N. D. BÕTKO

FÜÜSIKA II



A-29355

N. BÕTKO

FÜÜSIKA II

III JA IV OSA

ELEKTER.
OPTIKA JA AATOMI EHITUS

KIRJASTUS «VALGUS»
TALLINN 1969

53
B 95

Originaali tiitel:

Н. Д. Бытько

Физика

Части 3 и 4

Электричество.
Оптика и строение атома

Издание второе

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для заочных средних специальных учебных заведений

Издательство «Высшая школа»

Москва — 1965

Vene keelest tõlkinud L. Türnpuu

Kaane kujundanud J. Arrak

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
75104

2—3
21—69

EESSÕNA

Käesolev köide sisaldab füüsikakursuse kaht osa: «Elekter» (kolmas osa) ning «Optika ja aatomi ehitus» (neljas osa). Raamatus kasutatakse rahvusvahelist ühikute süsteemi (SI) ja rakendatakse valemeid vastavalt ratsionaliseeritud kujul. 1. jaanuarist 1963 on nimetatud ühikute süsteem (GOST 9867-61) NSV Liidus eelissüsteemiks kõigil teaduse ja tehnika aladel.

Õpik on ette nähtud kaugõppetehnikumidele ja iseseisvalt õppijaile, kuid on täiesti kasutatav ka päevastes ja õhtustes osakondades.

Õpik on koostatud vastavalt kesk-eriõppeasutustes kehtivale füüsikaprogrammile, mis on kinnitatud NSV Liidu Kõrgema ja Kesk-erihariduse Ministeeriumi poolt 1964. a.

On toodud küllaldaselt näiteid, mis laiendavad õpilaste teadmisi ja iseloomustavad füüsika seost tehnikaga; hulgaliselt on toodud lahendustega ülesandeid füüsikakursuse sisu parema mõistmise ja teadmiste kinnistamise eesmärgil. Samal eesmärgil on õpikus küsimusi ja ülesandeid enesekontrolliks. Kõigile ülesannetele on antud vastused, raskemate puhul ka näpunäiteid lahendamiseks.

Raamatus antakse samuti laboratoorsete tööde kirjeldus vastavalt tehnikumide füüsikakabinettide tüüpsisustusele.

Olen südamest tänulik retsensentidele V. A. Tolstikovile, G. D. Paleologile ja V. J. Dobronravovile, kelle märkused ning nõuanded aitasid parandada õpiku teaduslikku ja metoodilist külge. Kõik õpikut puudutavad soovid palun saata aadressil: г. Ростов-на-Дону, Почтамт, до востребования.

Autor

III OSA

ELEKTER

I PEATÜKK

ELEKTRIVÄLI

§ 1. SISSEJUHATUS

Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei XXIII kongress andis parteile ja kogu nõukogude rahvale kommunismi ehitamise konkreetse programmi.

Nõukogude inimeste järjest kasvavate materiaalsete ja kultuuriliste vajaduste maksimaalseks rahuldamiseks on tarvilik sotsialistliku tootmise pidev kasv ja täiustumine.

Tootmise pidev kasv kõrgema tehnika baasil mistahes rahvamajandusharus on seotud elektrifitseerimise arenguga.

V. I. Lenin pööras suurt tähelepanu meie maa elektrifitseerimisele. «Alles siis, kui meie maa on elektrifitseeritud, kui tööstusele, põllumajandusele ja transpordile on rajatud kaasaegne suurtööstuse tehniline baas, alles siis me võidame lõplikult.» (V. I. Lenin, Teosed, 31. kd., lk. 478, Tallinn 1955.)

1913. aastal oli tsaari-Venemaa elektrienergia tootmise poolest viieteistkümnendal kohal maailmas. Nüüd on meie maa teisel kohal, edestades kõiki kapitalistlikke riike peale Ameerika Ühendriikide. Meie ees seisab ülesanne ka USA-st elektrienergia tootmises lühima ajaga mööda minna.

V. I. Lenini üleskutset «Kommunism on nõukogude võim pluss kogu maa elektrifitseerimine» viiakse kõrvalekaldumatult ellu. Juba 1932. a. oli GOELRO plaan kahekordselt ületatud. 1950. a. ületas elektrijaamade koguvõimsus 22 miljonit kW, elektrienergiat toodeti aga 82 miljardit kWh.

1960. a. ületas meie maa kõikide elektrijaamade poolt toodetav elektrienergia hulk 310 miljardit kWh, 1965. a. aga ulatus see 507 miljardi kWh-ni. Viisaastaku jooksul (1966—1970) suurendatakse elektrienergia tootmist umbes 70% võrra.

Elektrienergia väga tähtsaks omaduseks on tema universaalsus, sest iga liiki energiat (mehhaanilist, kiirgusenergiat jne.) saab muundada elektrienergiaks ja vastupidi. Näiteks langeva vee kineetilist energiat võib muundada elektrienergiaks, kui ühendada elektrigeneraator hüdroturbiiniga. Sellel rajanebki hüdroelektrijaa-

made töö. Ühendades auruturbiini elektrigeneraatoriga, võib kütuse (kivisöe, nafta, turba, põlevkivi) põlemisel eralduvat soojusenergiat muundada elektrienergiaks. Sellele on rajatud soojus- ja aatomielektrijaamade töö.

Elektrienergiat on elektrimootorite abil kerge muundada mehhaaniliseks energiaks ja seda võimalust kasutatakse laialt transpordis (tramm, trollibuss, elektrivedur), tööstuses (ajamid tööpinkidel ja mitmesugustel seadmetel), põllumajanduses (elektritraktor, elektriajam sorteerimismasinatel, lüpsiagregaatidel jne.). Kergesti muundub ta soojuseks (elektriahi lõikeinstrumendi karastamiseks ja lõikamiseks jne.), aga samuti kiirgusenergiaks (hõõglamp, päevavalguslamp, kaarlamp jne.), hääleenergiaks (telefon, helikino, raadiovastuvõtja jne.), keemiliseks energiaks (metallesemete elektrokeemiline katmine teise metalli õhukese kihiga, akumulaatori laadimine, keemiliselt puhaste metallide, näiteks vase, tina jt. saamine, elektrolüüsil jne.).

Elektrienergiat teisteks energialiikideks muundavate seadmete kõrged kasutegurid võimaldavad seda energialiiki ökonoomselt kasutada tööstuses, transpordis, põllumajanduses ja igapäevases elus.

Elektriliste automaatseadmete kasutamine tootmises võimaldab automatiseerida niihästi üksikute pinkide kui ka kogu tehase tööd ja tunduvalt tõsta tööviljakust.

Kõik see näitab elektrifitseerimise ülisuurt tähtsust meie rahva elus ja tegevuses.

§ 2. KEHADE ELEKTRISEERUMINE HÕÕRUMISEL JA LAETUD KEHAGA PUUDUTAMISEL

Juba vanad kreeklased teadsid, et villaga hõõrutud merevaik tõmbab külge udusulgi, õlekõrsi, juuksekarvu ja teisi kergeid kehi, kuid nad ei teadnud, milles seisab selle nähtuse olemus ja kuidas seda kasutada.

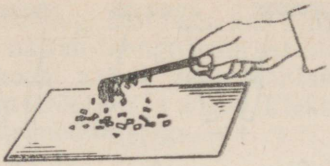
Kreeka filosoof Thales Mileetosest, kes elas aastatel 625—545 e. m. a., kirjeldas esimesena seda nähtust, mis ligi 2000 aasta jooksul jäi uurimata ja kasutamata, sest ühiskonna tootmistegevus ei esitanud vastavaid nõudeid.

Nimetatud nähtuse tundmaõppimisele asusid teadlased alles renessansiajastul.

F. Engels ütles: «See oli suurim progressiivne pööre kõigist pööretest, mida inimkond selle ajani oli läbi elanud. See oli ajajärk, mis vajas hiiglasi ja sünnitas hiiglasi mõttejõu, kire ja iseloomu poolest...», edasi: «Ka looduse uurimine toimus tol ajal üldise revolutsiooni tingimustes ja oli ise läbi ja läbi revolutsiooniline: pidi ta ju endale eluõiguse kätte võitma» [1].

---

[1] *F. Engels,* Looduse dialektika, lk. 6, Tallinn 1962.



Joon. 1.

XVI sajandil kordas inglise õpetlane Gilbert Thalese poolt kirjeldatud katseid. Katsetega tegi ta kindlaks, et peale merevaigu omandavad hõõrumisel võime kergeid kehi ligi tõmmata veel teemant, mäekristall, väävel, vaik jt. ained.

Selliste omadustega kehi hakati nimetama elektriseerituks (sõna «elekter» tuleneb sõnast «elektron», mis kreeka keeles tähendab merevaiku), antud omaduste esilekutsumist aga elektriseerimiseks.

Et Gilbertil ei õnnestunud elektriseerida metalle, siis ta väitis, et kehad jagunevad looduslikult elektriseeruvateks ja mitteelektriseeruvateks, mis on täiesti väär.

Tõestuse selle kohta, et ka metalle saab elektriseerida hõõrumise abil, andis esimesena vene õpetlane V. V. Petrov.

Selgus, et hõõrumisega on võimalik elektriseerida iga keha, sõltumata sellest, millises olekus ta on — tahkes, vedelas või gaasilises.

Sooritame järgmise katse. Viime eboniitpulga väikeste paberitükikeste lähedusse — märkame, et ta ei avalda neile mingit mõju. Hõõrume pulka villase riidega ja viime selle uuesti tükkide lähedusse. Näeme, et paberitükid tõmbuvad pulga külge (joon. 1). Külgetõmme on tingitud kehas tekkinud elektrilaengutest.

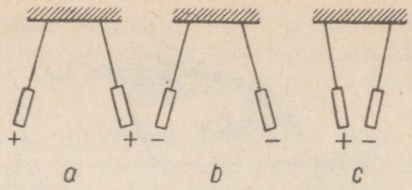
Edaspidi näeme, et elektrilaenguid leidub igas aines ja et hõõrumise teel õnnestub laenguid kokkupuutuvate kehade vahel ümber jaotada.

Korraldame veel ühe katse. Hõõrume vaiku villase riidega, seejärel aga puudutame sellega siidniidi otsa riputatud metallkuulikest. Viies nüüd kuulikese väikeste paberitükikeste lähedusse, on kerge kindlaks teha, et ta on laetud. Järelikult läksid elektrilaengud pulgalt kokkupuutemomendil üle kerale.

Sellist elektriseerimisviisi nimetatakse elektriseerimiseks laetud kehaga puudutamise teel.

§ 3. ELEKTRILAENGUTE KAKS LIIKI. LAENGUTE VASTASTIKUNE MÕJU

Korraldades katseid kehade elektriseerimisega hõõrumise teel, tegi Du Fay (1733) kindlaks, et kehad elektriseeruvad erinevate elektrilaengutega. Selle kohta märkis teadlane järgmist: «Eksisteerib kahte liiki elektrit — ühte liiki nimetan klaasi-, aga teist vaigu-



Joon. 2.

elektriks. Esimest liiki saadakse klaasil, kalliskividel, juustel, villasel riidel; teist merevaigul, vaigul, siidil.»

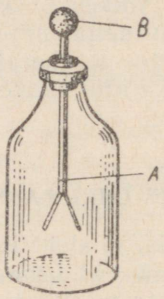
Hiljem nimetati amalgaamitud nahaga hõõrutud klaaspulgal saadud elektrit positiivseks ja karusnahaga hõõrutud vaigul saadud elektrit negatiivseks.

Kui elektriseerida kaks paberist hülssi positiivselt ja lähendada neid, siis tõukuvad nad teineteisest eemale (joon. 2, *a*). Kui anda hülssidele negatiivne laeng ja neid lähendada, siis tõukuvad nad samuti (joon. 2, *b*). Kui aga laadida üks hülss positiivselt ja teine negatiivselt, siis nad tõmbuvad vastastikku (joon. 2, *c*).

Seega samanimelised laengud tõukuvad ja erinimelised tõmbuvad.

§ 4. ELEKTROSKOOP

Laengu kindlakstegemiseks kasutatakse riista, mida nimetatakse elektroskoobiks. Selle töötamine põhineb laengute vastastikusel mõjul. Joonisel 3 kujutatud lihtsaim elektroskoop koosneb klaaspurgist, mis on suletud isolaatorist korgiga. Korki läbib metallvarras *A*, mille otsas on kuulike *B*. Varda alumise otsa külge on kinnitatud maisipaberist või alumiiniumist kerged lehekesed, mis samanimeliste laengute saamisel tõukuvad teineteisest



Joon. 3.

eemale. Selle järgi tehaksegi kindlaks, kas keha on laetud või mitte. Lehekeste kaldenurk näitab laengu suurust elektroskoobil.

Esimese elektroskoobi ehitas vene teadlane G. V. Rihman — M. V. Lomonossovi kaastöötaja ja sõber. Elektroskoopi kasutatakse mitmesugusteks elektrimõõtmisteks.

§ 5. ELEKTRONTEOORIA PÕHIALUSED

Lihtsamaid elektrinähtusi tunti juba antiikajal, kuid õpetus elektrist ei arenenud peaaegu kuni XVII sajandini. XVIII sajandi alguses kujutas see endast veel süstematiseerimata faktide ja vasturääkivate hüpoteeside kogumit, kusjuures elektriseeritud kehade mõju vaadeldi kui mingi kaalutu elektrivedeliku ilmnemist aines.

Ühed teadlased arvasid, et igas kehas leidub kahte liiki elektrivedelikku — positiivset ja negatiivset; kui esimest on rohkem, siis on keha laetud positiivselt, ja kui teist on rohkem, siis negatiivselt. Teised teadlased arvasid, et igas laadimata kehas on ainult üht liiki elektrivedelikku, mille ülejääk kehas tähendab positiivset ja puudujääk negatiivset laengut.

XIX sajandi esimesel poolel algas elektri kiire tungimine tehnikasse. Elektri praktiline kasutamine laienes, kusjuures füüsika saavutustega seotud elektrotehnika kiire areng avaldas olulist mõju elektriõpetuse arengule.

Elementaarlaengute olemasolu ja nende sidet ainega tõestasid Faraday avastatud elektrolüüsi seadused. Seejärel avastati elementaarlaengud ka vabade osakeste juures, kui õpiti tundma elektrivoolu hõrendatud gaasides. Inglise teadlase J. J. Thomsoni katsed võimaldasid 1897. a. kindlaks teha elementaarlaengu. Seda kõige väiksema negatiivse laenguga osakest nimetati *elektroniks*.

Kaasaegse elektronteooria seisukohalt koosneb iga keemilise elemendi aatom positiivselt laetud tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest. Mitmesuguste ainete aatomite koosseisu kuuluvad elektronid on ühesugused, kuid nende arv ja asend on erinevad. Elektroni mass $m = 9{,}1066 \cdot 10^{-31}$ kg, mis on ligikaudu 1840 korda väiksem vesiniku aatomi massist.

Mistahes keemilise elemendi aatom tervikuna on normaalolekus elektriliselt neutraalne. Sellest järeldub, et tuuma positiivne laeng võrdub aatomi kõikide elektronide laengute summa absoluutväärtusega.

Välismõjude toimel (puudutamine, soojendamine, hõõrumine) võivad aatomid kaotada osa oma elektronidest, seejuures säilib aga tuuma positiivne laeng. Sel juhul osutuvad aatomid positiivselt laetuks ja neid nimetatakse positiivseteks ioonideks.

On võimalik, et aatomitega ühineb täiendavalt elektrone. Sel juhul saame negatiivse iooni.

Tuumast kaugemal asuvad elektronid võivad naaberaatomite

mõjul end aatomist lahti rebida ja vabaks jääda. Palju vabu elektrone on tahketes elektrijuhtides.

Elektromagnetiliste nähtuste, aine elektriliste, magnetiliste ja optiliste omaduste teooriat, mis rajaneb elementaarlaengute liikumise ja vastastikuse mõju tundmaõppimisel, nimetatakse elektronteooriaks. Elektronteooria seisukohalt koosneb iga aine positiivsetest ja negatiivsetest laengutest, mis on üksteisega seotud elektrijõudude abil.

Kahe keha hõõrumisel või kokkupuutel lähevad elektronid ühelt kehalt üle teisele.

Keha, millel tekib elektronide ülejääk, on laetud negatiivselt ja keha, millel tekib elektronide puudujääk, on laetud positiivselt.

§ 6. JUHID JA DIELEKTRIKUD

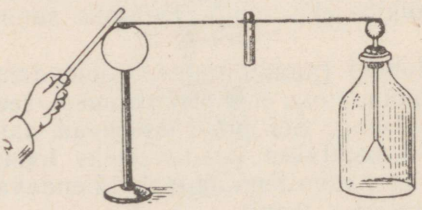
Korraldame järgmise katse. Võtame isoleeritud alusel oleva metallkera ja ühendame selle juhtme abil elektroskoobi vardaga (joon. 4).

Hõõrume eboniitpulka villase riidega, ja puudutades pulgaga kera, elektriseerime selle. Märkame, et üheaegselt elektriseerub ka elektroskoop. See tähendab, et osa laengut läks mööda juhet keralt elektroskoobile. Asendades elektroskoopi ja kera ühendava juhtme klaaspulgaga, ei märka me elektroskoobi lehekeste kõrvalekaldumist.

Taolised katsed näitavad, et erinevate ainete võime elektrilaenguid edasi anda on erinev. Aineid, milles elektrilaengud võivad vabalt ümber paigutuda, nimetatakse *juhtideks*. Nende hulka kuuluvad kõik metallid, süsi, grafiit, soolade, hapete ja aluste lahused.

Aineid, milles elektrilaengud ei saa vabalt ümber paigutuda, nimetatakse *mittejuhtideks* — *isolaatoriteks* ehk *dielektrikuteks*. Nende hulka kuuluvad klaas, portselan, eboniit, vaik, siid, vesi, petrooleum, vilgukivi, parafiin, õlid.

Ainete jaotamine juhtideks ja mittejuhtideks on teatud määral suhteline, sest nende vahele ei saa tõmmata teravat piiri. Viimasel



Joon. 4.

ajal on suure tähtsuse omandanud pooljuhid. Pooljuhtideks on näiteks vaskoksiid, seleen, talliumsulfiid, germaanium, räni. Need asuvad oma elektrilistelt omadustelt juhtide ja mittejuhtide vahel.

Kontrollküsimusi

1. Missuguseid laenguid eksisteerib looduses?
2. Miks vastastikusel hõõrumisel osutuvad elektriseeritud kehad erinimeliselt laetuks?
3. Miks vastastikusel hõõrumisel saavad elektriseeritud kehad suuruselt võrdsed laengud?
4. Kuidas elektrilaengud teineteist vastastikku mõjutavad?
5. Milliseid elektrone nimetatakse vabadeks?
6. Milliseid kehi nimetatakse juhtideks, isolaatoriteks, pooljuhtideks?
7. Millised ained kuuluvad juhtide, isolaatorite ja pooljuhtide hulka?
8. Kas võib isolaatorit elektriseerida hõõrumise teel, kui teda hoida käes? Andke seletus.
9. Kas võib juhti elektriseerida hõõrumise teel, kui teda hoida käes? Andke seletus.
10. Milles seisab elektriseerimine puudutamise teel?
11. Millel põhineb elektroskoobi töö?

§ 7. COULOMB'I SEADUS

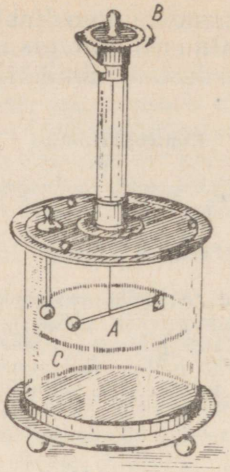
1785. aastal tegi prantsuse õpetlane Coulomb kindlaks kahe elektrilaengu vahel mõjuva jõu sõltuvuse laengute suurusest ja nendevahelisest kaugusest.

Laengute vastastikuse mõju uurimiseks kasutas Coulomb torsioonkaalusid (joon. 5). Torsioonkaalud koosnevad kergest, elektrit mittejuhtivast kaalukangist *A*, mis on riputatud väga peenikese kvartsniidi otsa ja asetseb silindrilises klaasanumas. Kangi ühte otsa on kinnitatud metallkuulike ja teise vastukaal. Kandeniidi ülemine ots kinnitub nupu *B* keskkohta. Nupp on varustatud osutiga ja võib pöörduda. Selle abil saab skaalalt määrata niidi väändenurka.

Anuma kaanes on ava, mille kaudu paigutatakse anumasse isolaatorile kinnitatud kuulike, mis mõõtmetelt on võrdne esimese kuulikesega. Anuma seinal oleva skaala *C* järgi määratakse kangi asend, seejärel antakse mõlemale kuulikesele laeng ja viiakse nad teineteisest teatud kaugusele. Coulomb kordas katset erinevate kauguste puhul, jättes laengute suuruse samaks. Mõõtes niidi väändenurki ja vastavaid kaugusi kuulikeste vahel, oli võimalik leida laengute vahel mõjuva jõu sõltuvust nendevahelisest kaugusest.

Et muuta laengute suurusi (kuulikestevahelise jääva kauguse korral), võttis Coulomb anumas asuvate kuulikestega suuruselt võrdse, kuid laadimata kuulikese ja puudutas sellega üht anumas olevat kuulikest. Seejuures andis puudutatav kuulike poole oma laengust laadimata kuulikesele.

Puudutades üht ja sama laetud kuulikest laadimata kuulikesega mitu korda järjest, sai esimese laengut vähendada vastavalt 2, 4 jne. korda.



Joon. 5.

Sel teel osutus võimalikuks määrata õhus paiknevate laengute vahel mõjuva jõu sõltuvust laengute suurusest. Suure täpsusega on tulemus kehtiv ka vaakuumis.

Katsete põhjal avastas Coulomb järgmise seaduse: *kaks punktlaengut mõjuvad vaakuumis teineteisele jõuga, mis on võrdeline laengute korrutisega ja pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga.* Seejuures mõeldakse punktlaengute all väikeste mõõtmetega (võrreldes kehadevahelise kaugusega) kehadel paiknevaid laenguid. Jõud mõjuvad piki laenguid ühendavat sirget.

Matemaatiliselt võib Coulomb'i seadust väljendada järgmise valemiga:

$$F = k\frac{q_1 \cdot q_2}{r^2},$$

kus F on laengute vahel mõjuv jõud, q_1 ja q_2 — laengute suurused, r — laengutevaheline kaugus, k — võrdetegur, mis sõltub valemis kasutatavate ühikute valikust.

§ 8. ELEKTRILAENGU ÜHIKUD

Coulomb'i seadus võimaldab defineerida elektrilaengu ühiku. Olgu jõud $F = 1$ dyn, kaugus laengute vahel $r = 1$ cm, $k = 1$ ja laengud $q_1 = q_2 = q$. Coulomb'i seaduse põhjal saame vaakuumi jaoks

$$q = \pm 1.$$

See näitab, et laengu suurus on arvuliselt võrdne ühega. Niisugust laenguühikut nimetatakse elektrostaatiliseks ehk CGSE-süsteemi ühikuks. CGSE-süsteemi, milles laengut mõõdetakse elektrostaatiliste laenguühikutega, nimetatakse absoluutseks elektrostaatiliseks süsteemiks.

Elektrostaatiliseks laenguühikuks on võetud selline laeng, mis vaakuumis 1 cm kaugusel mõjutab teist niisama suurt laengut jõuga 1 dyn.

See ühik on väga väike ja praktikas kasutatakse tunduvalt suuremat ühikut, mida nimetatakse kuloniks (C). $1\,C = 3 \cdot 10^9$ elektrostaatilist laenguühikut (lühendatult lü).

Nimetatud ühik on saadud katseliselt. Elektroni laeng $e = 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ lü ehk $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

§ 9. KESKKONNA DIELEKTRILINE LÄBITAVUS

Katsed on näidanud, et elektriseeritud kehade vastastikune mõju sõltub ka isoleerivast keskkonnast, milles need kehad asuvad. Nii näiteks on laengutevaheline jõud petrooleumis 2, vees aga vastavalt 81 korda väiksem kui tühjuses.

Suurust, mis võimaldab arvestada isoleeriva keskkonna mõju laetud kehade vahelisele jõule, nimetatakse antud keskkonna absoluutseks dielektriliseks läbitavuseks ja tähistatakse ε_a (ε — kreeka täht «epsilon»).

Mida suurem on ε_a, seda väiksem on laengute vahel mõjuv jõud. Coulomb'i seadust mistahes isoleeriva keskkonna jaoks võib kirjutada üles kujul:

$$F = k \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon_a r^2}.$$

Kahe punktlaengu vaheline jõud mistahes isoleerivas keskkonnas on võrdeline laengute korrutisega ja pöördvõrdeline keskkonna absoluutse dielektrilise läbitavusega ning laengutevahelise kauguse ruuduga.

Absoluutset dielektrilist läbitavust ε_a võib esitada kahe suuruse korrutisena:

$$\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0,$$

kus ε on dimensioonita suurus, mis sõltub ainult keskkonna omadustest ega olene ühikute valikust, ε_0 aga dimensiooniga suurus, mis oleneb ainult ühikute valikust ega sõltu keskkonna omadustest. ε_0 nimetatakse dielektriliseks konstandiks (vaakuumi dielektriliseks läbitavuseks) ja ta väärtus on:

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \quad \frac{C^2}{N\,m^2}.$$

Suurust ε nimetatakse keskkonna suhteliseks dielektriliseks läbitavuseks ehk lihtsalt dielektriliseks läbitavuseks ja *see näitab, mitu korda on laengute vahel mõjuv jõud antud keskkonnas väiksem kui vaakuumis.* Vaakuumi jaoks $\varepsilon = 1$.

Tabelis on toodud mõnede ainete suhtelised dielektrilised läbitavused.

Aine	ε	Aine	ε
Eboniit	2,7	Petrooleum	2,0
Karboliit	3...5	Vesi	81
Klaas	6...8	Vilgukivi	8...9
Parafiin	2,2	Õhk 1 at rõhul	1,0006

Asetades $\varepsilon_a = \varepsilon \cdot \varepsilon_0$ väärtuse Coulomb'i seadusse, saame

$$F = \frac{k \cdot q_1 \cdot q_2}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2}.$$

CGSE-süsteemis on kokkuleppeliselt võetud $\varepsilon_0 = 1$ ja $k = 1$, nii et Coulomb'i seadus mistahes keskkonna kohta saab selles süsteemis järgmise kuju:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon r^2}.$$

SI-süsteemis $k = \frac{1}{4\pi}$, kus $\pi = 3{,}14$, mistõttu Coulomb'i seadus omandab kuju:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{4\pi\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2}.$$

Ülesanne 1. Kaks võrdset positiivset laengut paiknevad teineteisest 3 cm kaugusel ja tõukuvad vees jõuga 16 dyn. Leida laengute suurused. Ülesanne lahendada nii CGSE- kui ka SI-süsteemis.

I. Antud (CGSE-süsteem)

$F = 16$ dyn;
$r = 3$ cm;
$\varepsilon = 81$.

