võrdub jõumomendiga, mis mõjub  $1m^2$  suuruse pindalaga raamile, kui voolutugevus selles on  $1A$ . ( $\vec{B}$  on arvuliselt võrdne jõumomendiga, mis mõjub raamile, mille magnetiline moment on  $1$ .)

Erinevalt elektrivälja tugevusest  $\vec{E}$ , mida iseloomustatakse jõu mõiste abil, määrab magnetilise induktsiooni  $\vec{B}$  jõumoment, mis annabki tunnistust magnetvälja pööriselisest olemusest.

### 30. Voolu magnetväli

Antud osa õppimisel peavad õpilased saama ettekujutuse sellest, et magnetvälja induktsioon  $\vec{B}$  sõltub keskkonnast, voolutugevusest ja juhtme kujust ning sellest, et  $\vec{B}$  on alati arvutatav või mõõdetav.

Õpilastele selgitatakse, et induktsioon vaakumis on midagi muud kui mingis keskkonnas, kus võivad esineda näiteks molekulaarvoolud ja järelikult ka lisamagnetväljad. Keskkonna magnetilisi omadusi iseloomustab suurus  $\mu$ , mida nimetatakse keskkonna magnetiliseks läbitavuseks:  $\mu = \frac{B}{B_0}$  või  $B = \mu B_0$ . Vektor  $\vec{B}$  on siin magnetiline induktsioon mingis ühtlases keskkonnas,  $B_0$  aga vaakumis.

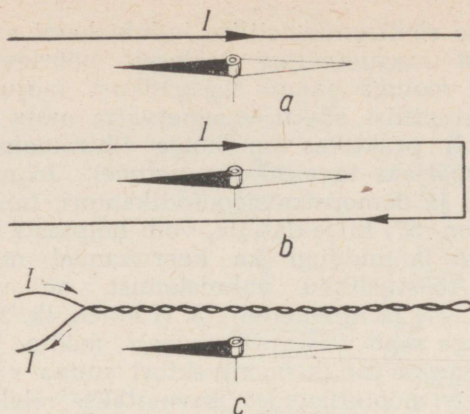
Magnetilise induktsiooni  $B$  teoreetilistest arvutustest ja tema mõõtmisest tuleb keskkoolis anda vaid kõige üldisem ettekujutus.

Teoreetilised arvutused põhinevad Biot'-Savart'i-Laplace'i seadusel, mille kohaselt vooluelemendi (selle all mõeldakse voolutugevuse  $I$  ja juhtmelõigu  $\Delta l$  korrutist) poolt tekitatud induktsioon avaldub valemiga  $B = k \frac{I \Delta l}{R^2} \sin \alpha$ , kus  $R$  on valitud ruumipunkti kaugus vooluelemendist,  $\alpha$  — nurk  $R$  ja  $\Delta l$  vahel. Tegur  $k$  sõltub valitud mõõtühikute süsteemist. Integreerides selle avaldise vastavalt lõpmata pika juhtme kohta, saame

$$B = k \frac{2I}{R_0} . \quad (1)$$

$R_0$  on siin valitud väljapunkti kaugus juhtmest. Antud materjali kordamisel XI klassis, kus õpilased on juba õppinud integraalarvutust, on soovitatav lasta see avaldis neil endil tuletda. X klassis tuleb anda vastav valem ainult SI-süsteemis valmis kujul:

$$B = \mu \mu_0 \frac{I}{2\pi R_0} . \quad (2)$$



JOON. 34

Valemite (1) ja (2) võrdlemisest selgub, et SI-süsteemis on

$$k = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}.$$

Tegurit  $\mu_0$  nimetatakse magnetiliseks konstandiks ja sõltub mõõtühikute süsteemi valikust.

Ülesannete lahendamise juures on soovitatav anda valem induktsiooni  $B$  arvutamiseks ringvoolu keskpunktis:

$$B = \sum \Delta B = \sum k \frac{I \Delta l}{R^2} \sin \alpha.$$

Kuna  $\alpha = 90^\circ$ , suurused  $k$ ,  $I$  ja  $R$  on aga konstantsed, siis

$$B = k \frac{I}{R^2} \sum \Delta l = k \frac{I}{R^2} 2\pi R = k \frac{2\pi I}{R} = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}.$$

Induktsiooni  $\vec{B}$  kvalitatiivset sõltuvust juhtme kujust võib näidata lihtsa katsega.

Pika vooluga juhtme alla asetatakse magnetnõel ja vaadeldakse selle kõrvalekaldumist (joon. 34,a). Seejärel painutatakse juhe selliselt, nagu on näha joonisel 34,b. Magnetnõela kõrvalekalle suureneb nüüd veelgi. Siis keerutatakse juhe kokku nii, nagu on näidatud joonisel 34,c. Viimasel juhul magnetnõel enam magnetvälja «ei avasta». Järelikult on vooluga bifilaarse juhtme magnetvälja magnetiline induktsioon  $B$  võrdne nulliga. Seda bifilaarse juhtme omadust kasutatakse paljudes aparatuurides, mida võib selgitada ülesriputatud raami, s. o. magnetomeetri mudeli põhjal (joon. 33).

Keskkooli jaoks tööstuses magnetomeetreid ei toodeta. Seepärast tuleb õpetajal need esialgu ise valmistada või kasutada vastavaid tehnilisi mõõteriistu. Magnetvälja induktsiooni mõõtmis-

seks kasutatakse elektromagnetilise induksiooni nähtust, näiteks voolu tekkimist magnetväljas ühtlaselt pöörlevas kontuuris, magnetvälja ja vooluga raami vastastikust mõju, Holli efekti, Faraday magnetoptilist efekti, magnetvälja mõju juhtide takistusele jne. Kooli praktikas on kõige lihtsamaks magnetvälja indikaatoriks-mõõtjaks tavaline magnetnõel. Joonisel 33 toodud raamindikaatori ja demonratsioonindikaatori, mis on sarnased peatükis VI (joon. 57) kirjeldatuile, võib hõlpsasti ise valmistada.

Täiuslikumad ja muidugi ka keerukamad magnetomeetrid, mis nõuavad tööstuslikku valmistamist, on välja töötatud V. Burovi [4, lk. 77] ja A. Dubovi [3, II köide, lk. 201] poolt. Taoliste aparaatidega saab vastavat suurust mõõta juba kindlates ühikutes ja määrata induksioonivektori suuna valitud väikeses ruumiosas. Neis mõõteriistades kasutatakse elektromagnetilise induksiooni nähtust. Taoliste mõõteriistade töötamisprintsiibiga on soovitatav õpilasi tutvustada elektromagnetilise induksiooni õppimisel. Katseid magnetilise induksiooni mõõtmise kohta kirjeldatakse VI peatükis.

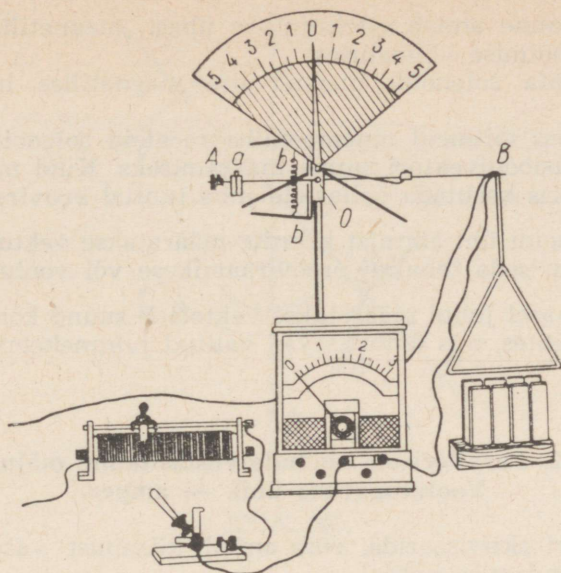
### 31. Ampère'i seadus

Selle teema käsitlemisel võib toimida kahel viisil: esiteks, toetudes õpilaste olemasolevatele teadmistele magnetväljast, anda neile Ampère'i valem ja seejärel selgitada seda katsete varal; teisel juhul näidatakse katsetega jõu  $F$  sõltuvust nii  $I$ -st,  $\Delta L$ -ist,  $B$ -st ja nurgast  $\alpha$  ning alles seejärel kirjutatakse välja Ampère'i valem.

Eelistada tuleks teist selgitusviisi. Üht vastava katse võimalikku varianti soovitab V. Savrassov (vt. «Физика в школе», 1951 nr. 2, lk. 60—62). Katseseadeldises soovitatakse kasutada demonratsioonidünamomeetrit, kuid õigem on siin valida mõni tundlikum dünamomeeter, näiteks aerodünaamiliste katsete universaalsest komplektist, mis on valmistatud füüsika katseriistade vabrikus Lvovis. Samal põhimõttel töötav tundlik ja näitlik dünamomeeter koos teiste katseks vajalike riistadega on toodud joonisel 35. Seadme põhiosaks on kang  $AB$ , mille pöörlemistelg läbib punkti  $O$ . Kang seatakse horisontaalasendisse liikuva vastu-kaalu  $a$  abil. Pöördemomendi tekitavad vedrud  $bb$ , mille elastsus- ja kaugus teljest  $O$  määravadki dünamomeetri tundlikkuse.

Voolutugevust raamis mõõdetakse demonratsiooniampermeetriga. Raami liikumine ei tohi ületada 3 cm, sest püsimgnetite pooluste vaheline magnetväli pole igal pool ühtlane.

Jõu  $F$  sõltuvus juhi aktiivse osa  $\Delta L$  pikkusest tehakse kindlaks püsimgnetite arvu muutmise teel. Seades raami veidi kõrgemale ja pöörates seda veidi, saame näidata, et nurga  $\alpha$  vähene-misel väheneb ka jõud  $F$ . Lõpuks, kui juht asetub piki magnetilise induksiooni jooni, võrdub jõud  $F$  nulliga.



JOON. 35

Pärast nende katsete tegemist kirjutatakse üles Ampère'i seadus:

$$F = I \Delta l B \sin \alpha$$

ja selgitatakse seda. Samas tuletatakse meelde ka VIII klassis õpitud vasaku käe reeglit ja rakendatakse seda juhtudel, kui voolu suund langeb ühte induktsoonivektori  $\vec{B}$  suunaga või on sellega vastupidine. Siin ilmneb kujukalt voolu magnetjõudude erinevus tsentraalsetest elektrijõududest ja gravitatsioonijõududest.

Lõpetuseks tuleb lahendada mõned umbes järgmise sisuga ülesanded.

1. Leida püsिमagnetite välja induktsoon järgmiste andmete põhjal.

$$F = 0,12 \text{ N}$$

$$I = 0,5 \text{ A}$$

$$\Delta l = 0,16 \text{ m}$$

$$n \text{ (keerdude arv)} = 125$$

$$B = \frac{F}{I \Delta l} = \frac{12 \cdot 10^{-2} \text{ N}}{0,5 \cdot 125 \text{ A} \cdot 0,16 \text{ m}} \approx 0,012 \text{ T}$$

Kui koolis on olemas magnetilise induktsooni mõõtja, näiteks ИММ-1, on soovitatav arvutusi kontrollida vahetu mõõtmisega.

Eelnevalt toodud näidisülesande kontrollimine otsese mõõtmise teel andis peaaegu sama tulemuse:

$$B = 100 \text{ Gs} = 0,010 \text{ T} \quad (1 \text{ T} = 10^4 \text{ Gs}).$$

See ülesanne annab ettekujutuse ühest magnetilise induktiooni  $B$  mõõtmise võimalusest.

2. Määrata solenoidi magnetvälja magnetilise induktiooni suund.

On olemas mitmeid mnemoonilisi reegleid solenoidi magnetvälja induktioonivektori suuna määramiseks. Kuid metoodiliselt on otstarbekas kasutada õpilastele juba tuntud krüvireeglit. Vaadeldes solenoidi üht äärmist keerdu, määratakse vektori  $\vec{B}$  suund samuti, nagu seda tehakse prooviraamikese või vooluga juhtme korral. Viimasel juhul määratakse vektori  $\vec{B}$  suund kontsentriliste jõujoonte suhtes, mis ümbritsevad valitud juhtmekeeru ühte väikest lõiku.

### 32. Paralleelsete voolude vastastikune mõju. Voolutugevuse ühik — amper.

Et õpilasi aktiveerida, võib antud küsimust vaadelda ülesannete lahendamise põhjal.

1. Kasutades Ampère'i seadust, tõestada, et paralleelsed samasuunaliste vooludega juhtmed tõmbuvad, vastassuunaliste voolude korral aga tõukuvad (vt. õpik § 126, joon. 283).

2. Kasutades valemit, mille põhjal määratakse magnetiline induktioon sirges vooluga juhtmes ja Ampère'i seadust, tuletada valem jõu arvutamiseks, millega mõjuvad vastastikku kaks paralleelset juhet. Seejuures on teada juhtmete pikkus  $l$ , nende vaheline kaugus  $R$  ja voolutugevused  $I_1$  ja  $I_2$ .

L a h e n d u s.

$$F = I_2 B_1 l \sin \alpha.$$

$$\text{Et } B_1 = \mu \mu_0 \frac{I_1}{2\pi R}, \text{ siis } F = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi R} l \sin \alpha.$$

Kuna eelmisest ülesandest on teada, et  $\alpha = 90^\circ$ , siis

$$F = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi R} l.$$

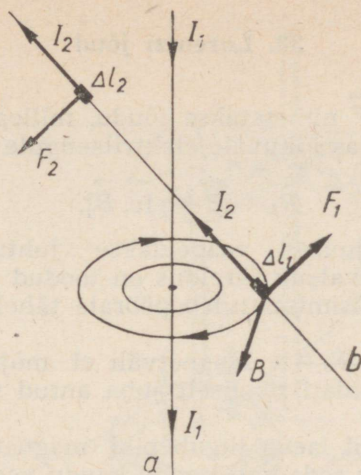
Kasutades seda valemit, tutvustatakse õpilasi ka õpikus esitatud voolutugevuse ühiku määramisega SI-süsteemis. Ühtlasi antakse teguri  $\mu_0$  arvuline väärtus ja mõõtühik.

Kui  $F = 2 \cdot 10^{-7}$  N,  $\mu = 1$  (vaakum),

$I_1 = I_2 = 1$  A,  $R = 1$  m, siis

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} = 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}.$$

Et demonstreerida paralleelsete voolude vastastikuse mõju sõltuvust voolutugevusest, nendevahelisest kaugusest ja magne-



JOON. 36

tilisest läbitavusest, kasutatakse sama seadeldist, mida kasutati Ampère'i seaduse illustreerimiseks (joon. 35). Nüüd tuleb aga kolmnurkse raami alla püsomagnetite asemele paigutada nelinurkse raami üks kül. Vooluga raami üks kül peab olema teisest küljest kaks korda pikem. See võimaldab demonstreerida vaadeldava jõu sõltuvust ka vastastikku mõjuvate juhtmete pikkusest. Kui raamidest lasta läbi samasuunalised voolud, siis nad tõmbuvad.

Selleks et näidata juhtide vahel mõjuva jõu sõltuvust keskkonna magnetilisest läbitavusest, tuleb valmistada kunstlik paramagnetiline vedelik. Selleks segatakse glütseriini sisse peenikest ferromagnetilist pulbrit või roostetolmu [7, lk. 256].

Lõpetuseks tuleb lahendada küsimusülesanne sirgete vooluga juhtmete vastastikuse mõju kohta, kui need asuvad ühes tasapinnas, kuid teineteise suhtes mingi nurga all.

Vaatleme kahte juhet (joon. 36), millest üks (juhe *a*) on kinnitatud vertikaalselt, teine (juhe *b*) aga võib liikuda mistahes suunas. Eraldame juhtmest *b* vooluelemendi  $I_2\Delta l_1$  ja määrame kruviireegli põhjal induktioonivektori  $B$  suuna selles, voolu  $I_1$  poolt tekitatud magnetvälja punktis. Vasaku käe reegli põhjal määrame jõu  $F_1$ , mis mõjub vooluelemendile  $I_2\Delta l_1$ .

Kui jälgida magnetvälja mõju teisele vooluelemendile  $I_2\Delta l_2$ , mis asub teiselpool juhet *a*, võime analoogiliselt eelnevaga leida, et elemendile  $I_2\Delta l_2$  mõjub jõud  $F_2$ . See jõud on vastupidine jõule  $F_1$ . Jõud  $F_1$  ja  $F_2$  pööravad juhet *b* ja nimelt selles suunas, et voolud  $I_1$  ja  $I_2$  muutuksid paralleelseks.

### 33. Lorentzi jõud

Lorentzi jõuks  $\vec{F}$  nimetatakse jõudu, millega elektromagnetiline väli mõjub temas liikuvale elektrilaengule  $q$

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}].$$

Antud teema juures vaadeldakse juhtu, mil  $E=0$  ja  $F_L = qvB\sin\alpha$ . Selle valemi järeldus on toodud õpikus § 128. Esitatud valemi analüüsimisel tuleb pöörata tähelepanu järgmistele punktidele:

a) kui  $v=0$ , siis  $F_L=0$ . Magnetväli ei mõju paigalseisvatele laengutele. Seda näidati sisuliselt juba antud teema käsitlemisel esimeses tunnis;

b) jõud  $F=0$ , kui laeng liigub piki magnetilise induksiooni jooni (varem näidati seda välja mõju kaudu vooluga juhile);

c) kiirus  $v$  muutub samas koordinaatide süsteemis, milles muutuvad jõud  $F$  ja magnetiline induksioon  $B$ ;

d) jõu  $F_L$  suund määratakse vasaku käe reegli abil.

Vastavalt ohutustehnika nõuetele on katsed katoodtorudega koolis keelatud ja Lorentzi jõudu  $F_L$  tuleb demonstreerida ionide kõrvalekaldumisega magnetvälja paigutatud elektrolüüdis.

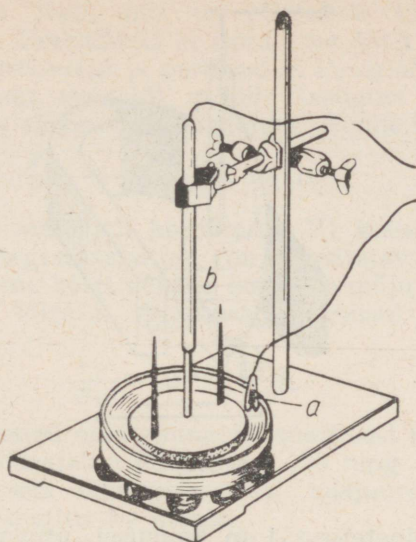
Katse korraldamisel asetatakse läbipaistvasse kristallisaatorisse (joon. 37) rõngakujuline (a) ja sirge (b) elektrood. Seejärel asetatakse kristallisaator sirgmagneti otsale või siis mitmele tugevale rõngasmagnetile.

Kristallisaatorisse kallatakse elektrolüüt, näiteks vasksulfaadi  $\text{CuSO}_4$  lahus, mille pinnale raputatakse mingit puru või pulbrit (lükopoodiumi, korgitolmu vms.). Variprojektsioonis on hästi näha pulbri segunemine ionide toimel suunas, mis on risti suurustega  $B$  ja  $I$ . Erinevate märkidega ionidele mõjuvad jõud on suunatud ühele poole, sest ioonid liiguvad vastupidistes suundades. Nõus tekivad konvektsioonivoolud.

Seda olukorda on kindlasti vaja selgitada tahvlijoonise abil, formuleerides vastava küsimuse ülesandena, milles on tarvis määrata jõu  $F$  suund. Vaskioonide  $\text{Cu}^{2+}$  laeng on positiivne, ionide  $\text{SO}_4^{2-}$  laeng aga negatiivne.

Selle katse üheks variandiks võib olla ka kerge, elektrolüüdi pinnal ujuva ketta pöörlemine. Ketta keskpunkti on tehtud ava keskmise elektroodi jaoks. Selleks et elektrolüüdi poolt kaasa haaratud ketta pöörlemine oleks õpilastele märgatav, asetatakse kettale paberist lipukesed. Muutes voolu suunda, vaadeldakse elektrolüüdi ja ketta pöörlemist mõlemas suunas.