$q_1 = q_2 = q - ?$

Lahendus

1. Coulomb'i seadusest CGSE-süsteemis $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon r^2} = \frac{q^2}{\varepsilon r^2}$ leiame laengu suuruse:
$q^2 = \varepsilon r^2 F$ ehk $q = r\sqrt{\varepsilon F}$.

Valime juure positiivse väärtuse, sest ülesande tingimuste kohaselt on laengud positiivsed.

2. Arvutame:

$q = 3\sqrt{81 \cdot 16}$ lü $= 108$ lü.

II. Antud (SI-süsteem)

$F = 16$ dyn $= \frac{16}{10^5}$ N $= 16 \cdot 10^{-5}$ N;

$r = 0{,}03$ m $= 3 \cdot 10^{-2}$ m;

$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\text{C}^2}{\text{N m}^2}$;

$\varepsilon = 81$.

$q_1 = q_2 = q - ?$

Lahendus

Coulomb'i seadusest SI-süsteemis

$$F = \frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$$

leiame laengu suuruse

$q^2 = 4\pi\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2 F$

ehk $q = \sqrt{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2 F} = 2r\sqrt{\pi\varepsilon_0\varepsilon F}$.

2. Arvutame:

$$q = 2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}\,\text{m} \cdot \sqrt{\frac{\pi 10^{-9}\,\text{C}^2 \cdot 81 \cdot 16 \cdot 10^{-5}\,\text{N}}{36\pi\,\text{N} \cdot \text{m}^2}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}\,\text{m} \cdot 9 \cdot 4 \cdot 10^{-7}\,\text{C}}{6\,\text{m}} = 36 \cdot 10^{-9}\,\text{C}.$$

Väljendame CGSE-süsteemis saadud tulemuse kulonites.

$$q = 108\text{ lü} = \frac{108}{3 \cdot 10^9}\,\text{C} = \frac{36}{10^9}\,\text{C} = 36 \cdot 10^{-9}\,\text{C}.$$

Näeme, et mõlemad tulemused on ühesugused.

Ülesanne 2. Laengud +20 lü ja +80 lü asuvad petrooleumis 24 cm kaugusel teineteisest. Kuhu tuleb asetada kolmas laeng +5 lü, et ta elektrijõudude mõjul tasakaalu jääks?

Antud (CGSE-süsteem)

$q_1 = +20$ lü;

$q_2 = +80$ lü;

$r = 24$ cm;

$q_3 = +5$ lü.

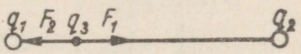
$r_1 = x - ?$

Lahendus.

Et kõik laengud on samamärgilised, siis võib laeng q_3 tasakaalus olla ainult sel juhul, kui ta asub laengute q_1 ja q_2 vahel neid ühendaval sirgel sellises punktis, kus laengute poolt mõjuvad jõud on võrdsed ja vastassuunalised (joon. 6).

1. Väljendame laengute q_1 ja q_3 vahel mõjuva jõu Coulomb'i seaduse põhjal:

$$F_1 = \frac{q_1 q_3}{\varepsilon x^2}.$$



Joon. 6.

2. Rakendame sama seadust laengute q_2 ja q_3 vahelise jõu leidmiseks:

$$F_2 = \frac{q_2 q_3}{\varepsilon (r-x)^2}.$$

3. Et laeng q_3 peab elektrijõudude mõjul tasakaalus olema, siis $F_1 = F_2$, s. o.

$$\frac{q_1 q_3}{\varepsilon x^2} = \frac{q_2 q_3}{\varepsilon (r-x)^2}; \quad \frac{q_1}{x^2} = \frac{q_2}{(r-x)^2} \text{ ehk } q_1 (r-x)^2 = q_2 x^2.$$

Sellest võrdusest nähtub, et kolmanda laengu tasakaal ei sõltu selle laengu suurusest ega keskkonnast, milles laengud asuvad.

4. Arvutame:

$$20(24-x)^2 = 80x^2; \quad (24-x)^2 = 4x^2; \quad \sqrt{(24-x)^2} = \sqrt{4x^2};$$

$$24-x = 2x; \quad 24 = 3x; \quad x = 8 \text{ cm}.$$

Kaugus x laengust q_1 kuni laenguni q_3 on 8 cm.

Ülesanne 3. Kaks ühesuguselt laetud väikest kuulikest kaaluga 1 G on riputatud ühest ja samast punktist 98 cm pikkuste siidniitide otsa. Kuulikesed tõukuvad teineteisest 3,2 cm kaugusele. Leida laengute suurused, eeldades, et nad asuvad õhus.

Antud (CGSE-süsteem)

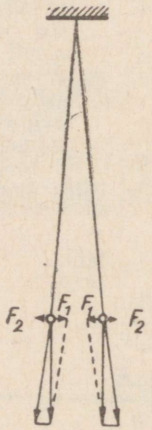
$P_1 = P_2 = P = 980$ dyn;
$l = 98$ cm;
$r = 3{,}2$ cm;
$\varepsilon = 1$.

$q_1 = q_2 = q - ?$

Lahendus

1. Leiame kummalegi kuulikesele mõjuva raskusjõu komponendi, mis on suunatud tasakaaluasendi poole (joon. 7):

$$\frac{F_1}{P} = \frac{0{,}5\,r}{l}, \text{ kust } F_1 = \frac{0{,}5Pr}{l}.$$



Joon. 7.

2. Kirjutame Coulomb'i seaduse põhjal välja jõu, mille mõjul kuulikesed teineteisest eemalduvad:

$$F_2 = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

3. Et jõud F_1 ja F_2 mõjuvad samas sihis, aga vastassuundades ning kumbki kuulike on nende jõudude mõjul tasakaalus, siis

$$F_1 = F_2, \quad \text{s. t.} \quad \frac{0{,}5\, rP}{l} = \frac{q^2}{\varepsilon r^2}, \quad \text{kust} \quad q^2 = \frac{0{,}5\, rP\, \varepsilon r^2}{l}$$

ehk

$$q = \sqrt{\frac{0{,}5\, rP\, \varepsilon r^2}{l}} = r\sqrt{\frac{0{,}5\, rP\varepsilon}{l}}.$$

4. Arvutame:

$$q = 3{,}2 \cdot \sqrt{\frac{0{,}5 \cdot 3{,}2 \cdot 980 \cdot 1}{98}}\ \text{lü} = \pm 3{,}2 \cdot 4\ \text{lü} = \pm 12{,}8\ \text{lü}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Sõnastage Coulomb'i seadus vaakuumi puhul.

2. Mis on võetud laenguühikuteks CGSE- ja SI-süsteemides ja milline on nende arvuline seos?

3. Kui suur on elektroni laeng?

4. Mida nimetatakse keskkonna dielektriliseks läbitavuseks?

5. Kuidas sõnastada Coulomb'i seadus mistahes keskkonna jaoks CGSE- ja SI-süsteemides?

6. Millega võrdub vaakuumi dielektriline konstant CGSE- ja SI-süsteemides?

7. Kaks suuruselt võrdset negatiivset laengut asuvad õhus 20 cm kaugusel teineteisest ja tõukuvad jõuga 10 000 dyn. Määrata laengute suurused.

Vastus: —2000 lü.

8. Kaks laengut, kumbki +100 lü, mõjutavad teineteist läbi vilgukivi jõuga 5000 dyn. Määrata vilgukivikihi paksus, kui $\varepsilon = 8$.

Vastus: 0,5 cm.

9. Millise jõuga tõmbub elektron vesiniku aatomi tuuma poole, kui elektroni laeng on $-4{,}8 \cdot 10^{-10}$ lü, vesiniku tuuma laeng on $+4{,}8 \cdot 10^{-10}$ lü ja nendevaheline keskmine kaugus võrdub 10^{-8} cm?

Vastus: $-2{,}304 \cdot 10^{-3}$ dyn.

10. Kaks laengut, kumbki $3{,}3 \cdot 10^{-6}$ C, asuvad transformaatoriõlis ($\varepsilon = 2{,}2$) 0,045 m kaugusel teineteisest. Leida nende vahel mõjuv jõud, kasutades SI-süsteemi.

Vastus: 22 N.

11. Kaks laengut 0,002 ja 0,0003 C mõjutavad teineteist vaakuumis jõuga 6 N. Leida nende laengute vaheline kaugus, kasutades SI-süsteemi.

Vastus: 30 m.

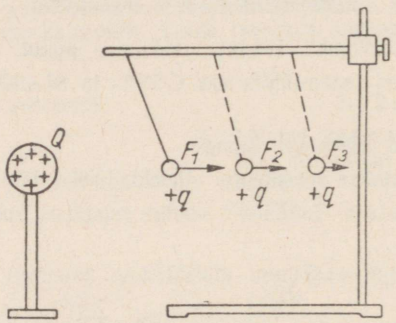
Sooritame järgmise katse. Võtame isoleeritud alusel oleva metallkera ja kerge leedripuust kuulikese, mis on riputatud siidniidi otsa. Anname kummalegi kehale samamärgilise laengu (joon. 8).

Lähendades ja eemaldades leedripuust kuulikest, jälgime laengute vastastikust toimet mitmesugustel kaugustel.

Korrates sama katset hõrenduskupli all õhuta ruumis (vaakuumis), veendume, et laengute vastastikuse toime iseloom säilib ka vaakuumis.

Me teame juba, et kehade vastastikune mõju looduses on võimalik ainult mingi materiaalse keskkonna vahendusel.

Kuidas aga teostub elektrilaengute vastastikune mõju? Põhjalike uurimuste tulemusena tulid teadlased järeldusele, et *elektrilaengute vastastikune mõju teatud vahemaa tagant toimub samuti erilise materiaalse keskkonna kaudu, mis on lahutamatult seotud laengutega ja mida nimetatakse elektriväljaks.*



Joon. 8.

Elektriväli ei ole aine, ta kujutab endast mateeria eri vormi. *Elektriliselt laetud mateeriaosakesed ja elektriväli on mateeria kaks teineteisest lahutamatut vormi.*

Iga elektrilaengut ümbritseb elektriväli, mis mõjub ainult elektrilaengutele.

Jõudusid, millega elektriväli mõjub laetud kehadele, nimetatakse elektrijõududeks.

Elektriväljal on omadus anda mõju edasi väga suure, kuid lõpliku kiirusega, mis võrdub ligikaudu 300 000 $\frac{km}{s}$.

Elektriväljas on energia pidevalt jaotunud, kuid energiatihedus väljas on tunduvalt väiksem laetud osakese energiatihedusest.

Elektriväli, mis ümbritseb laetud keha, ulatub lõpmatusse. Kuid elektrijõud vähenevad kauguse suurenedes väga kiiresti, mistõttu elektrivälja praktiline mõju laengutele on kindlaks tehtav ainult väikestel kaugustel laengutest.

Võtame kerge leedripuust kuulikese, mis on riputatud siidniidi otsa, ja anname talle positiivse laengu q. Nimetame seda proovilaenguks.

Paigutame proovilaengu mõne teise laengu Q poolt tekitatud elektrivälja ja märkame, et välja erinevates punktides on ühele ja samale proovilaengule mõjuvad jõud erinevad.

Kui paigutada välja ühte ja samasse punkti üksteise järel erineva suurusega proovilaenguid, kusjuures järgmine on eelmisest 2, 3 jne. korda suurem, siis märkame, et proovilaengule mõjuv jõud on ka vastavalt 2, 3 jne. korda suurem, s. t. jõud on võrdeline proovilaengu suurusega. See järeldub ka Coulomb'i seadusest.

Ent kuidas me ka ei muudaks proovilaengu suurust, jääb talle mõjuva jõu ja laengu suuruse suhe antud välja punkti jaoks muutumatuks, s. t.

$$\frac{F}{q}=\frac{2F}{2q}=\frac{3F}{3q}=\text{const},$$

kus F on elektrijõud ja q — positiivne proovilaeng.

See muutumatu suurus iseloomustab elektrivälja intensiivsust antud punktis ja teda nimetatakse elektrivälja tugevuseks. Tähistades elektrivälja tugevuse tähega E, saame:

$$E=\frac{F}{q}.$$

Suurust, mida mõõdetakse välja antud punkti paigutatud laengule mõjuva jõu ja selle laengu suuruse suhtega, nimetatakse elektrivälja tugevuseks antud punktis.

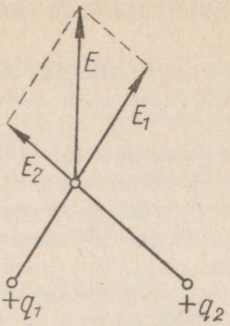
Väljatugevuse valemist on näha, et kui $q=+1$, siis väljatugevus on arvuliselt võrdne jõuga, millega väli mõjutab positiivset ühiklaengut antud punktis ($E=F$).

Elektrivälja tugevus on vektoriaalne suurus. Väljatugevuse vektori suund ühtib positiivsele laengule mõjuva jõu suunaga antud punktis. Kui välja on tekitanud kaks laengut q_1 ja q_2, siis leitakse kummagi laengu väljatugevused E_1 ja E_2 antud punktis ning seejärel liidetakse need nagu vektorid (joon. 9).

Tuletame väljatugevuse ühikud.

CGSE-süsteemis on jõuühikuks 1 dyn ja laenguühikuks 1 lü. Asetades jõu ja laengu väärtused väljatugevuse valemisse $E=\frac{F}{q}$ saame väljatugevuse ühiku. Hakkame seda nimetama väljatugevuse absoluutseks elektrostaatiliseks ühikuks (1 CGSE_E):

$$1\ \text{CGSE}_E=\frac{1\ \text{dyn}}{1\ \text{lü}}.$$



Joon. 9.

Elektrivälja tugevuse ühikuks CGSE-süsteemis võetakse sellise punkti väljatugevus, kus positiivsele laengule 1 lü mõjub jõud 1 dyn.

Rahvusvahelises ühikute süsteemis (SI) on jõuühikuks 1 N ja laenguühikuks 1 C. Vastavalt valemile $E = \frac{F}{q}$ on väljatugevuse ühikuks $E = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$.

Elektrivälja tugevuse ühikuks SI-süsteemis valitakse sellise punkti väljatugevus, kus positiivsele laengule 1 C mõjub jõud 1 N.

Elektrotehnikas kasutatakse tihti väljatugevuse ühikuid, mis on väljendatud teiste praktiliste ühikute kaudu, näiteks

$$1\,\frac{\text{volt}}{\text{meeter}}\text{, lühendatult } 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.$$

Seda ühikut on võimalik tuletada ühikust $1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$ järgmiselt:

$$E = \frac{F}{q}\ ;\ E = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{C}} = \frac{1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}}}{1\,\mathrm{C}} = 1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{mC}}.$$

Et 1 J = 1 volt × 1 amper × 1 sekund (lühendatult 1 J = 1 V · 1 A · 1 s),

$$\text{siis } E = 1\,\frac{\mathrm{VAs}}{\mathrm{mC}} = 1\,\frac{\mathrm{V \cdot C}}{\mathrm{m\,C}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}.$$

Ülesannete lahendamisel on vaja kogemusi selle väljatugevuse ühiku kasutamiseks, aga samuti osata jõudu 1 N väljendada teiste ühikute kaudu:

$$1\,\mathrm{N} = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{m}} = \frac{1\,\mathrm{V \cdot 1\,A \cdot 1\,s}}{1\,\mathrm{m}} = \frac{1\,\mathrm{V \cdot A \cdot s}}{1\,\mathrm{m}} = 1\,\frac{\mathrm{V \cdot C}}{\mathrm{m}}.$$

Oletame, et positiivne proovilaeng asub laengust Q kaugusel r

ja meil on vaja teada selle laengu Q poolt tekitatud elektrivälja tugevust punktis, kus paikneb proovilaeng.

Vastavalt Coulomb'i seadusele mõjub CGSE-süsteemis laengule q jõud

$$F = \frac{Q \cdot q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2}.$$

Et $\varepsilon_0 = 1$, siis

$$F = \frac{Qq}{\varepsilon r^2}.$$

Laengu Q poolt tekitatud elektrivälja tugevus punktis, kus asub proovilaeng q, on

$$E = \frac{F}{q}.$$

Asetades sellesse valemisse F väärtuse eelmisest valemist, saame:

$$E = \frac{\frac{Qq}{\varepsilon r^2}}{q} = \frac{Q}{\varepsilon r^2},$$

s. t.

$$E = \frac{Q}{\varepsilon r^2}.$$

Analoogiliselt on võimalik saada valemit elektrivälja tugevuse jaoks SI-süsteemis.

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \cdot \varepsilon r^2} = \frac{Q}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot 4\pi r^2},$$

kus

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\mathrm{C}^2}{\mathrm{N\,m}^2} = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{m\,V}}.$$

Ülesanne 4. Milline jõud mõjub laengule 50 lü, mis on paigutatud elektrivälja tugevusega 0,2 $\frac{\mathrm{dyn}}{\mathrm{lü}}$?

Antud (CGSE-süsteem)

$q = 50$ lü;

$E = 0{,}2 \frac{\mathrm{dyn}}{\mathrm{lü}}$.

$F - ?$

Lahendus

1. Valemist

$E = \frac{F}{q}$ saame laengule q mõjuva jõu

$F = qE$.

2. Arvutame:

$F = 0{,}2 \cdot 50$ dyn $= 10$ dyn.

Ülesanne 5. Leida vette asetatud laengu 8100 lü poolt tekitatud elektrivälja tugevus laengust 5 cm kaugusel.

Antud (CGSE-süsteem)

$Q = 8100$ lü;

$r = 5$ cm;

$\varepsilon = 81$.

E — ?

Lahendus

1. Elektrivälja tugevus antud punktis väljendub valemiga:

$$E = \frac{Q}{\varepsilon r^2}.$$

2. Arvutame:

$$E = \frac{8100}{81 \cdot 5^2} \frac{\text{dyn}}{\text{lü}} = 4 \frac{\text{dyn}}{\text{lü}}.$$

Ülesanne 6. Petrooleumis asetsevast punktlaengust 2 cm kaugusel on välja-tugevus $9 \frac{\text{V}}{\text{m}}$. Leida selle laengu suurus.

Antud (SI-süsteem)

$E = 9 \frac{\text{V}}{\text{m}}$;

$r = 2$ m;

$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\text{C}}{\text{V} \cdot \text{m}}$;

$\varepsilon = 2$.

Q — ?

Lahendus

1. Valemist

$$E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2}$$

saame laengu:

$Q = 4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r^2 E$.

2. Arvutame:

$$Q = \frac{4\pi \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{36\pi\,\text{V} \cdot \text{m}} \cdot 2 \cdot 4\,\text{m}^2 \cdot 9 \frac{\text{V}}{\text{m}} =$$

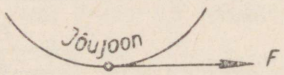
$$= 8 \cdot 10^{-9}\,\text{C}.$$

§ 12. ELEKTRIVÄLJA JÕUJOONED

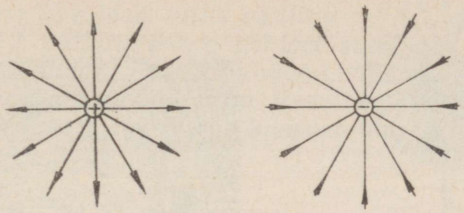
Elektrivälja jõudude mõjul hakkab elektrivälja paigutatud laeng liikuma mingit trajektoori mööda. Selliseid jooni nimetatakse elektrivälja jõujoonteks.

Kokkuleppeliselt on jõujoontele omistatud kindel suund. *Elektrivälja jõujoone suunaks loetakse sellesse välja paigutatud positiivse laengu liikumise suunda.*

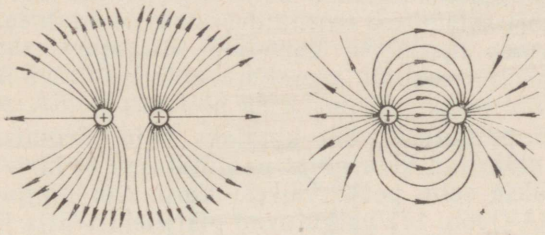
Suunda positiivselt laengult negatiivsele loetakse jõujoonte positiivseks suunaks.



Joon. 10.



Joon. 11.



Joon. 12.

Selle alusel võib väita, et *elektrivälja jõujooned algavad positiivsel ja lõpevad negatiivsel laengul. Nad võivad ulatuda ka lõpmatusse.*

Et laeng liigub elektrivälja jõudude mõjul ja igas punktis on see jõud erineva suunaga, ühtides jõujoone puutuja suunaga (joon. 10) selles punktis, siis *välja kaks jõujoont ei lõiku.* Vastasel juhul oleks elektrijõul ühes punktis kaks erinevat suunda, mis on vastuolus tegelikkusega.

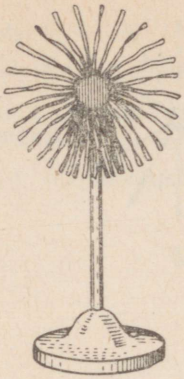
Joonisel 11*a*, *b* on kujutatud erinevate märkidega punktlaengute poolt tekitatud väljade jõujooned. Mõlemal juhul on jõujooned suunatud radiaalselt, nad väljuvad positiivsest ja suubuvad negatiivsesse laengusse.

Joonisel 12*a*, *b* on kujutatud sama- ja erinimelise punktlaengu poolt tekitatud elektriväljade jõujooned.

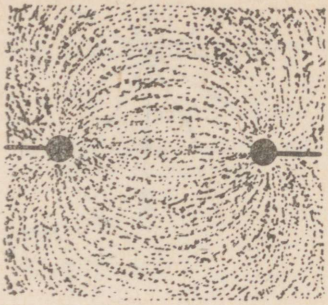
Joonistel 11 ja 12 kujutatud jõujoonte pilte nimetatakse tihti spektriteks.

Näitliku ettekujutuse saamiseks jõujoontest võib kasutada elektrisultanit (või kaht sultanit). Viimane kujutab endast peenikest metallvarrast, mille ülaosas paikneb ketas selle külge kleebitud pikkade maisipaberist ribadega.

Elektrofoormasina abil elektriseerimisel lähevad paberiribad radiaalselt piki elektrivälja jõujooni laiali (joon. 13).



Joon. 13.



Joon. 14.

Jõujoonte paigutuse võib kindlaks teha järgmise katse abil. Vaseliiniga määritud klaasplaat paigutatakse elektrivälja, seejärel aga puistatakse selle peale väikesi kipsi- või hiniinikristallikesi. Kristallikesed (joon. 14) paigutuvad piki elektrivälja jõujooni.

Elektriväli ei ole üksikutest osakestest (molekulidest, aatomitest, elektronidest jne.) koosnev aine, vaid kujutab endast erilist mateeria vormi, mida iseloomustab pidevus.

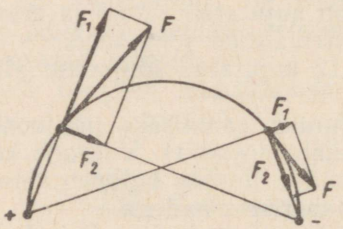
Et jõujoonte asendis ja kujus ilmnevad kõik elektrivälja iseärasused, siis kasutataksegi välja tundmaõppimiseks tema graafilist pilti.

Et elektrivälja tugevus kujutab endast välja jõukarakteristikut, siis kasutatakse jõujoonte konstrueerimiseks järgmist võtet.

Kui elektriväljas mingi punkti väljatugevuse vektori suunas liikuda, siis kujutab käidud tee endast ühte elektrivälja jõujoont.

Meenutame, et ringliikumisel ühtib joonkiiruse suund mistahes punktis vastavast punktist tõmmatud puutuja suunaga. Seetõttu ka mistahes punkti väljatugevuse vektor peab ühtima jõujoone puutujaga selles punktis.

Selle põhjal võib jõujoonele anda üldise definitsiooni: *elektri-*



Joon. 15.

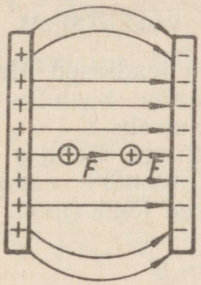
välja jõujoon on selline joon, mille puutuja suund mistahes punktis ühtib selle punkti väljatugevuse vektori suunaga.

Joonisel 15 on toodud konstruktsioon, mis selgitab kahe erinimelise laengu välja jõujoonte kuju. Resultantjõud F, mis leitakse vektorite geomeetrilise liitmise teel, koosneb ühe laengu tõmbejõust F_2 ja teise laengu tõukejõust F_1.

§ 13. HOMOGEENNE ELEKTRIVÄLI

Kui võtta kaks võrdset ja paralleelset metallplaati ning laadida nad võrdsete, kuid vastandmärgiliste laengutega, siis tekitavad nad lihtsaima kujuga elektrivälja, mida nimetatakse *homogeenseks* ja mida sageli kasutatakse raadiotehnilistes seadmetes (joon. 16).

Homogeenses väljas on jõujooned üksteisega paralleelsed ja asetsevad risti kummagi plaadi pinnaga. Jõujoonte tihedus on kõikjal ühesugune. Ainult plaatide äärtel on jõujooned kõverdunud ja



Joon. 16.

nende tihedus on erinev. *Homogeense välja tugevus on igas punktis nii suuruselt kui ka suunalt ühesugune.*

Mida tihedamalt paiknevad homogeense välja jõujooned, seda suurem on iga tema punkti väljatugevus.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida kujutab endast elektriväli ja millised on tema omadused?
2. Mida nimetatakse elektrivälja tugevuseks antud punktis?
3. Millise valemiga väljendub väljatugevus antud punktis?
4. Kuidas tuletatakse väljatugevuse ühikud CGSE- ja SI-süsteemides?
5. Kas väljatugevus on skalaarne või vektoriaalne suurus?
6. Kuidas sõltub punktlaengu väljatugevus laengu suurusest, keskkonna dielektrilisest läbitavusest ja vaadeldava punkti kaugusest laenguni CGSE- ja SI-süsteemides?
7. Mida nimetatakse elektrivälja jõujooneks?
8. Kuidas kujutatakse jõujoonte abil kahe samanimelise punktlaengu välja?
9. Kuidas kujutada jõujoonte abil kahe erinimelise punktlaengu välja?

10. Mis on homogeenne elektriväli?
11. Mida väljendab homogeense elektrivälja jõujoonte tihedus?
12. Leida elektrivälja tugevus punktis, kus proovilaengule +20 lü mõjub jõud 100 dyn.

$$\text{Vastus: } 5\ \frac{\text{dyn}}{\text{lü}}.$$

13. Leida väljatugevus punktis, kus proovilaengule +3 C mõjub jõud 45 N. Ülesanne lahendada SI-süsteemis.

$$\text{Vastus: } 15\ \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

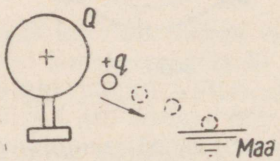
14. Punktlaengu $+10^{-10}$ C poolt tekitatud elektrivälja tugevus petrooleumis on $5\ \frac{\text{V}}{\text{m}}$. Määrata antud punkti kaugus välja tekitavast laengust. Ülesanne lahendada SI-süsteemis.

Vastus: 0,3 m.

§ 14. POTENTSIAAL

Kokkuleppeliselt loevad teadlased Maad selliseks kehaks, mis alati on elektriliselt neutraalne. Seetõttu muutub iga Maaga ühendatud juht samuti neutraalseks.