Huvitavaks demonstratsioonikatseks on ka elektriikaare kustumine magnetväljas. Selleks asetatakse söevarraste otsad elektromagneti pooluste vahele ja tekitatakse seal elektriikaar. Elektromagneti sisselülitamisel elektriikaar kustub, sest magnet-



JOON. 37

väli tõukab plasmas liikuvad laengud lihtsalt kaarest välja. [12, lk. 104].

Saadud mõistete kinnistamiseks ja süvendamiseks tuleb lähendada ülesandeid.

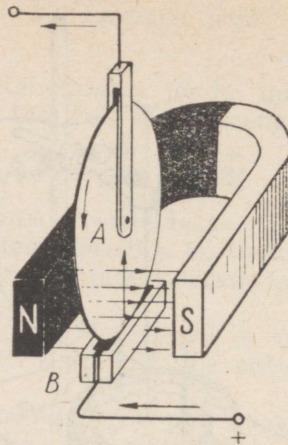
1. Joonisel 38 on näidatud elektronkiirte kimbu kõrvalekaldu mine magnetväljas. Määrake magnetilise induksiooni joonte suund.

2. 5. dets. 1970. a. oli ajalehes «Pravda» artikkel vee uuest magestamisviisist magnetite abil. Soolane vesi juhitakse torude abil mööda ultraviolet- või röntgenikiirguse allikast, mis ioniseerib lahustunud soolade osakesed. Seejärel voolab vesi mööda magnetist, mis kallutab ioniseeritud soolamolekulid kõrvale. Sellise seadme abil eemaldatakse umbes 90% soolade ionidest. Joonistage seadme skeem ja selgitage selle töötamist.

3. Joonisel 39 on näha liikuv metallketas *A*, mis on seatud magneti *B* pooluste vahele. Ketta alumine osa asub elavhõbedaga täidetud vannis. Millises suunas ja miks hakkab ketas pöörlema, kui elavhõbe ühendada vooluallika positiivse ja ketta telg negatiivse poolusega?



JOON. 38



JOON. 39

4. Kahte, teineteisest 1 m kaugusel asuvat lõpmata pikka juhet läbib 1 A tugevune vool. Kui suure jõuga mõjub magnetväli 1 mm pikkusele juhtmelõigule? Võrrelge seda jõudu vabade laengu elektrostaatilisest vastastikuse mõjuga neilsamadel juhtmelõikudel pikkusega 1 mm ja 1-meetrise vahemaa korral. Elektronide korrapärase liikumise kiirus juhtmes  $v=0,1$  mm/s.

L a h e n d u s.

$$F_m = \mu\mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi R} \Delta l = 2 \cdot 10^{-10} \text{ N};$$

$$F_k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R^2}; \quad I_1 = I_2 = I; \quad q_1 = q_2 = q.$$

Laengu  $q$  määramiseks kasutame Ampère'i seadust kujul  $F_m = evNB\sin\alpha$ , milles  $e$  on elektroni laeng,  $N$  aga elektronide arv juhtmelõiguses pikkusega 1 mm. Ülesande tingimuste kohaselt  $\sin\alpha=1$ ;  $eN=q$ .

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}.$$

Järelikult,

$$\mu\mu_0 \frac{I^2}{2\pi R} \Delta l = qv\mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R},$$

millest

$$q = \frac{I\Delta l}{v} = 10 \text{ C}.$$

$$F = \frac{10 \text{ C} \cdot 10 \text{ C}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{N} \cdot \text{m}^2} \cdot (1 \text{ m}^2)} \approx 9 \cdot 10^{11} \text{ N}.$$

See on tohutu jõud, mis on võimeline tõstma koormust 90 miljonit tonni. Praktiliselt ei ilmne see jõud ainult seetõttu, et juhtmes on negatiivseid ja positiivseid laenguid ühepalju.

Toodud arutluses vaadeldi vabade laengute elektrostaatilisi jõude ainult kahes väikeses juhtmelõigus. Nende lõikude korral

$$\frac{F_h}{F_m} = \frac{9 \cdot 10^{14} \text{ N}}{2 \cdot 10^{-10} \text{ N}} \approx 4 \cdot 10^{24}.$$

Edaspidi, selle materjali kordamisel XI klassis, kus õpilased juba tunnevad integraalarvutust, on soovitatav arvutada teise lõpmata pika juhtme kõigi vabade laengute mõju esimese juhtme mingile väikesele lõigule. Arvutused annavad väga huvitava tulemuse:

$$\frac{F_m}{F_h} = 10^{-25} = \frac{v^2}{c^2}.$$

Elektroni erilaengu määramine ja tsüklilised kiirendid on esitatud hästi ja üksikasjalikult õpikus § 129 ning selle võib anda õpilastele iseseisvaks läbitöötamiseks, kusjuures sellele peab järgnema vastav arutus ka klassis.

Eraldi tund on soovitatav pühendada ülesannete lahendamisele. Tüüpiliste küsimuste, ülesannete ja mõningate lahenduste eeskujud on toodud õpikus § 129 järel.

Täiendavalt vaatleme veel järgmisi ülesandeid ja küsimusi.

1. Tehnikas eelistatakse kasutada magnetilisi vastastikuseid mõjusid (elektrimootor, elektromagnet jne.), mitte aga elektrilisi. Miks?

Vastus. Peamise põhjusena tuleks nimetada asjaolu, et küllalt suurte elektrostaatiliste jõudude saamiseks on tarvis väga suure tugevusega elektrivälju. See aga tekitab omakorda raskusi laengute säilitamisel ja nõuab ohutustehnika huvides eriliste ettevaatusabinõude rakendamist. Seepärast kasutataksegi näiteks elektromagnetilisi tõstekraanasid, mitte aga elektrilisi (vt. ka ülesande lahendust lk. 118).

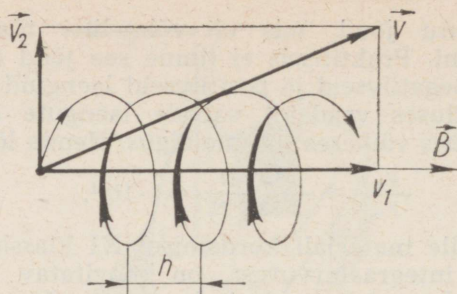
2. Kirjeldada laetud osakese  $q$  liikumist, kui selle kiirusvektor moodustab magnetilise induksioonivektoriga  $\vec{B}$  teravnurga.

Lahendus. Kujutame joonisel vektorid  $\vec{v}$  ja  $\vec{B}$  (joon. 40) ja lahutame vektori  $\vec{v}$  kaheks komponendiks  $\vec{v}_1$  ja  $\vec{v}_2$ , millest üks on vektoriga  $\vec{B}$  risti ja teine paralleelne. Kiirusvektori ristkomponent  $\vec{v}_2$  tingib Lorentzi jõu  $F_L = qv_2B$  tekkimise, mis on antud juhul kesktõmbejõuks. Järelikult

$$\frac{mv_2^2}{R} = qv_2B,$$

millest

$$R = \frac{m}{q} \frac{v_2}{B}.$$



JOON. 40

Viimase seose võib kirjutada ka ilma tuletamiseta, sest sellega puutuvad õpilased kokku juba elektroni erilaengu määramise õppimisel.

Ühe tiiru tegemise aeg

$$T = \frac{2\pi R}{v_2} = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q}$$

ei sõltu osakeste kiirusest, vaid määratakse tema omaduste ja induksiooni  $B$  põhjal.

Aja  $T$  jooksul läbib osake vektori  $\vec{B}$  suunas vahemaa  $h$ :

$$h = v_1 T = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q} v_1.$$

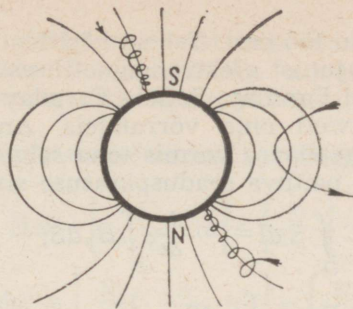
Seega liigub osake mööda kruijoont, mille samm

$$h = \frac{2\pi}{B} \frac{m}{q} v \cos \alpha \text{ ja raadius } R = \frac{m}{qB} v \sin \alpha.$$

Vektori  $\vec{B}$  suunas teravnurga all lendava laetud osakese trajektoor justkui keerdub ümber jõujoone. Sellega seletub ka laiuskraadi efekt, mis seisneb selles, et Maani jõudvate kosmiliste kiirte intensiivsus on suurematel laiuskraadidel suurem ning see kutsubki esile virmaliste tekkimise. Maa magnetväli on sellistele laetud osakestele omamoodi lõksuks (joon. 41).

Soovitav on informeerida õpilasi ka nõukogude teadlaste V. V. Vitkevitsi ja B. N. Panovkini avastustest — magnetpilvedest Päikesel. Nende pilvede magnetväli seob paljusid Päikesel ja maakeral toimuvaid protsesse («Бокпыр свера», 1970, nr. 12).

Kokkuvõtvas tunnis arutatakse läbi ja üldistatakse selle teema põhilised, veel selgitamist vajavad küsimused, tuuakse esile nende praktiline ja teaduslik tähtsus. Selleks tunniks võib lasta õpilastel teha 2 — 3 lühiettekannet kas magnetismi uurimise ajaloost, õpitud nähtuste rakendamisest rahvamajanduses, sõjaasjanduses jne. Huvitavaid andmeid võib leida J. I. Šuri raamatust [14],



JOON. 41

J. G. Dorfmani raamatust [13], ajakirjast «Наука и жизнь» ja mujalt. Sealhulgas on kasulik üksikasjalikumalt jutustada ka Maa magnetväljast, mitmesugustest magnetilistest anomaaliatest, Maa magnetvälja mõjust kosmilise kiirguse laetud osakestele jne.

### 34. Teema «Voolu magnetväli» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku paragrahvid
1.-2.	Magnetiline vastastikune mõju. Magnetväli.	§ 120, 121
3.-4.	Magnetvälja suund. Magnetilise induktiooni vektor $\vec{B}$ . Magnetilise induktiooni jooned.	§ 122-124
5.	Voolu magnetväli.	§ 125
6.	Ampère'i seadus. Ülesannete lahendamine.	§ 126
7.	Paralleelsete voolude vastastikune mõju. Voolutugevuse ühik amper.	§ 127
8.	Magnetvälja mõju liikuvale laengule. Lorentzi jõud.	§ 128
9.	Elektroni erilaengu määramine. Tsükliiline kiirendi. Ülesannete lahendamine.	§ 129
10.	Laboratoorne töö «Magnetvälja ja voolu vastastikuse toime vaatlemine».	
11.	Laboratoorse töö analüüs. Iseseisev või kontrolltöö. Antud teema kordamine.	

## V. ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON

Antud teema juures õpitakse tundma Faraday poolt avastatud katselisi fakte ja nähtusi elektromagnetilise induktiooni alalt. Nende klassikaliste katsete imetusväärne lihtsus, ilmekus ja lõpetatus võimaldab neid õpilastele demonstreerida peaaegu esialgsel kujul. Nimetatud katsete varal tutvuvad õpilased ühe suurima avastusega. See avastus oli Faradayle tasuks tema

geniaalsuse ja tohutu töö eest. Teema käsitlemisel laiendatakse ja süvendatakse ettekujutust elektromagnetilisest väljast, mille olemasolu väitis samuti Faraday. Sellele Faraday ideele andis matemaatilise kuju Maxwell oma võrrandis. Antud teema juures tuleb õpilastele arusaadavas vormis teha selgeks järgmises kahes Maxwelli võrrandis peituva seaduspärasuse sisu<sup>1</sup>:

$$\int_D E_l dl = - \frac{d}{dt} \int_S B_n dS;$$

$$\int_D B_l dl = \mu_0 \int_S j_n dS + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{d}{dt} \int_S EdS.$$

Esimest võrrandit võib vaadelda kui Faraday elektromagnetilise induktsiooni seaduse üldistust, kuna

$$- \frac{d}{dt} \int_S B_n dS = - \frac{d\Phi}{dt} = \mathcal{E}_i.$$

See võrrand näitab, et magnetvälja muutumine tekitab pööriselektrivälja

$$\int_D E_l dl = \mathcal{E}_i.$$

Järelikult võrdub kõrvalise välja väljatugevuse vektori ringvool kõrvaliste vooluallikate elektromotoorjõuga. See on ilmekalt näha galvaanielemendiga vooluringis, milles  $E_l dl$  on kõrvaliste jõudude elementaartöö positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel lõigul  $dl$ ,  $\int_D E_l dl$  on aga töö, mis tehakse positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel kogu suletud vooluringi ulatuses.

Järelikult võib esimese võrrandi kirjutada kujul

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

Seesugusena esitatakse võrrand ka õpilastele.

Juhtivusvoolude poolt tekitatud magnetväljade korral võtab teine võrrand kuju  $\int_D B_l dl = \mu_0 I$ , sest  $\int_S I_n dS$  on juhtivusvoolu suurus. Selle võrrandi õigsust on kerge selgitada sirgvoolu näite põhjal, kus magnetilise induktsiooni jooned esinevad kontsentriiliste ringjoontena.

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi R}; \quad dl = R d\alpha;$$

$$\int_D B_l dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\alpha = \mu_0 I.$$

<sup>1</sup>  $\int_D$  = ringintegraal.

Maxwelli võrrandeid, eriti teist, mis on vähem näitlik, on soovitatav kontrollida veel mõõtühiku nimetuste leidmise teel, kuigi see on vajalikuks, mitte aga piisavaks tingimuseks võrrandi õigsuse kohta.

Seda meetodit kasutatakse samal eesmärgil veel edaspidigi.

$$B_l dl - \left[ \frac{N}{A \cdot m} \cdot m \right] = \left[ \frac{N}{A} \right];$$

$$\mu_0 j_n dS - \left[ \frac{N}{A^2} \cdot \frac{A}{m^2} \cdot m^2 \right] = \left[ \frac{N}{A} \right];$$

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{dE}{dt} dS - \left[ \frac{s^2}{m^2} \cdot \frac{V}{m \cdot s} \cdot m^2 \right] = \left[ \frac{s \cdot J}{m \cdot A \cdot s} \right] = \left[ \frac{N \cdot m}{m \cdot A} \right] = \left[ \frac{N}{A} \right].$$

Teise võrrandi esimese ja teise liidetava mõõtühiku nimetused on võrdsed.

Vaakumis, kus juhtivusvoolud puuduvad,

$$\int_D B_l dl = \frac{1}{c^2} \frac{d}{dt} \int_S E dS.$$

See võrrand, mis on analoogiline Maxwelli esimese võrrandiga, näitab, et elektrivälja muutumine tekitab pöörismagnetvälja, millega õpilased tutvuvad XI klassis.

Faraday ja Maxwelli tööd on kaasaegse elektro- ja raadio-tehnika aluseks, seepärast peavad õpilased teadma nende prakti- list rakendamist ja oskama neid kasutada ülesannete lahenda- misel ning katsete tegemisel.

### 35. Elektromagnetilise induksiooni avastamine

Asudes selle teema õppimisele, tuleb õpilastele algul meelde tuletada neid teadmisi elektromagnetilisest induksioonist, mida õpiti VIII klassis. Selleks võib korrata katset, milles induksiooni- vool saadi poolis magneti liigutamisel pooli sees (vt. õpikust joon. 297). Seejärel antakse õpilastele ülesanne selgitada antud induksiooninähtust tänapäeval elektromagnetvälja omadustest kehtivate arusaamade põhjal. Seoses sellega on kasulik ja õpetlik üksikasjalikumalt jutustada Faraday elust ja tegevusest, tema sügavalt materialistlikest viljakatest ideedest elektromagnetismi valdkonnas, mis pole kaotanud oma tähtsust ka tänapäeval. Siin- juures võib kasutada fakte raamatutest [8—11].

Faraday nimega on seotud murranguline etapp klassikalises füüsikas. VIII klassi ajaloo kursusest teavad õpilased tööstus- likust pöördest Inglismaal, mille tulemusena Inglismaa muutus maailma «töökojaks». Täie võimsusega töötab «tema hiilgus —

aur», areneb ja täiustub metallurgia, arenevad mitmesugused transpordiliigid jne. Teaduse saavutusi kasutatakse üha enam praktilistel eesmärkidel. Iseloomulikuks näiteks sellest on Londoni Kuninglikus Seltsis 1800. aastal fikseeritud seisukoht «levitada teaduslikku mõtet ning juurutada kasulikke mehaanilisi avastusi, samuti loodusteaduslike ettekannete ja eksperimentide abil tõestada teaduse saavutuste kasutamise võimalusi igapäevases elus» [11, lk. 50]. Nimetatud seltsis alustas 1813. a. assistendi tagasihoidlikul ametikohal tööd ka Faraday. Michael Faraday, nagu paljud teisedki tolle aja eesrindlikud inimesed, püsis oma teaduslikes uurimustes stiihiliselt materialistlikel seisukohtadel. Oma uurimustes juhindus Faraday nähtuste vastastikuste seoste ja ühtsuse ideest ning «looduse jõudude» vastastikuste muundumiste ideest.

Nendes teesides on kaudselt aimatav energia jäävuse ja muundumise seaduse tunnetamine.

Eeltoodud seisukohtadest lähtudes on täiesti mõistetav Faraday poolt 1821. aastal püstitatud ja kümme aastat hiljem lahendatud ülesanne: «Muuta magnetism elektriiks». Räägitakse koguni, et Faraday kandnud endaga kaasas magnetit, meenutamaks talle nimetatud ülesannet.

Jutustades Faraday avastustest, räägivad õpilased sageli umbes järgmiselt: «Faraday töötas selle probleemi kallal 10 aastat, kui äkki ükskord magnetit pooli sisse pannes märkas, et galvanomeeter näitab voolu». Kõik näib äärmiselt lihtsana.

Tegelikult oli see hoopis teisiti. Magnetismi uurimises tehti alles esimesi samme.

1820. aastal tegi Oersted kindlaks magnetnõela pöördumise voolu toimel. See nähtus oli kõigile õpetlastele üllatuseks. Samal aastal avastas prantsuse füüsik Arago «magneetamise» voolu abil, Ampère aga voolude vastastikuse mõju. Tekkis idee panna juhe ja magnet pidevalt liikuma. Selle probleemi kallal töötas terve rida teadlasi, kuid esimesena lahendas selle 1822. a. Faraday.

Kasutades Faraday avastust, ehitas Barlow 1822. a. oma «ratta» (joon. 39). Tuleb märkida, et esimese praktiliseks kasutamiseks kõlbliku elektrimootori ehitas 1834. a. vene teadlane Jakobi.

Elektri ja magnetismi vastastikune seos oli ilmne ja idee — saada magnetismi arvel elektrit — «hõljus» õhus. Seda ülesannet püüdsid lahendada mitmed teadlased, nende hulgas ka Ampère ja Colladon, kuid kahjuks edutult.

Colladon tegi katseid, mis olid sarnased Faraday katsetega, kuid induktiooninähtust avastada ta siiski ei suutnud. Ebaõnnestumise põhjuseks oli asjaolu, et pool, millesse magnet lasti, asus ühes toas, ja teine, esimesega ühendatud pool ning magnetnõel asusid teises toas. Katse viidi selliselt läbi kaalutlustel, et vältida pooli lastava magneti mõju magnetnõelale. Asetanud magneti pooli, läks Colladon teise tuppa magnetnõela vaatama, kuid sel-

leks ajaks oli magnetnõel muidugi jõudnud tagasi oma esialgsesse asendisse [11, lk. 51].

Õpilasi tuleb tutvustada Faraday esimese katse ideega, mille kohaselt ta pidi induksioonivoolu saama teineteise suhtes liikumatutes juhtmetes voolu sisse- ja väljalülitamisel (vt. õpikust joon. 296).

Otstarbekas on induksioonivoolu kindlaks teha magnetnõela abil, nagu seda tegi Faraday. Efekti võrdlemisi nõrk ilmumine annab õpilastele teatud ettekujutuse tingimustest, milles Faraday avastus on tehtud. (Faradayl tuli endal valmistada ka isoleeritud juhe.) Seejärel, jälgides õpikus esitatud avastuse ajalugu ja Faraday arutluste loogikat, tuleb veel kord läbi vaadata induksioonivoolu tekkimine juhul, kui poolid teineteise suhtes liiguvad.

Võib isegi näidata, kuidas Faraday antud efekti suurendas, lähendades ja eemaldades poole just magnetnõela võnkumise taktis.

Kõige selle tulemusena peavad õpilased omandama peamise, et muutuv magnetväli on võimeline tekitama elektrivälja. Suletud juhtmes tekib vool, kui muutub seda kontuuri läbivate magnetilise induksiooni joonte arv.

Faraday uuris kuu aega elektromagnetilise induksiooni kõiki tähtsamaid külgi ja lõi originaalse teooria, mille kohaselt magneti ja vooluga juhtme ümber eksisteerib materiaalne eriline olek, mida saab kindlaks teha vaid tema muutumisel.

Hiljem, kui oli juba olemas ettekujutus magnetjõujoontest, formuleeris Faraday seaduse, mille järgi tekib kontuuris vool vaid kontuuri läbivate jõujoonte arvu muutumisel.

Seega avastas Faraday 1831. a. oma olemuselt täiesti uue elektrienergiaallika.

Faraday kujutas selgesti ette oma avastuse praktilist tähtsust. Iseloomulik on tema vastus ministeeriumile Gladstone'ile, kes kuulas Faraday selgitusi induksiooninähtuse kohta. Gladstone'i küsimusele «Milles seisneb siis lõppude lõpuks selle nähtuse kasulikkus?», vastas Faraday nii: «Sõör, pole välistatud võimalus, et lähemas tulevikus saate te sellest kõigest suurt tulu [11, lk. 49].»

Aeg näitas, kui suur tähtsus oli Faraday avastusel. Korraldades saksa füüsiku Helmholtzi sõnu, võib täie õigusega öelda: «Kuni inimesed kasutavad elektri hüvesid, ei unusta nad ka Faraday nime».

Et õpilasi veelgi paremini tutvustada Faraday elu ja tegevusega, tema ideedega ning vastava ajastuga, on soovitatav korraldada füüsika õhtu ja anda õpilastele lugeda vastavat kirjandust [8].

Faraday elu on väga õpetlik mitmes suhtes. Alati köidavad õpilaste tähelepanu niisugused üksikasjad tema eluloost, nagu töötamine 12-aastaselt raamatuköitjana kella 5-st hommikul õhtul kella 7-ni, teadusjanu, mitmesuguste füüsikariistade meisterdamine ja nendega katsete korraldamine jne.

Mitmesuguseid teisi andmeid Faraday kohta võib õpilastele teatavaks teha edaspidi vastava materjali õppimisel. Nii näiteks võib Faraday vaadetest valguse olemusele ja tema erakordsest ettenägelikkusest selles valdkonnas jutustada alles XI klassis optika õppimisel.

Lõpuks on vaja õpilastele öelda, et ka Faraday ei pääsenud mitmetele andekatele teadlastele osaks saanud saatusest kodanlikus ühiskonnas. Faraday elu lõpupäevadel nägid tema sõbrad vaeva talle riikliku pensioni taotlemisega, mida riigikassa minister lord Melburn käsitles kui almusepalumist.

### 36. Induktsioonivoolu suund. Lenzi reegel

VIII klassis määrati induktsioonivoolu suund liikuvast juhtmes parema käe reegli abil.

Seda nii mitmelgi juhul väga sobivat reeglit tuleb korrata veidi hiljem, kui elektromagnetilist induktsiooni selgitatakse elektroniteooria põhjal.

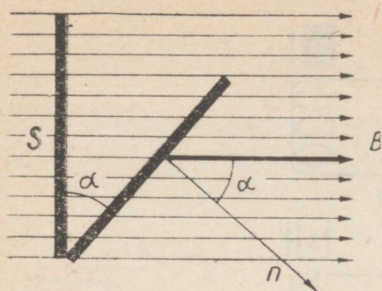
Antud teema juures peavad õpilased X klassis omandama üldise, kõikideks juhtudeks sobiva reegli voolu suuna määramiseks. Selle seaduspärasuse tegi kindlaks vene teadlane Lenz ja sellel reeglil on sügav füüsikaline sisu.

Selle seaduse või, nagu vahel nimetatakse, Lenzi reegli kasutuselevõtmisele peab eelnema magnetvoo mõiste selgitus.

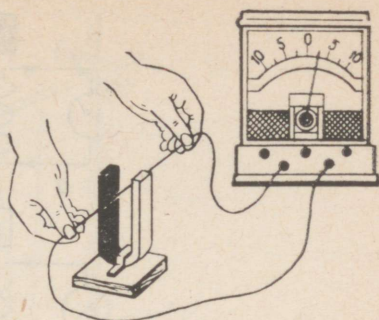
Nagu õpilastele teada, iseloomustab magnetvälja magnetilise induktsiooni vektor  $\vec{B}$ , näitliku pildi annavad aga induktsiooni-jooned, mille tähenduse järgi saab otsustada vektori  $\vec{B}$  suuruse üle antud välja osas.

Lõplike mõõtmetega pinda  $S$ , mis on risti vektoriga  $\vec{B}$ , läbib homogeenses magnetväljas  $BS$  jõujoont. See suurus kannab magnetilise induktsioonivoo ehk lihtsalt magnetvoo nimetust ja tähistatakse tähega  $\Phi$ . Kui vektor  $\vec{B}$  on pinna  $S$  suhtes mingi nurga all, siis on magnetvoog läbi selle pinna muidugi väiksem. Nagu näha jooniselt 42, on sel juhul  $\Phi = BS \cos \alpha$ , kus  $\alpha$  on nurk vektori  $\vec{B}$  ja pinna  $S$  normaali vahel. Mistahes välja jaoks  $\Delta \Phi = B \Delta S \cos \alpha$ , kus  $\Delta S$  on väike pinnaosa, mille piires võib vektori  $\vec{B}$  lugeda konstantseks suuruseks.

Enne seda, kui anda õpilastele magnetvoo lõplik määrang, on otstarbekas kirjutada antud valem järgmisel kujul:  $\Delta \Phi = B \cos \alpha \Delta S$ . Siit on kohe näha, et  $B \cos \alpha$  on vektori  $B$  projektsioon pinna  $S$  normaalil ja seepärast võib magnetvoogu  $\Delta \Phi$  läbi pinna  $\Delta S$  nimetada induktsioonivektori projektsiooni ja pinna suuruse korrutiseks.



JOON. 42



JOON. 43

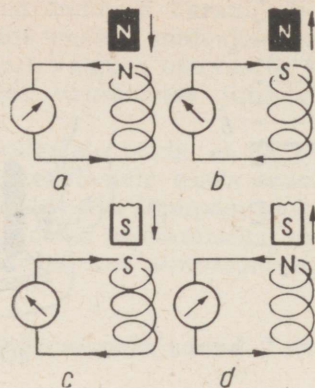
Vaevalt maksab õpilastelt nõuda selle formuleeringu meelde-jätmist. On küllaldane, kui nad omandavad valemi  $\Phi = BS \cos \alpha$  mõtte ja võivad sellest lähtudes teadlikult kirjutada ka kuju  $\Phi = BS \cos \alpha$  juhuks, kui vektor  $\vec{B}$  pole risti pinnaga  $S$ .

Induksioonivoolu suund määratakse alguses kahes-kolmes katses nii magneti kui ka kontuuri liigutamisel. Nende katsete alusel võetakse kasutusele Lenzi reegel, mida rakendatakse edaspidi induksioonivoolu määramiseks kõige erinevatel juhtudel.

Esimestes katsetes võib kasutada seadet demonstratsioonipooliga. Kahjuks on pooli keerdude suund õpilastele halvasti näha, vaatamata «dekoratiivsele» keerule pooli peal. Seepärast on parem kasutada pikka (1,5 — 2 m) juhet, mille otsad on ühendatud demonstratsioonigalvanomeetriga (joon. 43). Liigutades nüüd hoburaudmagnetit juhtme suhtes või siis juhet magneti pooluste suhtes, täheldatakse galvanomeetri osuti kõrvalekaldu mist umbes ühe jaotise võrra ühele või teisele poole. Seejärel keeratakse juhe õpilaste silma all mõnest keerust koosnevaks pooliks ja juhitakse selle sisse magnet. Induksioonivoolu suuna üle juhtmes otsustatakse galvanomeetri osuti kaldumise järgi. Selleks ühendatakse juhtme üks ots galvanomeetri küljest lahti ja tekkinud vahemikku ühendatakse (muidugi läbi täiendava takistuse!) galvaanielement. Elemendi pooluste järgi määratakse voolu suund juhtmes ja sellele vastav galvanomeetri osuti kõrvalekalle.

Elemendi kõrvaldamise järel korratakse katseid uuesti, määrates iga kord voolu suuna vooluringis, ja krüvireegli põhjal ka pooli poolused. Katsete käigus tehakse tahvlile ka vastavad joonised (joon. 44), mille põhjal formuleeritaksegi Lenzi reegel.

Lenzi reeglit selgitatakse ka energia jäävuse seaduse põhjal, analüüsides näiteks joonisel 44,a näidatud katset, nii nagu seda on tehtud õpikus. Kasulikud on ka järgmised arutlused. Kõrgu-



JOON. 44

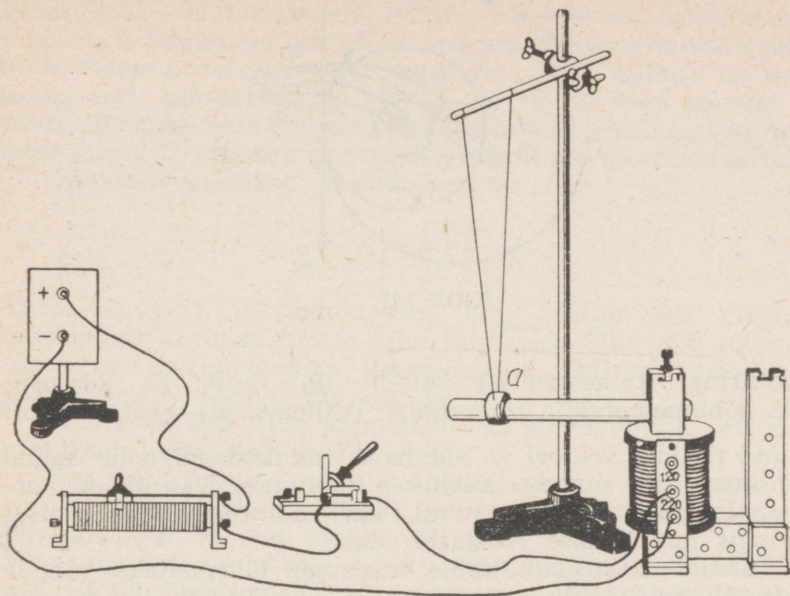
sele  $h$  tõstetud magneti potentsiaalne energia  $\Pi = mgh$ . Kui puuduvad induksioonivoolud, siis

$$mgh = \frac{mv^2}{2},$$

kus  $v$  on magneti kiirus maapinnal. Potentsiaalne energia muutub siin kineetiliseks. Kui tekib induksioonivool, siis osa mehhaanilisest energiast  $\left(\frac{mv^2}{2}\right)$  muundub elektrienergiaks. Magnetilangeamise kiirus  $v$  muutub väiksemaks, juhtmekeerd nagu tõukaks magnetit tagasi. Järelikult tekib magneti poole pööratud keerus samanimeline poolus ja seda kinnitab ka katse.

Näitlik on Lenzi reegli demonstreerimine Petrovski riista abil (õpikus joon. 303). Seda tuleb õpilastele tingimata näidata. Kasulik on näidata ka järgmist, joonisel 45 näidatud katset, kasutades selleks Thomsoni pooli või lahtivõetavat koolitransformatorit. 50 — 100 V alalisvoolu sisselülitamisel vaadeldakse, kuidas magnetväli tõukab alumiiniumrõnga  $a$  eemale, voolu väljalülitamisel aga rõnga liikumist vastupidises suunas. Nagu näitavad kogemused, omandavad õpilased, vaatamata ilmekatele demonst ratsioonkatsetele, Lenzi reegli halvasti, kui seda ei selgitata küllalt põhjalikult ja ei kinnistata arvukate harjutuste ja ülesannete lahendamisega. Tuleb rõhutada, et Lenzi reegli kasutamisel peab eelkõige määrama  $\Delta\Phi_1 = \Phi_2 - \Phi_1$ , s. t. induksioonivoolu põhjustava magnetvoo muutuse.

Induksioonivoolu enda poolt tekitatud magnetvoo  $\Delta\Phi_2$  on vastupidine vooga  $\Delta\Phi_1$ . Seejuures tuleb mõlema voolu juures silmas pidada nende magnetilise induksiooni vektorite  $\vec{B}_1$  ja  $\vec{B}_2$  suunda. Selgitame öeldut järgmiste ülesannete varal.

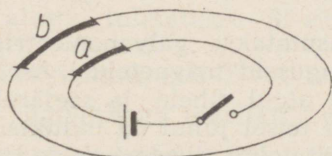


JOON. 45

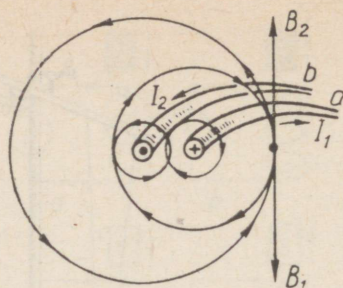
1. Määrata välises kontuuris tekkiva induksioonivoolu suund voolu sisse- ja väljalülitamisel sisemises kontuuris (joon. 46).

Lahendus. Vaatleme nimetatud kontuuridel kahte naaberlõiku  $a$  ja  $b$ . Enne voolu sisselülitamist on sisemise kontuuri magnetvoog  $\Phi_1 = 0$ .

Vektori  $\vec{B}_1$  suuna magnetvälja mistahes punktis määrame sisselülitatud voolu korral kuvireegli põhjal. Magnetvoo muutus  $\Delta\Phi_1 = \Phi_1 - 0 = \Phi_1$ . Vastavalt Lenzi reeglile kompenseerib välise kontuuri magnetvoog sisemise kontuuri magnetvoo muutumist (suurenemist). Seepärast peabki vektor  $\vec{B}_2$  olema suunatud vastupidiselt vektorile  $\vec{B}_1$ . Seega peab ka vool  $I_2$ , otsustades vektori  $\vec{B}_2$  järgi, olema vastupidine voolule  $I_1$  (joon. 47).



JOON. 46



JOON. 47

Vooluringi katkestamisel  $\Delta\Phi=0 - \Phi_1 = -\Phi_1$ . Et kompenseerida põhimagnetvälja muutumist (vähenemist) peab vektori  $\vec{B}_2$  suund ühtima vektori  $\vec{B}_1$  suunaga, induksioonivoolu suund aga ühtima voolu suunaga sisemises kontuuris. Kasulik on korraldada analoogilist arutlust juhul, kui voolutugevust sisemises vooluringis muudetakse reostaadi abil.

2. Suletud ristkülikukujuline traatraam lähendatakse sirgele vooluga juhtmele. Millise suunaga vool raamis tekib, kui ta asub kogu aeg sirge juhtmega ühes tasapinnas.

Lahendus. Kuna raami lähenemisel sirgjuhtmele teda läbiv magnetvoog kasvab, siis tekib raamis selline vool, mille magnetilise induksiooni vektor on suunatud põhivoo vektori  $\vec{B}_1$  suhtes vastupidiselt. Järelikult tekib raamis vastupidise suunaga vool.

Samal viisil võime näidata, et raami eemaldamisel tekib selles vool, mis on põhivooluga samasuunaline.

### 37. Elektromagnetilise induksiooni seadus

Materjali käsitluse võib üles ehitada selliselt, et algul antakse õpilastele valem  $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ , seejärel aga selgitatakse seda katsete varal või, vastupidi, algul tehakse katsetega kindlaks induksiooni elektromotoorjõu sõltuvus magnetvoo muutumise kiirusest ja alles seejärel kirjutatakse välja valem. Teist moodust peetakse eelistatavamaks.

Katse juures kasutatakse galvanomeetriga ühendatud raami ja mõningaid ühesuguseid magneteid. Asetades raami võrdsete ajavahemike tagant algul ühele ja seejärel mitmele magnetile, tehakse kindlaks, et teisel juhul on induksioonivool suurem kui esimesel. Seda selgitatakse nii, et võrdsete ajavahemike  $\Delta t = \text{const}$  jooksul muutus magnetvoog teisel juhul rohkem kui esimesel.

Pärast seda asetatakse raami ühele ja samale magnetile erinevate kiirustega. Seejuures ilmneb, et induksioonivool on seda suurem, mida lühem on magnetvoo muutumise aeg. Järelikult on induksiooni emj., mis omakorda võrdub  $IR$  ( $R$  on kogu suletud kontuuri takistus), seda suurem, mida suurem on magnetvoo muutumise kiirus ja väiksem aeg, mille jooksul see muutumine toimub.

Õpilastele öeldakse, et suuruselt on

$$\mathcal{E}_i = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right|.$$

Tuleb rõhutada, et induksiooni emj. sõltub just magnetvoo muutumise kiirusest, mitte selle suuruselt. Siin võib tuua selgituseks näite sirgjoonelisest liikumisest, kus kiirus sõltub  $\Delta s$  ja  $\Delta t$  suhtest, mitte üksnes nihkest  $\Delta s$ .

Käsitatud materjali kinnistamiseks on soovitatav, et õpilased vastaksid järgmistele küsimustele.

Kas tekib induksioonivool suletud raamis, mis liigub homogeenses magnetväljas ühtlaselt ja sirgjooneliselt? Sirgjooneliselt kiirendusega? Pöörleb magnetväljas?

Vastus. Esimesel kahel juhul raamis induksioonivoolu ei teki, sest  $\Delta\Phi = 0$ . Kolmandal juhul tekib vool, sest  $\Delta\Phi \neq 0$ . Seda muidugi juhul, kui magnetilise induksiooni jooned ei ole kogu pöörlemise vältel raami tasapinnaga paralleelsed ega ka risti.

Seoses neile küsimustele vastamisega, tuleb juhtida õpilaste tähelepanu järgmistele asjaoludele.

a) Katsed raami ja magnetitega induksioonivoolu saamiseks õnnestusid vaid seepärast, et raam liikus mittehomoogeenses magnetväljas. Magnetist eemal on väli praktiliselt võrdne nulliga, pooluste lähedal on aga väli maksimaalne.

b) Kui liigutada raami piki jõujooni, siis raamis voolu ei teki.

VIII klassis said õpilased teada, et vool tekib suletud juhis ainult siis, kui see lõikab magnetvälja jõujooni.

See väide on üldiselt võttes ebaõige, mis ilmnes ka näitest, kus raam liikus sirgjooneliselt ühtlases magnetväljas. Oluline on, et muutuks just raami läbiv magnetvoog.

Antud osa lõpetuseks näidatakse õpilastele, et valemi parema poole ette pannakse miinusmärk:

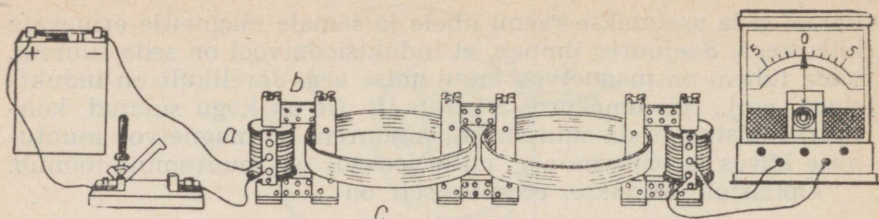
$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t};$$

üksikasjalikult on seda põhjendatud õpikus.

Esitatud valemi alusel tuletatakse SI-süsteemis magnetvoo ühik **veeber**:  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$ .

Valemist  $\Phi = BS$  järgneb samuti, et  $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$ .

Valemi  $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  õppimisega tegelikult piirdubki X klassis (ptk. XI ja XII) tutvumine magnetvälja põhiliste seadustega. Edasine materjal vaid konkretiseerib ja süvendab varemõpitud.



JOON. 48

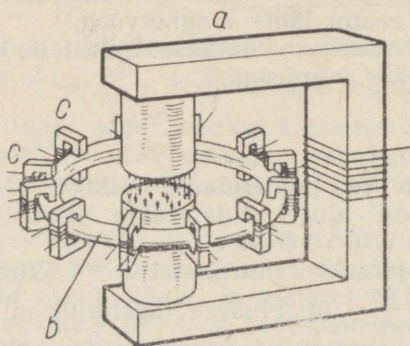
Seepärast on soovitatav teha õpitust kokkuvõtte, korrata ja üldistada tähtsamaid andmeid elektri- ja magnetvälja kohta, juhtida seejuures õpilaste tähelepanu järgmistele punktidele.