Oletame, et liikuv positiivne laeng q asub liikumatu positiivse laengu Q elektriväljas. Coulomb'i seaduse põhjal tekivad nende laengute vahel vastastikused jõud (joon. 17).



Joon. 17.

Elektrijõudude mõjul hakkab liikuv laeng eemalduma liikumatust laengust Q, ja jõudnud maapinnale, neutraliseerub, Seejärel laengu eemaldumine lakkab.

Selge, et proovilaengu q ümberpaigutamisel maapinnale sooritas laengu Q elektriväli teatava hulga tööd.

Elektrivälja mingi punkti potentsiaaliks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse laengu ümberpaigutamisel sellest punktist maapinnale tehtud töö ja laengu suuruse suhtega.

Kui tähistada töö tähega A, proovilaeng tähega q, potentsiaal tähega φ (kreeka täht «fii»), siis vastavalt definitsioonile

$$\varphi = \frac{A}{q}.$$

Võttes selles valemis $q = +1$, saame $\varphi = A$. Sellest võrdusest selgub, et *elektrivälja antud punkti potentsiaal on arvuliselt võrdne tööga, mida teevad elektrijõud positiivse ühiklaengu ümberpaigutamisel antud punktist maapinnale.*

Potentsiaal on skalaarne suurus.

Potentsiaali definitsioonist selgub, et Maa potentsiaali tuleb tinglikult lugeda võrdseks nulliga. See õigustab end ka praktiliselt.

Teoreetilises uurimistöös on kasulik nullpotentsiaaliks võtta lõpmata kaugel oleva punkti potentsiaal, seepärast anname potentsiaalile veel teisegi definitsiooni.

Välja potentsiaaliks antud punktis nimetatakse suurust, mida mõõdetakse positiivse laengu ümberpaigutamisel antud punktist lõpmatusse tehtava töö ja selle laengu suuruse suhtega.

Matemaatiliselt võib tõestada, et kui välja tekitab punktlaeng Q dielektrikus läbitavusega ε, siis potentsiaal mingis punktis laengust Q kaugusel r väljendub CGSE-süsteemis valemiga:

$$\varphi = \frac{Q}{\varepsilon r}.$$

SI-süsteemis väljendub potentsiaal valemiga

$$\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 \varepsilon r},$$

kus

$$\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi} \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{mV}}.$$

Nende valemite abil võib leida potentsiaali ka kerakujulise juhi pinnal, kui juhi raadius on r ja talle on antud laeng Q_1.

§ 15. POTENTSIAALIDE VAHE, SELLE ÜHIKUD

Olgu potentsiaal välja punktis B võrdne φ_1-ga, punktis C aga φ_2-ga. Teades, et $\varphi_1 = \frac{A_1}{q}$ ja $\varphi_2 = \frac{A_2}{q}$, võib leida kahe punkti potentsiaalide vahe:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1}{q} - \frac{A_2}{q}$$

ehk

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_1 - A_2}{q} = \frac{A}{q}.$$

Potentsiaalide vahet nimetatakse pingeks ja tähistatakse tähega U.

Kahe punkti potentsiaalide vahe on võrdne positiivse laengu

ümberpaigutamisel ühest punktist teise tehtava töö ja selle laengu suuruse suhtega.

Kui $q=+1$, siis $\varphi_1-\varphi_2=A$. Sellest valemist järeldub, et kahe punkti potentsiaalide vahe on arvuliselt võrdne elektrijõudude poolt sooritatud tööga ühiklaengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise.

Kui valemis $\varphi_1-\varphi_2=\frac{A}{q}$ võtta $A=1$ ja $q=1$, siis

$$\varphi_1-\varphi_2=1.$$

CGSE-süsteemis on tööühikuks 1 erg ja laenguühikuks 1 lü. Potentsiaalide vahe ühikuks on selles süsteemis $\frac{1\text{ erg}}{1\text{ lü}}=1$ pü.

Pingeühik — 1 pü — on selline kahe punkti potentsiaalide vahe, mille puhul laengu +1 lü ümberpaigutamisel ühest punktist teise sooritatakse töö 1 erg.

SI-süsteemis on tööühikuks 1 J ja laenguühikuks 1 C.

Siit potentsiaalide vahe ühik: $\frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}=1$ volt $=1$ V.

Volt on kahe punkti potentsiaalide vahe, mille korral laengu +1 C ümberpaigutamisel ühest punktist teise tehakse tööd 1 J.

Leiame CGSE- ja SI-süsteemi pingeühikute arvulise seose:

$$1\text{ V}=\frac{1\text{ J}}{1\text{ C}}=\frac{10^7\text{ ergi}}{3\cdot10^9\text{ lü}}=\frac{1}{300}\text{ pü}.$$

Niisiis on pingeühik 300 korda suurem voldist.

Ülesanne 7. Kui palju tööd tuleb teha, et viia laeng 600 lü punktist potentsiaaliga 0,2 pü punkti potentsiaaliga 10 V?

Antud (SI-süsteem)

$\varphi_1=300\text{ V}\cdot0{,}2=60\text{ V}$;

$\varphi_2=10\text{ V}$;

$q=\frac{6\cdot10^2}{3\cdot10^9}\text{ C}=2\cdot10^{-7}\text{ C}$.

A — ?

Lahendus

1. Töö väljendub valemiga:

$$A=q(\varphi_1-\varphi_2).$$

2. Arvutame:

$$A=2\cdot10^{-7}\text{ C}\cdot(60\text{ V}-10\text{ V})=$$
$$=2\cdot10^{-7}\text{ C}\cdot50\text{ V}=10^{-5}\text{ CV}=10^{-5}\text{ J}.$$

Ülesanne 8. Leida 0,2 m raadiusega kera potentsiaal (SI-süsteemis), kui kera asub petrooleumis ja tal on laeng 10^{-8} C.

Antud (SI-süsteem)

$r=0{,}2$ m;

$Q=10^{-8}$ C;

$\varepsilon_0=\frac{1}{36\pi\cdot10^9}\frac{\text{C}}{\text{Vm}}$;

$\varepsilon=2$.

φ — ?

Lahendus

1. Määrame potentsiaali valemist:

$$\varphi=\frac{Q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 r}.$$

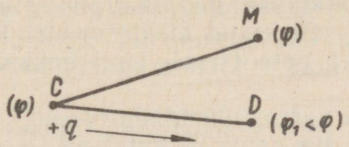
2. Arvutame:

$$\varphi=\frac{10^{-8}\text{ C}}{4\pi\,\frac{1}{36\pi\cdot10^9}\frac{\text{C}}{\text{Vm}}\cdot2\cdot0{,}2\text{ m}}=$$
$$=2{,}25\cdot10^2\text{ V}=225\text{ V}.$$

§ 16. LAENGUTE ÜMBERPAIKNEMISE TINGIMUSED ELEKTRIVÄLJAS

Paigutame laengu q elektrivälja punkti C. Ühendame juhtme abil punkti C punktiga D, mille potentsiaal on väiksem kui punktis C. Laeng q läheb punktist C punkti D (joon. 18).

Kui aga ühendada punkt C punktiga M, mille potentsiaal on niisama suur kui punktis C, siis laeng q ümber ei paikne.



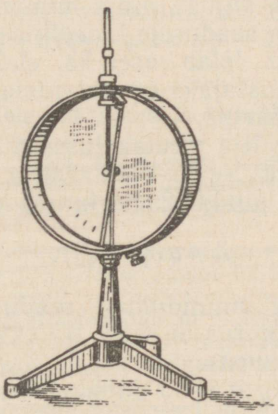
Joon. 18.

Selliste katsete põhjal (positiivsete ja negatiivsete laengutega) tuldi järeldusele: *elektrilaengud paiknevad elektrijõudude mõjul ühest punktist teise, kui nende punktide potentsiaalide vahe ei võrdu nulliga, kusjuures positiivsed laengud liiguvad kõrgema potentsiaaliga punktist madalama potentsiaaliga punkti poole ja negatiivsed laengud vastupidi.*

§ 17. ELEKTROMEETER

Potentsiaalide vahe mõõtmiseks määratud seadet nimetatakse elektromeetriks.

Juba M. V. Lomonossov ja G. V. Rihman, uurides atmosfäärielektrit, kasutasid aastail 1752—1753 «elektrilist näitajat», mis



Joon. 19.

koosnes metallvardast, selle külge riputatud kanepiniidist ja skaalast. See oli esimene elektromeeter maailmas.

Kaasaegse elektromeetri ehitus on näidatud joonisel 19. Elektromeeter koosneb kahe klaasseinaga metallkorpusest, mille ülaosas on läbi eboniitkorgi pandud metallvarras. Metallvarda ülemises otsas asub kerakujuline konduktor. Varda külge on kinnitatud kerge alumiiniumleheke või -osuti.

Mõõtmistel ühendatakse metallkorpus Maaga, s. t. maandatakse. Seda tehakse selleks, et elektromeetri korpusel oleks nullpotentsiaal, sest Maa potentsiaali loeti kokkuleppeliselt võrdseks nulliga.

Kui elektromeetri varras ühendada laetud kehaga, mille potentsiaal on φ, siis saab see sama potentsiaali.

Elektromeetri varda ja maandatud korpuse vahel tekib elektriväli, mille mõjul alumiiniumleheke (või -osuti) kaldub esialgsest asendist mingi nurga võrra kõrvale. Mida suurem on potentsiaalide vahe korpuse ja varda vahel, seda tugevam on väli elektromeetris ja seda suurem on osuti kaldenurk.

Et mõõta potentsiaalide vahet voltides, on vaja elektromeeter gradueerida etaloni abil (potentsiaalide etalonideks kasutatakse spetsiaalseid patareisid).

§ 18. ELEKTRIVÄLJA TÖÖ LAENGU ÜMBERPAIGUTAMISEL

Õppides tundma tööd Maa raskusväljas, nägime, et keha kaaluga P viimisel kõrgusele H sooritati töö $P \cdot H$. See töö on potentsiaalse energia juurdekasvu mõõduks ega sõltu keha trajektoori pikkusest ja kujust.

Keha tagasipöördumisel esialgsesse asendisse väheneb tema potentsiaalne energia tõstmisel tehtud töö võrra, sõltumata keha trajektoori pikkusest ja kujust, ning muundub vastavalt energia jäävuse ja muundumise seadusele kineetiliseks energiaks.

Samasugune nähtus leiab aset ka elektriväljas. Elektrivälja energeetiliseks iseloomustajaks on potentsiaal. Välja antud punkti jaoks on tal püsiv väärtus.

Oletame, et mingi välja meelevaldses punktis *1* on potentsiaal φ_1, punktis *2* aga φ_2 ($\varphi_1 > \varphi_2$). Elektrivälja jõudude mõjul paigutub laeng q punktist *1* punkti *2*. Seejuures sooritatakse töö:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

Energia jäävuse ja muundumise seaduse alusel on võimalik tõestada, et selle töö suurus ei sõltu trajektoori kujust ega pikkusest — ta on jääv suurus.

Tõepoolest, kui laeng q asub punktis *1*, siis välja potentsiaalne energia on W_{k_1}, kui aga laeng asub punktis *2*, siis on tema potentsiaalne energia W_{k_2}. Seejuures $W_{k_1} > W_{k_2}$. Et energia ei teki ega kao,

siis laengu q ümberpaigutamisel punktist *1* punkti *2* peab väli sooritama töö

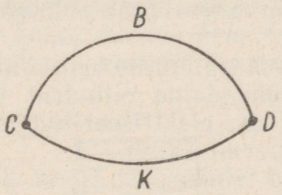
$$A = W_{k_1} - W_{k_2},$$

mis ei sõltu trajektoori pikkusest ja kujust.

Niisiis, *elektrivälja jõudude töö laengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise ei sõltu laengu liikumise teest, vaid on võrdne laengu ja tema tee alg- ning lõpp-punktide potentsiaalide vahe korrutisega.* Siit jõuame väga tähtsale tulemusele: *elektrivälja jõudude poolt tehtud töö laengu ümberpaigutamisel mööda kinnist kõverat võrdub nulliga.*

Tõepoolest, kui laengu ümberpaiknemisel punktist C punkti D mööda kõverat CBD sooritatakse positiivne töö $A_1 = q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)$, siis laengu liikumisel tagasi lähtepunkti (mööda kõverat DKC) sooritatakse niisama suur negatiivne töö (joon. 20):

$$A_2 = q(\varphi_2 - \varphi_1).$$



Joon. 20.

Kogu töö laengu ümberpaigutamisel mööda kinnist kõverat võrdub nulliga. Selles on kerge veenduda, kui teha vastavad arvutused: $A = A_1 + A_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2) + q(\varphi_2 - \varphi_1) = q\varphi_1 - q\varphi_2 + q\varphi_2 - q\varphi_1 = 0$.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse välja antud punkti potentsiaaliks?
2. Kas potentsiaal on skalaarne või vektoriaalne suurus?
3. Millise keha potentsiaal on kokkuleppeliselt loetud nulliks?
4. Mis on pinge?
5. Mida nimetatakse elektrivälja kahe punkti potentsiaalide vaheks?
6. Milliste ühikutega mõõdetakse pinget CGSE- ja SI-süsteemides? Milline on ühikute arvuline seos?
7. Kuidas on ehitatud elektromeeter ja milleks teda kasutatakse?
8. Millisel tingimusel toimub laengute ümberpaigutumine elektriväljas?
9. Kas elektrivälja jõudude poolt laengu ümberpaigutamisel tehtud töö sõltub tee kujust? Kuidas seda tõestada?
10. Elektrivälja mingi punkti potentsiaal on 10 pü. Mida see tähendab?
11. Elektriväija kahe punkti potentsiaalide vahe on 10 V. Mida see tähendab?
12. Millest sõltub laengu ümberpaigutamisel tehtud töö elektriväljas?

13. Leida kahe välja punkti potentsiaalide vahe (SI-süsteemis), kui laengu 400 lü viimisel ühest punktist teise on vaja teha 10^{-4} J tööd?

Vastus: 750 V.

14. Laengu ümberpaigutamisel elektriväljas sooritati töö 4 J. Määrata laengu suurus, kui pinge oli 100 V.

Vastus: 0,04 C.

§ 19. JUHID ELEKTRIVÄLJAS

Elektriseerime klaaspulga ja hakkame seda lähendama elektroskoobile. Märkame, et elektroskoobi lehekesed lähevad laiali.

Sellest võib järeldada, et elektrilaengud elektroskoobis jaotuvad ümber.

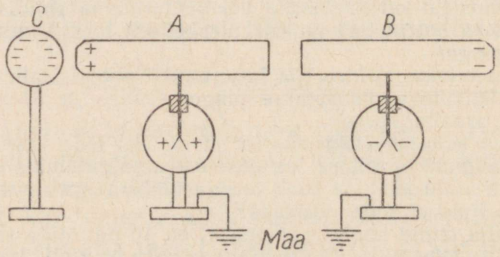
Taoliste katsete alusel on kindlaks tehtud, et iga elektriseeritud keha läheduses paiknev elektrijuht elektriseerub.

Sellist nähtust nimetatakse elektrostaatiliseks induktsiooniks (sõna «induktsioon» tuleneb ladinakeelsest sõnast *inductio* — juhin, korraldan) ehk elektriseerimiseks mõju abil.

Võtame kaks elektroskoopi, mille kerakonduktorid on asendatud silindritega *A* ja *B*. Lähendame silindrid kuni kokkupuuteni ja viime ühe silindri lähedusse elektriseeritud keha. Näeme, et elektroskoopide lehekesed lähevad laiali.

Eemaldame silindrid teineteisest (joon. 21) laetud keha *C* juuresolekul ja uurime nende laenguid: silindril *A* on üht liiki (keha *C* laengu suhtes vastandmärgiline), silindril *B* aga teist liiki laeng (keha *C* laengu suhtes samamärgiline). Eemaldame keha *C* ja ühendame silindrid. Näeme, et lehekesed langevad silmapilkselt kokku. Sellest järeldub, et need laengud olid võrdsed. Elektronteooria seisukohast võib nähtust seletada järgmiselt.

Laetud keha elektrivälja mõjul toimub juhis vabade elektronide ümberpaigutumine. Kirjeldatud katses kogunevad elektronid silindrile *B*, mistõttu see elektriseerub negatiivselt. Silindril *A* tekib elektronide puudujääk, nii et ta elektriseerub positiivselt.



Joon. 21.

Laetud keha eemaldamisel jaotuvad elektronid üle kogu juhi ja seepärast juhi neutraalne olek taastub.

Kordame katset ja, lahutamata silindreid, puudutame parempoolset sõrmega. Võtnud ära sõrme ja seejärel ka laetud keha, eemaldame silindrid teineteisest. Nüüd osutuvad nad elektriseerituks. Laengute uurimine näitab, et kumbki silinder on laetud positiivselt, s. t. laetud keha suhtes erinimeliselt.

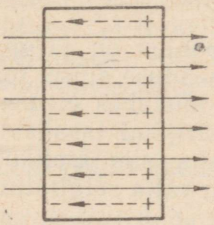
Mis siin siis juhtus?

Kui puudutasime silindrit laetud keha juuresolekul, siis laengute vastastikuse mõju tõttu läks negatiivne laeng (elektronid) meie keha kaudu maasse.

Positiivne laeng (laetud keha suhtes vastandmärgiline) säilis seotud olekus, sest, nagu teada, erinimelised laengud tõmbuvad. Kui me sõrme, seejärel aga laetud keha kaugemale viisime, siis tekkis mõlemal silindril elektronide puudujääk, mistõttu nad osutusid positiivselt (mõjuva keha suhtes e r i m ä r g i l i s e l t) laetuks ka pärast nende eemaldamist teineteisest.

Niisiis, *elektriseeritud keha läheduse tõttu toimub juhis vabade elektronide ümberjaotumine, kusjuures juhi kaugem osa elektriseerub mõjuva kehaga samanimeliselt, lähem aga erinimeliselt; laengut juhi lähemal otsal hoiab mõjuva keha laeng seotud olekus.*

Joonisel 22 on kujutatud vasemalt paremale suunatud homo-



Joon. 22.

geensesse elektrivälja paigutatud juht. Elektrostaatilise induktsiooni tulemusena ta elektriseerub. Otstel paiknevad laengud tekitavad juhi sees oma elektrivälja, mis on suunalt vastupidine välise väljaga (seesmise välja jõujooned on joonisel näidatud punktiiriga).

Laengute ümberjaotumine juhis lõpeb väga lühikese aja jooksul ja siis saabub tasakaal (laengud jäävad paigale).

Nähtust võib seletada sellega, et välise välja ja juhi seesmise välja tugevused saavad võrdseteks ning vastassuunalisteks ja nende summa juhi sees muutub nulliks.

Niisiis, laengute tasakaalu puhul on väljatugevus elektriväljas asuva juhi sees alati null, vaatamata sellele, kuidas on suunatud väli temast väljaspool, s. t. väli juhi sees puudub.

§ 20. LAENGUTE JAOTUMINE ISOLEERITUD JUHIL

Võtame mõned erineva kujuga juhid, kleebime nende külge maisipaberist lehekesed, mis etendavad lihtsaimate elektroskoopide osa. Seejärel isoleerime juhid ja elektriseerime nad. Näeme, et paberiribakesed tõukuvad ainult tasastel kumeratel pindadel, kuid üldse mitte nõgusatel.

Esimesena tõestas Cavendish, et elektrilaengud paiknevad ainult juhi välispinnal. Ta elektriseeris isoleeritud messingkera ja asetas tihedalt selle vastu kaks õõnsat metallpoolkera, hoides kinni nende isoleeritud käepidemetest.

Pärast poolkerade eemaldamist tegi ta kindlaks, et seesmine kera oli laengu kaotanud, poolkerad aga osutusid laetuks (joon. 23).

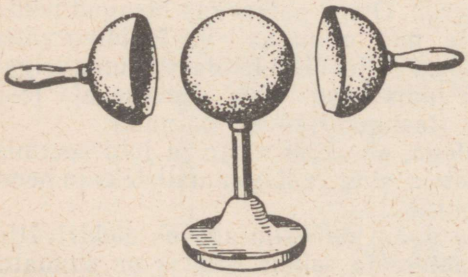
Hiljem korraldas samasuguseid uurimisi hiiglasuure puust kuubiga ka Faraday. Kuubi serva pikkus oli 4 m ja ta oli kaetud staniolpaberiga.

Katse ajal asus teadlane ise koos tundlike elektroskoopidega selle kuubi sees, kuid ei avastanud seal mingeid elektrilaenguid, samal ajal kui kuubi seinad olid elektriseeritud nii tugevasti, et nende välispinnale lähenedes võis saada suuri sädemeid.

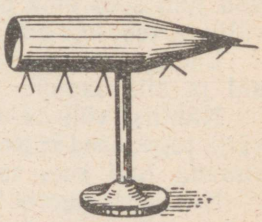
Niisiis, mitmesuguste katsete põhjal on kindlaks tehtud, et elektrilaengud paiknevad ainult juhi välispinnal, kui see on tasane või kumer, neid ei ole aga ei keha sees ega ka tema nõgusatel pindadel.

Nimetatud nähtuse põhjus on järgmine: samanimeliste laengute vastastikuse toime seaduse alusel toimub laengute ümberpaiknemine juhil seni, kuni mistahes elementaarlaengule teiste laengute poolt mõjuvad elektrijõud tasakaalustuvad. Et välispind on alati kaugemal kui seesmine, siis järelikult paiknevad laengud alati välispinnale. Sel viisil on välja selgitatud, et elektriväli puudub ka õõnsa laetud juhi sees.

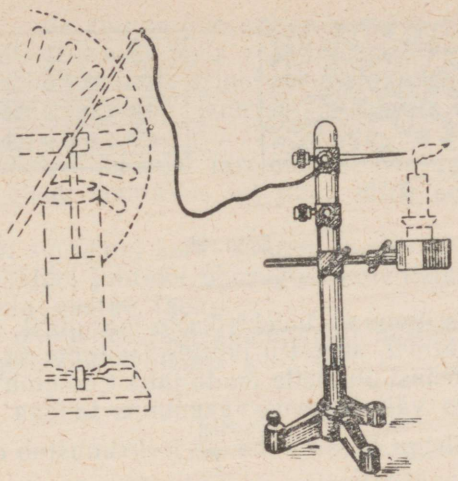
Kirjeldatud nähtust kasutatakse kehade varjestamiseks, s. t. kaitseks väliste elektriväljade eest. Selleks ümbritsetakse keha juhiga, näiteks traatvõrguga.



Joon. 23.



Joon. 24.



Joon. 25.

Mida suurem on pinna kumerus, seda tihedamalt paiknevad laengud (joon. 24). Väga suure kumerusega on teravikud, nii et laengu tihedus neil on väga suur. Samanimeliste laengute vastastikuse mõju tulemusena eraldub osa laenguid teravikult ja elektriseerib õhku. Sel juhul öeldakse, et teravikelt toimub laengute äravool. Äravoolu demonstreerimiseks võib kasutada joonisel 25 näidatud seadet. Laengute voolamise tõttu kaldub küünlaleek teravikust eemale.

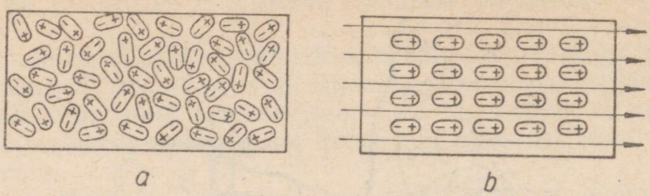
§ 21. DIELEKTRIKUD ELEKTRIVÄLJAS

Kui elektriseeritud keha dielektrikule lähendada, siis elektriseerub viimane samuti induktsiooni teel, kuid dielektriku jaotamisega kahte ossa ei õnnestu saada üht liiki laengut. Põhjuseks on asjaolu, et dielektrikutes peaaegu ei olegi vabu elektrone. Dielektriku elektronid on lahutamatult seotud aatomite positiivsete tuumadega.

Kui paigutada dielektrik elektrivälja, siis nihkuvad laengud tema aatomites üksteise suhtes. Iga aatom muutub dipooliks. Öeldut võib rakendada ka molekulide kohta, mida saame samuti dipoolidena vaadelda.

Välise elektrivälja puudumisel on dipoolid dielektrikus paigutatud korrapäratult (joon. 26, *a*). Kui aga dielektrik asetseb elektriväljas, siis pöörduvad dipoolid nii, et nende positiivne osa paikneb jõujoonte suunas ja negatiivne vastassuunas. Sellist dielektrikut nimetatakse polariseerituks (joon. 26, *b*).

Dielektriku polarisatsiooni tulemusena ilmuvad temas seotud laengud ja tekib seesmine elektriväli, mis on suunatud vastupidi välise väljaga. Üldine väljatugevus dielektriku sees väheneb. Seo-



Joon. 26.

tud laengud, mis ilmuvad dielektriku ja juhi piiril, neutraliseerivad osa laenguid juhtidel, mistõttu juhtide laengute vastastikune mõju nõrgeneb. See tõsiasi on meile teada juba Coulomb'i seadusest.

Kui tähistada väljatugevus vaakuumis tähega E_0 ja antud dielektriku sees tähega E, siis suhe $\frac{E_0}{E}$ iseloomustab dielektriku polariseeritavust ehk dielektriku aine absoluutset dielektrilist läbitavust. Järelikult

$$\varepsilon_a = \frac{E_0}{E}.$$

Dielektriku absoluutne läbitavus on suurus, mis näitab, mitu korda antud laengute väljatugevus vaakuumis on suurem kui dielektrikus.

§ 22. JUHI ELEKTRIMAHTUVUS

Võtame elektromeetri, eemaldame ta teistest juhtidest ja hakkame talle järk-järgult andma ühesuurusi laenguid.

Seda võib teha järgmiselt. Hoides kinni proovikuulikese isoleeritud käepidemest, puudutame sellega elektrofoormasina laetud konduktorit. Seejärel anname laengu puudutamise teel proovikuulikeselt üle elektromeetrile, mille vardal asub õõnes kerakonduktor.

Suurendades elektromeetri laengut 2, 3 jne. korda, märkame, et vastavalt sama arv korda suureneb ka elektromeetri potentsiaal.

See näitab, et laengu muutumisega muutub ka juhi potentsiaal, kuid laengu ja potentsiaali suhe selle juhi jaoks jääb muutumatuks.

Selliste katsete tulemusena on jõutud järeldusele, et *isoleeritud juhi laengu ja potentsiaali suhe on jääv suurus.*

Seda suurust nimetatakse juhi elektrimahtuvuseks. Kui tähistada juhi laengut tähega q, tema potentsiaali Maa suhtes tähega φ ja elektrimahtuvust tähega C, siis $C = \frac{q}{\varphi}$.

Seega on juhi elektrimahtuvus suurus, mida mõõdetakse juhi laengu ja tema potentsiaali suhtega.

Kui võtta mitu isoleeritud ühesuguse kujuga, kuid erineva suu-

rusega juhti ja anda kõigile ühesugune laeng q, siis nende potentsiaalid tõusevad erinevalt. Seda võib märgata kerade külge kleebitud maisipaberist lehekeste erineva eemaldumise järgi.