1. Elektrostaatiline väli, näiteks punktlaengute oma, on potentsiaalne. Tema jõukarakteristikuks on väljatugevuse vektor  $\vec{E}$ . Elektrivälja jõujooned algavad elektrilaengutelt ja lõpevad elektrilaengutel või suunduvad lõpmatusse.

2. Magnetväli ei ole potentsiaalne väli. Tema jõukarakteristikuks on magnetilise induksiooni vektor  $\vec{B}$ . Magnetlaenguid pole olemas. Magnetilise induksiooni jooned (näiteks alalisvoolul) on suletud või suunduvad lõpmatusse, näiteks mõned jooned magnetite poolustelt.

3. Muutuv magnetväli kutsub esile elektrivälja, mis panebki liikuma varem liikumatuna püsinud laengud mööda suletud vooluringi. (Magnetväli, s. t. Lorentzi jõud  $F_L = qv \sin \alpha$  ei mõju liikumatutele laengutele). Seejuures võrdub induksiooni emf.  $\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ . Kui juht pole suletud, siis voolu ei teki.

4. Tekkiv elektriväli pole potentsiaalne väli, sest tema jõujooned (vt. joon. 47) on suletud. Sellist välja nimetatakse pöörisväljaks, s. t. et muutuv magnetväli tekitab pööriselise elektrivälja



JOON. 49

ja kui selles väljas asub juht, siis tekib selles vool. Tekkinud vool omakorda kutsub esile pöörismagnetvälja jne.

Nähtust võib selgitada ahela abil, mis koosneb raud- ja vask- või alumiiniumrõngastest.

Koolis leiduvate vahendite abil võib katse korraldada järgmiselt. Võetakse kaks-kolm universaalset koolitransformaatorit, eemaldatakse neilt madalpinge poolid ja nende asemele paigutatakse südamiketele massiivsed vask- või alumiiniumrõngad, mis südamikke vahetult ei puuduta (joon. 48).

Esimese transformaatori mähis ühendatakse alalisvooluallikaga, viimase transformaatori mähis aga galvanomeetriga. Vooluringi sulgemisel ja avamisel tekib transformaatori mähise  $a$  keerdude ümber pöörismagnetväli. See väli on eriti tugev raudsüdamikus  $b$  ja, tungides alumiiniumrõngasse  $c$ , tekitab selles induksioonivoolu jne.

Soovitav on õpilastele teatada, et antud nähtust kasutatakse näiteks transformaatorites. Seejuures võib demonstreerida koolitransformaatori töötamist, laskumata selle ehituse detailsemasse selgitusse, sest seda õpitakse juba XI klassis.

Aine olemasolu (antud juhul rõngad) pole elektromagnetilise välja levimiseks tingimata vajalik. Seda tõestasid oma katsetega D. Maxwell, H. Hertz ja A. Popov. Muutuv pöörismagnetväli tekitab pööriselektrivälja (ja vastupidi) ka vaakumis. Sellest kuulevad õpilased üksikasjalikumalt XI klassis.

X klassis vaatlevad õpilased antud nähtuse rakendamist beetatroni töötamise skeemi varal (joon. 49).

Elektromagnet  $a$  muutuv magnetväli tekitab pööriselektrivälja, millesse paigutatakse rõngakujuline vaakumtoru  $b$ . «Elektronkahurist» väljunud elektronid liiguvad mööda pööriselektrivälja jõujooni üha suureneva kiirusega. Erikujuliste poolustega elektromagnetid  $c$  on paigutatud piki vaakumtoru ja need kindlustavad elektronide liikumise mööda ringorbiiti. Beetatron, erinevalt tsüklotronist, ei nõua elektronide tiirlemissageduse konstantsust ja võimaldab saada elektrone, mille energia küünib 500 MeV.

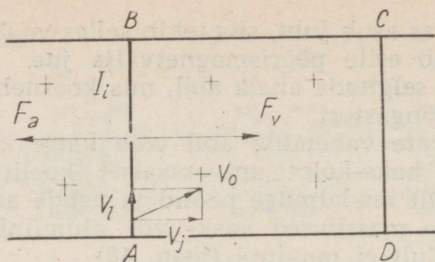
### 38. Induktsiooni elektromotoorjõud liikuvates juhtmetes

Käesolevas osas selgitatakse elektroniteooria ja Lorentzi jõu põhjal induktsiooni elektromotoorjõu tekkimist magnetväljas liikuvais juhtmeis.

Induktsiooni emj. valemi  $\mathcal{E}_i = vBl$  tuletamisel ja selle kasutamisel tuleb silmas pidada järgmist.

1. Lorentzi jõud mõjub ainult magnetvälja suhtes liikuvale laengule.

Kuna aga kõik inertsiaalsüsteemid on võrdväärsed, võib nähtust vaadelda ka süsteemis, mis on seotud laenguga, lugedes



JOON. 50

liikuvaks magnetvälja. See aga tähendab, et muutub kontuuri läbiv magnetvoog ja sellega kaasneb muidugi pööriselektrivälja tekkimine. Seega loetakse, et esimeses süsteemis mõjub laengule magnetjõud  $F_m = qv_j B$ , teises süsteemis aga, mis on seotud laenguga, loetakse see jõud elektriliseks  $F_e = qE$ . ( $v_j$  — on juhtme liikumise kiirus). Suuruselt on need jõud võrdsed  $qE = qv_j B$ . Juhtme suhtes on nad suunatud ühele ja samale poole.

2. Lorentzi jõud  $F_m = qv_j B$  ei takista juhtme  $AB$  liikumist, sest ta on risti kiiruse komponendiga  $v_j$  ja järelikult välisjõud selle jõu ületamiseks tööd ei tee. Energeetilisest seisukohast näiv vastuolu seletub järgmisel viisil (joon. 50).

Oletame, et kontuuri  $ABCD$  külge  $AB$  liigub  $CD$  poole kiirusega  $v_j$ . Lorentzi jõu mõjul hakkavad vabad laengud juhtme liikuma piki juhet  $A$ -lt  $B$ -le kiirusega  $v_l$  (vabade laengute kiirus  $v_l$  väljendub millimeetri osades sekundi kohta). Laengu täieliku kiiruse  $v_0$  leiame rööpküliku reegli põhjal, Lorentzi jõu tervikuna aga valemi  $F_L = qv_0 B$  järgi. Selle jõu komponent  $F_j = qv_j B$  nagu segab laenguid piki juhet  $A$ -st  $B$ -ni, komponent  $F_l = qv_l B$  on aga suunatud, nagu näitab vasaku käe reegel, vastupidiselt juhtme liikumisele.

Selle jõu vastu teevadki välisjõud tööd.

3. Üldjuhul, kui nurk  $\alpha$  vektorite  $\vec{v}_j$  ja  $\vec{B}$  vahel ei võrdu  $90^\circ$ , võtab valem kuju  $F_L = qv_j B \sin \alpha$ . Kui  $\alpha = 0$ , siis  $F_L = 0$ . Kui  $\alpha = 90^\circ$ , siis on  $F_L$  maksimaalne.

4. Induktsioonivoolu  $I_i$  ja elektromotoorjõu  $\mathcal{E}_i$  suund määratakse parema käe reegli põhjal, mis on õpilastele teada juba VIII klassist. Siinkohal on soovitatav korrata katset, milles hoburaudmagneti pooluste vahel juhet liigutades saadakse induktsioonivool (joon. 43). Galvanomeetri osuti kaldumise järgi veendume selle reegli õigsuses.

5. Induktsioonivoolu tugevus  $I_i$  määratakse Ohmi seaduse  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$  põhjal, kus  $R$  on suletud vooluringi takistus.

6. Juhtmelõik, milles tekib elektromotoorjõud, on nagu elektrigeneraatoriks ja etendab ahelas samasugust osa nagu galvaanilementki.

Et saada elektrienergiat magnetväljas liikuva juhtme arvel, selleks tuleb teha tööd, rakendades selleks teatud jõudu. Vastavalt Ampère'i seadusele mõjub vooluga juhile  $I_i$  (joon. 50) jõud  $F_a = I_i B l$ , mis on suunatud juhtme liikumisele vastupidiselt (selles on kerge veenduda vasaku käe reegli abil). Jõu  $F_a$  ületamiseks peab juhtmele rakendama teatud välisjõu  $F_v = -F_a$ . Sel juhul jääb juht liikuma ühtlaselt ja sirgjooneliselt.

Leiame jõu  $F_v$  töö teepikkusel  $d$ .

$$A = F_v \cdot d = -I_i B l d;$$

$l d = -\Delta S$  (kontuuri pindala väheneb);

$$-\Delta S B = -\Phi; \quad I_i = \frac{\Delta q}{\Delta t},$$

kus  $\Delta q$  tähistab laenguid, mis läbisid juhtme ristlõiget aja  $\Delta t$  jooksul, mil juhe nihkus edasi lõigu  $d$  võrra. Järelikult

$$A = -\frac{\Delta q \Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Kuna  $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\mathcal{E}_i$ , siis  $A = \Delta q \mathcal{E}_i$ . Seega on välisjõudude töö juhtme liikumise sihis võrdne elektrijõudude tööga laengute liikumise sihis. Mehhaaniline energia muundub võrdseks hulgaks elektrienergiaks.

Generaatori töö selgitamiseks võtame valemi

$$A = I_i B l d = I_i B l v_j t,$$

kus  $v_j$  on juhtme liikumise kiirus magnetväljas. Valemist on näha, et generaatori liikumapanekuks tuleb teha seda suurem töö, mida tugevam on magnetväli  $B$ . Tööstuslikes generaatorites tekitavad magnetvälja rootori elektromagnetid ja järelikult sõltub magnetvälja tugevus voolutugevusest rootori mähises. Töö on samuti võrdeline juhtme liikumise kiirusega magnetvälja suhtes. (Kumb Maa suhtes liigub — kas väli või juhe — sel pole tähtsust.) Peale selle on töö võrdeline induksioonivoolu tugevusega, mis omakorda sõltub induksiooni elektromotoorjõust ja suletud vooluringi takistusest, s. t.  $I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R}$ .

Kui generaatoriga pole ühendatud koormust, siis  $I_i = 0$  ja tööd tehakse ainult hõõrdejõudude ületamiseks. Täpsemalt õpitakse generaatori ehitust ja töötamist XI klassis. Arvestades konkreetse klassi taset ja vajalikku ajavaru otsustab õpetaja, kas ta piirdub nähtuse üldise iseloomustamisega või peatub ka meie poolt esiletoodud punktidel.

Tehtud järelduste katseliseks kinnistamiseks võib teha katse magnetoelektrilise masinaga [4, lk. 233], mille rootor pöörleb avatud voluringi korral kergelt, suletud voluringi korral aga raskelt.

### 39. Foucault' voolud

Induktsioonivoolude tekkimist massiivsetes juhtides selgitatakse järgmiste lihtsate, kuid ilmekate katsete varal.

1. Näidatakse õpikus kirjeldatud katset (vt. õpik joon. 310), kus vaadeldakse pendli võnkumist elektromagneti pooluste vahel. Massiivse (tervikliku) pendli võnkumine sumbub palju kiiremini kui väljalõigetega pendli võnkumine.

2. Riputatakse niitide abil üles metallketas  $a$  (joon. 51), mille alla tsentrifuugmasinasse kinnitatakse hoburaudmagnet. Et vältida tekkivate õhuvoolude mõju, seatakse ketta ja magneti vahele papitükk. Magneti pöörlemine kandub, tänu Foucault' voolude tekkimisele, üle ka kettale.

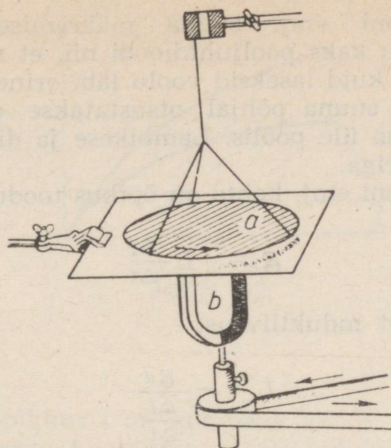
3. Elektromagneti pooluste otste vahele (vt. joon. 55) surutakse raudsilinder pikkusega 50 mm ja diameetriga 5 mm ning täpselt samade mõõtmetega kimp peeneid raudtraate. Silindrile ja traadikimbule kinnitatakse steariiniga vertikaalselt tikud. Elektromagnet lülitatakse vahelduvvooluvõrku. 1—2 minuti pärast sulab steariin raudsilindril ja tikud kukuvad maha. Traadikimp aga märgatavalt ei soojene. Katse aitab selgitada, miks transformaatorite südamikud pannakse kokku üksikutest metall-lehtedest.

4. Võib demonstreerida Foucault' voolude tekkimist ka Thomsoni pooli abil. On huvitav jälgida, kuidas metallrõngad hõljuvad õhus. Nende tugev kuumenemine on samuti seletatav Foucault' voolude tekkimisega muutuvas magnetväljas. Üheks katsevariandiks võiks olla ühesuguste mõõtmetega vask- ja raudrõnga soojenemise demonstreerimine. Rõngad paigutatakse pooli südamikule ja steariiniga kinnitatakse nende külge horisontaalselt tikud. Pooli lülitamisel vahelduvvooluvõrku langevad tikud esmalt rohkem soojenenud vaskrõngalt. See on täiesti seaduspärane, sest valemi  $Q = \frac{6i^2t}{R}$  kohaselt eraldub vaskrõngas suurem soojushulk.

Ekskursioonide korraldamisel on soovitatav (võimaluse korral) õpilastele tutvustada ka detailide kuumutamist kõrgsagedusvoolude abil.

### 40. Eneseinduktsioon. Induktiivsus

Induktsiooni elektromotoorjõu tekkimist selles juhtmes endas, mille muutuv voolutugevus ergutab muutuvat magnetvälja, võib algul selgitada joonisel 46 toodud skeemi põhjal. Mõlemad kon-



JOON. 51

tuurid (nii sisemine kui ka välimine) asuvad voolu sisse- ja väljalülitamisel muutuv magnetväljas ja neis mõlemas peab tekkima induksiooni emj., mida sisemise kontuuri juures nimetamegi eneseinduksiooni elektromotoorjõuks.

Kontuuri sulgemisel (voolu kasvamisel) on  $\mathcal{E}_e$  suunatud vastupidiselt vooluallika elektromotoorjõule ja takistab seega voolutugevuse kasvamist, vooluringi katkestamisel aga toetab põhvoolu (püüab seda säilitada).

Mõnikord, selgitades eneseinduksiooninähtust, öeldakse, et juhtmes esineb vooluringi sulgemisel kaks vastupidist voolu. Vool kui laengute korrastatud liikumine saab alati olla ainult üks. Vastupidiselt on suunatud vaid vooluallika emj. ja eneseinduksiooni emj. või siis põhilise elektrivälja tugevus ja indutseeritud elektrivälja tugevus.

Eneseinduksiooninähtust vooluahela sulgemisel võib hästi demonstreerida õpikus joonisel 313,a toodud seadme abil. Katse juures kasutatakse 3,5 V ja 0,28 A taskulambipirne, reostaati takistusega 50 — 100Ω ja paispooli või universaalse koolitransformatori 220 V pooli, mis on asetatud kinnisele südamikule. Vooluallikana kasutatakse akumulaatorit või 6 — 12 V alaldit. Vooluringi sulgemisel süttib lamp 2 umbes 1 sekundi võrra hiljem kui lamp 1. Seadme skeem, mille abil demonstreerida eneseinduksiooni vooluringi katkestamisel, on näidatud õpikus joonisel 313,b. Selle katse juures on võimalik kasutada neidsamu seadmeid, mis eelmises katses. Kuid parem on siiski hõõgniidiga lamp asendada neonlambiga CH-2 pingele 127 V. Rakendades seadmele vaid mõnevoldise pinget, on vooluringi katkestamisel näha neonlambi hele sähvatus. Järelikult on eneseinduksiooni elektromotoorjõud tunduvalt suurem vooluallika elektromotoorjõust.

Eneseinduktsiooni emj. suuna määramiseks ühendatakse lambiga järjestikku kaks pooljuhtdiodi nii, et nad oleksid omavahel paralleelsed, kuid laseksid voolu läbi erinevates suundades. Diodide läbilaske suuna põhjal otsustatakse eneseinduktsiooni emj. ja voolu suuna üle poolis. Lambikese ja diodid võib asendada galvanomeetriga.

Eneseinduktsiooni emj. kohta on õpikus toodud valem

$$\mathcal{E}_e = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

ja on selgitatud, et induktiivsust

$$L = - \frac{\mathcal{E}_e}{\frac{\Delta I}{\Delta t}}$$

möödetakse henrides (H).

Eneseinduktsiooni elektromotoorjõu  $\mathcal{E}_e$  sõltuvust voolu muutumise kiirusest näidatakse õpikus joonisel 313 toodud seadme abil, kui üldahelasse ühendatakse reostaat. Selleks tuleb nihutada reostaadi liugurit erineva kiirusega. Liuguri aeglasel liigutamisel muutub lampide 1 ja 2 heledus praktiliselt võrdselt. Kui aga liigutame reostaadi liugurit kiiresti, märkame, et voolu suurendamisel süttib lamp 2 veidi hiljem kui lamp 1. Mida suurem on voolu muutumise kiirus, seda märgatavam on see nähtus ja järelikult seda suurem on ka  $\mathcal{E}_e$ .

Induktiivsus  $L$  sõltub juhi mõõtmetest, tema kujust ja selle keskkonna magnetilistest omadustest, milles ta asub.

Induktiivsuse  $L$  sõltuvust loetletud suurustest võib selgitada sellesama seadme abil, muutes nüüd pooli induktiivsust.

Enne katsete demonstreerimist joonistatakse tahvlile induktioonpooli või transformaatori sektsioonide ühendamise skeem. Seejärel tehakse terve seeria katseid, ühendades algul pooli esimese või teise sektsiooni (490 või 422 keerdu) ja seejärel mõlemad sektsioonid korraga (klemmid 220 V).

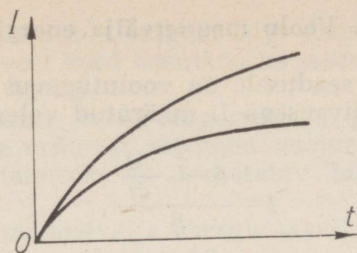
Lambikese 2 sähvatuse hilinemise põhjal järeldatakse, et suurema keerdude arvuga pool (seega ka pikem juhe) omab suuremat induktiivsust.

Vahetades poolis südamikke, tehakse kindlaks induktiivsuse sõltuvus ka keskkonna magnetilisest läbitavusest.

Kõigis katsetes peab volutugevus  $I$  olema voluringi hargmikes ühesugune.

Õpitu kinnistamiseks on kasulik lahendada järgmised ülesanded.

1. Graafikutel (joon. 52) on näha volutugevuse muutumine poolides nende ühendamisel alalisvooluallikaga. Kumma pooli induktiivsus on suurem? Millisel ajamomendil on eneseinduktsiooni elektromotoorjõud suurim (väiksem)?



JOON. 52

2. Kui pooli pikkus  $l$  on kümneid kordi suurem tema diameetrist, määratakse ühekihilise pooli induktiivsus valemiga

$$L = \mu \mu_0 n^2 l S,$$

milles  $S$  on pooli ristlõike pindala,  $n$  — keerdude arv pikkusühikul. Arvutage pooli induktiivsus, kui  $l = 350$ ,  $S = 1400 \text{ mm}^2$ , juhtme diameeter on  $0,50 \text{ mm}$  ja  $\mu$  võtta võrdseks ühega.

Vastus.  $L \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ H}$ .

3. Kuidas muutub raudsüdamikuga pooli induktiivsus (vt. ülesanne 2), kui a) eemaldada südamik; b) vähendada pooli pikkust; c) venitades pooli spiraalse vedruna pikemaks (eeldame, et keerdude diameeter ei muutu); venitades pooli pikemaks nii, et keerdude diameeter väheneb; venitades pooli sirgjuhtmeks?

Lahendus. Vastused juhtudele a) ja b) on ilmsed. Pooli venitamisel kasvab induktiivsus pooli pikkuse  $l$  arvel, kuid väheneb pikkusühikule tuleva keerdude arvu  $n$  vähenemise tõttu. Kuna valemist on näha, et induktiivsus sõltub  $n^2$ -st, siis venitamisel induktiivsus väheneb. Valemi võib kirjutada ka teisel kujul. Et  $nl$  on keerdude arv poolis, siis

$$n^2 l = \frac{n^2 l^2}{l} = \frac{N^2}{l};$$

$$L = \mu \mu_0 \frac{N^2}{l} S.$$

Siit on ilmne, et pikkuse  $l$  suurenedes induktiivsus  $L$  väheneb. Keerdude diameetri ( $S$ ) vähenemine pooli pikkuse  $l$  edasisei suurendamisel põhjustab muidugi induktiivsuse vähenemist ning minimaalne väärtus on induktiivsusel siis, kui pool on venitatud sirgjuhtmeks.

Kasulik on vaadelda ülesande käiku ka vastupidises järjekorras, tehes õpilastele ülesandeks suurendada sirgjuhtme induktiivsust.

## 41. Voolu magnetvälja energia

Vastavalt Ohmi seadusele on voolutugevus vooluringis takistusega  $R$  ja induktiivsusega  $L$  määratud valemiga

$$I = \frac{\mathcal{E} - L \frac{\Delta I}{dt}}{R},$$

kus  $\mathcal{E}$  on vooluallika elektromotoorjõud. Sellest valemist saame pärast mõningaid lihtsaid teisendusi võrrandi

$$I \mathcal{E} dt = I^2 R dt + LI dI.$$

Seega on vooluallika elementaartöö  $I \mathcal{E} dt$  võrdne Joule'i soojusega  $I^2 R dt$  ja magnetvälja energiaga  $LI dI$ . Oletades, et aja  $t$  jooksul muutub vool 0-st kuni 1-ni, leiame, et magnetvälja energia

$$T_m = \int_0^I LI dI = \frac{LI^2}{2}.$$

Õpikus on see valem antud ilma tuletuseta. Kui õpilased XI klassis õpivad integraalarvutust, on kordamisel sellise tuletuskäiguga tutvumine neile sobivaks ülesandeks.

Valemit  $T_m = \frac{LI^2}{2}$  on sobiv vastandada kineetilise energia analoogilise valemiga  $T_k = \frac{mv^2}{2}$ , nagu seda ongi tehtud õpikus. Samuti võib neid võrrelda ka laetud kondensaatori energia valemiga  $T_c = \frac{C(\Delta\varphi)^2}{2}$ . Sellist analoogiat võib veelgi jätkata.

Homogeenses elektriväljas  $\Delta\varphi = Ed$ ;  $\Delta\varphi^2 \sim E^2$ , seepärast väljendub elektrivälja energia tihedus valemiga  $T = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$ .

Magnetväli, näiteks vooluga sirgjuhtme magnetväli, sõltub voolutugevusest vastavalt valemile

$$B = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi R}.$$

Järelikult on väikeses ruumalas, kus välja võib lugeda homogeenseks,  $B \sim I$  või  $I^2 \sim B^2$ . Seepärast võib oletada, et magnetvälja energia tihedus peaks väikeses ruumalas, kus loeme välja homogeenseks, (vastavalt valemile  $T_m = \frac{LI^2}{2\mu\mu_0}$ ) olema võrdeline magnetilise induktsiooni  $B$  ruuduga. Pärast seda antakse õpilastele valem

$$T_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu\mu_0}.$$

See on analoogiline elektrivälja energia tiheduse valemiga.

Et demonstreerida voolu magnetvälja energia sõltuvust suurustest  $L$  ja  $I$ , võib veel kord kasutada katseseadet, mis on näidatud õpikus joonisel 313, b.

Muutes pooli läbiva voolu tugevust ja pooli induktiivsust, jälgitakse lambikese erinevat süttimist vooluringi katkestamisel.

Materjali kinnistamiseks on soovitatav lahendada järgmised ülesanded.

1. Kui suur on magnetvälja energia poolil, mille induktiivsus  $L=10$  H ja mida läbib vool  $I=4$  A?

2. Kui suur on bifilaarse mähisega pooli magnetvälja energia?

3. Kumba energia on suurem: kas kondensaatoril mahtuvusega 10 mF, mille katetel on pinge 20 V, või poolil induktiivsusega  $L=10$  H voolutugevusel 20 A.

Vastus. Pooli energia on  $10^6$  korda suurem.

Kahes viimases kokkuvõtvast tunnis on soovitatav teha kontrolltöö või iseseisev töö, samuti nende analüüs. Ühtlasi tehakse ülevaade tähtsamatest või veel ebaselgetest küsimustest vastavalt konkreetsetele töötingimustele ühes või teises klassis.

#### 42. Teema «Elektromagnetiline induktsioon» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku paragrahvid
1.	Elektromagnetilise induktsiooni avastamine.	§ 130
2.-3.	Magnetvoog. Induktsioonivoolu suund. Lentzi reegel. Ülesannete lahendamine.	§ 131, 132
4.-5.	Elektromagnetilise induktsiooni seadus. Magnetilise induktsiooni ja magnetvoo ühikud. Ülesannete lahendamine.	§ 133, 134
6.-7.	Pööriselektriväli. Induktsiooni emj. liikuvates juhtmetes.	§ 135-136
8.	Foucault' voolud.	§ 137
9.	Eneseinduktsioon. Induktiivsus.	§ 138
10.	Laboratoorne töö: «Elektromagnetilise induktsiooni ja eneseinduktsiooni uurimine».	
11.	Voolu energia. Magnetvälja energia.	§ 140

#### VI. AINETE MAGNETILISED OMADUSED

Õpilastele on teada, et magnetilise induktsiooni vektor  $\vec{B}$  on juhtivusvoolude ja aine elektrilaengute liikumisest tekitatud summaarse magnetvälja jõukarakteristikuks. Antud osa ülesandeks on konkretiseerida ja süvendada neid üldisi teadmisi ning anda õpilastele ülevaade magnetvälja mõjust ainele.

### 43. Ampère'i hüpotees. Erinevate ainete magnetiline läbitavus

Ampère'i hüpoteesiga, mille kohaselt püsिमagnetite magnetilised omadused seletuvad neis esinevate suletud elektrivoolude olemasoluga, on õpilased tuttavad juba VIII klassist ning samuti eelneva materjali õppimisest.

Neid teadmisi tuleb ära kasutada ja rakendada mistahes ainete magnetiliste omaduste tundmaõppimisel. Õpilased teavad, et ühtlases keskkonnas magnetilise induktsiooni vektor  $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$ , kus  $\vec{B}_0$  on magnetiline induktsioon vaakumis,  $\mu$  aga keskkonnas magnetiline läbitavus.

Järelikult tuleb keskkonna magnetiliste omaduste iseloomustamiseks osata mõõta selle keskkonna magnetilist läbitavust.

Seoses sellega meenutatakse ja analüüsitakse järgmisi põhivalemeid, milles esineb suurus  $\mu$ , märkides ära põhimõtteliselt võimalikud viisid tema mõõtmiseks.

1.  $M_{\max} = BIS = \mu B_0 IS.$
2.  $F = \mu \mu_0 \frac{I_1 I_2 l}{2\pi R}.$
3.  $\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - \frac{\Delta(\mu B_0 S)}{\Delta t}.$
4.  $W_m = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu \mu_0} = \frac{1}{2} \frac{\mu}{\mu_0} B_0^2.$
5.  $W_m = \frac{LI^2}{2}.$

Vastavalt valemile (1) võib  $\mu$  mõõta, kasutades raami pöört uuritavas keskkonnas (joon. 33). Valem (2) järgi saaks  $\mu$  määrata paralleelsete voolude vastastikuse mõju põhjal (vt. katse kirjeldust lk. 81 ja seadet joonisel 35).

Magnetilise läbitavuse  $\mu$  võib määrata ka valemite (3—5) järgi, kasutades seadet, mis sarnaneb sellele, millega demonstree-riti eneseinduktsiooni nähtust vooluringi katkestamisel (vt. õpikus joonis 313). Sama võib teha ka laboratoorse töö käigus (vt. joon. 63). Algul viiakse katsed läbi ilma südamikuta, pärast aga südamikuga, millel ongi otsitav magnetiline läbitavus  $\mu$ . Sellisel viisil on eelkõige võimalik mõõta raua magnetilist läbitavust.

Valemis (5) kuulub  $\mu$  varjatud kujul suuruse  $L$  koosseisu. Kui õpilased lahendasid ülesande 3 (lk. 105), siis võib meenutada, et solenoidi korral  $L = \mu \mu_0 n^2 l S$ , s. t.  $L \sim \mu$ .

On muidugi mõistetav, et õpilastelt pole seda valemit tarvis nõuda. Katseid (joonis 313 õpikus ja joonis 63) võib õpetaja oma äranägemise järgi korrata või kasutada nende skeeme selgituse ajal.

<sup>1</sup> Tuleb silmas pidada, et paramagneetikute  $\mu$  (tugevates väljades) ja eriti ferromagneetikute  $\mu$  sõltuvad suurusest  $B_0$ .

On veel teisi võimalusi  $\mu$  mõõtmiseks. Nagu uuringud on näidanud, on mõningate ainete (raud, koobalt, nikkel jt.) magnetiline läbitavus  $\mu$  ühest tunduvalt suurem. Neid aineid nimetatakse nende peamise esindaja raua järgi — ferromagneetikuteks. Sõltuvalt magnetiva välja tugevusest võib raua magnetiline läbitavus  $\mu$  kasvada tuhandeid, nikli ja koobalti  $\mu$  aga sadu kordi. Spetsiaalsetel sulamitel, näiteks permalloil, on  $\mu$  maksimaalne väärtus  $10^6$ . Enamikul ainetel on  $\mu$  kas veidi suurem või veidi väiksem kui 1. Esimesi neist ( $\mu > 1$ ) nimetatakse paramagneetikuteks (alumiinium, mangaan, hapnik jt.), teisi ( $\mu < 1$ ) aga diamagneetikuteks (vismut, vask, kuld, elavhõbe, vesi, kloor jt.).

Näiteks on alumiiniumi magnetiline läbitavus 1,000013, vismutil 0,999824, veel 0,999991.

Magnetilised omadused on iseloomulikud eranditult kõikidele kehadele, nii tahketele, vedelatele kui ka gaasilistele.

Selle nähtuse üldine põhjus on õpilastele arusaadav: igas aines esinevad molekulaarvoolud, mis tekitavad oma magnetvälja. Ainete magnetiliste omaduste erinevus pole aga õpilastele teada. Ootamatu on diamagneetikute omadus nõrgendada välist magnetvälja. Selle poolest meenutavad nad dielektrikuid, kus elektri-väli on nõrgem kui samadel tingimustel vaakumis.

#### 44. Para- ja diamagnetism

Asudes selle teema selgitamisele, tuleb silmas pidada järgmist.

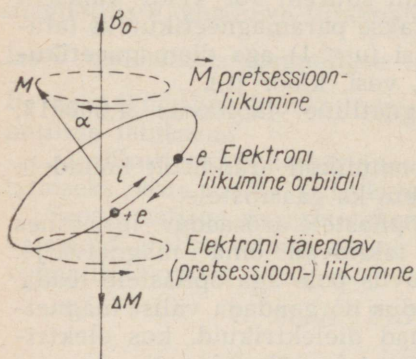
Aine magnetilised omadused sõltuvad tema molekulide magnetmomentidest, mis võrduvad kõikide elektronide orbitaalsete ja spinnmomentide ning tuumade magnetmomentide geomeetrilise summaga.

Kui molekuli magnetmoment võrdub nulliga, siis on aine diamagneetik, kui aga ei võrdu, siis on see aine paramagneetik.

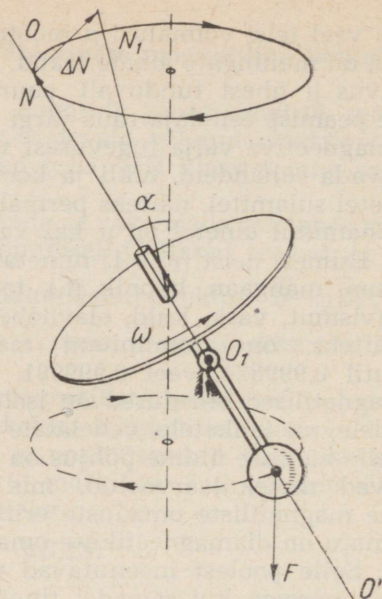
Para- ja diamagneetikute tundmaõppimise esimeses kontsentris võib vaadelda ainult nende elektronide orbitaalseid momente.

Orbiidil tiirlevat elektroni (joon. 53) võib vaadelda kui ringvoolu  $i$ , mille magnetmoment  $M = iS$  ( $S$  on elektroni orbiidi pindala). Elektroni orbiit püüab pöörata end magnetväljas nii, et vektor  $\vec{M}$  ühtiks magnetilise induktsiooni vektoriga  $\vec{B}_0$ . Seda on kerge kindlaks teha vasaku käe reegli põhjal. Selle tulemusena tekib magnetmomendi  $\vec{M}$  pretsessiooniliikumine ümber vektori  $\vec{B}_0$  sihi, mis sarnaneb güroskoobi telje liikumisega. Selgitame öeldut üksikasjalikumalt. Vaatleme massiivset güroskoopi (massiivset ketast), mis pöörleb ümber telje  $OO'$  nii, nagu on näidatud joonisel 54. Pöörlemise tõttu on tal teatud liikumishulgamoment  $\vec{N}$ . Oletame, et telg  $OO'$  võib vabalt pöörduda mistahes suunas

<sup>1</sup> Liikumishulgamomenti nimetatakse ka pöörlemishulgaks. (Tõlk.)



JOON. 53



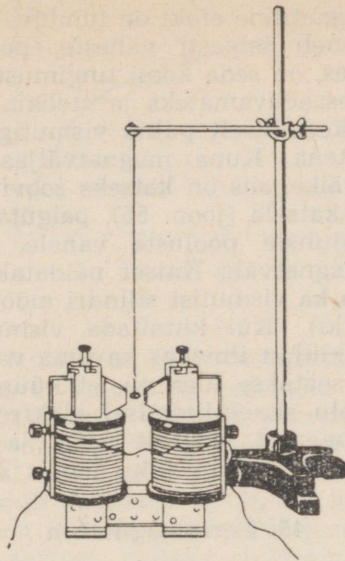
JOON. 54

šarniiris  $O_1$  ja jõud  $\vec{F}$  tekitab momendi  $\vec{M}$ , mis püüab vähendada nurka  $\alpha$  vertikaali ja telje  $OO'$  vahel. Selle tulemusena tekib täiendav liikumishulgamoment  $\Delta\vec{N} = \vec{M}\Delta t$ , mis on suunatud joonise tasapinna taha. Nüüd saame uue väärtuse  $\vec{N}' = \vec{N} + \Delta\vec{N}$ . Telje  $OO'$  ülemine ots pöörduv  $\Delta\vec{N}$  sihis. Järelikult on telje  $OO'$  pöörlemine pretsessioonilise iseloomuga ning vastupidine ketta pöörlemise suunale.

Jooniste 53 ja 54 analoogia on täielik, kui joonisel 53 näidata mitte elektronide, vaid positiivsete laengute liikumist.

Laengute täiendav liikumine vastupidises suunas tekitab magnetvälja, mis on suunatud vastupidiselt välisele magnetväljale  $\vec{B}_0$ . Sellega ongi seletatav diamagneetiline efekt.

Paramagneetikute juures etendab diamagneetiline efekt kõrvalist osa, sest tervikuna tugevneb magnetväli olemasoleva magnetmomendi  $\vec{M}$  orienteerumise tõttu välja sihis. Selline orientatsioon saab võimalikuks tänu pretsessioonilikumise «summutamisele» molekulide pörgete poolt. Sellest omakorda järeldub, et paramagnetism sõltub kehade temperatuurist. Välise välja puudumisel desorienteerib soojusliikumine paramagneetiku üksikute aatomite magnetmomendid. Kehade diamagnetilised omadused ei sõltu nende temperatuurist, sest need on tingitud induksiooninähtustest.



JOON. 55

Tuleb märkida, et Langevini teooria kohaselt tekib diamagnetiline efekt ka siis, kui magnetilise induktsiooni vektor  $\vec{B}_0$  on risti elektroni orbiidiga. See seletub Lorentzi jõu mõjuga elektroni liikumise kiirusele.

Kuna paramagneetikutel  $\mu > 1$ , siis sarnanevad nad magnetväljas nõrkade magnetitega. Analogia põhjal võime järeldada, et paramagneetiku elementaarvoolud orienteeruvad välja sihis ja tugevdavad seda.

Nähtuse selgitamiseks on kasulik veel kord vaadelda katset sirgmagneti ja vooluraamiga (joon. 32).

Sarnaselt vooluga mähisele või magnetnõelale peab paramagneetikust silinder tõmbuma mittehomogeensesse magnetvälja ja asetuma piki magnetilise induktsiooni jooni.

Kooli tingimustes on raske näidata, kuidas paramagneetik tõmbub välja sisse. Selleks on vaja kaalusid tundlikkusega 1 mg. Paramagneetiku orientatsiooni magnetväljas on aga võrdlemisi hõlpus näidata. Selleks koostatakse koolitransformaatorist elektromagnet ja tema pooluste vahele riputatakse peenikese kapronniidi abil paramagneetikust, näiteks alumiiniumist, silinder (joon. 55).

Silindri käitumine magnetväljas sõltub keskkonna magneetumusest, milles ta asub. Kui see keskkond on magneeditud tugevamini kui silinder, siis käitub silinder nagu diamagneetik.

Teades, et diamagnetiline efekt on tunduvalt nõrgem kui paramagnetiline ja ilmneb selgesti väheste, peamiselt keemiliselt puhaste ainete juures, on seda kooli tingimustes muidugi raskem näidata. Kõige kättesaadavamateks ja «töökindlamateks» on katsed küünlaleegi ja keemiliselt puhta vismutiga, mis on müügil pikerguste graanulitena. Kuna magnetväljas graanulile mõjuv pöörmoment on väike, siis on katseks soovitav, analoogiliselt eespool kirjeldatud katsele (joon. 55), paigutada vismut elektromagneti koonusekujuliste pooluste vahele. Selliselt saadakse võrdlemisi tugev magnetväli. Katset näidatakse variprojektsioonis. Võib valmistada ka vismutist silindri mõõtmetega 50—55 mm (nagu alumiiniumistki). Kui kinnitada vismutsilindrile paberist lipukesed, on katse küllalt ilmekas ka ilma variprojektsioonita.

Katse küünlaga seatakse üles nii, et küünla leek asuks otse pooluste vahel. Voolu sisselülitamisel elektromagnetisse tõukub leek magnetvälja tugevast tsoonist välja ja seepärast muutub leegi ülemine osa tasaseks (vt. õpiku joonis 323).

#### 45. Ferromagnetism

Enamiku elementide (para- ja diamagneetikute) aatomites elektronide spinnid kompenseerivad üksteist paarikaupa ja seepärast on nende magnetilised omadused määratud peamiselt elektronide orbitaalsete magnetmomentidega. Väikesel hulgal ainetel — ferromagneetikutel — aga ei kompenseeru spinnid vastastikku, sest neil pole täielikult täidetud üks seesmistest elektronkatetest (raual on näiteks M-kihis 18 elektroni asemel ainult 14 elektroni).

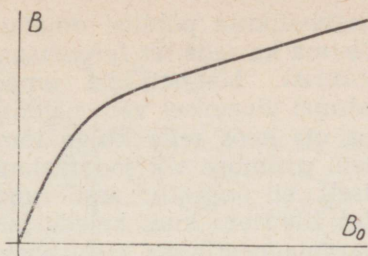
Selle tulemusena omavad ferromagneetikud püsivat spinnidest tingitud magnetmomenti. Seejuures on ferromagneetiku energia, mis on vajalik spinnide paralleelse orientatsiooni korral püsiva seisundi säilitamiseks, minimaalne.