Väikseim kera saavutab suurima ja suurim kera väikseima potentsiaali.

Elektrimahtuvuse valemist järeldub, et ühesuguse laengu korral on suurim elektrimahtuvus sel juhil, mille potentsiaal tõuseb kõige vähem.

Järelikult on suuremal keral suurem mahtuvus.

Et saada kõikidel juhtidel ühesugust potentsiaali, on vaja igaühele neist anda vastav laeng.

Oletame, et muutsime juhi potentsiaali nullist kuni üheni. Kui võtta elektrimahtuvuse valemis $\varphi = 1$, siis

$$C = \frac{q}{1}$$

ehk

$$C = q.$$

Seega võib öelda, et juhi elektrimahtuvus on arvuliselt võrdne laenguga, mis muudab juhi potentsiaali ühiku võrra.

Katsed näitavad, et ühesuguste mõõtmetega massiivsel ja õõnsal metallkeral on ühesugune elektrimahtuvus. Ühesuguse kuju ja mõõtmetega erinevast ainest kehadel on samuti ühesugune elektrimahtuvus. Erineva kujuga ja mõõtmetega elektrijuhtidel on aga erinev mahtuvus. *Järelikult ei sõltu juhi mahtuvus keha ainest, kuid sõltub keha kujust ja dielektrikust, kus asub keha.*

§ 23. ELEKTRIMAHTUVUSE ÜHIKUD

Kui elektriseerida üha suurema ja suurema raadiusega kerasid ühesuguste laengutega q, siis nende potentsiaalid muutuvad pöördvõrdeliselt raadiustega. Teoreetiliselt on tõestatud ja katsetega kinnitatud, et kera potentsiaal võrdub laengu q ja raadiuse r suhtega, s. t. $\varphi = \frac{q}{r}$, kust

$$q = \varphi r.$$

Asetades selle q väärtuse elektrimahtuvuse valemisse $C = \frac{q}{\varphi}$, saame

$$C = \frac{\varphi r}{\varphi} = r$$

ehk

$$C = r.$$

Sellest järeldub, et kerakujulise juhi mahtuvus on arvuliselt

võrdne tema raadiusega. Et aga raadiust mõõdetakse CGSE-süsteemis sentimeetrites, siis ka juhi elektrimahtuvust mõõdetakse samades ühikutes.

Niisiis, CGSE-süsteemis on mahtuvuse ühikuks 1 cm. Analüüsides valemit

$$C=\frac{q}{\varphi},$$

võib järeldada, et ühikuline mahtuvus on sellisel juhil, millel ühiklaeng tõstab tema potentsiaali ühiku võrra (s. t. kui $q=1$ ja $\varphi=1$, siis $C=1$).

Elektrimahtuvuse elektrostaatiliseks ühikuks võetakse sellise juhi mahtuvus, millel laeng 1 lü muudab ta potentsiaali 1 pü võrra.

Selline mahtuvus on vaakuumis või õhus asuval metallkeral raadiusega 1 cm (õhu ja vaakuumi dielektrilised läbitavused on peaaegu võrdsed). Elektrimahtuvuse ühikuks SI-süsteemis on farad (F).

Farad on sellise juhi mahtuvus, millel laeng 1 C tõstab potentsiaali 1 V võrra.

$$1\ \text{F}=\frac{1\ \text{C}}{1\ \text{V}}\ ;\ 1\text{F}=\frac{3\cdot 10^9\ \text{lü}}{\frac{1}{300}\ \text{pü}}=9\cdot 10^{11}\ \text{cm}.$$

Miljondikku faradist nimetatakse mikrofaradiks (μF):

$$1\,\mu\text{F}=\frac{1\ \text{F}}{1\,000\,000}=\frac{9\cdot 10^{11}\ \text{cm}}{10^6}=9\cdot 10^5\ \text{cm}.$$

Sellist mahtuvust omaks metallkera raadiusega 900 000 cm = =9 km. Maakera raadius on 6400 km. Tema elektrimahtuvus on 711 μF.

Miljondikku mikrofaradist nimetatakse pikofaradiks (pF):

$$1\ \text{pF}=\frac{1\ \mu\text{F}}{1\,000\,000}=\frac{9\cdot 10^5\ \text{cm}}{10^6}=0{,}9\ \text{cm}.$$

Ülesanne 9. Millise potentsiaalini laadub juht, kui ta elektrimahtuvus on 5 cm ja talle anti laeng $2\cdot 10^{-10}$ C?

Antud (SI-süsteem)

$q=2\cdot 10^{-10}$ C;

$C=5\ \text{cm}=\frac{5}{9\cdot 10^{11}}$ F.

$\varphi-?$

Lahendus

1. Leiame juhi potentsiaali valemist

$$C=\frac{q}{\varphi},\ \text{siit}\ \varphi=\frac{q}{C}.$$

2. Arvutame:

$$\varphi=\frac{2\cdot 10^{-10}\ \text{C}}{\frac{5}{9\cdot 10^{11}}\ \text{F}}=\frac{2\cdot 10^{-10}\cdot 9\cdot 10^{11}}{5}\ \text{V}=$$

$$=36\ \text{V}.$$

Juhi elektrimahtuvus sõltub mitmest tegurist.

Vaatleme mõningaid katseid, mis seda kinnitavad.

1. Võtame isoleeritud plaadikujulise juhi ja hoolitseme selle eest, et ta läheduses ei oleks teisi juhte. Kinnitame plaadi külge kerge maisipaberist ribakese ja laeme plaadi laenguga q kuni potentsiaalini φ. Sel juhul juhi elektrimahtuvus

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

2. Lähendame sellele laetud juhile teise, laenguta juhi ja märkame, et paberiribake esimesel juhil langeb alla. Järelikult laetud juhi potentsiaal väheneb. Kui teine juht eemaldada, siis veendume, et esimese juhi potentsiaal saavutab jälle esialgse väärtuse. See näitab, et laeng esimesel juhil ei muutunud.

Kui laeng jäi muutumatuks ja potentsiaal katse ajal vähenes, siis valemist $C = \frac{q}{\varphi}$ järgneb, et esimese juhi mahtuvus suurenes: juhi elektrimahtuvus suureneb teise, laenguta juhi lähenemisel temale.

Resultaati võib seletada järgmiselt. Teine juht laetakse samuti elektrostaatilise induktsiooni seaduse põhjal ja esimesel juhil asuvad laengud osutuvad seotuks vastandnimeliste laengutega teisel juhil. Tulemusena esimese juhi potentsiaal väheneb, aga ta elektrimahtuvus suureneb.

3. Maandame teise juhi ja märkame, et esimese juhi potentsiaal väheneb veelgi; tähendab, tema elektrimahtuvus suureneb. Eemaldades teise juhi, veendume, et esimese juhi potentsiaal saavutab jällegi esialgse väärtuse. Järelikult tema laeng ei muutunud: teise juhi maandamine suurendab esimese juhi mahtuvust. Seletus on järgmine. Teise juhi positiivsed laengud neutraliseeritakse Maast tulevate elektronidega, mistõttu esimese ja teise juhi laengute vaheline side tugevneb. Seejuures väheneb esimese juhi potentsiaal, tema mahtuvus aga suureneb.

4. Paigutame juhtide vahele tahke dielektriku (klaas, vilgukivi jne.). Seejuures väheneb esimese juhi potentsiaal veel enam (peaaegu nullini). Dielektriku ja teise juhi eemaldamisel saavutab esimese juhi potentsiaal jälle esialgse väärtuse. Tähendab, ka sel juhul laeng ei muutunud. Potentsiaali vähenemine märgib ainult seda, et suurenes elektrimahtuvus. *Tahke dielektrik juhtide vahel suurendab süsteemi elektrimahtuvust.*

Et elektrivälja sattunud tahke dielektrik polariseerub, siis tema pindadel paiknevad polariseeritud aatomid ja molekulid mõjutavad juhtidel olevaid laenguid ning osa nendest laengutest neutraliseerub. Seetõttu nende juhtide laengute vaheline jõud väheneb, mis

omakorda viib potentsiaali vähenemiseni ja elektrimahtuvuse suurenemiseni.

5. Hakkame vähendama dielektriku paksust: näiteks asendame kolm klaasplaati kõigepealt kahe, seejärel aga ühe plaadiga. Märkame potentsiaali edasist langust, s. t. elektrimahtuvuse suurenemist: *dielektriku paksuse vähenemisega süsteemi elektrimahtuvus kasvab.*

Dielektriku väikese paksuse juures muutub plaatidevaheline elektriväli homogeenseks ja elektrivälja tugevus dielektrikus väheneb kõikjal ühesuguselt. Järelikult põhjustab plaadi paksuse vähenemine potentsiaalide vahe vähenemist ja süsteemi elektrimahtuvuse suurenemist.

6. Muudame dielektriku ainet. Märkame, et kõigi eelmiste tingimuste säilimisel väheneb isolaatori dielektrilise läbitavuse suurenemisega juhi potentsiaal ja järelikult suureneb elektrimahtuvus: *süsteemi elektrimahtuvus kasvab dielektrilise läbitavuse suurenemisega.*

Suurema läbitavusega dielektrikus on väljatugevus väiksem, mistõttu ka potentsiaalide vahe väheneb. See viib süsteemi elektrimahtuvuse suurenemisele.

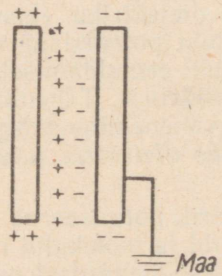
7. Muudame plaatide vastakuti oleva pinna suurust. Märkame, et selle pinna suurenemisel kasvab ka süsteemi elektrimahtuvus. Niisiis, plaatide ühise kattepinna suurenemisel kasvab süsteemi elektrimahtuvus.

Et saavutada esialgset potentsiaali väärtust, on vaja süsteemi esimesele juhile anda väga suur laeng.

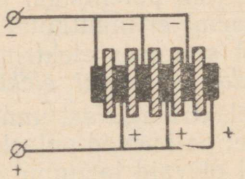
Kaks teineteisest dielektrikuga eraldatud elektrijuhti moodustavad nn. k o n d e n s a a t o r i.

Kui juhid on tasapinnalised ja asetsevad paralleelselt, siis nimetatakse kondensaatorit p l a a t- ehk t a s a k o n d e n s a a t o r i k s (joon. 27).

Suure mahtuvusega kondensaatori saamiseks tuleb võtta kaks võimalikult suurt plaati, mis aga praktiliselt ei ole otstarbekas. Seepärast võetakse väikesed plaadid, kuid suuremal hulgal ja ühen-



Joon. 27.



Joon. 28.

datakse nad, nagu näidatud joonisel 28. Tulemus on sama, mis kahe suure plaadi korral.

Olgu C — elektrimahtuvus, S — plaadi ühe külje pindala, ε_0 — vaakuumi dielektriline konstant, ε — dielektriku suhteline dielektriline läbitavus, d — dielektriku paksus, n — plaatide arv, $\pi = 3{,}14$, siis CGSE-süsteemis väljendub plaatkondensaatori mahtuvus valemiga

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}.$$

Kui aga kondensaatoris on n plaati, siis $C = \frac{\varepsilon S(n-1)}{4\pi d}$.

SI-süsteemis arvutatakse kondensaatori elektrimahtuvust valemiga

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}.$$

Kui aga kondensaator koosneb n plaadist, siis

$$e = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S(n-1)}{d},$$

kus

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \frac{\mathrm{C\,V}}{\mathrm{m}}.$$

Kahest plaadist koosneva kondensaatori mahtuvus on võrdeline ühe plaadi pindalaga ja plaate eraldava aine dielektrilise läbitavusega ning pöördvõrdeline dielektriku paksusega.

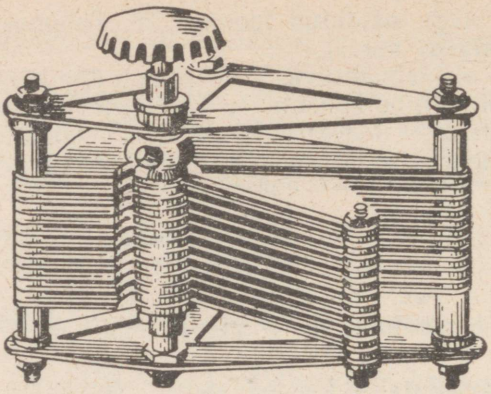
Tehnikas kasutatav kondensaator koosneb stanniolpaberi lehtedest, mis on eraldatud parafineeritud paberi, vilgukivi, klaasi või spetsiaalse keraamilise ainega. Raadiotehnikas kasutatakse veel muudetava mahtuvusega kondensaatorit ehk pöördkondensaatorit (joon. 29), milles dielektriku osa täidab õhk või vilgukivi.

Sellises kondensaatoris on üks plaatide süsteem paigal, teine aga liigub. Pöörates liikuvat plaatide süsteemi ümber telje, muudetakse sellega plaatide ühist vastaspinda (tööpinda), millega muutub ka mahtuvus.

Esimesena kasutas kondensaatorit vene õpetlane P. N. Jablotškov erilise kaarlambi skeemis, mida tunti tollal Jablotškovi «küünlana». Kondensaatorite edasine levik on seotud raadio leiutaja, vene õpetlase A. S. Popovi nimega.

Meie päevil kasutatakse kondensaatoreid laialdaselt elektro- ja raadiotehnikas.

Kondensaatori mahtuvuse suurendamiseks tema väikeste geomeetriliste mõõtmete säilitamisega on vaja kasutada suure läbitavusega dielektrikuid.



Joon. 29.

Nõukogude õpetlane B. M. Vul sai erilise keraamilise dielektriku (baariumtitanaat), millel on suur dielektriline läbitavus ($\varepsilon = 1000$, s. t. 125 korda suurem kui vilgukivil). See andis võimaluse valmistada suure mahtuvusega väikesemõõtmelisi kondensaatoreid.

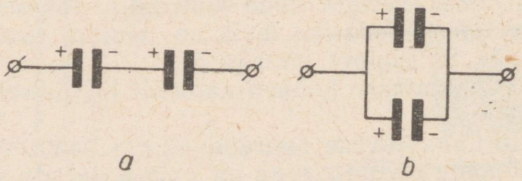
Laialdast kasutamist on leidnud elektrolüütkondensaatorid, mille mahtuvus ulatub kuni mõne tuhande mikrofaradini küllaltki väikeste gabariitide juures.

Sellistes kondensaatorites on dielektrikuks õhuke alumiiniumoksiidikiht, millega on kaetud kondensaatori alumiiniumkatted. Elektrolüütkondensaatori valmistamiseks keeratakse kaks alumiiniumriba spiraali. Ribad on teineteisest eraldatud elektrolüüdilahuses immutatud kiulise paberi kihiga.

Praktilistel eesmärkidel ühendatakse kondensaatoreid tihti patareisse, kas siis järjestikku või paralleelselt. Joonisel 30, *a* on kujutatud kondensaatorite järjestikühenduse ja joonisel 30, *b* paralleelühenduse skeem.

Järjestikku ühendatud ühesuguste kondensaatorite patarei mahtuvus on võrdne ühe kondensaatori mahtuvuse ja kondensaatorite arvu jagatisega. Juhul kui kondensaatorid on erineva mahtuvusega, siis arvutatakse patarei mahtuvust valemiga

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_n}.$$



Joon. 30.

Paralleelse ühenduse korral on patarei mahtuvus võrdne tema koosseisu kuuluvate üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga

$$C = C_1 + C_2 + \ldots + C_n.$$

Ülesanne 10. Raadiotehnikas kasutatav plaatkondensaator on valmistatud üksteisest vilgukiviga eraldatud õhukestest stanniollehtedest. Milline peab olema vilgukivikihi paksus, kui 0,1 μF mahtuvuse saamiseks vajatakse 41 stanniollehte igaüks pindalaga 31,4 cm². Ülesanne lahendada CGSE- ja SI-süsteemides.

I. Antud (CGSE-süsteem)

$C = 0{,}1\ \mu\text{F} = 9 \cdot 10^5\ \text{cm} \cdot 0{,}1 = 9 \cdot 10^4\ \text{cm}$;

$S = 31{,}4\ \text{cm}^2$;

$\varepsilon = 9$;

$n = 41$.

$d - ?$

Lahendus

1. Valemist

$$C = \frac{\varepsilon S (n-1)}{4\pi d}$$

saame

$$4\pi d C = \varepsilon S (n-1),$$

kust

$$d = \frac{\varepsilon S (n-1)}{4\pi C}.$$

2. Arvutame: $d = \dfrac{9 \cdot 31{,}4\ \text{cm}^2 \cdot (41-1)}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 9 \cdot 10^4\ \text{cm}} = 0{,}01\ \text{cm}.$

II. Antud (SI-süsteem)

$C = 0{,}1\ \mu\text{F} = 10^{-7}\ \text{F}$;

$S = 31{,}4\ \text{cm}^2 = \dfrac{31{,}4}{10^4}\ \text{m}^2 = 3{,}14 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^2$;

$\varepsilon_0 = \dfrac{1}{36\pi \cdot 10^9}\ \dfrac{\text{F}}{\text{m}}$;

$\varepsilon = 9$;

$n = 41$.

$d - ?$

Lahendus

1. Valemist

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S (n-1)}{d}$$

saame

$$d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S (n-1)}{C}.$$

2. Arvutame:

$$d = \frac{1}{36 \cdot 3{,}14 \cdot 10^9 \cdot 10^{-7}}\ \frac{\text{F}}{\text{Fm}} \cdot 9 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-3}\ \text{m}^2 \cdot (41-1) = 10^{-4}\ \text{m}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Milles seisab elektrostaatilise induktsiooni nähtus?
2. Miks paberitükikesed tõmbuvad algul elektriseeritud kammi külge, seejärel aga tõukuvad temast eemale?
3. Miks laetud elektroskoobi lehekesed lähenevad teineteisele, kui lähendada (konduktorit puudutamata) laadimata juht?
4. Laadimata elektroskoobi kerakonduktorile lähendati positiivselt laetud klaaspulk. Pulka eemaldamata puudutati hetkeks kera. Seejärel eemaldati pulk ja elektroskoop osutus laetuks negatiivse laenguga. Selgitada seda nähtust.
5. Kus paiknevad elektrilaengud laetud juhil?

6. Miks lõpeb elektroskoobi varras kerakonduktoriga, aga mitte teravikuga?
7. Miks tehakse juhid elektrostaatiliste katsete jaoks õõnsad?
8. Kui paigutada elektroskoop metallvõrgust kuplisse ja elektroskoobi varras ühendada võrguga ning seejärel elektriseerida võrk, siis elektroskoobi lehekesed ei lähe laiali. Kuidas seda seletada?
9. Õõnes avaga metallkera asub isoleeritud alusel. Kuidas anda sellele kerale üle kogu laeng, mis asub teisel isoleeritud metallkeral?
10. Mis on dielektriku polarisatsioon?
11. Mida nimetatakse juhi elektrimahtuvuseks?
12. Milliste ühikutega mõõdetakse elektrimahtuvust CGSE- ja SI-süsteemides ja milline on nende ühikute vahekord?
13. Juhi elektrimahtuvus on 5 cm. Mida see tähendab?
14. Millistest teguritest sõltub antud juhi elektrimahtuvus? Andke seletus.
15. Mis on plaatkondensaator?
16. Millise valemi järgi võib arvutada plaatkondensaatori mahtuvust?
17. Väljendada mahtuvus 5 μF sentimeetrites.

Vastus: $45 \cdot 10^5$ cm.

18. Et laadida juhti potentsiaalini 1000 V, anti talle laeng $3 \cdot 10^5$ lü. Määrata juhi mahtuvus faradites.

Vastus: 10^{-7} F.

19. Määrata kera raadius, kui ta mahtuvus on 5 pF.

Vastus: 4,5 cm.

20. On vaja valmistada kondensaator mahtuvusega 500 cm, kusjuures dielektrikuna on kasutada parafineeritud paber. Kui palju tuleb võtta selleks 1,57 cm^2 pindalaga plaate, kui dielektriku (paberi) paksus on 0,02 cm.

Juhis. Leida kondensaatori mahtuvuse valemist $(n-1)$ ja seejärel plaatide arv n.

Vastus: 45 plaati.

II PEATÜKK

ALALISVOOL

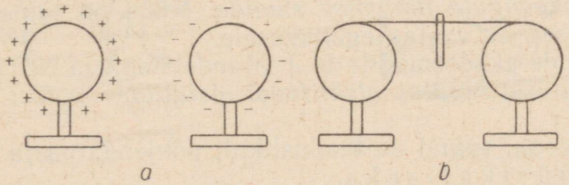
§ 25. ELEKTRIVOOLU MÕISTE

Peaaegu igal sammul võime märgata, kui suur tähtsus on kaasajal elektril. Elektrivool paneb liikuma trammid, trollibussid, elektrirongid, valgustab maju ja tänavaid, elektrivoolu abil töötavad telefon, telegraaf, raadio jne.

Mida siis kujutab endast elektrivool?

Et sellele küsimusele vastata, vaatleme järgmist katset.

Laeme kaks isoleeritud juhti võrdsete erinimeliste laengutega (joon. 31, *a*). Ühendame nad omavahel juhtmega ja näeme, et juhid kaotavad laengu.



a *b*

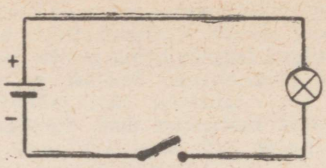
Joon. 31.

Millist osa etendas siin juhe? Ta oli «sillaks», mida mööda üht liiki elektrilaengud liikusid teist liiki laengute juurde ja neutraliseerusid vastastikku. Laengud liikusid vaadeldaval juhul kindlas suunas — kõrgema potentsiaaliga kehalt madalama potentsiaaliga kehale.

Sellega jõudsime elektrivoolu mõisteni: *elektrivooluks nimetatakse elektrilaengute suunatud liikumist.*

§ 26. KINNINE VOOLURING. VOOLU SUUND

Voolu säilitamiseks juhis pikema aja jooksul on vaja tema otstel alal hoida potentsiaalide vahet. Seda ülesannet täidavad elektrienergia allikad ehk vooluallikad.



Joon. 32.

Ühendades vooluallika ja tarbija juhtmete abil, saame vooluringi. Kui vooluring ei ole kusagilt katkestatud, siis nimetatakse vooluringi kinniseks; kui aga vooluring on katkestatud, siis lahtiseks.

Tavaliselt on vooluringis vastav seade tema avamiseks ja sulgemiseks. Seda nimetatakse lülitiks ehk katkestiks.

Niisiis, lihtsaim vooluring koosneb vooluallikast, tarbijast, ühendusjuhtmetest ja lülitist (joon. 32).

Keerukamates vooluringides kasutatakse seadmeid voolu reguleerimiseks (reostaadid) ja mõõteriistu (ampermeetrid, voltmeetrid, elektrienergia arvestid jne.).

Millise märgiga laengute liikumine kujutab endast elektrivoolu? XVII sajandi füüsikud oletasid, et metallides liiguvad positiivsed laengud negatiivsete poole. Sellist voolu suunda nimetatakse tehniliseks. Lepiti kokku, et *elektrivoolu suunaks loetakse alati positiivsete laengute liikumise suunda.* Nüüd on täpselt kindlaks tehtud, et see ei vasta tegelikkusele.

Nõukogude akadeemikute L. J. Mandelštami ja N. D. Papaleksi uurimuste alusel *kujutab elektrivool metallides endast elektronide liikumist.*

Selline voolu suund on teaduslikult põhjendatud ja seda nimetatakse füüsikaliseks.

§ 27. VOOLUALLIKA ELEKTROMOTOORNE JÕUD

Joonisel 33 toodud seade võimaldab selgitada vooluallikates toimuvaid põhinähtusi. Seade koosneb kahest isoleeritud leedripuust kuulikesest, mis on laetud ühesuuruste vastandnimeliste laengutega $+q$ ja $-q$ ning asetatud kahe isoleeritud metallkera *1* ja *2* vahele. Kerad on ühendatud juhtme abil.

Erinimeliste laengute $+q$ ja $-q$ vahel mõjuvate jõudude toimel lähenevad kuulikesed teineteisele.

Kulutame mehhaanilist energiat ja hakkame kuulikesi välise (mehhaanilise) jõu mõjul teineteisest eemaldama, ületades seejuures elektrilist tõmbejõudu. Niipea kui kuulikesed puudutavad metallkerasid, tekib nende vahel potentsiaalide vahe ja juhtmes ilmub lühiajaline vool (negatiivsed laengud liiguvad mööda juhet ja neutraliseerivad positiivsed laengud).

Laengute ümberpaigutamiseks juhtmes teevad tööd elektrijõud. Näeme, et juhtmes tekib vool ainult siis, kui mitteelektrilised jõud sooritavad tööd vooluallika elektrivälja jõudude vastu.

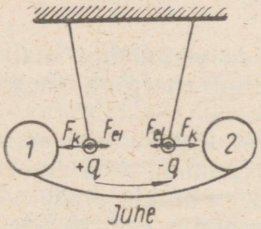
Et säilitada pidevat potentsiaalide vahet keradel, on vastavalt energia jäävuse ja muundumise seadusele vaja pidevalt sooritada tööd elektrilaengute ümberpaigutamiseks vooluallika sees elektrivälja jõudude vastu.

Eespool toodust järeldub:

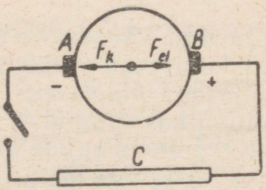
a) *elektrilaengute eraldamiseks üksteisest vooluallika sees on vaja elektriväljaga vastassuunas mõjuvat jõudu. Seda jõudu nimetatakse kõrvaljõuks, sest see sooritab tööd väljastpoolt saadud energia (mehhaanilise, keemilise jt.) arvel;*

b) *püsiva potentsiaalide vahe säilitamiseks vooluallika poolustel (keradel 1 ja 2) on vaja, et kõrvaljõud sooritaksid pidevalt tööd elektrilaengute ümberpaigutamisel vooluallika sees elektrivälja jõudude vastu.*

Kõrvaljõudude mõjul toimub vabade elektronide ümberpaigutumine ühelt pooluselt teisele, näiteks pooluselt *B* poolusele *A* (joon. 34).



Joon. 33.



Joon. 34.

Kui tarbija on välja lülitatud, siis elektronide kogunemisel poolusele *A* kasvab tema negatiivne potentsiaal. Samavõrd kasvab ka pooluse *B* positiivne potentsiaal.

Elektrivälja tugevus vooluallika sees kasvab, järelikult suureneb ka elektrijõud F_{el}, mis takistab kõrvaljõudu F_k vabade elektronide ümberpaigutamisel. Kui elektrijõud saab võrdseks kõrvaljõuga ($F_{el}=F_k$), siis kõrvaljõud enam tööd ei tee ja potentsiaalide vahe vooluallika poolustel saavutab suurima väärtuse. Energia jäävuse ja muundumise seaduse põhjal *koguneb kõrvaljõudude töö tulemusena lahtise vooluringi korral vooluallikasse potentsiaalset energiat.*

Kui sulgeda vooluring, siis sooritavad kõrvaljõud energiavaru arvel tööd laengu ümberpaigutamiseks läbi kogu vooluringi.