Ferromagneetikute tähtsaks iseärasuseks on nende domeenidel põhinev struktuur. Osutub, et väikesed ruumalad ( $10^{-6}$  —  $10^{-9}$  cm<sup>3</sup>) ferromagneetikutes on iseenesest magneeditud kuni täieliku küllastuseni. Tervikuna aga pole ferromagneetik välise välja puudumisel magneeditud.

Erinevalt para- ja diamagneetikutest võib ferromagneetikutel esineda püsivat magneetumust või, nagu öeldakse, neil esineb jääkmagneetumus.

Jääkmagneetumus esineb tänu koertsitiivjõududele, mis on nagu omamoodi hõõrdumine, mis ei lase soojusliikumisel desorienteerida domeenide magnetmomente.

Ferromagneetiku, näiteks pika solenoidi raudsüdamik magneedituse mõõduks võib olla vastavalt õpikule «magneetumus»  $I = B - B_0 = (\mu - 1) B_0$ , kus  $B = \mu B_0$  on täielik magnetiline induktioon rauas,  $B_0$  aga on solenoidi läbiva voolu poolt tekitatud välja magnetiline induktioon.



JOON. 56

Magneetumuse  $I$  sõltuvus  $B_0$ -st on kujutatud õpikus joonisel 326. Sealt on näha, et teatud  $B_0$  väärtuste korral saabub «küllastus», s. t. magneetumus  $I$  enam ei suurene. See olukord selektub magnetmomentide täieliku orientatsiooniga välja sihis.

Füüsika õpetajal on kasulik silmas pidada ka sõltuvuse iseloomu, mis väljendub valemiga  $B=B_0+I$ , kus  $I=f(B_0)$ . See on küllaltki oluline, sest tihti on vaja teada just magnetilise induktiooni vektori  $B$  väärtust, näiteks elektromagneti pooluste otsikute vahel. Selle sõltuvuse graafik on näha joonisel 56. Pärast südamiküüllastumist kasvab  $B$  võrdeliselt  $B_0$ -ga. Sellest järeldub, et pärast küllastumist hakkab magnetiline läbitavus vähenema, püüdes läheneda ühele. Seepärast võib väga suurte  $B_0$  väärtuste korral valemis  $B=B_0+I$  jätta liikme  $I$  arvestamata.  $B_0$  väikeste väärtuste korral tekib magnetväli peamiselt südamiku molekulaarvoolude arvel,  $B_0$  suurte väärtustel aga solenoidi läbiva voolu arvel.

Kui võrd solenoidis  $B_0 \sim i$  (vt. lk. 114), siis  $B$  sõltuvus solenoidi läbivast voolust  $I$  on sarnane joonisel 56 toodud graafikuga.

Ferromagnetismi olemuse selgitamine eelnevalt toodud ulatuses ei ole kohustuslik. Siiski võib seda õpilastele tutvustada «täiendavaks lugemiseks» mõeldud paragrahvi 146 alusel. Et anda õpilastele ettekujutust domeenidest, võib korraldada katse teraseviilmetega, mis on paigutatud katseklaasi. Elektromagneti väljas viilmed magneetuvad ja nad tõmbavad külge raudesemeid. Raputanud katseklaasi viilmetega, ilmneb, et katseklaas kaotas peaaegu täielikult oma magnetilised omadused. Selle põhjuseks on teraseviilmete ebakorrapärane asetus katseklaasis.

Vastavalt programmile tuleb ferromagneetikute domeenilist struktuuri demonstreerida Barkhauseni katse varal. Selleks mähitakse 30–40 cm pikkusele raudjuhtmele mõnituhat keerdu peenikest traati, mille otsad ühendatakse madalsagedusvõimendi (УНЧ-3, kinoprojektori võimendi vms.) sisendiga. Nihutades püsimagnetit piki kerde, kuulatakse kahinaid ja naksatusi, mida põhjustavad domeenide ümbermagneetumisel indutseeritavad voolud. Barkhauseni «hüppeid» võib demonstreerida ka elektromagnetilise silloskoobi abil [5, lk. 242].

Õppides ferromagneetikute põhilisi omadusi (õpikus § 145) peavad õpilased mõistma ka seda, et ferromagneetikute omadused sõltuvad temperatuurist. Magnetiliste omaduste kvalitatiivset muutumist temperatuuri tõusmisel võib näidata järgmiselt.

Magneeditud noa ots koos selle külge tõmbunud žiletiteraga asetatakse gaasipõleti, priimuse või jootmislambi leeki. (Piirituslambil katse tavaliselt ei õnnestu, sest raua Curie' punkt on  $753^{\circ}\text{C}$ ). Kuumutades žiletitera kuni heleda hõõgumiseni, vaadeldakse, kuidas ta paramagneetikuks muutudes tuleb noa küljest lahti ja langeb oma raskuse mõjul alla.

Jahtunud žiletitera tõmbub uuesti noatera külge. Pärast seda antakse, vastavalt õpikule, ferromagneetikute «magneetumuse» mõiste ning valem  $I = B - B_0 = (\mu - 1) B_0$ .

Et demonstreerida ferromagneetiku magneetumuse  $I$  või magnetilise induktsiooni  $B$  sõltuvust välise magnetvälja magnetilisest induktiivsusest  $B_0$ , selleks on tingimata tarvis valmistada magnetvälja induktsiooni indikaator, mille mehhanism on näha joonisel 57, ja välisilme joonisel 58. Selle seadme põhiosaks on 0,20 mm diameetriga traadist keritud 100 keeruga raam  $a$  mõõtmetega  $4 \times 4$  cm. Raam on paigaldatud teljele  $b$ , mis omakorda on ühenduses osutiga. Osutit algasendisse tagasitoova pöörlemomendi tekitab spiraalvedru  $c$ , mille üks ots on joodetud raami telje külge, teine ots aga on kinnitatud paneelile. Raamimähise juhtmeotsad keeratakse spiraalseteks ja ühendatakse klemmidega  $d$ .

Taoline indikaator võib olla ka magnetelektrilise mõõteriista mudeliks.

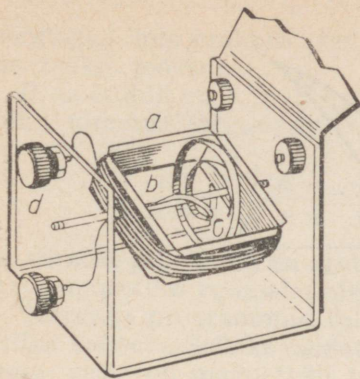
Indikaatori skaala on ebaühtlase jaotusega, sest homogeenses magnetväljas on moment  $M = BSi \sin \alpha$ , kus  $\alpha$  on nurk juhtmekeeru tasapinna normaali ja vektori  $\vec{B}$  vahel.

Katse idee, mille abil tehakse kindlaks sõltuvus  $I$  ja  $B_0$  või  $B$  ja  $B_0$  vahel, seisneb järgmises.

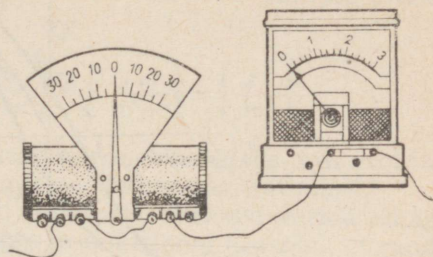
Induktsioon  $B_0$  on järjestikku ühendatud poolide vahelises kitsas pilus võrdeline poole läbiva vooluga ( $B_0 = ki$ ), mis võimaldab gradueerida indikaatori skaala magnetilise induktsiooni tingühikutes, mis on ampermeetri näitude kordsed.

Katse jaoks on soovitatav valmistada 2 pooli pikkusega 25—30 cm, mähkides ruudukujulise ristlõikega ( $22 \times 22$  mm) karkassile 1500—2000 keerdu 1 mm läbimõõduga traati. Ava mõõtmed on antud selleks, et siis mahub pooli 2 sirgmagnetit. Võib kasutada ka kahte 220 V pooli universaalsetelt kooli-transformaatoritelt. Viimaste tekitatud magnetväli on küll veidi nõrgem (joon. 58).

Reguleeritava alalispingeallikana kasutatakse kooli elektri-jaotuskilbi alaldit. Enne katset gradueeritakse indikaatori skaala tingühikutes, mille võib põhimõtteliselt väljendada teslades. Selleks juhitakse poolidesse maksimaalne lubatav vool (3—4 A)



JOON. 57



JOON. 58

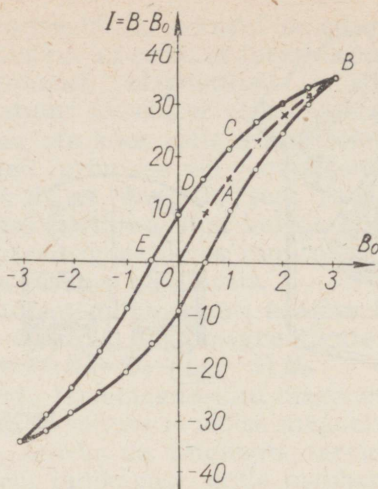
ja, suurendades järk-järgult voolutugevust ka indikaatori raamis, saadakse osuti kalle, näiteks paremale, üle terve skaala. Osuti selline asend märgitakse arvuga 30. (Absoluutsetes ühikutes oleks  $B_0$  suurusjärgus  $10^{-2}$  T.) Seejärel nõrgendatakse voolu poolides kuni 2 amprini ja märgitakse mõõteriista skaalale arv 20 jne. kuni nullini.

Edasi paigutatakse poolidesse terassüdamikud, mille koertsitiivjõud on suur.

Kuna taoliste südamike leidmine pole kerge, võib kasutada sirgmagneteid. Joonisel 58 näidatud seade võimaldab magneteid kahjustamata neid täielikult demagneetida ja saada isegi nende palju tugevam magneetumus, kui see on tavalistel kooli sirgmagneteil.

Südamike asetamisel pooli kasvab induksioon vahemikus 10—20 korda, seepärast tuleb niisama palju kordi vähendada ka indikaatori tundlikkust voolu nõrgendamise teel raamis. Sellisel ettevalmistatud mõõteriista on klassis hea kasutada. Mõõteriista demonstreerimisel selgitatakse õpilastele selle töötamise printsiipi, meenutades prooviraami (vt. joon. 33). Öeldakse, et mõõteriist on gradueeritud tingühikutes, mis vastavad umbes  $10^{-2}$  teslale.

Asetades indikaatori poolide vahele, juhitakse neisse vool, mis kutsub esile osuti kõrvalekaldumise 2—3 jaotuse võrra. Võetakse demagneeditud südamikud ja, lähendades neid raudesemetele, näidatakse, et nad ei tõmba neid külge. Seejärel pannakse südamikud poolidesse ja vaadeldakse, kuidas magnetiline induksioon kasvab 10—20 korda. Tehakse järeldus: raua magnetiline läbitavus  $\mu > 1$ . Võtnud südamiku poolist välja, demonstreeritakse tema magnetilisi omadusi ja määratakse magnetnõela abil ka poolused. Pannes südamiku uuesti pooli, vähendatakse voolutugevust nullini ja näidatakse, et vardas esineb jääkmagnetism.



JOON. 59

Muudetakse ka voolu suunda poolides ja demagneeditakse südamikud ning seejärel magneeditakse need uuesti. Pärast neid katseid võib asuda uurima magneetumuse  $I$  sõltuvust  $B_0$ -st.

$B_0$  mõõdetakse tingühikutest, mis arvuliselt on võrdsed ampermeetri näitudega. Viimane mõõdab voolutugevust poolides. Joonisel 59 esitatud graafik  $OAB$  ongi ehitatud andmete põhjal, mis on saadud ühe katse juures joonisel 58 näidatud seadmega. Graafikult on näha  $I$  ja  $B_0$  vahelise sõltuvuse mittelineaarne iseloom.

Analüüsidest katse tulemusi, tuleb pöörata tähelepanu sellele, et raua magnetiline läbitavus  $\mu > 1$  ja  $B_0$  suurte väärtuste korral väheneb. Seoses sellega on soovitatav kõrvutada katse tulemusi õpiku joonisel 328 toodud graafikuga.

Edasi vaadeldakse õpikus hüsteresisilmust, mille võib samuti saada katse varal (joon. 59). Analüüsidest seda graafikut tuleb juhtida õpilaste tähelepanu asjaolule, et haru  $BCD$  kulgeb kõverast  $OAB$  kõrgemale, mis on seletatav «magnetilise hüsteresiga» või magneetumuse  $I$  vähenemisega hilinemisega välja  $B_0$  vähenemisel. Koertsitiivjõu suurust iseloomustab graafikul löik  $OE$ . See löik näitab välja magnetilist induksiooni, mis oleks võimeline südamikku demagneetima.

Hüsteresisilmuse pindala on seda suurem, mida «kõvemast» materjalist on südamik.

Õpilastele tuleb selgitada, et ferromagneetiku ümbermagneetamise protsess on seotud tagasipöördumatute energiakadudega. Mida suurem on ilmuse pindala, seda suurem on energiakadu, mis lõppkokkuvõttes läheb ferromagneetiku soojendamiseks.

Kasulik on silmas pidada, et kui hüsteresisilmus joonistatakse koordinaattelgedes  $B_0H$ , siis on ilmuse pindala arvuliselt võrdne

energiaga, mis eraldub ferromagneetikust ümbermagneetumise ühe tsükli jooksul.

$H$  mõõtühik on A/m. Seepärast on SI-süsteemis silmuse pinnahüki nimetus järgmine:

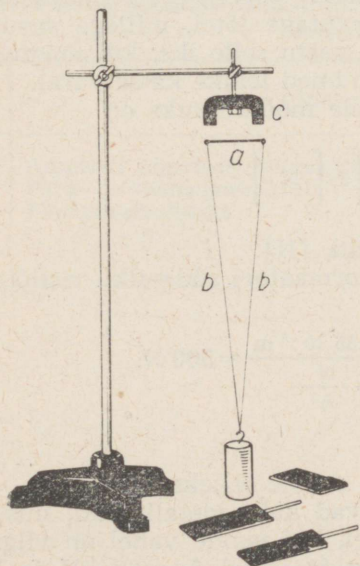
$$\left[ \frac{\text{N}}{\text{A}\cdot\text{m}} \right] \cdot \left[ \frac{\text{A}}{\text{m}} \right] = \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right] = \left[ \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot\text{m}} \right] = \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right],$$

s. t. silmuse pinnahüki on arvuliselt võrdne energiaga, mis eraldub ferromagneetiku ruumalaühikus tema ümbermagneetimisel.

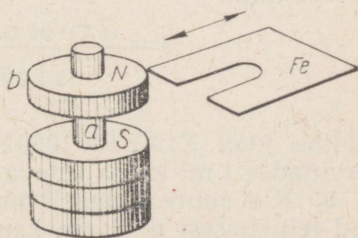
Vastavalt programmile tuleb tingimata demonstreerida «magnetilist kaitset». Selleks näidatakse projektsiooni kaasabil, et raudrõnga sees on magnetväli tühine. Põhjus on selles, et magnetvälja jõujooned koonduvad kõik rauas. Rõngas paigutatakse kahe klaasi vahele ja asetatakse projektsioonilambi kondensoorile. Magnetvälja spekter saadakse ülemisel klaasil, kusjuures õpilaste tähelepanu juhitakse asjaolule, et rõnga sees asetsevad rauaviilmed korrapäraselt.

Pärast seda koostatakse seade, mis on näidatud joonisel 60. Terastraat  $a$  «ripub» õhus, pingutades niite  $bb$  tänu magneti  $c$  tõmbejõule. Kui asetada magneti ja traadi vahele õhuke raudplaat, siis kukub traat alla [2, lk. 275].

Selles katses võib kasutada suurt hoburaudmagnetit või keramiilisi magneteid, mis seatakse U-kujulisele raudsüdamikule või siis kaarekujulisele elektromagnetile südamikule.



JOON. 60



JOON. 61

Keraamiliste magnetitega võib demonstreerida veel järgmist katset (joon. 61). Asetades plastmassist vardale  $a$  keraamilised rõngasmagnetid nii, et samanimelised poolused oleksid vastakuti, näidatakse kuidas magnet  $b$  «seisab» õhus. Seejärel pistetakse magnetite vahele raudleht ja jälgitakse magneti  $b$  allalangemist. Pärast raudlehe eemaldamist tõuseb magnet  $b$  uuesti üles.

Materjali kinnistamiseks on soovitatav lisaks õpikus toodud ülesannetele lahendada ka järgmised.

1. Pika solenoidi sisemuses tekkiv magnetiline induksioon määratakse valemiga

$$B = \frac{\mu\mu_0 IN}{l},$$

kus  $N$  on keerdude arv,  $l$  aga solenoidi pikkus. Kontrollige mõõtühikute samasust valemi paremal ja vasakul poolel.

Lahendus.  $B$  mõõtühik on  $\left[\frac{N}{A \cdot m}\right]$ . Valemi parema poole

$$\text{mõõtühik võrdub } \left[\frac{N \cdot A}{A^2 \cdot m}\right] = \left[\frac{N}{A \cdot m}\right].$$

2. Hoburauakujulise elektromagneti ühe pooluse tõstejõud määratakse valemiga

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0},$$

kus  $S$  on pooluse ristlõike pindala. Võrrelge valemi vasaku ja parema poole mõõtühikuid. Arvutage jõud, millega surutakse koolitransformaatori südamiku vastu selle ike, kui magnetiline induksioon  $B=1$  T. Puuduvad andmed leidke katse varal.

Lahendus. Valemi parema poole mõõtühikuks on

$$\left[\frac{N^2 \cdot m^2 \cdot A^2}{A^2 \cdot m^2 \cdot N}\right] = [N],$$

vasaku poole mõõtühikuks samuti  $[N]$ .

Mõõtmise teel saame, et transformaatori südamiku ristlõige on  $36 \times 35$  mm.

$$F = \frac{(1 \text{ T})^2 \cdot 36 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot 35 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6} \frac{N}{A^2}} \approx 500 \text{ N}.$$

Üldine jõud  $F_{\text{ü}} = 2F = 1000$  N.

Arvutades  $1 \text{ m}^2$  kohta tuleva jõu, saame selleks  $\approx 10^6$  N.

3. Kui suure jõuga  $F$  tõmbuvad kaks metallplaati, mis asuvad teineteisest  $d=1$  cm kaugusel, kui nende vahel on vilgukivi ( $\epsilon=6,0$ ); potentsiaalide vahe plaatide vahel  $\Delta\varphi \approx 60$  kV ja kummagi plaadi pindala  $S=1 \text{ m}^2$ .

Lahendus.

$$F = qE; \quad E = \frac{\Delta\varphi}{d}; \quad q = C\Delta\varphi = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S \Delta\varphi}{d}.$$

$$F = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S (\Delta\varphi)^2}{d^2} = \frac{8,8 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}}{\text{Nm}^2} \cdot 6,0 \cdot 1\text{m}^2 \left(60 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}}\right)^2}{(10^{-2} \text{m})^2} = 1,9 \cdot 10^3 \text{N}.$$

Antud ülesande ja eelmise ülesande vastuste võrdlemisest tuleneb järeldus: pinnaühikule mõjuvad magnetjõud võivad olla praktiliselt tunduvalt suuremad elektrilistest. Seda vaatlesime sisuliselt juba ka IV peatükis (lk. 85).

Antud teema viimasel tunnil või juhul, kui on aega, tuleks pühendada eraldi tund ferromagneetikute omaduste praktiliste rakenduste vaatlemisele. Sellel teemal võiks korraldada õpilaste konverentsi, kus kuulatakse õpilaste lühikesi teemakohaseid ettekandeid, näidatakse varem ettevalmistatud katseid ja demonstreeritakse kinofilmi «Elektromagnetid ja nende kasutamine».

Huvitavaid, polütehnilise suunitlusega demonstratsioone võib ette valmistada, kasutades G. I. Žerehovi raamatut [12]. Sellised võiksid olla näiteks rauamaagi lademete luure magnetomeetriga, magnetiline kaliiber, magnetiline defektoskoopia, elektromagnetiline traaler jt. Sõjalis-patriootilise kasvatus eesmärgil on sobiv koos viimase katse demonstreerimisega rääkida õpilastele I. V. Kurtšatovi töödest laevastikus Suure Isamaasõja päevil.