Suurust, mida mõõdetakse laengu ümberpaigutamisel kogu suletud vooluringi ulatuses tehtud töö ja laengu suuruse suhtega, nime-

tatakse vooluallika elektromotoorseks jõuks (lühendatult tähistatakse emj. ehk E).

Siit on näha, et

$$E = \frac{A}{q},$$

s. t. elektromotoorne jõud ei ole jõud sõna otseses mõttes. Elektromotoorse jõu ühikuks on

$$E = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{C}} = \frac{1\,\mathrm{V}\cdot 1\,\mathrm{C}}{1\,\mathrm{C}} = 1\,\mathrm{V}.$$

Kui $q = 1$ C, siis $E = A$. Sellest järgneb, *et vooluallika emj. on arvuliselt võrdne kõrvaljõudude poolt sooritatud tööga ühiklaengu viimisel läbi kogu kinnise vooluringi. Emj. mõõdetakse voltides nagu pingetki.* Avatud vooluringi korral on pinge vooluallika poolustel võrdne tema emj.-ga.

§ 28. VOOLURINGI VÄLIS- JA SISEOSA. PINGELANGUS VOOLURINGI VÄLISOSAS

Vooluringi välisosaks nimetatakse seda vooluringi osa, milles laengud kulutavad elektriväljas omandatud energiat. Joonisel 34 on vooluringi välisosaks osa *ACB*.

Vooluallikas muundab mingit energiat elektrivoolu energiaks. Ta tekitab potentsiaalide vahe juhi otstel ja hoiab seda alal. Vooluallikas ei tekita aga elektrilaenguid endid, ta ainult paneb nad korrastatult liikuma. Et laengute ümberpaiknemine elektrivälja mõjul toimub vooluringi välisosa ulatuses, siis peab mistahes kahe punkti vahel ahela välisosas eksisteerima potentsiaalide vahe. Suurim potentsiaal on vooluallika positiivsel poolusel, väikseim — negatiivsel. Potentsiaali vähenemist punktist punkti vooluringi välisosas («+»-lt «−»-le) nimetatakse potentsiaali languseks.

Vooluallika poolustevahelist pinget kinnise vooluringi korral nimetatakse tema klemmide pingeks.

Vooluallika klemmide pinge on arvuliselt võrdne tööga, mida sooritab vooluallikas ühiklaengu viimisel läbi vooluringi välisosa.

SI-süsteemis on pingeühik 1 V, mis võrdub

$$1\,\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}} = \frac{1}{300}\ \text{pü}.$$

Seadet, mis on ette nähtud vooluallika emj. ja pingelanguse mõõtmiseks vooluringi välisosas, nimetatakse voltmeetriks. Tuleb märkida, et pingelangus toimub ka vooluringi siseosas (vooluallika sees). Vastasel korral ei tekiks suletud vooluringis voolu.

§ 29. VOOLUTUGEVUS, SELLE ÜHIKUD

Kui säilitada juhi otstel püsiv potentsiaalide vahe, siis elektrilaeng, mis läbib juhi ristlõiget võrdsetes ajavahemikes, jääb ühesuguseks, s. t. tekib alalisvool.

Igapäevase elu kogemustest teame, et elektrilamp trammis tarvitab vähem voolu kui trammimootor. Alalisvoolude kvantitatiivseks iseloomustamiseks kasutatakse voolutugevust.

Suurust, mida mõõdetakse juhi ristlõiget läbinud laengu ja vastava aja suhtega, nimetatakse voolutugevuseks ehk lihtsalt vooluks.

Voolutugevus võrdub arvuliselt ajaühikus juhi ristlõiget läbinud laenguga.

Tähistades laengu suuruse tähega q, aja tähega t ja voolutugevuse tähega I, siis vastavalt definitsioonile saame

$$I = \frac{q}{t}.$$

Kui $q = 1$ C ja $t = 1$ s, siis

$$I = \frac{1\text{ C}}{1\text{ s}} = 1\frac{\text{C}}{\text{s}} = 1\text{ A}.$$

Sellist voolutugevuse ühikut nimetatakse ampriks prantsuse füüsiku Ampère'i (1775—1836) auks.

Rahvusvahelises ühikute süsteemis (SI) on tarvitusele võetud järgmine definitsioon: *amper on sellise alalisvoolu tugevus, mis, läbides vaakuumis teineteisest 1 m kaugusel asuvat kahte paralleelset, lõpmata pikka ja kaduvväikese ristlõikega silindrikujulist juhet, põhjustaks nende juhtmete vahel jõu* $2 \cdot 10^{-7}$ *N juhtme pikkuse iga meetri kohta.*

Praktikas tuleb tihti kasutada tunduvalt väiksemaid voolutugevuse ühikuid: milliamper (mA) ja mikroamper (μA). Voolutugevuse ühikute vahelised seosed:

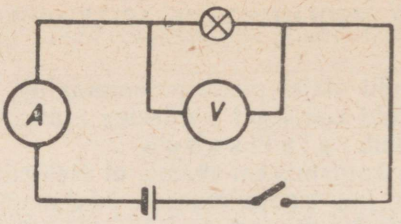
$$1\text{ A} = 10^3\text{ mA} = 10^6\ \mu\text{A};\ 1\text{ mA} = 0{,}001\text{ A};\ 1\ \mu\text{A} = 0{,}000\,001\text{ A}.$$

§ 30. AMPERMEETER, VOLTMEETER JA GALVANOMEETER NING NENDE LÜLITAMINE AHELASSE

Voolutugevuse mõõtmiseks kasutatavat mõõduriista nimetatakse ampermeetriks.

Väga väikeste voolude mõõtmiseks (alla 1 μA) kasutatakse mõõduriista, mida nimetatakse galvanomeetriks.

Pinge mõõtmiseks antud vooluringi osas kasutatakse voltmeetrit.



Joon. 35.

Ampermeeter või galvanomeeter lülitatakse vooluringi järjestikku ahelaosaga, milles voolutugevust mõõdetakse, voltmeeter aga paralleelselt selle osaga, mille pinget tahetakse mõõta (joon. 35).

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse elektrivooluks?
2. Millist voolu suunda kasutatakse tehnikas?
3. Millist voolu suunda nimetatakse füüsikaliseks?
4. Mida kujutab endast elektrivool metallides?
5. Mis on vooluring? Mille poolest erineb kinnine vooluring lahtisest?
6. Mis on elektromotoorne jõud?
7. Mida kujutavad endast nn. kõrvaljõud?
8. Mis on vooluringi sise- ja välisosa?
9. Mis on potentsiaali langus vooluringi välisosas?
10. Mida nimetatakse voolutugevuseks?
11. Milline on vool tugevusega üks amper?
12. Kuidas lülitatakse vooluringi ampermeeter ja kuidas voltmeeter?
13. Milline laeng läbib 5 minutiga juhet, kui voolutugevus on 0,2 A?

Vastus: 60 C.

§ 31. JUHI TAKISTUS. TAKISTUSÜHIK. ELEKTRIJUHTIVUS

Kui muuta pinget vooluahela antud osas, siis muutub ka voolutugevus, kuid pinge ja voolutugevuse suhe jääb konstantsel temperatuuril samaks, s. t.

$$\frac{U}{I} = \text{const.}$$

See suurus iseloomustab antud juhi (või tarbija) elektrilisi omadusi. Teiste sõnadega, *voolutugevus vooluringi antud osas on võrdeline sellele osale rakendatud pingega.*

Nagu juba märgitud, kujutab elektrivool metallides endast vabade elektronide korrastatud liikumist.

Et aatomid ja ioonid on soojuslikus võnkliikumises, siis põrkavad elektronid liikumisel nende vastu. Arusaadavalt toimuvad ka elektronide omavahelised põrked.

Elektronide ja aatomite ning elektronide omavahelise mõju-

mise tulemusena tekivad elektronidele mitmesugustes suundades mõjuvad jõud. See kutsub esile teatava kaootilisuse elektronide liikumises ja põhjustab voolutugevuse vähenemist. Järelikult takistab juht elektrivoolu läbiminekut temast, s. t. *tal on elektritakistus.*

Et vooluringi antud osas on pinge U suhe voolutugevusse I muutumatu ja sõltub ainult juhist, siis on kokku lepitud mõõta juhi takistust suhtega:

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

Kui $U = 1\,\mathrm{V}$ ja $I = 1\,\mathrm{A}$, siis

$$R = \frac{1\,\mathrm{V}}{1\,\mathrm{A}} = 1\,\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}} = 1\,\Omega \text{ (oom)}.$$

Takistusühikuks SI-süsteemis on oom. Nimetus on pandud saksa füüsiku Ohmi (1787—1854) auks.

Takistusühikuks 1 Ω võetakse sellise juhi takistus, milles tekib vool 1 A, kui pinge tema otstel on 1 V.

Suurust, mis võrdub juhi takistuse R pöördarvuga, nimetatakse tema juhtivuseks:

$$g = \frac{1}{R}.$$

SI-süsteemis on juhtivusühikuks oomi pöördväärtus, nn. siimens:

$$g = \frac{1}{\Omega} = \Omega^{-1} = 1\,\mathrm{S}.$$

§ 32. OHMI SEADUS VOOLURINGI OSA KOHTA

Me juba rääkisime, et voolutugevus ahela antud osas on võrdeline pingega. Selles on kerge veenduda. Koostades näiteks vooluringi vanast taskulambipatareist (mille pinge on väike) ja elektrilambist, siis helendub lamp nõrgalt või ei helendu üldse, mis näitab, et lampi läbib nõrk vool. Asendades patarei uuega, mille pinge on küllalt suur, märkame, et lamp helendub eredamalt. See tähendab, et lampi läbib tugevam vool. Lülitades ahelasse veel ühe, kaks jne. patareid, s. t. suurendades pinget mingi arv korda, näeme, et voolutugevus suureneb sama arv korda (juhul kui juhi temperatuur voolu mõjul oluliselt ei muutu).

Lülitades ahelasse (tema antud ossa) erineva takistusega juhte (ühe ja sama potentsiaalide vahe korral), märkame, et vooluringi osa takistuse muutumisel muutub ka vool temas. Nimelt näitab katse, et juhi takistuse suurenemisega voolutugevus väheneb.

TRÜ Raamatukogu

Märkisime juba, et pinge suhe vooluringi antud osas voolava vooluga ongi selle osa takistuse mõõt, s. t.

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

Sellest valemist saame

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

Tulemuse võib sõnastada järgmiselt: *voolutugevus vooluringi antud osas on võrdeline pingega selle juhtmelõigu otstel ja pöördvõrdeline tema takistusega.*

Seaduse avastas eksperimentaalselt saksa õpetlane Ohm 1827. a. ja seda nimetatakse tema auks Ohmi seaduseks vooluringi osa kohta.

Ohmi seaduse võib üles kirjutada veel järgmisel kujul:

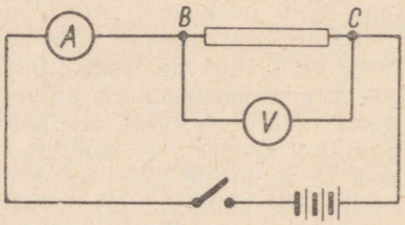
$$U = I \cdot R.$$

See tähendab, et *pingelangus vooluringi osas on võrdne selle osa takistuse ja teda läbiva voolu korrutisega.*

§ 33. JUHI TAKISTUSE SÕLTUVUS AINEST, JUHI PIKKUSEST JA RISTLÕIKE PINDALAST

Koostame ahela joonisel 36 näidatud skeemi järgi. Paigutades ahela ossa *BC* kordamööda samast ainest ja sama ristlõike pindalaga, kuid erineva pikkusega juhte, märkame, et mida pikem on juht, seda väiksem vool teda läbib. Järelikult on pikemal juhil suurem takistus.

Võtame mitu samast ainest ja ühesuguse pikkusega, kuid erineva ristlõikega juhet. Ristlõike pindala suurenemisega suureneb voolutugevus, mis tähendab aga takistuse vähenemist. Edasi võtame mitu ühesuguste mõõtmetega, kuid erinevast ainest juhet (näit. vasest, alumiiniumist, kroomniklist jne.) ja veendume, et vaskjuhet



Joon. 36.

läbib tugevam vool kui alumiinium- või kroomnikkeljuhet. See aga omakorda tähendab, et nende ainete takistused on erinevad. Järelikult sõltub takistus veel juhi ainest.

Erinevate ainete takistuste iseloomustamiseks on tarvitusele võetud eritakistuse mõiste, mida tähistatakse kreeka tähega ϱ (kreeka täht «roo»).

Aine eritakistuseks nimetatakse sellest ainest 1 m pikkuse ja 1 mm² ristlõike pindalaga silindrikujulise juhi takistust 20° C juures.

Juhtide takistuste täpse mõõtmise tulemusena on kindlaks tehtud, et *jääval temperatuuril on juhi takistus võrdeline tema pikkusega, pöördvõrdeline ristlõike pindalaga ja sõltub juhi ainest.*

Tähistades juhi pikkuse tähega l, ristlõike pindala tähega S ja eritakistuse tähega ϱ, võime kirjutada:

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

Siit saame: $RS = \varrho l$, kust eritakistus

$$\varrho = \frac{RS}{l} .$$

Kui $R = 1\ \Omega$, $S = 1\ \text{mm}^2$ ja $l = 1\ \text{m}$, siis saame eritakistuse ühikuks $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$. SI-süsteemis on eritakistuse ühikuks $\frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \Omega \cdot \text{m}$.

Järgnevalt toome tabeli mõnede ainete eritakistuste kohta.

Materjal	ϱ $\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	$\varrho \cdot 10^{-8}$ $(\Omega \cdot \text{m})$	Materjal	ϱ $\left(\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$	$\varrho \cdot 10^{-8}$ $(\Omega \cdot \text{m})$
Alumiinium	0,029	2,9	Nikroom (sulam)	1,1	110
Elavhõbe	0,94	94	Plii	0,21	21
Hõbe	0,016	1,6	Raud	0,13	13
Konstantaan (sulam)	0,5	50	Vask	0,018	1,8
Nikeliin (sulam)	0,4	40	Volfram	0,056	5,6

Takistuse arvutamisel valemist $R = \varrho \frac{l}{S}$ ei sõltu resultaat sellest, millistes ühikutes võtta eritakistus ϱ, kui ainult ristlõike pindala ja pikkus on võetud vastavates ühikutes.

Ülesanne 11. Kui pikk tuleb võtta vaskjuhe ristlõike pindalaga 0,5 mm², et ta takistus oleks 9 Ω?

Antud (SI-süsteem)

$\varrho = 1{,}8 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$;

$S = 0{,}5\ mm^2 = 5 \cdot 10^{-7}\ m^2$;

$R = 9\ \Omega$.

l — ?

Lahendus

1. Valemist $R = \varrho \frac{l}{S}$ saame

$RS = \varrho l$, kust $l = \frac{RS}{\varrho}$.

2. Arvutame

$$l = \frac{9\ \Omega \cdot 5 \cdot 10^{-7}\ m^2}{1{,}8 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m;} = 250\ m.$$

Ülesanne 12. 1 km pikkuse vaskjuhtme takistus on 2,55 oomi. Leida juhi diameeter.

Antud (SI-süsteem)

$l = 1\ km = 1000\ m = 10^3\ m$;

$\varrho = 0{,}018 \frac{\Omega \cdot mm^2}{m} = 18 \cdot 10^{-9}\ \Omega \cdot m$;

$R = 2{,}55\ \Omega$.

d — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Ristlõike pindala geomeetriliste mõõtmete kaudu

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

b) Ristlõike pindala takistuse valemist

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

c) Koostame võrrandi $\frac{\pi d^2}{4} = \frac{\varrho l}{R}$, kust

$\pi d^2 R = 4\varrho l$.

d) Leiame juhi diameetri

$$d = \sqrt{\frac{4\varrho l}{\pi R}} = 2\sqrt{\frac{\varrho l}{\pi R}}.$$

2. Arvutame:

$$d = 2\sqrt{\frac{18 \cdot 10^{-9}\ \Omega \cdot m\ 10^3\ m}{3{,}14 \cdot 2{,}55\ \Omega}} = 2\sqrt{\frac{18 \cdot 10^{-6}}{8}\ m^2} =$$

$$= 2\sqrt{\frac{9}{4} \cdot 10^{-6}\ m^2} = \frac{2 \cdot 3}{2} \cdot 10^{-3}\ m = 0{,}003\ m = 3\ mm.$$

Ülesanne 13. Määrata nikeliinjuhtme takistus, kui ta mass on 17,6 kg ja diameeter 2 mm.

Antud (SI-süsteem)

$\varrho = 40 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot m$;

$m = 17{,}6\ kg$;

$D = 8800 \frac{kg}{m^3}$;

$d = 2\ mm = 2 \cdot 10^{-3}\ m$.

R — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Juhtme ruumala $V = \frac{m}{D}$.

b) Ristlõike pindala

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

c) Juhtme pikkus $l = \frac{V}{S}$.

d) Juhtme takistus

$$R = \frac{\varrho l}{S} = \frac{\varrho V}{S^2} = \frac{\varrho \frac{m}{D}}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)^2} = \frac{16\varrho m}{\pi^2 d^4 D}.$$

2. Arvutame:

$$R = \frac{16 \cdot 40 \cdot 10^{-8}\ \Omega\,\text{m} \cdot 17{,}6\ \text{kg}}{3{,}14^2 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^4\ \text{m}^4 \cdot 8800\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{16 \cdot 40 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^{-3}\ \Omega}{10 \cdot 16 \cdot 10^{-12}} = 80\ \Omega.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mis on juhi takistus ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
2. Mis on elektrijuhtivus ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
3. Mida nimetatakse aine eritakistuseks?
4. Kuidas sõltub juhi takistus tema pikkusest, ristlõike pindalast ja ainest?
5. Milleks paigutatakse trammirööbaste ühenduskohtadele muhvid palmikujuliselt punutud vasktraadist?
6. Mitu korda on 1 m nikroomtraadi takistus suurem kui 1 m sama ristlõike pindalaga pliitraadil?

Vastus: 5 korda.

7. Esimene ookeanikaabel (1886) oli 3000 km pikk ja ta diameeter oli 5 mm. Leida takistus, kui $\varrho = 0{,}018\ \frac{\Omega\,\text{mm}^2}{\text{m}}$.

Vastus: 2752 Ω.

8. Leida alumiiniumjuhtme takistus, kui ta mass on 1080 g ja diameeter 2 mm $\left(D = 2{,}7\ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$.

Vastus: 1,2 Ω.

9. Pooli lülitamisel alalisvooluahelasse pingega 1,35 V läbis teda vool 0,27 A. Määrata juhtme pikkus (pooli lahti harutamata), kui ta on konstantaanist ja ta diameeter on 0,6 mm.

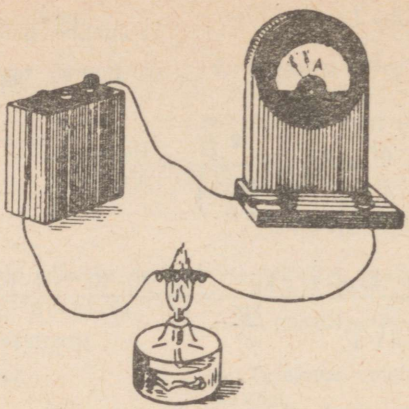
Vastus: 2,83 m.

§ 34. JUHI TAKISTUSE SÕLTUVUS TEMPERATUURIST

Juhi takistus muutub tema temperatuuri muutumisel, kusjuures temperatuuri tõusuga puhaste metallide takistus suureneb, kuid söe, soolade ning hapete lahuste ja pooljuhtide takistus väheneb.

Kui koostada ahel patareist, traatpoolist ja ampermeetrist (joon. 37), siis spiraali soojendamisel näeme, et ampermeetri näit väheneb. See tähendab, et traatpooli takistus suureneb soojendamisel.

Enamiku puhaste metallide korral moodustab takistuse juurde-



Joon. 37.

kasv soojenemisel ühe kraadi võrra umbes 0,004 tema takistusest 0° C juures. Seda suurust nimetatakse *takistuse temperatuuriteguriks ja tähistatakse tähega* α (kreeka täht «alfa»).

Mõnedel sulamitel muutub takistus temperatuuri muutumisel väga vähe. Näiteks nikeliinil (54% vaske, 26% niklit, 20% tsinki) $\alpha = 0{,}0003\ \text{deg}^{-1}$, manganiinil (84% vaske, 4% niklit, 12% mangaani) $\alpha = 0{,}000\,015\ \text{deg}^{-1}$.

Sellistest metallidest traati kasutatakse nendes seadmetes, kus on vaja jäävat takistust (reostaatides, oomi etalonis jne.).

Takistuse temperatuuriteguriks nimetatakse suurust, mis näitab, millise osa esialgsest takistusest (0° C juures) moodustab takistuse juurdekasv temperatuuri tõusmisel 1° C võrra.

Tähistame juhi temperatuuri tähega t, tema takistuse 0° C juures tähega R_0, takistuse antud temperatuuril t tähega R_t, takistuse temperatuuriteguri tähega α ja takistuse juurdekasvu tähega ΔR (kreeka täht «delta»).

1. Leiame takistuse juurdekasvu temperatuuri tõusmisel 0° C kuni t° C-ni:

$$\Delta R = R_t - R_0.$$

2. Leiame, millise osa algtakistusest moodustab takistuse juurdekasv juhtme soojendamisel kuni t °C:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \frac{R_t - R_0}{R_0}.$$

3. Leiame, millise osa algtakistusest moodustab ühekraadisele temperatuurimuutusele vastav takistuse juurdekasv:

$$\frac{\Delta R}{R_0 t} = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Saadud avaldis vastab sisuliselt takistuse temperatuuritegurile, mistõttu võime kirjutada

$$\alpha = \frac{\Delta R}{R_0 t}$$

ehk

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Sellest valemist saab leida takistuse temperatuuriteguri ühiku

$$\alpha = \frac{\Omega}{\Omega \deg} = \frac{1}{\deg} = \deg^{-1}.$$

Tabelis on toodud mõnede ainete takistuse temperatuuritegurid.

Aine	α ($\deg^{-1}$)	Aine	α ($\deg^{-1}$)
Alumiinium	0,0042	Nikeliin	0,000 3
Hõbe	0,004	Nikroom	0,000 3
Konstantaan	0,000 05	Vask	0,004
Manganiin	0,000 015	Volfram	0,004 6

Valemist $\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}$ saame:

$$R_t - R_0 = \alpha R_0 t,$$

siit

$$R_t = R_0 + \alpha R_0 t$$

ehk

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

kus avaldist $1 + \alpha t$ nimetatakse takistuse temperatuuribinoomiks. See näitab, mitu korda suureneb juhi takistus soojenemisel 0° C-lt kuni t° C-ni. Niisiis, *soojenenud juhi takistus on võrdne algtakistuse ja takistuse temperatuuribinoomi korrutisega.*

Kui juht ei soojene mitte 0° C-lt, vaid temperatuurilt t_1 temperatuurini t_2, siis ta takistus muutub R_1-st R_2-ni, kusjuures takistuse temperatuuritegur vahemikus 0° C kuni 100° C peaaegu ei muutu.

Seetõttu metalljuhtide takistuse suurenemist soojenemisel 0° C-lt kuni 100°-ni võib küllaldase täpsusega lugeda võrdeliseks temperatuurimuutusega, s. t.

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} \approx \alpha(t_2 - t_1),$$

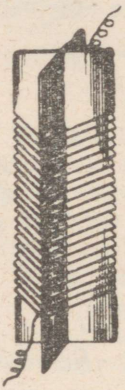
kust

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)].$$

Et saada täpset seadet temperatuuri mõõtmiseks — seadme töö

põhineks takistuse muutumisel sõltuvalt juhi soojenemisest — võetakse raskesti sulav metall (näiteks plaatina või volfram) ja määratakse võimalikult täpselt katsega tema takistuse sõltuvus temperatuurist. Seejärel valmistatakse sellest metallist (traadist) väike pool ja paigutatakse see raskesti sulavast ainest torusse (joon. 38). Niisugust seadet nimetatakse takistustermomeetriks ehk püromeetriks.

Plaatinapüromeeter võimaldab täpselt mõõta temperatuure kuni 1000° C. Vahemikus —20° C kuni +600° C on mõõtmistäpsus 0,0001° C. Püromeetri abil saab mõõta ka madalaid temperatuure. Selleks leitakse püromeetri takistus vedelas õhus (—195° C juures) ning seejärel gradueeritakse skaala —195° C ja 0° C vahel.



Joon. 38.

Nagu näeme, võimaldavad elektrilised termomeetrid mõõta nii madalaid kui ka kõrgeid temperatuure.

Tootmises on väga tähtis teada masinaosade ja seadmete temperatuuri. Nii näiteks soojusseadmes paigutatakse erinevatesse kohtadesse (katla küttekoldesse, heitgaaside väljavoolutorusse jne.) spiraalid, millest igaühest lähevad juhtmed vastava mõõteriista juurde. Operaator võib kohalt lahkumata määrata seadmete üksikosade temperatuuri, keerates lülitit lihtsalt ühtedelt juhtmetelt teistele. Sel teel võib jälgida mitmete ahjude temperatuuri tehastes, soojenemist ja jahtumist valatud detailides jne.

Registreerivate seadmetega ühendatud püromeetritel on tähtis osa masinate töö tundmaõppimisel. Ühendades püromeetri osuti signalisaatoriga (lambike, elektrikõlisti jt.), võib automaatselt signaliseerida seadmele ohtliku temperatuuri saabumisest. Näiteks sulamispunkti-lähedasel temperatuuril lülitatakse automaatselt sisse punane tuli või kõlisti või vähendatakse pöörlemiskiirust.

Laialdaselt kasutatakse tehnikas termistore, s. t. aineid negatiivse takistuse temperatuuriteguriga. Tugevamini ilmnevad need omadused pooljuhtide juures, millel on negatiivsed ja arvuli-

selt väga suured temperatuuritegurid (tuhandeid kordi suuremad kui metallidel). Seetõttu väheneb pooljuhtide takistus temperatuuri tõusul väga kiiresti ja voolutugevus kasvab.

Millega seletada erinevusi elektrijuhtivuses erinevate ainete soojendamisel?

Ühelt poolt põhjustab aine temperatuuri tõus elektronide ja molekulide vaheliste põrgete sagenemist, elektronide liikumine muutub kaootilisemaks, nende keskmine kiirus väheneb ja seega väheneb ka voolutugevus. Järelikult põhjustab temperatuuri tõus takistuse suurenemist. Oluline osa on laengukandjate liikuvusel. Mida suurem on liikuvus, seda väiksem on takistus ja vastupidi.

Teisest küljest võib temperatuuri tõus põhjustada vabade elektronide ja ioonide arvu suurenemist aine ruumalaühikus, s. t. võib põhjustada laengukandjate kontsentratsiooni suurenemist aines, järelikult vool suureneb ja takistus väheneb.

Sõltuvalt sellest, milline loetletud põhjustest domineerib, võib aine takistus temperatuuri tõusmisel kas suureneda (metallid), väheneda (süsi, pooljuhid) või jääda praktiliselt muutumatuks (mõned sulamid).