#### 46. Teema «Ainete magnetilised omadused» ajalise jaotuse näidisplaan

Tund	Tunni sisu	Õpiku paragrahvid
1.	Ampère'i hüpotees. Magnetiline läbitavus.	§ 141, 142
2.	Para- ja diamagneetikud.	§ 143, 144
3.	Ferromagneetikud.	§ 145, 146

## LABORATOORSED TÖÖD

### 1. Juhi eritakistuse määramine

Töövahendid: 70—100 cm pikkune ja 0,2—0,5 mm diameetriga traat; ampermeeter; voltmeeter; reostaat; mõõdulint; kruvikaliiber; alalisvooluallikas 2—6 V; lüliti; ühendusjuhtmed.

Juhtme eritakistus leitakse valemist  $R \approx \rho \frac{l}{S}$ . Takistus  $R$  leitakse ampermeetri ja voltmeetri abil ( $R = \frac{U}{I}$ ). Selleks koostatakse vooluring, ühendades järjestikku 70—100 cm pikkuse traadi, reostaadi, lüliti ja ampermeetri, millega mõõdetakse voolutugevust  $I$ . Pinget  $U$  traadi otstel mõõdetakse voltmeetriga. Traadi pikkus mõõdetakse mõõdulindi või mõõtejoonlauaga.

Traadi ristlõike pindala  $S$  arvutatakse valemi

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

põhjal, kusjuures traadi diameeter  $D$  mõõdetakse kruvikaliibriga. Selle töö tegemisel tuleb silmas pidada järgmist.

1. Soovitav on valida mõneoomise takistusega traat (fekral, nikroom), sest juhtme väikese takistuse korral kannatab pinge mõõtmise täpsus ( $U = IR$ ). Voolutugevus  $I$  valitakse selline, et juhtmed märgatavalt ei kuumeneks. Sobiv on siin kasutada mingi soojendusriista sirgestatud spiraali või siis kõlbmatu reostaadi traati.

Kruvikaliibri puudumisel võib traadi diameetri  $D$  mõõta ka nii, et mähitakse traati mitu keerdu ümber pliiatsi. Diameeter  $D = \frac{h}{n}$ , kus  $h$  on pliiatsile mähitud osa pikkus,  $n$  aga selle pikkuse kohta tulev keerdude arv.

Selle töö üheks variandiks või täiendavaks ülesandeks üksikutele õpilastele võiks olla takistuse mõõtmine oommeetriga või Wheatstone'i silla abil.

## 2. Vooluallika elektromotoorjõu ja sisetakistuse määramine

Selle töö kirjeldus on toodud õpikus. Vooluallika elektromotoorjõud määratakse avatud vooluringi korral vooluallika klemmidega ühendatud voltmeetri näitude põhjal. Vooluallika sisetakistuse leidmiseks aga kasutatakse Ohmi seadust

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R+r},$$

millest sisetakistus  $r = \frac{\mathcal{E} - IR}{I} = \frac{\mathcal{E} - U}{I}$ . ( $U$  on voltmeetri näit suletud vooluringi korral).

Üksikutele õpilastele võib selle töö juures täiendavaks ülesandeks olla elektromotoorjõu  $\mathcal{E}$  ja sisetakistuse  $r$  rangem määramine. Selleks tuleks neil koostada ja lahendada kahest võrrandist koosnev süsteem

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1+r}$$

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2+r},$$

milles kumbki võrrand kirjeldab vooluringi erinevat töörežiimi. Sellele küsimusele võiks pöörata tähelepanu ka töö analüüsimisel.

## 3. Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine

Selle töö otstarbekat läbiviimist on kirjeldatud õpikus.

Mingi aine elektrokeemilise ekvivalendi määramiseks kasutatakse Faraday seadust

$$k = \frac{m}{It}.$$

Väga kasulikuks täiendavaks ülesandeks on selle töö juures elementaarlaengu määramine. Selleks kasutatakse valemit

$$e = \frac{It A}{m N n} \approx 1,7 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

kus  $A=63,5$  vase aatommass,  $n=2$  aga vase valents ja  $N=6,02 \cdot 10^{23}$  on Avogadro arv.

#### 4. Magnetvälja ja voolu vastastikuse mõju uurimine

Selle töö eesmärgiks on Ampère'i seaduse  $F = I\Delta l B \sin\alpha$  sisuline kontrollimine, näitliku kujutluse loomine magnetvälja mõjust voolule ja mõningate praktiliste oskuste kujundamine, sealhulgas magnetjõudude suuna määramine vasaku käe reegli põhjal.

Töö vahendid. Alalisvooluallikas 6—12 V; ampermeeter 3 A; reostaat 10—30  $\Omega$ ; 2—3 sirg- ja hoburaudmagnetit; väike magnetnõel alusel või kompass; kaks traadipooli (näiteks elektromagnetismi katseriistade komplektist) takistusega umbes 10  $\Omega$  ja juhtme diameetriga 30—40 mm (soovitatakse, et üks pool mahuks vabalt teise sisse); mitmekiuline isolatsiooniga 1 m pikkune juhe; lüliti; ühendusjuhtmed.

Töö käigus peavad õpilased tegema järgmised katsed.

##### 1. Püsिमagnetі jõujoonte vaatlemine.

Rauapuru abil saadakse nii sirgмagnetі kui ka hoburaudmagnetі magnetspekter. Mõlemad spektrid joonistatakse vihkusse, näidates ühtlasi ära ka magnetilise induktsiooni vektori  $\vec{B}$  suuna.

##### 2. Ampère'i jõu suuna määramine.

Juhtmelõik riputatakse statiivile kiigena nii, et ta asuks hoburaudmagnetі pooluste vahel ja lülitatakse siis vooluringi. Muutes voolu suunda ja magnetі pooluste asetust, kontrollitakse vasaku käe reegli kehtivust.

Iga juhu jaoks märgitakse vihkusse vektorite  $\vec{F}$  ja  $\vec{B}$  asend.

##### 3. $\vec{F}$ sõltuvus $I$ -st ja $\vec{B}$ -st.

Muutes vooluringis voolutugevust ja kasutades mitmesuguseid magneteid, tehakse kindlaks, et  $F \sim I$  ja  $F \sim B$ .

##### 4. $F$ sõltuvus nurgast $\Delta l$ ja $B$ vahel.

Juhtmelõik paigutatakse sirgмagnetite erinimeliste pooluste vahele nii, et ta oleks magnetilise induktsiooni joontega paralleelne. Tehakse kindlaks, et sel juhul  $F = 0$ . Nihutades magneteid, suurendatakse nurka  $\alpha$  ja vaadeldakse jõu  $F$  suurenemist.

##### 5. Pooli magnetpooluste määramine.

Pool ühendatakse vooluallikaga. Esialgu määratakse teoreetiliselt kruvireegli abil ning seejärel magnetnõela abil pooli põhja- ja lõunapoolus. Voolu suund määratakse vooluallika pooluste järgi.

##### 6. Pooli orienteerumine magnetväljas.

Pikkade peente juhtmete otsas rippuv vooluga pool asetatakse püsिमagnetі välja (erinevatesse) punktidesse ja jälgitakse tema

pooluste orienteerumist. Seejärel asetatakse samadesse kohtadesse magnetnõel ja pannakse tähele, et see orienteerub analoogiliselt pooliga. Pooli ja magnetnõela kaugus magnetist tuleb valida maksimaalne, et väli oleks võimalikult homogeenne ja esiplaanile ei tuleks tõukumise efekt.

#### 7. Pooli liikumine magnetväljas.

Sirmmagneti poolusele asetatakse pool ja lastakse sellesse vool. Jälgitakse, kuidas pool magneti suhtes tõukub või tõmbub. Nähtust selgitatakse Ampère'i seaduse varal. Nagu näha õpiku jooniselt 282 tõukab resultantjõud  $F$  antud voolu suuna ja magnetite sellise asendi korral raami magnetilt minema.

Õhus ümber pöördunud, tõmbub raam uuesti magnetile tagasi. Seda pole raske selgitada raami pooluste ja magneti pooluste vastastikuse mõjuga. Selgituseks võib kasutada ka õpiku joonisega 282 analoogilist joonist.

#### 8. Vooluga poolide vastastikune mõju.

Katsed on analoogilised punktis 7 kirjeldatuile.

### 5. Elektromagnetilise induksiooni uurimine

Töövahendid: galvanomeeter või galvanoskoop; kolm pooli (mähist); magnet; raudsüdamik; alalisvooluallikas 4—12 V; reostaat; lüliti; ühendusjuhtmed.

Selle töö põhiliseks ülesandeks on anda õpilastele näitlik ettekujutus elektromagnetilisest induksioonist ja õpetada neid määrama induksioonivoolu suunda. Täiendavalt on soovitatav üles seada katseseade (kas või üksikutele õpilastele) eneseinduksiooni uurimiseks (õpikus joon. 313).

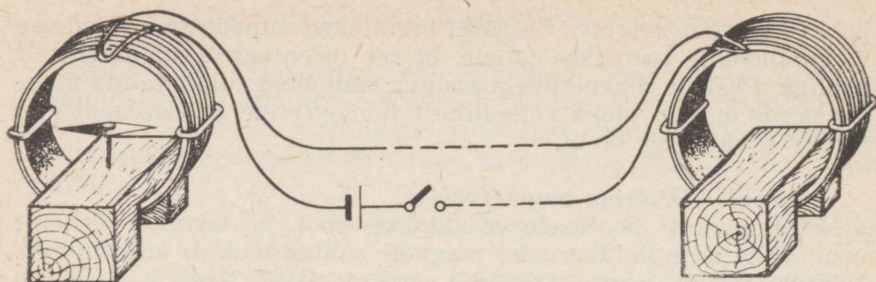
Juhul, kui koolil pole küllaldaselt galvanomeetreid (milliampermeetreid), võib voolu olemasolu kindlaks teha galvanoskoobi abil (pool koos teravikul asuva magnetnõelaga).

#### 1. Pooli magnetpooluste määramine sõltuvalt voolu suunast.

Kõigepealt koostatakse vooluring, nagu on näidatud joonisel 62, asetades poolid laua erinevatele otstele. Tehakse kindlaks voolu suund juhtmetes ja määratakse magnetnõela abil poolide vastavad poolused.

#### 2. Induksioonivoolu saamine magneti kaasabil.

Pooli sisse juhitakse magneti poolus ja galvanoskoobi nõela kalde järgi määratakse voolu suund vooluringis. Kasutades eelmise katse tulemusi, määratakse nüüd induksioonivoolu tekitatud poolused poolidel. Tulemusi võrreldakse nende määrangutega, mis on saadud Lentzi reegli põhjal. Katset korratakse, liigutades



JOON. 62

magneti poolust vastupidises suunas, vahetades teise pooluse, nihutades pooli liikumatul magnetil.

Katset selgitatakse joonistega, mis on sarnased joonisega 44.

### 3. Induksioonivoolu saamine elektromagneti abil.

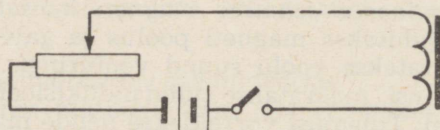
Koostatakse veel teine vooluring, nagu näha joonisel 63.

Vool lastakse läbi raudsüdamikuga pooli, kusjuures tema poolused määratakse magnetnõela abil. Elektromagnetiga tehakse 2—3 katset, mis on sarnased punktis 2 kirjeldatuile. Seejuures on soovitatav, et õpilased ennustaksid katse tulemusi ette, kas Lentzi või parema käe reegli põhjal, ja alles siis kontrollitakse öeldut katse abil.

### 4. Induksiooni elektromotoorjõu saamine muutuva voolu magnetvälja abil.

Mõlemad poolid asetatakse raudsüdamikule ja, lülitades teises poolis voolu kord sisse, kord välja ning muutes selle tugevust reostaadiga, jälgitakse voolu tekkimist esimeses poolis. Voolu suund esimeses poolis määratakse galvanoskoobiga, kuid samuti Lentzi reegli abil. Varjates galvanoskoobi nõela õpilaste pilkude eest, on kasulik lasta õpilastel eelnevalt öelda, kummale poole peaks nõel Lentzi reegli järgi ühel või teisel juhul kalduma. Õpilaste vastuseid kontrollitakse katsetega.

Sama katset korratakse ilma raudsüdamikuta, kusjuures täheldatakse induksioonivoolu järsku nõrgenemist.



JOON. 63

## FÜÜSIKA PRAKTIKUM

### 1. Kondensaatori mahtuvuse määramine.

Töövahendid: 2—3 muutumatu mahtuvusega kondensaatorit, galvanomeeter, alalispinge voltmeeter, alalisvooluallikas, ühepooluseline lüliti, ühendusjuhtmed.

Antud töös määratakse mahtuvus galvanomeetri osuti maksimaalse väljalöögiga tema ühendamisel laetud kondensaatoriga. Selleks rakendatakse ballistilise galvanomeetri kohta kehtivat seost

$$Q = k\alpha_{\max} \text{ ehk } \alpha_{\max} = k'C,$$

kus  $Q$  on galvanomeetrit läbiv elektri hulk, mis võrdub kondensaatori ühe katte laenguga.

Vooluallika pinget valitakse katseliselt, sõltuvalt olemasolevate kondensaatorite mahtuvusest ja galvanomeetri tundlikkusest.

Tööks on kõige sobivam kasutada reguleeritava pingega alaldeid BYII-1 või BC-24. Võib kasutada ka kenotronaldit või anoodpatareid. Sellisel juhul kasutatakse pinget reguleerimiseks potentsiomeetrist lülitust.

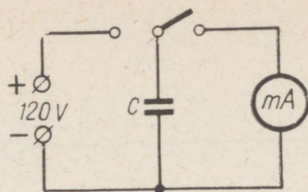
Töö käik.

Koostatakse joonisele 64 vastav skeem, kasutades tuntud mahtuvusega kondensaatorit  $C_1$ . Kondensaator tühjendatakse läbi galvanomeetri ja arvutatakse suurus  $k' = \frac{\alpha_{1\max}}{C_1}$ . Pärast seda tehakse katse uuritava kondensaatoriga ja arvutatakse tema mahtuvus

$$C_2 = \frac{\alpha_{2\max}}{\alpha_{1\max}} C_1.$$

Kondensaatorid  $C_1$  ja  $C_2$  ühendatakse järjestikku ja paralleelselt ning määratakse nende üldine mahtuvus. Seda võrreldakse valemite põhjal arvutatud vastavate mahtuvustega

$$\frac{1}{C_j} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \text{ ja } C_p = C_1 + C_2.$$



JOON. 64

Täiendava ülesandena võib lasta õpilastel kontrollida galvanomeetri maksimaalse väljalöögi sõltuvust kondensaatori katete pingest vastavalt valemile  $\alpha_{\max} = k''\varphi$ .

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 83—85. Lahendada ülesanded nr. 906, 914, 916 [18].

## 2. Metalli takistuse temperatuuriteguri määramine.

Töövahendid: metalli takistuse temperatuuriteguri määramise riist, termomeeter ( $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), takistusmagasin  $10-50\ \Omega$ , galvanomeeter, reohord, alalisvooluallikas  $3-6\ \text{V}$ , metallnõu, soojendi (piirituslamp, elektripliit), lüliti, ühendusjuhtmed, oommeeter.

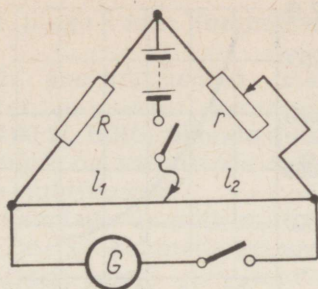
Töö käik. Metalli takistuse temperatuuriteguri määramise riist kujutab endast isoleeritud vasktraadist pooli, mis on paigutatud katseklaasi. Toatemperatuuril on selle juhtme takistus umbes  $80\ \Omega$ .

Töö seisneb vase takistuse temperatuuriteguri määramises vastavalt valemile  $\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$ . Selleks on vaja teada vaskjuhtme takistust  $R_0$  temperatuuril  $0^{\circ}\ \text{C}$  ja takistust  $R_t$  temperatuuril  $t$  ja temperatuuri  $t$ .

Temperatuur  $0^{\circ}\ \text{C}$  saadakse tavaliselt sulava jää abil. Kuna töö harilikult tehakse kevadel, on jää hankimine seotud raskustega. Sel juhul tuleb  $\alpha$  leidmiseks lahendada kahest võrrandist koosnev süsteem

$$\alpha = \frac{R_1 - R_0}{R_0 t_1} \quad \text{ja} \quad \alpha = \frac{R_2 - R_0}{R_0 t_2}.$$

$R_1$  ja  $R_2$  tähendavad neis valemis traadi takistust vastavalt temperatuuridel  $t_1$  ja  $t_2$ ;  $R_0$  või  $R_1$  ja  $R_2$  mõõdetakse, koostades vooluringi Wheatstone'i sillaga, nagu on näidatud joonisel 65 [6, lk. 177]. Võib kasutada ka sellist silla skeemi, mis erineb eelnevast selle poolest, et tuleb vahetada patarei ja galvanomeetri asukohad. Sellise «klassikalise» skeemi puuduseks on kooli tingimustes asjaolu, et patarei on reohordi kaudu peaaegu lühistatud.



JOON. 65

Takistust  $R_t$  mõõdetakse iga  $20^\circ \text{C}$  järel, seades reohordi iu-guri nii, et galvanomeetri näit võrduks alati nulliga. Sel korral

$$\frac{R_t}{r} = \frac{l_1}{l_2},$$

millest

$$R_t = \frac{rl_1}{l_2}.$$

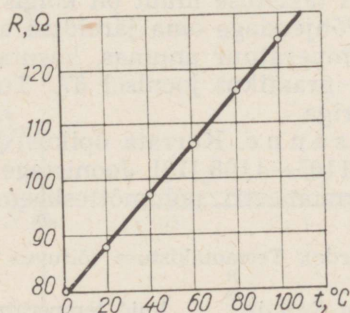
Katse tulemuste põhjal ehitatakse takistuse  $R$  ja temperatuuri vahelise sõltuvuse graafik (joon. 66) ning leitakse  $\alpha$  väärtus.

Et anda õpilastele ettekujutus juhtme takistuse muutumisest temperatuuri tõusmisel, on soovitatav arvutada, mitu protsenti on  $R_0 < R_{100}$  ( $\approx 50\%$ )

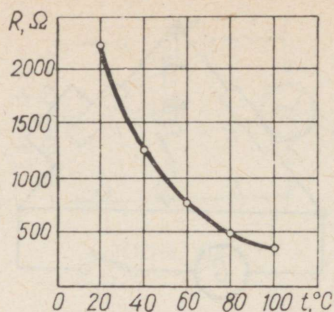
Täiendavateks ülesanneteks sobivad anda järgmised.

1. Määrata oommeetriga konstantaanjuhtmest keritud pooli takistus toatemperatuuril ja  $100^\circ \text{C}$  juures.

Mõõtmised näitavad, et konstantaanjuhtme takistus muutub tunduvalt vähem kui vaskjuhtmel.



JOON. 66



JOON. 67

2. Määrata ampermeetri ja voltmeetri abil elektripirni hõõgniidi takistus selle erinevate heledusastmete korral.

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 93. Lahendada ülesanded nr. 950, 955 [18].

### 3. Termistori temperatuurikarakteristiku määramine

Töövahendid: termotakisti (MMT-1 või MMT-9) juurdeviigu juhtmetega, soojendi, oommeetri.

Töö käik.

Termotakisti (parem, kui see on katseklaasis) asetatakse veenõusse, mis asub soojendil (elektripliidil). Pooljuhi takistust mõõdetakse iga  $10^\circ \text{C}$  tagant. Mõõtmistulemuste põhjal joonistatakse graafik (joon. 67) ja vastatakse järgmistele küsimustele.

1. Mille poolest erineb metalli takistuse muutumine (vt. joon. 66) termistori takistuse muutumisest nende temperatuuri tõusmisel (langemisel)?

2. Mitu korda vähenes termistori takistus tema kuumutamisel  $20$  kuni  $100^\circ \text{C}$ ?

3. Kas termistori takistuse muut on kõigis temperatuurivahemikes ühesugune. Põhjendage oma järeldusi arvuliste näidetega<sup>1</sup>.