Ülesanne 14. Volframhõõgniidiga elektrilambil on 0° C juures takistus 300 Ω ja hõõgumisel 2400 Ω. Määrata hõõgniidi temperatuur tööolukorras.

Antud (SI-süsteem)

$R_0 = 300\ \Omega$;

$R_t = 2400\ \Omega$;

$\alpha = 0{,}0046\ \text{deg}^{-1}$.

t — ?

Lahendus

1. Valemist $\alpha = \dfrac{R_t - R_0}{R_0 t}$

saame

$$\alpha R_0 t = R_t - R_0,$$

siit

$$t = \frac{R_t - R_0}{R_0 \alpha}.$$

2. Arvutame:

$$t = \frac{2400\ \Omega - 300\ \Omega}{300\ \Omega \cdot 0{,}0046\ \text{deg}^{-1}} = \frac{2100\ \Omega}{300\ \Omega \cdot 0{,}0046\ \text{deg}^{-1}} = \frac{7}{0{,}0046\ \text{deg}^{-1}} \approx 1522^\circ\ \text{C}.$$

Ülesanne 15. Kui pikk tuleb 20° C juures võtta nikeliintraat diameetriga 0,4 mm, et temperatuuril 820° C oleks ta takistus 49,6 Ω?

Antud

$d = 0{,}4$ mm;

$t_1 = 20^\circ$ C;

$t_2 = 820^\circ$ C;

$R_2 = 49{,}6\ \Omega$;

$\varrho = 0{,}4\ \dfrac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$;

$\alpha = 0{,}0003\ \text{deg}^{-1}$.

l — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Ristlõike pindala:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

b) Traadi takistus temperatuuril t_1:

$$R_1 = \frac{R_2}{1 + \alpha(t_2 - t_1)}.$$

c) Juhi pikkus:

$$l = \frac{R_1 S}{\varrho} = \frac{R_1 \pi d^2}{4\varrho} = \frac{\pi d^2 R_2}{4\varrho[1+\alpha(t_2-t_1)]}.$$

2. Arvutame:

$$t = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}16\ \text{mm}^2 \cdot 49{,}6\ \Omega}{4 \cdot 0{,}4\ \frac{\Omega\ \text{mm}^2}{\text{m}}\ [1+0{,}0003\ \text{deg}^{-1}(820-20)\ \text{deg}]} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 49{,}6\ \text{m}}{12{,}4} = 3{,}14 \cdot 4\ \text{m} = 12{,}56\ \text{m} \approx 12{,}6\ \text{m}.$$

Ülesanne 16. Enne töö algust oli dünamomasina elektromagneti vaskmähise takistus 100 Ω. Ümbritseva õhu temperatuur on 25° C. Mõne tunni töötamise järel tõusis mähise takistus 120 Ω-ni. Millise temperatuurini oli soojenenud mähis?

Antud (SI-süsteem)

$t_1 = 25°\ \text{C}$;
$R_1 = 100\ \Omega$;
$R_2 = 120\ \Omega$;
$\alpha = 0{,}004\ \text{deg}^{-1}$.

t_2 — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Valemist

$$R_2 = R_1[1+\alpha(t_2-t_1)],$$

avaldame temperatuuride vahe:

$$R_2 = R_1 + R_1\alpha(t_2-t_1)$$

ehk $R_2 - R_1 = R_1\alpha(t_2-t_1)$, kust $t_2 - t_1 = \frac{R_2-R_1}{R_1\alpha}$.

b) Lõpptemperatuur

$$t_2 = \frac{R_2-R_1}{R_1\alpha} + t_1.$$

2. Arvutame:

$$t_2 = \frac{120\ \Omega - 100\ \Omega}{100\ \Omega \cdot 0{,}004\ \text{deg}^{-1}} + 25°\ \text{C} =$$

$$= \frac{20}{0{,}4\ \text{deg}^{-1}} + 25°\ \text{C} = 50°\ \text{C} + 25°\ \text{C} = 75°\ \text{C}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse takistuse temperatuuriteguriks?
2. Kuidas tuletatakse takistuse temperatuuriteguri valem?
3. Milline on takistuse temperatuuriteguri ühik?
4. Milliste ainete jaoks on takistuse temperatuuritegur positiivne ja milliste jaoks negatiivne?
5. Kuidas tuletada valemit $R_1 = R_0(1+\alpha t)$?
6. Kuidas tuletatakse ligikaudne valem

$$R_2 = R_1[1+\alpha(t_2-t_1)]?$$

7. Millisel juhi omadusel rajaneb takistustermomeetri töö?
8. Mis on termistorid ja kus neid kasutatakse?

9. Kuidas võib seletada ainete erinevat juhtivust nende temperatuuri muutumisel?

10. Elektrilambi volframniidi takistus 0° C juures on 20 Ω. Lambi töötamisel on ta takistus 204 Ω. Määrata hõõgniidi temperatuur tööolukorras.

Vastus: 2000° C.

11. Vasktraadist poolil on +5° C juures takistus 0,5 Ω. Ümbritseva õhu temperatuuri tõusul kasvas takistus kuni 0,54 Ω-ni. Millise temperatuurini soojenes õhk?

Vastus: +25° C.

§ 35. ÜLIJUHTIVUSE MÕISTE

Elektrijuhtivuse mõistest järeldub, et mida väiksem on juhi takistus, seda suurem on tema juhtivus. Puhaste metallide soojendamisel nende takistus suureneb ja jahutamisel väheneb. Juhtivusega on lugu vastupidine — soojendamisel väheneb ja jahutamisel suureneb.

1911. a. jahutas Hollandi füüsik Kamerlingh-Onnes elavhõbeda järk-järgult kuni 4,3° K ja vaatles takistuse järkjärgulist vähenemist, mis langes kokku valemi $R_t = R_0(1+\alpha t)$ abil saadud tulemustega. Viies temperatuuri 4,3° K-lt kuni 4,2° K-ni, märkas õpetlane takistuse hüppelist vähenemist 10 miljardit korda, s. t. takistus muutus praktiliselt nulliks, võrreldes elavhõbeda takistuse muutumisega kuni temperatuurini 4,3° K. Järelikult oli tegemist elektrijuhtivuse hüppelise suurenemisega.

Elavhõbedasammast läbis tugev elektrivool, kuigi pinge tema otstel alanes peaaegu nullini. Sellest järeldus, et elavhõbeda takistus osutus praktiliselt võrdseks nulliga. Niisugust nähtust hakati nimetama ülijuhtivuseks.

Ülijuhtivus ei esine ainult elavhõbedal. Ülijuhtideks muutuvad plii 7,26° K, alumiinium 1,14° K, tsink 0,79° K, magneesium 0,7° K, tallium 2,3° K, tantaal 4,4° K juures jne.

Vool, mis läbib juhti ülijuhtivuse olukorras, ei tee mingit tööd, s. t. liikuvate laengute energia ei muutu. Kui säilitada temperatuuri, mille juures aine muutub ülijuhtivaks, siis võib vool kesta nõrgenemata kuitahes kaua. Mõnedes katsetes ulatus vool kuni 1250 A-ni pliitraadi ristlõike pindala 1 mm² kohta, kuid traat ei soojenenud. Järelikult energiakadusid juhtmes ei tekkinud.

Igakülgselt uurisid ülijuhtivuse nähtust nõukogude õpetlased A. I. Salnikov, L. D. Landau ja N. N. Bogoljubov.

§ 36. REOSTAADID

Seadmeid, mis võimaldavad muuta ahela takistust ja koos sellega ka voolutugevust, nimetatakse reostaatideks.

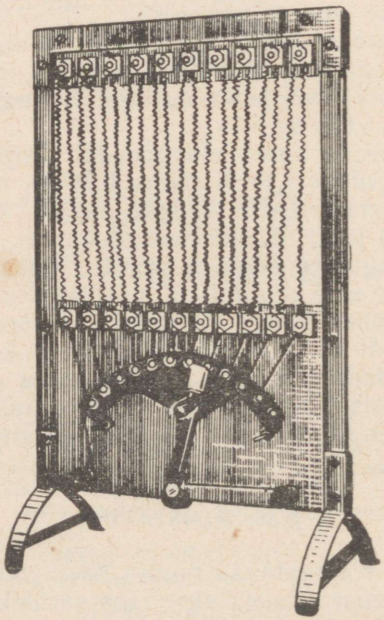
Traatreostaadid valmistatakse spetsiaalsetest sulamitest — konstantaanist, manganiinist, nikeliinist, nikroomist. Need sulamid

on suure eritakistusega ja väikese takistuse temperatuuriteguriga, mistõttu nendest valmistatud reostaadid võivad märgatavalt soojeneda, ilma et takistus seejuures oluliselt muutuks.

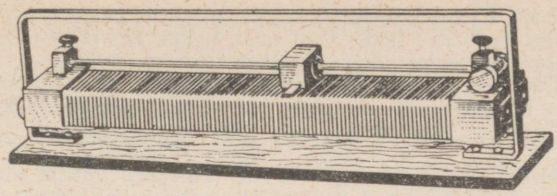
Reostaate on mitut tüüpi. Sagedamini kasutatakse väntreostaate, liugkontaktreostaate ja takistusmagasine.

Väntreostaati (joon. 39) kasutatakse peamiselt tehnikaseadmetes (näiteks trammis). Tema abil on võimalik ahela takistust astmeliselt muuta.

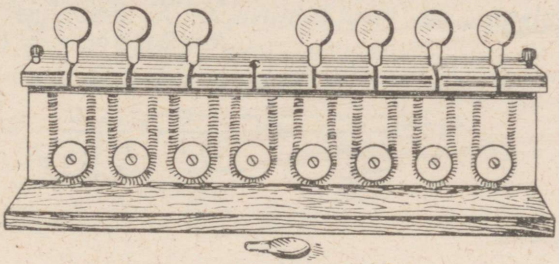
Neil juhtudel, kus takistust on vaja sujuvalt muuta, näiteks teaduslike uurimiste puhul, raadiovastuvõtjates, televiisorites jne., kasutatakse liugkontaktiga reostaate (joon. 40). Viimane koosneb isolaatoritest ja sellele mähitud isoleerimata traadist. Seda mööda võib sujuvalt liikuda metall-liugur, mis ühendab juhtmekeerde üksteise järel ahelasse. Juhul kui on vaja teada ahelasse lülitatud takistuse suurust, kasutatakse takistusmagasini (joon. 41). See koosneb reast kasti monteeritud poolidest. Kasti ülaosas paiknevad massiivsed, üksteisest piludega isoleeritud vaskplaadid. Piludesse on võimalik paigutada pistikud. Pistiku kohalt läheb vool mööda vaskplaati (läbi pistiku) ja möödub takistuspoolist. Kui pistik välja võtta, siis läheb vool läbi takistuspooli, mis ühendab kaht vastavat plaati. Kasti ülaosas on märgitud vastavate poolide takistused.



Joon. 39.



Joon. 40.



Joon. 41.

Ülesanne 17. Leida pinge 10 m pikkuse alumiiniumjuhtme otstel, kui juhtme diameeter on 0,2 mm ja vool 70 mA.

Antud (SI-süsteem)

$l = 10$ m;

$d = 0{,}2$ mm $= 2 \cdot 10^{-4}$ m;

$\varrho = 2{,}9 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot$ m;

$I = 70$ mA $= 0{,}07$ A.

U — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Juhtme ristlõike pindala

$$S = \frac{\pi d^2}{4}.$$

b) Juhtme takistus

$$R = \frac{\varrho l}{S} = \frac{\varrho l}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4\varrho l}{\pi d^2}.$$

c) Ohmi seadusest $I = \frac{U}{R}$ leiame pinge juhtme otstel

$$U = I \cdot R = \frac{I \cdot 4\varrho l}{\pi d^2} = \frac{4\varrho I \cdot l}{\pi d^2}.$$

2. Arvutame:

$$U = \frac{4 \cdot 2{,}9 \cdot 10^{-8}\ \Omega \cdot \text{m} \cdot 10\ \text{m} \cdot 0{,}07\ \text{A}}{3{,}14 \cdot (2 \cdot 10^{-4})^2\ \text{m}^2} \approx 0{,}65\ \text{V}.$$

Ülesanne 18. Elektrihõõglambi volframniidi pikkus on 0,2 m ja ristlõike pindala 0,000 56 mm². Kui tugev vool läbib lampi, kui talle rakendatakse pinge 220 V ja hõõgniidi temperatuur tööolukorras on 2000° C?

Antud

$l = 0{,}2$ m;

$S = 0{,}000\,56$ mm²;

$\alpha = 0{,}0046\ \text{deg}^{-1}$;

$\varrho = 0{,}056\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$;

$t = 2000°$ C;

$U = 220$ V.

I — ?

Lahendus

(süsteemivälistes ühikutes)

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Niidi takistus 0° C juures

$$R_0 = \frac{\varrho l}{S}.$$

b) Niidi takistus t° C juures

$$R_t = R_0(1+\alpha t) = \frac{\varrho l}{S}(1+\alpha t).$$

c) Niiti läbiv vool

$$I = \frac{U}{t} = \frac{U}{\frac{\varrho l}{S}(1+\alpha t)} = \frac{US}{\varrho l(1+\alpha t)}.$$

2. Arvutame:

$$I = \frac{220\ \text{V} \cdot 0{,}000\,56\ \text{mm}^2}{0{,}056\ \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 0{,}2\ \text{m} \cdot (1+0{,}004\,6\ \text{deg}^{-1} \cdot 2000°\ \text{C})} =$$

$$= \frac{220\ \text{V}}{100\ \Omega \cdot 0{,}2 \cdot 10{,}2} = \frac{22\ \text{V}}{2 \cdot 10{,}2\ \Omega} = \frac{11}{10{,}2}\ \text{A} = 1{,}08\ \text{A}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mis on ülijuhtivus?
2. Milleks kasutatakse reostaate ja missugused tehniliste reostaatide tüübid leiavad sagedamat kasutamist?
3. Milles seisab Ohmi seadus vooluringi osa kohta?
4. Ohmi seadusest vooluringi osa kohta $I = \frac{U}{R}$, kust $R = \frac{U}{I}$. Miks ei või öelda, et takistus on võrdeline pingega ja pöördvõrdeline voolutugevusega?
5. Miks ei tohi 120 V pingele määratud elektrilampi lülitada võrku pingega 220 V?
6. Määrata voolutugevus elektripliidi küttespiraalis, kui ta on lülitatud võrku pingega 120 V ja takistus on 24 Ω?

Vastus: 5 A.

7. Määrata nikroomtraadi pikkus, mida 110 V pingega võrgus läbib 5 A vool. Traadi ristlõike pindala on 0,15 mm².

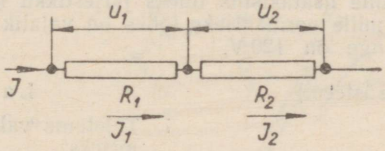
Vastus: 3 m.

Kui ühe takisti lõpp ühendada teise algusega, siis sellist lülitust nimetatakse järjestikuseks.

Olgu kaks juhti takistustega R_1 ja R_2 ühendatud järjestikku (joon. 42). Lülitades ampermeetri ahela erinevatesse kohtadesse, veendume, et *järjestiklülituse korral on voolutugevus ahela kõikides osades ühesugune* (I reegel), s. t.

$$I_1 = I_2 = I.$$

Mõõtes pingelangust ahela erinevates osades ja vooluallika klemmidel, veendume, et *järjestiklülitusel on pingelangus allika*



Joon. 42.

klemmidel võrdne pingelanguste summaga ahela üksikutes osades (II reegel), s. t.

$$U = U_1 + U_2.$$

Samasugusele järeldusele võib jõuda, teades, et pinge ahela antud osas on arvuliselt võrdne tööga, mida on vaja sooritada ühiklaengu viimisel läbi selle vooluringi osa.

Ühiklaengu viimiseks läbi kogu ahela kulutatud töö on järjestiklülituse korral võrdne sama laengu viimisel läbi üksikute ahelaosade sooritatud tööde summaga, s. t. $U = U_1 + U_2$.

Tähistades ahela kogutakistuse tähega R, võime Ohmi seaduse põhjal kirjutada:

$$U = IR.$$

Kasutades Ohmi seadust vooluringi üksikute osade kohta, saame:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2.$$

Jagades esimese võrduse teisega, leiame:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2},$$

s. t. *pinged üksikutes vooluringi osades jaotuvad võrdeliselt nende osade takistustega* (III reegel).

Liidame U_1 ja U_2 ning saame

$$U_1 + U_2 = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2).$$

Teades, et $U_1+U_2=U$, kirjutame:

$$U=I(R_1+R_2).$$

Võrreldes seda võrdusega $U=IR$, näeme, et $IR=I(R_1+R_2)$, kust

$$R=R_1+R_2,$$

s. t. *ahela kogutakistus järjestiklülituse korral on võrdne üksikute takistuste summaga* (IV reegel).

Erijuhul, kui järjestikku ühendatud n tarbijal on ühesugune takistus R_0, on ahela kogutakistus

$$R=n\cdot R_0.$$

Ülesanne 19. Milline lisatakistus tuleks järjestikku lülitada projekteerimisseadme kaarlambiga, mille normaalseks tööks on vajalik 12 A vool 48 V pinge juures, kui võrgu pinge on 120 V.

Antud (SI-süsteem)

$U_1=48$ V;
$I=12$ A;
$U=120$ V.

R_1 — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.
   a) Välisahela kogutakistus

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

   b) Kaare takistus

$$R_k=\frac{U_k}{I}.$$

   c) Järjestikku ühendatud takistite kogutakistus:

$$R=R_1+R_k \quad \text{ehk} \quad \frac{U}{I}=R_1+\frac{U_k}{I}.$$

   d) Leiame lisatakistuse:

$$R_1=\frac{U}{I}-\frac{U_k}{I}=\frac{U-U_k}{I}.$$

2. Arvutame:

$$R_1=\frac{120\text{ V}-48\text{ V}}{120\text{ A}}=\frac{72\text{ V}}{12\text{ A}}=6\ \Omega.$$

Ülesanne 20. 110 V pingega võrku on vaja lülitada 15 lampi igaüks takistusega 12 Ω. Igale lambile lubatud pinge on 6 V. Määrata lampidega järjestikku lülitatava lisatakistuse suurus ja voolutugevus ahelas.

Antud (SI-süsteem)

$U_{\text{üld}}=110$ V;
$U_1=6$ V;
$R_1=12\ \Omega$;
$n=15$ lampi.

R_2 — ?
I — ?

Lahendus

1. Et järjestiklülituse korral on ahela kõikides osades üks ja seesama vool, siis Ohmi seadusest vooluringi osa kohta leiame:

$$I=\frac{U_1}{R_1}.$$

2. Leiame pinge 15 järjestikku lülitatud lambist koosnevas ahelaosas:

$$U=U_1\cdot n.$$

3. Leiame pinge lisatakistuse klemmidel:

$U_{üld} = U + U_2$, kust $U_2 = U_{üld} - U$.

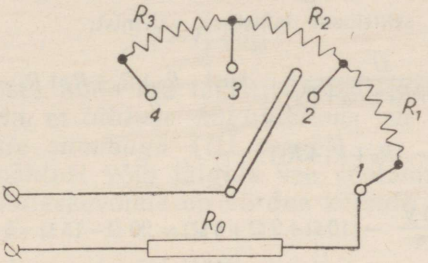
4. Leiame lisatakistuse $R_2 = \frac{U_2}{I}$.

5. Arvutame:

$$I = \frac{6\ \text{V}}{12\ \Omega} = 0{,}5\ \text{A}; \qquad U = 6\ \text{V} \cdot 15 = 90\ \text{V};$$

$$U_2 = 110\ \text{V} - 90\ \text{V} = 20\ \text{V}; \quad R_2 = \frac{20\ \text{V}}{0{,}5\ \text{A}} = 40\ \Omega.$$

Ülesanne 21. Määrata reostaadi sektsioonide takistused (joon. 43), teades, et voolutugevus läbi tarbija takistusega $R_0 = 10\ \Omega$ muutub vända ümberpaigutamisel ühelt kontaktilt teisele 2 A võrra ja pinge ahelas on 120 V.



Joon. 43.

Antud (SI-süsteem)

$R_0 = 10\ \Omega$;
$U = 120\ \text{V}$;
$\Delta I = 2\ \text{A}$.

R_1 — ?
R_2 — ?
R_3 — ?

Lahendus

1. Leiame voolutugevuse ahelas sisselülitatud reostaadi korral (vänt on kontaktil *1*)

$$I_0 = \frac{U}{R_0} = \frac{120\ \text{V}}{10\ \Omega} = 12\ \text{A}.$$

2. Leiame voolutugevuse ahelas esimese sisselülitatud sektsiooni korral (vänt on kontaktil *2*)

$$\Delta I = I_0 - I_1, \text{ kust}$$
$$I_1 = I_0 - \Delta I = 12\ \text{A} - 2\ \text{A} = 10\ \text{A}.$$

3. Arvutame I sektsiooni takistuse valemist

$$I_1 = \frac{U}{R_0 + R_1}, \text{ kust } R_0 + R_1 = \frac{U}{I_1}; \quad R_1 = \frac{U}{I_1} - R_0.$$

$$R_1 = \frac{120\ \text{V}}{10\ \text{A}} - 10\ \Omega = 12\ \Omega - 10\ \Omega = 2\ \Omega.$$

4. Määrame voolutugevuse ahelas kahe sisselülitatud sektsiooni korral (vänt asub kontaktil *3*):

$$\Delta I = I_1 - I_2, \text{ kust } I_2 = I_1 - \Delta I = 10\ \text{A} - 2\ \text{A} = 8\ \text{A}.$$

5. Arvutame II sektsiooni takistuse valemist

$$I_2=\frac{U}{R_0+R_1+R_2}\text{, kust } R_0+R_1+R_2=\frac{U}{I_2};$$

$$R_2=\frac{U}{I_2}-(R_0+R_1);$$

$$R_2=\frac{120\text{ V}}{8\text{ A}}-(10\ \Omega+2\ \Omega)=15\ \Omega-12\ \Omega=3\ \Omega.$$

6. Leiame voolutugevuse ahelas kolme sisselülitatud sektsiooni puhul (vänt asub kontaktil *4*):

$$\Delta I=I_2-I_3\text{, kust } I_3=I_2-\Delta I;$$

$$I_3=8\text{ A}-2\text{ A}=6\text{ A}.$$

7. Leiame III sektsiooni takistuse valemist:

$$I_3=\frac{U}{R_0+R_1+R_2+R_3}\text{, kust } R_0+R_1+R_2+R_3=\frac{U}{I_3};$$

$$R_3=\frac{U}{I_3}-(R_0+R_1+R_2);$$

$$R_3=\frac{120\text{ V}}{6\text{ A}}-(10\ \Omega+2\ \Omega+3\ \Omega)=20\ \Omega-15\ \Omega=5\ \Omega.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millist tarbijate lülitust nimetatakse järjestikuseks?
2. Missugused neli reeglit kehtivad juhtide järjestiklülitusel?
3. Vooluringi on lülitatud järjestikku tarbijad takistustega 20 Ω, 5 Ω ja 35 Ω. Määrata pinge kõikide tarbijate klemmidel ja kogu pingelangus, kui vool ahelas on 2 A.

Vastus: 40 V, 10 V, 70 V, 120 V.

4. Kaks tarbijat on ühendatud järjestikku. Ühe tarbija takistus on 6 Ω. Määrata teise tarbija takistus, kui voolutugevus ahelas on 5 A ja pingelangus mõlemal tarbijal on kokku 40 V.

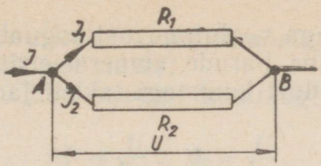
Vastus: 2 Ω.

5. Kui pikk nikeliintraat ristlõikega 2 mm² tuleb valida reostaadi valmistamiseks elektrikaarele, millega ta lülitatakse järjestikku, kui võrgu pinge on 120 V ja pinge elektrikaare klemmidel peab olema 45 V voolutugevusel 15 A?

Vastus: 25 m.

§ 38. TAKISTITE PARALLEELLÜLITUS

Lülitust, mille puhul takistite ühed otsad ühendatakse ühte sõlme *A*, teised otsad aga teise sõlme *B*, nimetatakse paralleellülituseks (joon. 44). Sellise lülituse kohta kehtivad nn. Kirchhoffi



Joon. 44.

seadused. Skeemist on näha, et *pinge iga paralleelselt ühendatud takisti otstel on võrdne pingega kogu hargmiku otstel* (I reegel).

Lülitades ampermeetri ahela erinevatesse osadesse, võib kindlaks teha, et *ahela hargnemata osas on voolutugevus võrdne voolutugevuste summaga harudes* (II reegel).

$$I = I_1 + I_2.$$

Paralleellülituses juhib iga takisti voolu iseseisvalt. Seepärast on kerge veenduda, et *lülituse kogujuhtivus on võrdne üksikute takistite juhtivuste summaga* (III reegel).

Analoogilist nähtust võib jälgida vee voolamisel torudes, kus kogu torustiku läbilaskevõime on võrdne kõikide torude läbilaskevõimete summaga.

Kui $g = \frac{1}{R}$ on kogu paralleellülituse juhtivus, $g_1 = \frac{1}{R_1}$ ja $g_2 = \frac{1}{R_2}$ aga üksikute takistite juhtivused, siis võib kirjutada:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

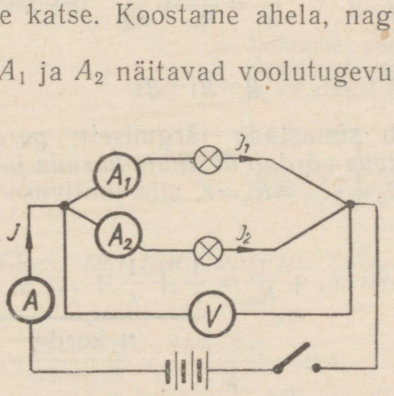
ehk

$$g = g_1 + g_2.$$

Samasuguse sõltuvuse saab tuletada ka matemaatiliselt.

Teeme järgmise katse. Koostame ahela, nagu näidatud joonisel 45.

Ampermeetrid A_1 ja A_2 näitavad voolutugevust kummaski lam-



Joon. 45.

bis, ampermeeter A aga voolutugevust koguahelas. Viimase ampermeetri näit on võrdne harude ampermeetrite näitude summaga. Kasutades Ohmi seadust kummagi takisti jaoks eraldi, võime kirjutada:

$$I_1=\frac{U}{R_1};\quad I_2=\frac{U}{R_2},$$

kasutades aga sama seadust koguühenduse jaoks, mille takistus on R, saab kirjutada:

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

Liidame kaks esimest võrdust ja saame

$$I_1+I_2=\frac{U}{R_1}+\frac{U}{R_2}$$

ehk

$$I_1+I_2=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right).$$

Kirchhoffi seaduse põhjal $I_1+I_2=I$. Seega võtab viimane võrdus kuju:

$$I=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right).$$

Võrreldes võrdusi $I=\frac{U}{R}$ ja $I=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$, tuleme järeldusele, et

$$\frac{U}{R}=U\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right),$$

kust

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}$$

ehk

$$g=g_1+g_2.$$

Tulemuse võib sõnastada järgmiselt: *paralleelselt lülitatud takistite kogujuhtivus võrdub üksikute harude juhtivuste summaga.*

Kui $R_1=R_2=R_3=\ldots=R_n=r$, siis juhtivuse valemit kasutades võib kirjutada:

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\ldots+\frac{1}{R_n}=\underbrace{\frac{1}{r}+\frac{1}{r}+\ldots+\frac{1}{r}}_{n\text{ korda}}=\frac{n}{r}.$$

Niisiis, $\frac{1}{R}=\frac{n}{r}$, kust $R=\frac{r}{n}$.

n võrdse takisti paralleellülitusel on ahela kogutakistus n korda väiksem üksiku takisti takistusest.

Kasutame uuesti Ohmi seadust kummagi takisti jaoks eraldi:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Jagades esimese võrduse teisega, saame $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$.

Paralleellülitusel on voolutugevused üksikutes harudes pöördvõrdelised harude takistustega (IV reegel).

Ülesanne 22. Kolm takistit 2Ω, 3Ω ja 6Ω on ühendatud paralleelselt ning lülitatud 90 V pingega võrku. Määrata kogutakistus ja voolutugevus hargnemata osas.

Antud (SI-süsteem)

$R_1 = 2\ \Omega$;
$R_2 = 3\ \Omega$;
$R_3 = 6\ \Omega$;
$n = 90$ V.

R — ?
I — ?

Lahendus

1. Leiame kogujuhtivuse

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}.$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{3+2+1}{6} = \frac{6}{6\ \Omega} = \frac{1}{1\ \Omega}.$$

2. Arvutame kogutakistuse:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{1\ \Omega}, \text{ kust } R = \frac{1\ \Omega}{1} = 1\ \Omega.$$

3. Leiame voolutugevuse hargnemata osas:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{90\ \text{V}}{1\ \Omega} = 90\ \text{A}.$$

Ülesanne 23. Vool tugevusega 21 A haruneb kaheks. Harude takistused on vastavalt 3 Ω ja 4 Ω. Leida voolutugevused harudes.

Antud (SI-süsteem)

$I = 21$ A;
$R_1 = 3\ \Omega$;
$R_2 = 4\ \Omega$.

I_1 — ?
I_2 — ?

Lahendus

1. Määrame voolutugevused harudes järgmisest võrrandisüsteemist (II ja IV reegel paralleellülitusel):

$$\left.\begin{aligned} I_1 + I_2 &= I; \\ \frac{I_1}{I_2} &= \frac{R_2}{R_1}; \end{aligned}\right\} \quad \left.\begin{aligned} I_1 &= I - I_2; \\ \frac{I - I_2}{I_2} &= \frac{R_2}{R_1}; \end{aligned}\right.$$

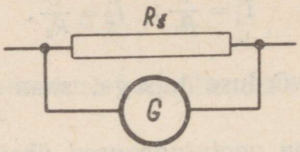
$$IR_1 - I_2R_1 = I_2R_2; \quad IR_1 = I_2(R_1 + R_2); \quad I_2 = \frac{IR_1}{R_1 + R_2}.$$

2. Arvutame:

$$I_2 = \frac{21\ \text{A} \cdot 3\ \Omega}{3\ \Omega + 4\ \Omega} = \frac{21\ \text{A} \cdot 3\ \Omega}{7\ \Omega} = 9\ \text{A};$$

$$I_1 = 21\ \text{A} - 9\ \text{A} = 12\ \text{A}.$$

Ülesanne 24. Galvanomeeter takistusega 4950 Ω on varustatud šundiga [1], mille takistus on $\frac{1}{99}$ galvanomeetri takistusest (joon. 46). Määrata galvanomeetri ja šundi ühine takistus.



Joon. 46.

Antud (SI-süsteem)

$R_g = 4950\ \Omega$;
$R_š = \frac{1}{99} R_g$.

R — ?

Lahendus

1. Määrame galvanomeetri ja šundi ühise takistuse valemist:

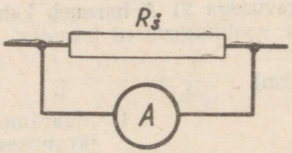
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_g} + \frac{1}{R_š} \quad \text{ehk} \quad \frac{1}{R} = \frac{R_š + R_g}{R_š \cdot R_g},$$

$$\text{kust } R = \frac{R_š \cdot R_g}{R_š + R_g} = \frac{R_g \cdot \frac{R_g}{99}}{\frac{R_g}{99} + R_g} = \frac{R_g^2}{100\,R_g} = \frac{R_g}{100}.$$

2. Arvutame:

$$R = \frac{4950\ \Omega}{100} = 49{,}5\ \Omega.$$

Ülesanne 25. Leida šundi takistus ampermeetrile, mille takistus on 0,04 Ω, et riista mõõtepiirkond laieneks 100 korda (joon. 47).



Joon. 47.

Antud (SI-süsteem)

$R_a = 0{,}04$;
$R = 0{,}01\,R_a$.

$R_š$ — ?

Lahendus

Ülesande tingimuste kohaselt peab ampermeetri mõõtepiirkond suurenema 100 korda, järelikult peab šundi ja ampermeetri ühine takistus olema 100 korda väiksem kui ampermeetri takistus eraldi.

[1] Galvanomeeter talub väga väikest voolu. Et kasutada galvanomeetrit suuremate voolude mõõtmiseks (sel juhul on tegemist ampermeetriga), juhitakse enamik voolu väikese takistusega juhi kaudu galvanomeetrist mööda. Sellist lisajuhti nimetatakse šundiks.

1. Leiame šundi takistuse valemist

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_a}+\frac{1}{R_š}, \quad \text{kust} \quad \frac{1}{R_š}=\frac{1}{R}-\frac{1}{R_a} \quad \text{ehk} \quad R_š=\frac{R\cdot R_a}{R_a-R}.$$

Lõppkujul $R_š=\frac{0{,}01\,R_a^2}{R_a(1-0{,}01)}=\frac{0{,}01\,R_a}{1-0{,}01}$.

2. Arvutame:

$$R_š=\frac{0{,}01\cdot 0{,}04\ \Omega}{1-0{,}01}\approx 0{,}000\,4\ \Omega.$$

Ülesanne 26. Mitmeks võrdseks osaks tuleb lõigata traat takistusega 50 Ω, et nende osade paralleellülitusel saada takistus 2 Ω?

Antud (SI-süsteem)

$R_1=50\ \Omega$;
$R_k=2\ \Omega$.

n — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Traadi ühe osa takistus

$$r=\frac{R_1}{n}.$$

b) Traadi kõikide osade takistus paralleellülitusel

$$R_k=\frac{r}{n}=\frac{\frac{R_1}{n}}{n}=\frac{R_1}{n^2}.$$

c) Osade arvu leiame valemist

$$n^2=\frac{R_1}{R_k}; \qquad n=\sqrt{\frac{R_1}{R_k}}.$$

2. Arvutame:

$$n=\sqrt{\frac{50\ \Omega}{2\ \Omega}}=\sqrt{25}=5 \text{ (osa)}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millist takistite lülitust nimetatakse paralleelseks?
2. Millised neli reeglit kehtivad paralleellülituse korral?
3. Neli juhet takistustega 2 Ω, 4 Ω, 6 Ω ja 8 Ω on ühendatud paralleelselt ning lülitatud võrku pingega 4,8 V. Määrata kogutakistus ja koguvoolutugevus.

Vastus: 0,96 Ω; 5 A.

4. Vool tugevusega 80 A haruneb takistitesse 5 oomi ja 11 oomi. Määrata voolutugevus kummaski takistis, nende pinge ja kogutakistus.

Vastus: 55 A ja 25 A; 275 V; $3\frac{7}{16}\ \Omega\approx 3{,}44\ \Omega$.

5. Valgustusvõrku pingega 120 V lülitati paralleelselt kolm lampi. Voolutugevused lampides on 0,5 A, 0,8 A ja 1 A. Leida voolutugevus ahela hargnemata osas, üksikute lampide takistused ja kogutakistus.

Vastus: 2,3 A; 240 Ω; 150 Ω; 120 Ω; ≈52,2 Ω.

6. Ampermeetri skaala ulatus on 2 A ja takistus 0,01 Ω. Millise takistusega šunt tuleb ühendada ampermeetriga, et ampermeeter kõlbaks kuni 20 A voolu mõõtmiseks?

Vastus: $\frac{1}{900} = 0{,}001\,11\ \Omega$.

§ 39. OHMI SEADUS KOGU VOOLURINGI KOHTA

Kui vooluallikas on ühendatud avatud ahelaga, siis on tal kõrvaljõudude poolt tehtud töö tõttu teatav potentsiaalne energia. Laengule 1 C vastavat energiahulka nimetatakse vooluallika elektromotoorseks jõuks ja tähistatakse tähega E.

Kui vooluahel sulgeda, siis muutub vooluallika potentsiaalne energia kasulikuks tööks U (laengu 1 C viimine läbi vooluringi välisosa takistusega R) ja tööks u (laengu 1 C viimine läbi ahela siseosa, s. t. vooluallika takistusega r_0).

Energia jäävuse seaduse põhjal

$$E = U + u.$$

Siit järeldub, et vooluallika emj. on suurus, mis võrdub pingelanguste summaga vooluringi sise- ja välisosas. Ohmi seaduse põhjal võib ahela kummagi osa kohta kirjutada:

$U = IR$; $u = Ir_0$, kus r_0 on vooluringi siseosa takistus.

Järelikult $E = IR + Ir_0$ ehk $E = I(R + r_0)$, kust

$$I = \frac{E}{R + r_0}.$$

Saadud valem on matemaatiline kuju Ohmi seadusele kogu vooluringi kohta:

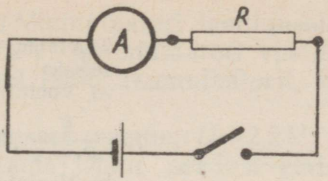
voolutugevus ahelas on võrdeline vooluallika emj.-ga ja pöördvõrdeline ahela kogutakistusega.

Laboratoorne töö nr. 1. Vooluallika emj. ja sisetakistuse määramine.

Töövahendid. Galvaanielement, alalisvoolu ampermeeter mõõtepiirkonnaga kuni 2 A 0,1-ampriste jaotustega, alalisvoolu voltmeeter mõõtepiirkonnaga kuni 3 V 0,1-voldiste jaotustega, takistusmagasin takistusega kuni 10 Ω, lüliti, juhtmed.

Töö käik

1. Mõõta vooluallika emj., ühendades voltmeetri vahetult vooluallika klemmidega.
2. Koostada ahel, nagu näidatud skeemil (joon. 48), ja mõõta voolutugevus ahelas 5 Ω takistuse korral.
3. Arvutada vooluallika sisetakistus, kasutades Ohmi seadust kogu vooluringi kohta.



Joon. 48.

4. Korrata katset teiste takistuste korral ja arvutada igal juhul vooluallika sisetakistus.
5. Arvutada sisetakistuse keskmine väärtus.
6. Kõik mõõtmistulemused kanda tabelisse.

Katse nr.	E	R	I	r_0	r_0 keskm.
1					
2					
3					
4					

Ülesanne 27. Kui galvaanielement ühendada voltmeetriga, siis näitab viimane 1,2 V. Kui aga element samaaegselt sulgeda 2-oomise takistusega traadiga, siis näitab voltmeeter 1 V. Leida elemendi sisetakistus.

Antud (SI-süsteem)

$E = 1{,}2$ V;
$R = 2\ \Omega$;
$U = 1$ V.

r — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.
a) Voolutugevus traadis Ohmi seaduse põhjal

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

b) Voolutugevus koguahelas Ohmi seaduse põhjal

$$I_0 = \frac{E}{R + r_0}.$$

c) Koostame võrrandi sisetakistuse leidmiseks

$$\frac{E}{R+r_0} = \frac{U}{R} \quad \text{ehk} \quad R + r_0 = \frac{E \cdot R}{U}, \quad \text{kust} \quad r_0 = \frac{ER}{U} - R.$$

2. Arvutame:

$$r_0 = \frac{1{,}2\ \text{V} \cdot 2\ \Omega}{1\ \text{V}} - 2\ \Omega = 2{,}4\ \Omega - 2\ \Omega = 0{,}4\ \Omega.$$

Ülesanne 28. Kui välistakistus on 0,2 Ω, siis annab galvaanielement voolu 0,5 A, kui aga välistakistus on 2,4 Ω, saame voolu 0,25 A. Leida elemendi emj. ja sisetakistus.

Antud (SI-süsteem)

$I_1 = 0{,}5$ A;
$R_1 = 0{,}2\ \Omega$;
$I_2 = 0{,}25$ A;
$R_2 = 2{,}4\ \Omega$.

E — ?
r_0 — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.
a) Voolutugevus esimesel juhul:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + r_0},\ \text{kust}\ E = I_1R_1 + I_1r_0.$$

b) Voolutugevus teisel juhul:

$$I_2 = \frac{E}{R_2 + r_0},\ \text{kust}\ E = I_2R_2 + I_2r_0.$$

c) Koostame võrrandi sisetakistuse leidmiseks:

$$I_1R_1 + I_1r_0 = I_2R_2 + I_2r_0; \qquad I_1r_0 - I_2r_0 = I_2R_2 - I_1R_1;$$

$$r_0(I_1 - I_2) = I_2R_2 - I_1R_1;$$

$$r_0 = \frac{I_2R_2 - I_1R_1}{I_1 - I_2}.$$

2. Arvutame:

$$r_0 = \frac{0{,}25\ \text{A} \cdot 2{,}4\ \Omega - 0{,}5\ \text{A} \cdot 0{,}2\ \Omega}{0{,}5\ \text{A} - 0{,}25\ \text{A}} = \frac{0{,}6\ \text{V} - 0{,}1\ \text{V}}{0{,}25\ \text{A}} = 2\ \Omega;$$

$$E = 0{,}5\ \text{A} \cdot 0{,}2\ \Omega + 0{,}5\ \text{A} \cdot 2\ \Omega = 1{,}1\ \text{V}.$$

§ 40. OHMI SEADUS AHELAOSA KOHTA, MIS SISALDAB EMJ.

Mõnedel elektrienergia tarbijatel, nagu akumulaatorid, elektrimootorid jne., on oma elektromotoorne jõud. Selliste tarbijate lülimisel võrku toimib nende elektromotoorne jõud vastupidi sellele pingele, mis on rakendatud ta klemmidele, ja pinge väheneb tarbija oma emj. võrra.

Tähistame: R_0 — tarbija sisetakistus, E — tarbija elektromotoorne jõud, mida nimetame ka vastuelektromotoorseks jõuks, U — tarbija klemmidele rakendatud pinge, I — tarbijat läbiv vool.

Sel juhul pinge, mille mõjul tekib tarbijas vool, on

$$U_1 = U - E.$$

Rakendades Ohmi seadust vooluringi osa kohta, võime kirjutada

$$I = \frac{U_1}{R_0}$$

ehk

$$I = \frac{U - E}{R_0}.$$

See valem väljendab Ohmi seadust emj.-ga vooluahela osa kohta.

Et generaatoris sisetakistusega r_0 toimub pingelangus Ir_0, siis generaatori kui vooluahela osa kohta, mis annab energiat ahela ülejäänud osadele, $U = E - Ir_0$. Seepärast omandab Ohmi seadus kuju: $I = \frac{E - U}{r_0}$, kus E on generaatori emj., U — pinge generaatori kui vooluahela osa klemmidel.

Vaatame näidet. Akumulaatori laadimisel on tema klemmidele rakendatud pinge 2,2 V. Akumulaatori vastuelektromotoorne jõud on 1,8 V. Milline vool läbib akumulaatorit, kui tema sisetakistus on 0,08 Ω?

Ülesande tingimusest saame: $U=2{,}2$ V, $E=1{,}8$ V, $R_0=0{,}08$ Ω. Lahendamisel kasutame Ohmi seadust emj.-ga vooluahela osa kohta

$$I=\frac{U-E}{R_0}.$$

Asendades vaadeldavate suuruste arvulised väärtused saadud valemisse, leiame

$$I=\frac{2{,}2\text{ V}-1{,}8\text{ V}}{0{,}08\ \Omega}=5\text{ A}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Sõnastage Ohmi seadus kogu vooluringi kohta.
2. Kuidas saab mõõta vooluallika emj.?
3. Milles seisab Ohmi seadus emj.-ga ahelaosa kohta?
4. Galvaanielement emj.-ga 1,5 V ja sisetakistusega 2 Ω on suletud juhtme abil, mille takistus on 3 Ω. Leida voolutugevus ahelas.

   Vastus: 0,3 A.

5. Määrata elemendi emj. ja sisetakistus, kui ühendamisel takistusega 1,5 Ω annab ta voolu 0,6 A, aga ühendamisel takistusega 2,5 Ω voolu 0,4 A.

   Vastus: 1,2 V; 0,5 Ω.

6. Element emj.-ga 1,5 V annab vooluahelas voolu 0,4 A. Pingelangus vooluahela välisosas on 1,2 V. Määrata ahela välisosa takistus ja elemendi sisetakistus.

   Vastus: 3 Ω, 0,75 Ω.

7. Akumulaatorite patarei laadimiseks ühendati ta alalisvooluvõrku pingega 12 V. Seejuures tekkis vastuelektromotoorne jõud 11,7 V. Leida laadimisvoolu tugevus, kui patarei sisetakistus on 0,15 Ω.

   Vastus: 2 A.

§ 41. ELEKTRIVOOLU TÖÖ

Igapäevasest elust teame, et elektrivool võib teha mitmesuguseid töid. Nii näiteks pannakse elektrimootorite abil liikuma trammid, trollibussid, elektrirongid, tööpingid, tõstekraanad, soonimismasinad, pumbad jne.

Elektrienergiat on kerge muundada teisteks energialiikideks. Muundumise mõõduks on elektrivälja töö ahelas laengute ümberpaigutamisel elektriväljas.

Olgu pingelangus ahela välisosas U. See tähendab, et generaatori elektrivälja töö, mis kulub laengu 1 C viimiseks läbi antud ahelaosa, on võrdne pingega U. Laengu qC viimisel läbi antud ahelaosa tehtud töö on järelikult $A=qU$. Kuid $q=I\cdot t$, nii et

$$A=UIt.$$

Alalisvoolu töö antud ahelaosas on võrdne selle ahelaosa pingelanguse, teda läbiva voolu ja vastava aja korrutisega.

Kui mõõta pinget voltides, voolu amprites ja aega sekundites, siis valemist $A = UIt$ järeldub, et tööühikuks on

$$1\,V \cdot 1\,A \cdot 1\,s = 1\,J.$$

Et aga $1\,V \cdot 1\,A = 1\,W$ (vatt), siis

$$1\,J = 1\,W \cdot 1\,s = 1\,Ws.$$

Praktiliseks kasutamiseks on tööühik $1\,J = 1\,Ws$ väga väike, seetõttu kasutatakse tunduvalt suuremat ühikut:

$3600\,Ws = 1\,Wh$; $100\,Wh = 1\,hWh$ (hektovatt-tund);
$1000\,Wh = 1\,kWh$ (kilovatt-tund).

Niisiis, $1\,Ws = 1\,J$; $1\,Wh = 3600\,J$; $1\,hWh = 360\,000\,J$; $1\,kWh = 3\,600\,000\,J$.

Elektrivoolu tööd mõõdetakse spetsiaalsete automaatseadmete (arvestite) abil. Viimased registreerivad voolu töö hWh-des ja kWh-des.

Ülesanne 29. Elektripliit takistusega 24 Ω tarvitab voolu 5 A. Määrata elektrienergia kulu kuu jooksul (tariif on 4 kopikat 1 kWh), kui pliiti kasutatakse iga päev 2 tundi.

Antud (SI-süsteem)

$R = 24\,\Omega$;
$I = 5\,A$;
$t = 2\,h \cdot 30$;
1 kWh — 4 kop.

Energia maksumus
x — ?

Lahendus

1. Voolu töö kuu jooksul:
$A = UIt$, kus $U = I \cdot R$ (Ohmi seaduse põhjal), järelikult $A = I^2Rt$;

$$A = 5^2A^2 \cdot 24\,\Omega \cdot 2 \cdot 30\,h = 25 \cdot 24 \cdot 60\,\frac{A^2 \cdot Vh}{A} = 36\,000\,Wh = 36\,kWh.$$

2. Arvutame energia maksumuse:

1 kWh — 4 kop.
36 kWh — x kop.

$$x = \frac{4\,kop. \cdot 36\,kWh}{1\,kWh} = 4\,kop. \cdot 36 = 144\,kop. = 1\,rubla\ 44\,kop.$$

§ 42. ELEKTRIVOOLU VÕIMSUS

Suurust, mis iseloomustab elektrienergia muundumise kiirust antud vooluringi osas, nimetatakse voolu võimsuseks. Võimsust arvutatakse töö ja kulunud aja suhtena. Kui tähistada voolu võimsus tähega P, voolu töö A ja voolu läbimise aeg t, siis

$$P = \frac{A}{t}.$$

Et $A = UIt$, siis

$$P = \frac{UIt}{t} = UI$$

ehk

$$P = UI.$$

Alalisvoolu võimsus vooluahela osas on võrdne ahelat läbiva voolu ja vastava ahelaosa pingelanguse korrutisega.

SI-süsteemis on võimsusühikuks vatt.

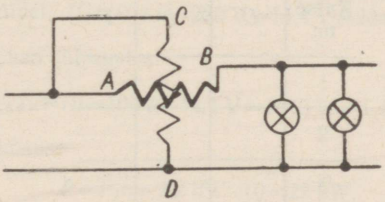
$$1\,W = 1\,A \cdot 1\,V.$$

Tunduvalt suuremaks võimsusühikuks on 1 hektovatt (1 hW) ja 1 kilovatt (1 kW).

$$1\,hW = 100\,W; \quad 1\,kW = 1000\,W;$$
$$1\,kW = 10\,hW.$$

Võimsused 1 kW ja 1 hj (süsteemiväline ühik hobujõud) on järgmises vahekorras:

$$1\,kW = 1{,}36\,hj; \quad 1\,hj = 0{,}736\,kW.$$

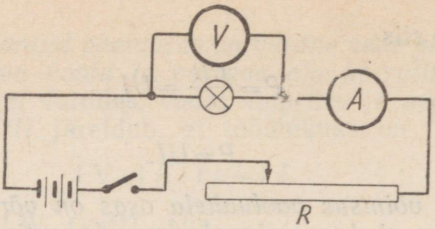


Joon. 49.

Kui alalisvooluahelasse lülitada ampermeeter ja voltmeeter, siis nende näitude korrutamisel saamegi võimsuse vooluringi antud osas. Voolu võimsust võib mõõta veel spetsiaalse mõõteriista, nn. vattmeetri abil, mille ehituses on kasutatud nii voltmeetri kui ka ampermeetri printsiipe. Joonisel 49 on näidatud elektrodünaamilise vattmeetri ahelasse lülitamise skeem, kusjuures liikumatu voolumähis *AB* on lülitatud tarbijaga (lampidega) järjestikku, liikuv pingepool *CD* aga nendega paralleelselt.

Laboratoorne töö nr. 2. Hõõglambi võimsuse sõltuvuse uurimine tema klemmide pingest.

Töövahendid. Akumulaatorite patarei 8 V, elektrilamp 8 V, liugkontaktiga reostaat, alalisvoolu ampermeeter mõõtepiirkonnaga 5 A 0,1-ampriste jaotustega, alalisvoolu voltmeeter mõõtepiirkonnaga 30 V 0,1-voldiste jaotustega, juhtmed, lüliti.



Joon. 50.

Töö käik

1. Koostada ahel, nagu näidatud skeemil (joon. 50).
2. Sulgeda ahel, mõõta suurim pinge lambi klemmidel ning voolutugevus ahelas. Seejärel arvutada voolu võimsus.
3. Vähendada reostaadi abil pinget lambi klemmidel, mõõta voolutugevus ja arvutada seejärel voolu võimsus.
4. Korraldada mitu katset, vähendada pinget lambi klemmidel ja arvutada voolu võimsus.
5. Mõõtmiste ja arvutuste tulemused märkida tabelisse.
6. Ehitada graafik, mis iseloomustab lambi võimsuse sõltuvust tema klemmide pingest.

Katse nr.	U	I	P
1			
2			
3			
4			
5			

Ülesanne 30. Tarbijal takistusega 0,4 Ω on võimsus 0,25 kW. Leida voolutugevus ja pingelangus tarbijal.

Antud (SI-süsteem)

$R = 0{,}4\ \Omega$;
$P = 0{,}25\ \text{kW} = 250\ \text{W}$.

I — ?
U — ?

Lahendus

1. Määrame voolutugevuse:
$P = UI$, kuid $U = IR$, mistõttu $P = I^2R$,
kust $I^2 = \frac{P}{R}$ ja $I = \sqrt{\frac{P}{R}}$.

2. Arvutame:

$$I = \sqrt{\frac{250\ \text{W}}{0{,}4\ \Omega}} = \sqrt{625\frac{\text{AV}}{\Omega}} = \sqrt{625\ \text{A}^2} = 25\ \text{A}.$$

Pingelangus $U = I \cdot R = 25\ \text{A} \cdot 0{,}4\ \Omega = 10\ \text{V}$.

Ülesanne 31. Töökojas on üles seatud 10 mootorit igaüks võimsusega 2,2 kW. Mootorid on lülitatud üksteisega paralleelselt võrku pingega 220 V. Leida: 1) vool ühes mootoris; 2) vool kõigis mootorites; 3) pinge generaatori klemmidel, kui generaator asub töökojast 200 m kaugusel ja vool tuleb töökotta mööda vaskjuhtmeid ristlõike pindalaga 50 mm²; 4) võimsuskadu juhtmetes; väljendada see protsentides üldisest mootorite võimsusest.

Antud

$U = 220$ V
$P_1 = 2{,}2$ kW $= 2200$ W;
$n = 10$;
$l = 400$ m (2 juhet);
$S = 50$ mm²;
$\varrho = 0{,}018 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$.

I_1 — ? I — ? U_1 — ?
$P_{kadu} \cdot 100\%$ — ?

Lahendus

(süsteemivälistes ühikutes)

1. Leiame voolutugevuse ühes mootoris:

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{2200 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 10 \text{ A}.$$

Kümmet mootorit läbiv vool:

$$I = I_1 \cdot n = 10 \text{ A} \cdot 10 = 100 \text{ A}.$$

2. Arvutame juhtme takistuse:

$$R = \frac{\varrho l}{S} = \frac{0{,}18 \frac{\Omega \text{ mm}^2}{\text{m}} \cdot 400 \text{ m}}{50 \text{ mm}^2} = 0{,}144 \ \Omega.$$

3. Leiame pingelanguse juhtmetes:

$$u = I \cdot R = 100 \text{ A} \cdot 0{,}144 \ \Omega = 14{,}4 \text{ V}$$

ja generaatori klemmidel: $U_1 = U + u = 220 \text{ V} + 14{,}4 \text{ V} = 234{,}4 \text{ V}$.