4. Mõõda vee temperatuur anumal, kasutades selleks termistori, oommeetrit ja graafikut joonisel 67. Tulemust kontrollige elavhõbetermomeetriga.

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 117—119. Lahendada ülesanded nr. 1105—1108 [18]. Joonistage termotakistil põhineva elektrilise termomeetri põhimõtteskeem.

<sup>1</sup> (Kokkuvõtte juurde). Termotakistuse sõltuvus temperatuurist avaldub ligikaudu valemiga  $R_T = Ae^{\frac{B}{T}}$ , kuid temperatuuritegur leitakse seosest  $\alpha_T = -\frac{B}{T^2}$  [vt. 6, lk. 122].

#### 4. Pooljuhtdiodi pingevoolu tunnusjoone määramine

Töövahendid: pooljuhtdiodid, alalisvooluallikas 6 — 12 V, milliampermeeter, voltmeeter, oommeeter (avomeeter), reostaat takistusega 30—100  $\Omega$ , lüliti, ühendusjuhtmed.

Töö peamine eesmärk on tutvustada õpilasi praktiliselt pooljuhtdiodi ühepoolse juhtivusega.

Töö juures võib kasutada ükskõik milliseid diode, peaasi, et saadav vool oleks mõõdetav kabinetis esinevate ampermeetritega (Д7В, Д7Ж jt.). Vajaduse korral võib kasutada isegi seleen- või vaskoksiidsambaid. Peamine nõue pooljuhtalalditega töötamisel on, et peetaks kinni nende ekspluatatsioonirežiimist. On selge, et alaldav element langeb rivist välja, kui ületada lubatud voolutugevus või vastupinge.

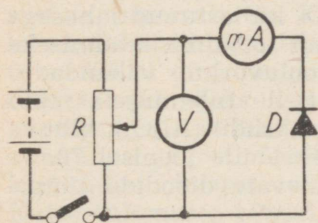
Töö käik.

Pärast töökirjelduse läbilugemist tutvuvad õpilased diodi passiandmetega, kus peab olema eraldi märgitud vastupinge amplituudväärtus, alalisvoolu suurim väärtus ja pingelang diodis nimetatud voolutugevuse korral. Harilikult väljendub pingelang diodis vaid voldi osades ja seepärast kutsub diodi vahetu ühendamine vooluallika klemmidega esile lühisvoolu, mis on muidugi lubamatu.

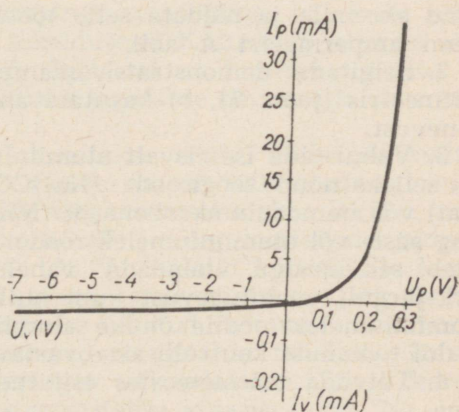
Oommeetri abil on soovitatav kindlaks teha, et diodi takistuse väärtus on järsult erinev vastavalt teda läbiva voolu suunast.

Koostatakse vooluring vastavalt joonisel 68 esitatud skeemile. Skeem ja ka töö lihtsustub tunduvalt, kui vooluallikana kasutada reguleeritava pingega alaldiit BC-24.

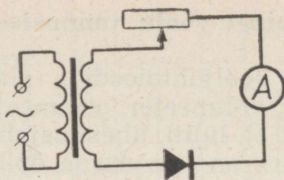
Alaldatud voolu tarbijana tuleb ühendada vooluringi (milliampermeetriga järjestikku) niisugune muutumatu takistus  $R$ , mis väldiks antud vooluallika puhul alaldi riknemise.



JOON. 68



JOON. 69



JOON. 70

Suurendades järk-järgult pinget ja voolutugevust, märgitakse üles milliampermeetri ja voltmeetri näidud. Seejärel konstrueeritakse mõõtmistulemuste põhjal alalisvoolu graafik (joon. 69).

Pinge-voolu tunnusjoone saamiseks vastuvoolu korral muudetakse voolu suunda vooluringis ja ühendatakse vastavalt ümber juhtmed ka mõõteriistade klemmidel.

Seleen- või vaskoksiidsammaste kasutamisel tuleb jälgida, et vastupinge ühe elemendi kohta ei ületaks vastavalt 15 ja 5 volti.

Kuivõrd vastuvool on sama pinge korral tuhandeid kordi nõrgem kui pärivool, peab vastuvoolu sõltuvuse pingest kujutama graafikul teises mastaabis (joon. 69, [6, lk. 143]). Seleen- ja vaskoksiidalaldi pinge-voolu tunnusjoon on analoogilise kujuga.

## TÄIENDAVID ÜLESANDED

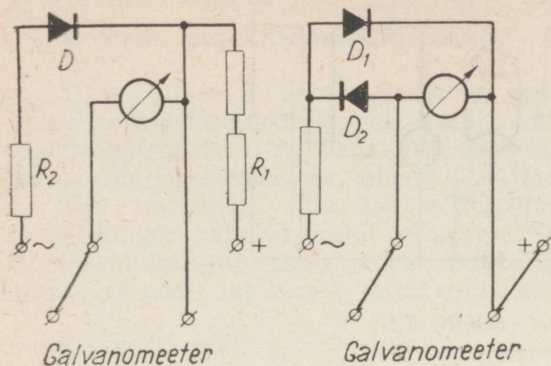
1. Koostada vahelduvvoolualaldi vastavalt joonisel 70 kujutatud skeemile ja näidata selle töötamist magnetelekt rilist süsteemi ampermeetri  $A$  abil.

2. Selgitada demonstratsiooniampermeetris (joon. 71, a) ja voltmeetris (joon. 71, b) kasutatavate alaldite tööd ja skeemide erinevust.

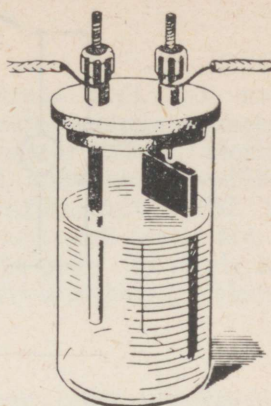
3. Valmistada iseseisvalt alumiiniumalaldi (joon. 72), kasutades selleks nõud söögisooda ( $\text{NaHCO}_3$  — naatriumvesinikkarbonaat) või ammooniumkarbonaadi ( $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$  küllastunud lahusega ning süsi- või alumiiniumelektroode. Alaldi töökorda seadmiseks tuleb see esialgu ühendada vahelduvvooluvõrku, vähendades järk-järgult voolutugevust kuni nullini. Selle tulemusena tekib alumiiniumelektroodile õhuke alumiiniumoksiidi ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) kiht. Alaldi töötamist kontrollitakse vastavalt skeemile joonisel 70.

4. Tutvuda teatmeteostes esitatud erinevate diodide tüüpidega.

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 117—119. Lahendada ülesanded nr. 1113, 1114, 1115 [18].



JOON. 71



JOON. 72

## 5. Vaakumtriodi tundmaõppimine

Töövahendid: vaakumtrioid alusel, reguleeritav alalispingeallikas 100 — 200 V, küttepatarei 2 — 6 V, kütteahela reostaat takistusega  $30\Omega$ , milliampermeeter 10 — 50 mA, voltmeeter 200 V, lüliti, ühendusjuhtmed.

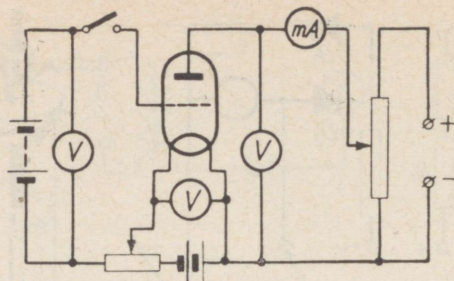
Töö seisneb selles, et uuritakse anoodvoolu sõltuvust anood- ja võrepingest.

Tööks võib kasutada nii vaakumtriode (6C5C, 6C2II jt.) kui ka pentode (6K3, 6K4II jt.), mida kasutatakse triodidena.

Algul tutvuvad õpilased töö kirjelduse või teatmeteose põhjal lampide põhinäitajatega (küttepinge, anoodpinge ja -voolu ekstreemväärtustega ning lambi sokeldusega. Kütteniidi jalad on soovitatav leida oommeetri abil. Õpilastel on huvitav tutvuda ka triodi sisemise ehitusega. Selleks jagatakse neile välja ilma balloonia triodid.

Pärast sellist tutvumist koostatakse seade, mille põhimõtteskeem on toodud joonisel 73. Skeem ja töö selle seadmega lihtsustub tunduvalt, kui kasutada universaalset alaldit BYII-1, millel on klemmid küttepingele 6,3 V ja reguleeritavale pingele 0 — 250 V ning pingele  $0 \pm 100$  V. Andnud kütteniidile lambi normaalseks tööks vajaliku pinge, suurendatakse järk-järgult anoodpinget 0-st kuni maksimaalse lubatud väärtuseni konstantse võrepinge juures. Mõõtmisandmed märgitakse tabelisse. Katset korratakse, kusjuures küttepinget vähendatakse 1,5—2 korda. Katse tulemuste põhjal konstrueeritakse graafik (joon. 74).

Et uurida anoodvoolu sõltuvust võrepingest ühe ja sama anoodvoolu korral, ühendatakse võrevooluringi erinev arv ele-



JOON. 73

mente. Katset korratakse mitmesugustel küttepingetel ning seejärel konstrueeritakse graafik (joon. 75).

Analüüsis katse tulemusi, peavad õpilased vastama järgmistele küsimustele.

1. Kas anoodvool lambis allub Ohmi seadusele?

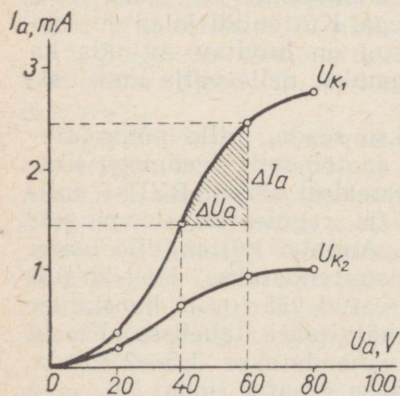
2. Määratakse graafiku (joon. 74) põhjal lambi sisetakistus, mis vastab voolu alg-, kesk- ja lõppväärtusele.

3. Kumb avaldab anoodvoolule suuremat mõju: kas anoodpinge või võrepinge?

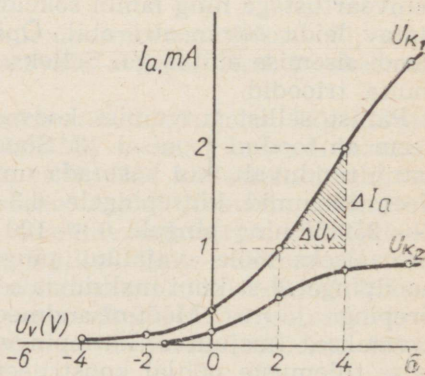
Töestage seda konkreetsete arvuliste näidetega, arvutades, mitme milliampri võrra suureneb anoodvool, kui võre- või anoodvool muutub 1 V võrra?

Täiendavalt võib anda õpilastele ülesande uurida lambi võrele antavate signaalide võimendamist [6, lk. 138].

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 113. Lahendada ülesanded nr. 1056—1058 [18].



JOON. 74



JOON. 75

## 6. Pooli induktiivsuse määramine

Töövahendid: universaalse koolitrafo pool (või mõni teine suure induktiivsusega pool), vahelduvvooluampermeeter voolutugevusele 1 A, vahelduvvooluvoltmeeter 220 V, reostaat 50 — 100  $\Omega$ , oommeeter, ühendusjuhtmed, vahelduvvooluallikas.

Töö lihtsustub, kui kasutada pingeregulaatorit PHIII. Sel juhul langeb vajadus eraldi voltmeetri ja reostaadi järele ära.

Sissejuhatavast osast ja töö kirjeldusest peab õpilastele selguma, et pooli takistus  $Z$  leitakse vahelduvvoolu korral valemist

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2},$$

kus  $R$  on pooli takistus alalisvoolule,  $L$  aga pooli induktiivsus,  $\omega = 2\pi f$ , kusjuures  $f = 50$  Hz (tavalise valgustusvoolu sagedus).

Kui  $R \ll Z$ , siis  $Z = \omega L = 2\pi f L$ .

Töö käik.

1. Mõõdetakse oommeetriga transformaatori pooli (220 V) takistus  $R \approx 14 \Omega$ . Oommeetri puudumisel võib takistuse  $R$  määrata Ohmi seaduse põhjal, koostades selleks vajaliku alalisvooluringi.

2. Kinnisel raudsüdamikul asuv pool lülitatakse vahelduvvooluvõrku järjestikku reostaadi ja ampermeetriga ning leitakse Ohmi seaduse põhjal takistus  $Z = \frac{U}{I}$ , kus  $U$  on voltmeetriga mõõdetud pingel klemmidel ( $Z \approx 1300 \Omega$ ).

3. Korrates katsed mitmesuguste  $U$  ja  $I$  väärtuste korral, tehakse kindlaks, et  $Z$  ei sõltu pingest ja voolutugevusest poolis. Arvutamise teel leitakse, et

$$L = \frac{Z}{2\pi f} \approx 4 \text{ H.}$$

4. Muudetakse transformaatori südamiku asendit ja leitakse pooli induktiivsuse  $L$  teised, väiksemad väärtused.

5. Täiendavas katses võib ühendada pooliga järjestikku hõõglambi ja, nihutades transformaatori südamikku, muuta hõõgniidi heledust.

Kodune ülesanne. Korrata õpikust § 138, 139 ja lahendada ülesanded nr. 1176—1178 [18].

## KIRJANDUS

1. Р. В. Телесин, В. Ф. Яковлев. Курс физики. Электричество. М., «Просвещение», 1970.
2. Преподавание физики и астрономии в средней школе по новым программам, под ред. Л. И. Резникова. М., «Просвещение», 1970.
3. Методика преподавания физики в средней школе. М., Изд-во АПН РСФСР, 1960.
4. В. А. Буров и др. Демонстрационный эксперимент по физике в старших классах средней школы, ч. II. М., «Просвещение», 1968.
5. Н. М. Шахмаев, С. Е. Каменецкий. Демонстрационные опыты по электричеству. М., Учпедгиз, 1963.
6. А. А. Покровский и др. Практикум по физике в средней школе. М., Учпедгиз, 1963.
7. А. А. Марголис и др. Практикум по школьному физическому эксперименту. М., «Просвещение», 1968.
8. П. С. Кудрявцев. Фарадей. М., «Просвещение», 1969.
9. П. С. Кудрявцев. История физики, т. I. М., Учпедгиз, 1956.
10. Б. И. Спасский. История физики, ч. I. М., Изд-во МГУ, 1963.
11. Е. В. Савелова. Вопросы истории физики и техники в курсе физики средней школы. Л., Учпедгиз, 1956.
12. Г. И. Жерехов. Политехническое обучение в демонстрационных опытах. М., Учпедгиз, 1957.
13. Я. Г. Дорфман. Беседы о магнетизме. М., Изд-во АН СССР, 1950.
14. Я. И. Шур. Верный путеводитель. М., Детгиз, 1956.
15. Л. А. Арцимович. Элементарная физика плазмы. М., Атомиздат, 1969.
16. М. С. Соминский. Полупроводники. М., Физматгиз, 1961.
17. В. П. Демкович, Н. Я. Прайсман. Приближенные вычисления в школьном курсе физики. М., «Просвещение», 1967.
18. V. Demkovitš. Füüsika küsimuste ja ülesannete kogu keskkooliie. Tln., «Valgus», 1969.

## ÕPPEFILMID

1. Elekterkeevitus
2. Pooljuhid ja nende kasutamine tehnikas

## SISUKORD

ELEKTRODÜNAAMIKA . . . . .	5
<b>I. Elektrostaatika</b> . . . . .	5
1. Elektrilaeng. Kehade elektriseerimine . . . . .	6
2. Laengute vastastikune mõju. Coulomb'i seadus. . . . .	8
3. Lähi- ja kaugmõju . . . . .	10
4. Elektriväli . . . . .	11
5. Elektrivälja tugevus . . . . .	12
6. Elektriväli keskkonnas . . . . .	15
7. Potentsiaalide vahe . . . . .	19
8. Elektrimahtuvus . . . . .	24
9. Kondensaatorid . . . . .	25
10. Elektrivälja energia . . . . .	27
11. Teema «Elektrostaatika» ajalise jaotuse näidis- plaan . . . . .	34
<b>II. Alalisvool</b> . . . . .	34
12. Elektrivool . . . . .	35
13. Ohmi seadus vooluringi osa kohta . . . . .	38
14. Joule'i-Lenzi seadus . . . . .	40
15. Elektromotoorjõud . . . . .	42
16. Ohmi seadus kinnise vooluringi kohta . . . . .	42
17. Vastused küsimustele peatükist «Alalisvool». . . . .	47
18. Teema «Alalisvool» ajalise jaotuse näidisplaan. . . . .	48
<b>III. Elektrivool mitmesugustes keskkondades</b> . . . . .	48
19. Elektrijuhtivus . . . . .	48
20. Elektrivool metallides . . . . .	52
21. Elektrivool gaasides . . . . .	56
22. Plasma . . . . .	61
23. Elektrivool vaakumis . . . . .	62
24. Elektronkiired. Elektronkiiretoru . . . . .	64
25. Vastused peatükis «Elektrivool erinevates kesk- kondades» esitatud küsimustele . . . . .	67
26. Teema «Elektrivool erinevates keskkondades» ajalise jaotuse näidisplaan . . . . .	68
<b>IV. Voolu magnetväli</b> . . . . .	68
27. Magnetiline vastastikune mõju. Magnetväli . . . . .	69
28. Magnetvälja suund . . . . .	73
29. Magnetilise induktsiooni vektor . . . . .	74
30. Voolu magnetväli . . . . .	76
31. Ampère'i seadus . . . . .	78
32. Paralleelsete voolude vastastikune mõju. Voolu- tugevuse ühik — amper . . . . .	80
33. Lorentzi jõud . . . . .	82
34. Teema «Voolu magnetväli» ajalise jaotuse näidis- plaan . . . . .	87

V. <b>Elektromagnetiline induksioon</b> . . . . .	87
35. Elektromagnetilise induksiooni avastamine . . . . .	89
36. Induksioonivoolu suund. Lenzi reegel . . . . .	92
37. Elektromagnetilise induksiooni seadus . . . . .	96
38. Induksiooni elektromotoorjõud liikuvates juhtides . . . . .	99
39. Foucault' voolud . . . . .	102
40. Eneseinduksioon. Induktiivsus . . . . .	102
41. Voolu magnetvälja energia . . . . .	106
42. Teema «Elektromagnetiline induksioon» ajalise jaotuse näidisplaan . . . . .	107
VI. <b>Ainete magnetilised omadused</b> . . . . .	107
43. Ampère'i hüpotees. Erinevate ainete magnetiline läbitavus . . . . .	108
44. Para- ja diamagnetism . . . . .	109
45. Ferromagnetism . . . . .	112
46. Teema «Ainete magnetilised omadused» ajalise jaotuse näidisplaan . . . . .	119
Laboratoorsed tööd . . . . .	120
Füüsika praktikum . . . . .	125
Kirjandus ja õppefilmid . . . . .	134

Эльза Давыдовна Корж, Виктор Петрович Орехов. Преподавание физики в X классе. Электродинамика. Пособие для учителей. На эстонском языке. Перевел с русского В. Туйск. Художественное оформление Ю. Никкаринен. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.  
 Toimetaja E. Randma. Kunstiline toimetaja H. Keigo. Tehniline toimetaja E. Sagrais. Korrektor V. Artma.  
 Laduda antud 23. X 1972. Trükkida antud 21. II 1973. Kohila paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 8,5. Arvestuspognaid 8,03. Trüklarv 1000. Tellimuse nr. 6103. Trükikoda «Kommunist», Tallinn, Pikk t. 2. Hind 32 kop.







32 kop.

A

33131

87025.

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00471537 3