4. Määrame võimsuskao juhtmetes

$$P_{kadu} = Iu = 100 \text{ A} \cdot 14{,}4 \text{ V} = 1440 \text{ W} = 1{,}44 \text{ kW}$$

ja kõigi mootorite võimsuse

$$P = P_1 n = 2{,}2 \text{ kW} \cdot 10 = 22 \text{ kW}.$$

5. Arvutame võimsuskao protsentides, võrreldes mootorite koguvõimsusega

$$\frac{P_{kadu}}{P} \cdot 100\% = \frac{1{,}44 \text{ kW}}{22 \text{ kW}} \cdot 100\% \approx 6{,}54\%.$$

Ülesanne 32. Elektrivedur liigub kiirusega $54 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ja arendab tõmbejõudu 7000 kG. Leida tarvitatava voolu tugevus, kui liini pinge on 1500 V ja mootori kasutegur 92%.

Antud (SI-süsteem)

$\eta = 0{,}92$;
$v = 54 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$;
$F_k = 7000 \text{ kG} = 68\,600 \text{ N}$;
$U = 1500$ V.

I — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.
   a) Mootori kasulik mehhaaniline võimsus:

$$N_{kas} = F_k \cdot v \left(\frac{\text{J}}{\text{s}}\right) = F_k \cdot v \ (\text{W}).$$

   b) Mootori poolt kulutatud võimsus

$$P_{kul} = U \cdot I \ (\text{W}).$$

c) Mootori kasulik elektriline võimsus

$$P_{kas}=P_{kul}\cdot\eta=U\cdot I\cdot\eta\ (\mathrm{W}).$$

d) Koostame võrrandi tarbitava voolu leidmiseks:

$$P_{kas}=N_{kas}$$

ehk

$$I\cdot U\cdot\eta=F_k\cdot v,$$

kust

$$I=\frac{F_k\cdot v}{U\cdot\eta}.$$

2. Arvutame:

$$I=\frac{68\,600\ \mathrm{N}\cdot 15\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}}{1500\ \mathrm{V}\cdot 0{,}92}=745{,}6\ \mathrm{A}\approx 746\ \mathrm{A}.$$

Ülesanne 33. Korteris on kaks lampi võimsusega 40 W, üks lamp võimsusega 60 W ja üks võimsusega 100 W. Peale selle on korteris elektripliit võimsusega 600 W ja elektriteekann võimsusega 400 W. Lambid töötavad 6 tundi, pliit 3 tundi ja teekann 1 tund ööpäevas. Leida elektrienergia kulu ja selle maksumus 1 kuu jooksul, kui 1 kWh hind on 4 kop.

Antud (SI-süsteem)

$N_1=40\ \mathrm{W}\cdot 2=80\ \mathrm{W}$;
$N_2=60\ \mathrm{W}$;
$N_3=100\ \mathrm{W}$;
$N_4=600\ \mathrm{W}$;
$N_5=400\ \mathrm{W}$;
$t_1=6\ \mathrm{h}\cdot 30=180\ \mathrm{h}$;
$t_2=3\ \mathrm{h}\cdot 30=90\ \mathrm{h}$;
$t_3=1\ \mathrm{h}\cdot 30=30\ \mathrm{h}$;
1 kWh — 4 kop.

A — ?
Energia maksumus x — ?

Lahendus

(süsteemivälistes ühikutes)

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.
   a) Kõiki lampe läbiv vool teeb tööd
   $$A_1=(N_1+N_2+N_3)\cdot t.$$
   b) Pliidis
   $$A_2=N_4\cdot t_2.$$
   c) Teekannus
   $$A_3=N_5\cdot t_3.$$

d) Voolu kogutöö $A=A_1+A_2+A_3=(N_1+N_2+N_3)t_1+N_4t_2+N_5t_3$.

2. Arvutame elektrienergia kulu kuus:

$$A=(80\ \mathrm{W}+60\ \mathrm{W}+100\ \mathrm{W})\cdot 180\ \mathrm{h}+600\ \mathrm{W}\cdot 90\ \mathrm{h}+400\ \mathrm{W}\cdot 30\ \mathrm{h}=$$
$$=43\,200\ \mathrm{Wh}+54\,000\ \mathrm{Wh}+12\,000\ \mathrm{Wh}=109\,200\ \mathrm{Wh}=$$
$$=109{,}2\ \mathrm{kWh}.$$

3. Arvutame elektrienergia maksumuse:

1 kWh — 4 kop.
109,2 kWh — x kop.

$$x=\frac{4\ \mathrm{kop.}\cdot 109{,}2\ \mathrm{kWh}}{1\ \mathrm{kWh}}=4\ \mathrm{kop.}\cdot 109{,}2=436{,}8\ \mathrm{kop.}=4\ \mathrm{rbl.}\ 37\ \mathrm{kop.}$$

Ülesanne 34. Lift kaaluga 900 kG tõuseb keskmise kiirusega 0,44 $\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$. Pinge mootori klemmidel on 220 V, tema kasutegur aga 90%. Leida mootori poolt tarbitav võimsus ja voolutugevus.

Antud (SI-süsteem)

Liikumist takistav jõud

$F_{tak} = mg = 900\ \text{kG} = 9{,}8\ \text{N} \cdot 900 = 8820\ \text{N}$;

$v_k = 0{,}44\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$;

$U = 220\ \text{V}$;

$\eta = 0{,}9$.

P_{kul} — ?

I — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Mootori poolt kulutatud elektriline võimsus

$$P_{kul} = U \cdot I\ (\text{W}).$$

b) Mootori kasulik elektriline võimsus

$$P_{kas} = P_{kul} \cdot \eta = U \cdot I \cdot \eta\ (\text{W}).$$

c) Mootori kasulik mehhaaniline võimsus

$$N_{kas} = F_{tak} \cdot v_k \left(\frac{\text{J}}{\text{s}}\right) = F_{tak} \cdot v_k\ (\text{W}).$$

d) Koostame võrrandi tarbitava voolu leidmiseks:

$$P_{kas} = N_{kas} \text{ ehk } U \cdot I \cdot \eta = F_{tak} \cdot v_k, \text{ kust } I = \frac{F_{tak} \cdot v_k}{U\eta}.$$

2. Arvutame tarbitava voolu tugevuse:

$$I = \frac{8820\ \text{N} \cdot 0{,}44\ \frac{\text{m}}{\text{s}}}{220\ \text{V} \cdot 0{,}9} = 19{,}6\ \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{V}} = 19{,}6\ \frac{\text{A} \cdot \text{V} \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{V}} = 19{,}6\ \text{A}.$$

3. Arvutame tarbitava võimsuse:

$$P_{kul} = U \cdot I = 220\ \text{V} \cdot 19{,}6\ \text{A} = 4312\ \text{W} = 4{,}3\ \text{kW}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millega võrdub alalisvoolu töö vooluringi osas?
2. Millistes ühikutes mõõdetakse voolu tööd?
3. Mida nimetatakse voolu võimsuseks?
4. Millega võrdub alalisvoolu võimsus?
5. Millistes ühikutes mõõdetakse voolu võimsust?
6. Leida 5 A voolu poolt 5 minuti jooksul 120 V pingel tehtud töö ja väljendada see kWh-des.

Vastus: 0,05 kWh.

7. Tõestada, et tarbijate takistuste, nende klemmide pinge ja võimsuste vahel on järgmine seos:

$$R_1 : R_2 = \frac{U_1^2}{P_1} : \frac{U_2^2}{P_2}.$$

8. Pinge keevitusagregaadi elektroodidel on 60 V, voolutugevus aga 120 A. Leida kaare takistus ja voolu võimsus.

Vastus: 0,5 Ω; 7,2 kW.

9. Elektrimootor, tarvitades voolu 10 A pingel 127 V, arendab võimsust 16 hj. Määrata mootori kasutegur.

Vastus: 92,7%.

10. Sisepõlemismootoriga elektrijaam kulutab 1 kWh elektrienergia tootmiseks 0,3 kg naftat küttevääruusega 11 000 $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$. Leida elektrijaama kasutegur.

Vastus: ≈26,2%.

11. Elektrisoojendaja võimsusega 600 W on arvestatud pingele 120 V. Leida soojendaja valmistamiseks vajaliku nikeliintraadi pikkus, kui traadi ristlõike pindala on 0,2 mm^2.

Vastus: 12 m.

§ 43. VOOLU SOOJUSLIK TOIME. JOULE'i-LENZI SEADUS

Juhti läbiv vool soojendab seda. Tarbijani suunduvate juhtmete soojendamiseks kuluv energia kujutab endast kasutut energiakadu. Nende kadude vähendamine, eriti elektrienergia ülekandmisel kauge vahemaa taha, on üheks tähtsamaks elektrotehnika probleemiks. Kuid elektrienergiat on võimalik soojuseks muuta ka kasulikel eesmärkidel. Nii näiteks kasutatakse voolu soojuslikku toimet metallide elektrikeevitusel, sulavkaitsmetes (kaitsekorkides), soojuslikes mõõteriistades (ampermeetrid, voltmeetrid, püromeetrid), automaatsetes termoregulaatorites, elektri-jootetõlvikutes, elektripliitides, teekannudes, triikraudades, aga ka metallide (elektrihõõglamp) või söe (elektrikaar) helendama panemiseks jne.

1840. a. mõõtis vene akadeemik E. H. Lenz katseliselt elektrivoolu poolt mitmesugustes tingimustes eraldatavat soojushulka. Samal ajal, sõltumata Lenzist, tegi analoogilisi uurimusi inglise õpetlane Joule.

Avastatud seadus leidis praktikas laialdast kasutamist näiteks hõõglambi ja elektrikeevituse juures.

Kui lasta puhta veega täidetud kalorimeetrisse spiraal (joon. 51) ja ampermeetri ning voltmeetri abil mõõta voolutugevus ja pinge, ajamõõtjaga aga fikseerida voolu kestus, siis võib töö arvutada valemist

$$A = UIt.$$

Teades kalorimeetri ja vee massi, nende erisoojusi ja temperatuuri tõusu soojenemisel, võib arvutada voolu toimel eraldunud soojushulga

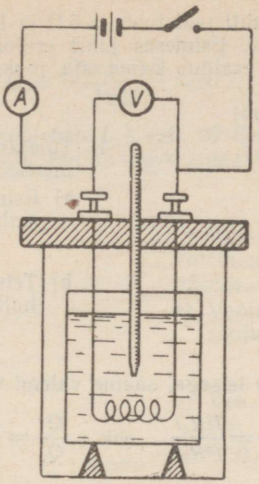
$$Q = (c_v m_v + c_k m_k)\Delta t,$$

kus c_v ja c_k on vastavalt vee ja kalorimeetri erisoojused, m_v — vee mass, m_k — kalorimeetri mass ja $\Delta t = t_2 - t_1$ temperatuuri juurdekasv.

Sel juhul muundub voolu töö täielikult soojuseks ja võime kirjutada:

$$Q = A = UIt.$$

Katsete põhjal jõuti seaduseni, mis kannab Joule'i-Lenzi seaduse nimetust: *voolu toimel juhis eraldunud soojushulk on võrdeline pingelangusega selles juhis, voolutugevusega ja voolu kestusega.*



Joon. 51.

Asendades viimases valemis korrutise UI võimsusega P, saame

$$Q = Pt.$$

Kui valemis $Q = UIt$ asendada U korrutisega IR, siis saame

$$Q = I^2Rt,$$

kus I on väljendatud amprites, R — oomides, t — sekundites, Q — džaulides (tuleb märkida, et 1 J = 0,24 cal).

Sellisel kujul leiab Joule'i-Lenzi seadus sagedast kasutamist praktikas.

Voolu toimel ahelaosas eraldunud soojushulk on võrdeline voolutugevuse ruuduga, ahelaosa takistusega ja voolu kestusega.

Millega seletub metalljuhtme soojenemine voolu toimel? Kuni juhis puudub vool, liiguvad vabad elektronid korrapäratult, ja põrgates kokku kristallvõre ioonidega, vahetavad nendega energiat. See energia, mille vabad elektronid annavad ioonidele, on keskmiselt võrdne energiaga, mille ioonid annavad omakorda vabadele elektronidele. Sel viisil tekib soojuslik tasakaal vabade elektronide süsteemi ja kristallvõre ioonide süsteemi vahel.

Kui juhet läbib vool, siis hakkavad elektronid korrapäraselt liikuma. Ioonidega kokku põrgates annavad elektronid nendele rohkem energiat, kui tagasi saavad. Elektronide energia vähenemine taastatakse kiiresti elektrivälja energia arvel.

Tulemusena rikutakse soojuslikku tasakaalu vabade elektronide süsteemi ja võre ioonide süsteemi vahel. Juhi siseenergia suurenemisel ta temperatuur tõuseb seni, kuni tekib soojuslik tasakaal juhi ja ümbritseva keskkonna vahel.

Ülesanne 35, *a*. Kaks juhti takistustega 5 Ω ja 10 Ω on ühendatud järjestikku ning lülitatud vooluahelasse. Esimeses juhis eraldub mingi aja jooksul 100 J soojust. Kui palju soojust eraldub sama aja jooksul teises juhis?

Antud (SI-süsteem)

$R_1 = 5\ \Omega$;

$R_2 = 10\ \Omega$;

$t_1 = t_2 = t$;

$I_1 = I_2 = I$;

$Q_1 = 100$ J.

Q_2 — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Esimeses juhis eraldunud soojushulk

$$Q_1 = I^2 R_1 t.$$

b) Teises juhis eraldunud soojushulk

$$Q_2 = I^2 R_2 t.$$

c) Jagades esimese võrduse teisega, saame valemi Q_2 määramiseks:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{I^2 R_1 t}{I^2 R_2 t} \quad \text{ehk} \quad \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Valemist on näha, et järjestiklülitusel on juhtides eraldunud soojushulgad võrdelised vastavate osade takistustega.

Lõplikult

$$Q_2 = \frac{Q_1 R_2}{R_1}.$$

2. Arvutame:

$$Q_2 = \frac{100\ \text{J} \cdot 10\ \Omega}{5\ \Omega} = 200\ \text{J}.$$

Ülesanne 35, *b*. Kaks juhti takistustega 5 Ω ja 10 Ω on ühendatud paralleelselt ning lülitatud vooluahelasse. Esimeses juhis eraldus mingi aja jooksul 100 J soojust. Kui palju soojust eraldus sama aja jooksul teises juhis?

Antud (SI-süsteem)

$R_1 = 5\ \Omega$;

$R_2 = 10\ \Omega$;

$U_1 = U_2 = U$;

$t_1 = t_2 = t$;

$Q_1 = 100$ J.

Q_2 — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Esimeses juhis eraldunud soojushulk

$$Q_1 = \frac{U^2 t}{R_1}.$$

b) Teises juhis eraldunud soojushulk

$$Q_2 = \frac{U^2 t}{R_2}.$$

c) Jagades esimese võrduse teisega, saame valemi Q_2 määramiseks:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

Valemist järeldub, et paralleellülitusel on juhtides eralduvad soojushulgad pöördvõrdelised vastavate juhtide takistustega.

Lõplikult leiame:

$$Q_2 = \frac{Q_1 R_1}{R_2}.$$

2. Arvutame:

$$Q_2 = \frac{100\ \text{J} \cdot 5\ \Omega}{10\ \Omega} = 50\ \text{J}.$$

Ülesanne 36. Kui kaua soojeneb 1 l vett 20° C-st kuni 100° C-ni elektriteekannus, mille võimsus on 600 W, kui kannu kasutegur on 80%?

Antud

$m = 1$ kg;

$c = 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}}$;

$t_1 = 20°$ C;

$t_2 = 100°$ C;

$P = 600$ W $= 0{,}6$ kW;

$\eta = 0{,}8$.

τ — ?

Lahendus

(süsteemivälistes ühikutes)

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Voolu poolt eraldatav kasulik soojus

$$Q_1 = P\tau \cdot \eta\ (\text{J}).$$

b) Vee poolt neelatud kasulik soojus

$$Q_2 = cm\ (t_2 - t_1)\ (\text{cal}).$$

c) Koostame soojusliku tasakaalu võrrandi sellise arvestusega, et Q_1 ja Q_2 oleksid väljendatud ühesugustes ühikutes (kalorites):

$$0{,}24\ Q_1 = Q_2 \quad \text{ehk} \quad 0{,}24\ P\tau\eta = cm\ (t_2 - t_1).$$

d) Määrame vee soojendamiseks vajaliku aja:

$$\tau = \frac{cm\ (t_2 - t_1)}{0{,}24\ P\eta}.$$

2. Arvutame:

$$\tau = \frac{1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{deg}} \cdot 1\ \text{kg}\ (100 - 20)\ \text{deg}}{0{,}24\ \frac{\text{kcal}}{\text{kJ}} \cdot 0{,}6\ \text{kW} \cdot 0{,}8} = \frac{80\ \text{kcal}}{0{,}24 \cdot 0{,}6 \cdot 0{,}8\ \frac{\text{kcal}}{\text{s}}} = 695\ \text{s} = 11\ \text{min.}\ 35\ \text{s}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Milles seisab Joule'i-Lenzi seadus?
2. Milliste valemitega võib väljendada Joule'i-Lenzi seadust?
3. Elektripliidi spiraali lühendati. Kas ja kuidas muutub pliidi hõõgumine, kui ta lülitada niisama suure pingega võrku?
4. Miks halvasti ühendatud juhtmed kuumenevad?
5. Miks soovitatakse elektripliidi läbipõlenud spiraali otsi ühendada rauast või alumiiniumist plaadikesega, surudes spiraali otsad sellesse plaadikesse?
6. Kas lühendatud spiraaliga elektripliit hakkab tarvitama rohkem või vähem energiat?
7. Miks elektritõlvikusse sisenevad juhtmed ei soojene nii tugevasti kui tõlviku spiraal?
8. Milline soojushulk eraldub juhis tahistusega 5 Ω, kui teda 20 min. vältel läbib vool 4 A?

Vastus: 23,04 kcal.

9. Ahelasse on paralleelselt ühendatud võrdse pikkuse ning võrdse ristlõikega raud- ja nikeliinjuhe. Millises juhtmes eraldub sama aja jooksul rohkem soojust ja mitu korda?

Vastus: Raudjuhtmes eraldub 3 korda rohkem soojust kui nikeliinjuhtmes.

10. Määrata jahutusõli maht, mis voolab igas sekundis läbi reostaadi, kui õli temperatuur tõuseb 1 sek. jooksul 50° C võrra ja reostaadi poolt tarbitav võimsus on 10 kW ($õli\ tihedus\ D=0{,}9\ \frac{g}{cm^3}=900\ \frac{kg}{m^3}$; $õli\ erisoojus\ c=0{,}4\ \frac{kcal}{kg\cdot deg}$).

Näpunäide. Õli ruumala võib leida soojusliku tasakaalu võrrandist $0{,}24\,P\cdot\tau=cDV\cdot t$.

Vastus: 0,000 133 m^3 = 133 cm^3.

11. 400 lampi pingega 120 V töötavad iga päev 10 h. Iga lambi takistus on 240 Ω. Leida päevane naftakulu sisepõlemismootoris, mis paneb käima dünamo, kui mootori kasutegur on 30% ja dünamo kasutegur 80% ($q=11\,000\ \frac{kcal}{kg}$).

Juhis. 1) Kogu seadeldise kasutegur $\eta=\eta_1\cdot\eta_2=0{,}3\cdot 0{,}8=0{,}24$.
2) Voolu tööd võib väljendada kWs-tes:

$$A=\frac{U^2\tau n}{1000\,R}\ \text{kWs}.$$

3) Nafta massi kg-des võib leida soojusliku tasakaalu võrrandist:

$$qm\eta_1\eta_2=\frac{0{,}24\,U\tau n}{1000\,R},$$

kus n on lampide arv.

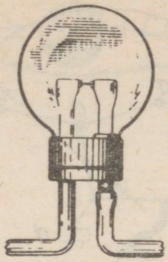
Vastus: 78,6 kg.

§ 44. VOOLU SOOJUSLIKU TOIME RAKENDUSI

1. Elektrisoojendusriistad. Tegelikus elus on laialdaselt levinud mitmesugused elektrisoojendusriistad: pliidid, triikrauad, teekannud, soojendid, tõlvikud, soojenduspadjad, elektrikeetjad jt., kus kasutatakse voolu soojuslikku toimet. Nende seadmete küttekehadel on suur eritakistus ja nad taluvad kõrgeid temperatuure.

2. Hõõglamp. Elektrivoolu toimel juhis eralduvat soojust on võimalik muundada valgusenergiaks. Selline protsess toimub hõõglambis. Kunstlikul valgustusel on küllaltki tähtis osa ühiskonna elus. Valgustus on tähtis tegur vabrikute, tehaste, kaevanduste jne. töös.

Petrooleumilampide asendamine elektrilampidega tõstis tööviljakust ning parandas töö- ja puhkusetingimusi. Üle 700° C soojendatud juhis eralduv soojushulk kasvab kiiresti temperatuuri kasvamisel. Voolu poolt kuumutatava juhi värvus muutub vahemikus tumepunasest valgeni. Käesoleval ajal valmistatakse volframniidiga ja lämmastikuga täidetud kestaga hõõglampe. Hõõgniidi temperatuur ulatub kuni 2800° C-ni. Kasulik oleks hõõglampide temperatuuri veelgi tõsta, kuid niidi materjal auruks seejuures liiga ruttu ja lambi tööiga osutuks üsna lühikeseks. Idee kasutada hõõgniiti valgustamiseks kuulub vene leidurile A. N. Lodõginile. Joonisel 52 on toodud Lodõgini lambi skeem. Klaasanumasse, kahe vaskelektroodi vahele, paigutati õhuke süsiniit, mis voolu toimel balloonis leiduva õhuhapniku arvel osaliselt ära põles. Esimesed Lodõgini



Joon. 52.

lambid «põlesid läbi» 30 minutiga. Edaspidi pikenes lampide tööiga kuni 6 kuuni.

1902. a. leiutas A. N. Lodõgin volframniidiga lambi, mida kasutatakse ka tänapäeval.

Meie tehnika võimaldab valmistada elektrilampe, mille balloon on veidi suurem nööpnõelapeast. Sellised lambid töötavad 3 V pingel ja neid kasutatakse gastroskoopides. Peale miniatuursete elektrilampide õpiti valmistama ka hiiglasuuri lampe. Nende balloonid on kõrgemad kui 1 m, võimsus ulatub aga üle 30 kW. Sellised lambid on mõeldud kasutamiseks majakates.

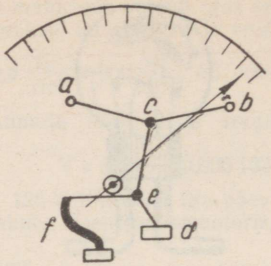
3. Elektriahjud. Laialt on levinud elektriahjud, kus kasutatakse elektrivoolu toimel takistusest eralduvat soojust. Spiraali materjaliks on valitud molübdeen, mis talub temperatuuri üle 2000° C.

Neid ahje kasutatakse nii metallide soojendamiseks kui ka sulatamiseks. Sellistes ahjudes töödeldakse terast ja värvilisi metalle, eeskätt karastatakse ja tsementeeritakse neid. Peale selle kasutatakse ahje keraamika- ja klaasitööstuses detailide põletamisel, emaileerimisel, klaasi sulatamisel jne. Kuivatamiseks kasutatakse ahje ka teistes tootmisharudes.

4. Sulavkaitsmed. Mistahes elektriseadet tuleb ekspluateerida nii, et temas ei tekiks ohtlikke ülekuumenemisi. Kuid võib juhtuda, et rikneb juhtmete isolatsioon või lülitub peajuhtmete vahele väikese takistusega juhe. Sel juhul tekib «lühiühendus», kusjuures vool võib ulatuda mõne tuhande amprini.

Kui näiteks laualambi juhtmes, mille takistus on 0,1 Ω, tekib lühiühendus 120 V pinge all, siis võib vool ulatuda $\frac{120\ V}{0{,}1\ \Omega} = 1200$ A-ni. See omakorda võib rikkuda elektrienergia arvesti ja viia tulekahjuni.

Et sellist ohtu ei tekiks, lülitatakse ahelasse järjestikku tarbijaga kaitsmed, mille põhiosaks on pliitraat. Kui voolutugevus ületab lubatud piiri, traat sulab, katkestab sellega ahela ja avariid ei toimu.



Joon. 53.

5. Kuumtraat-ampermeetrid ja -voltmeetrid. Kuumtraat-ampermeetrites ja -voltmeetrites kasutatakse voolu poolt soojendatavate juhtmete pikenemise nähtust. Juhet *ab* läbiv vool soojendab teda, mistõttu juhe pikeneb (joon. 53).

Vedru *f* tõmbab kõrvale niit *fe*, mis on kinnitatud juhtme *cd* külge, see omakorda on ühendatud juhtmega *ab*.

Seejuures pöördub niidiga *fe* haaratud plokk ja osuti pöördub seda enam, mida tugevam vool läbib juhet *ab*. Kuumtraat-voltmeeter erineb ampermeetrist selle poolest, et traadiga järjestikku lülitatakse veel lisatakistus (tavaliselt asub see juba mõõteriista sees).

§ 45. TERMOELEMENDID JA NENDE KASUTAMINE

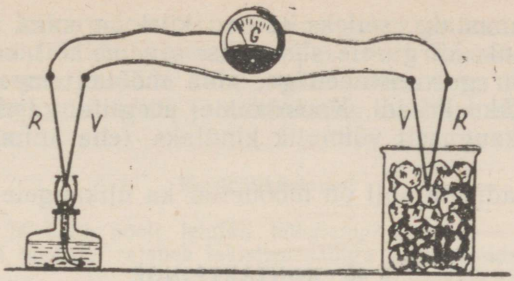
Eespool õppisime tundma elektrivoolu energia vahetut muundumist soojusenergiaks. Tekib küsimus, kas on võimalik saada elektrivoolu vahetult soojusest ja kuidas see toimub? Tavaliselt muundatakse soojus eelnevalt mehhaaniliseks tööks ja alles seejärel elektrienergiaks. Aga miks mitte muuta soojus vahetult elektrivooluks? Sel viisil on tõepoolest võimalik voolu saada, kuid kahjuks üsna vähesel hulgal. Vaatamata sellele on nimetatud nähtus väga huvitav ja viib mitmetele praktiliselt tähtsatele järeldustele.

Kui võtta kaks erinevast metallist, näiteks vasest ja rauast juhet, joota nende otsad kokku ja üht jootekohta soojendada ning teist jahutada, siis tekib ahelas vool, mida võib kindlaks teha galvanomeetri abil (joon. 54).

Soojuse vahetu muundumise elektriks avastas füüsik Seebeck 1821. aastal.

Kaks metalli, mille otsad on kokku joodetud, moodustavad termopaari ehk termoelemendi. *Voolu, mida saadakse termoelemendist, nimetatakse termovooluks ehk termoelektriks.* Termoelektromotoorne jõud on kõikide metallipaaride puhul väga väike. Nii näiteks termopaaril nikkel-plaatina on 100° C juures emj. 0,0015 V, termopaaril vask-konstantaan — 0,004 V, vismut-antimon — 0,011 V.

Termoelemendi või -patarei kasutegur on väga madal — kõigest



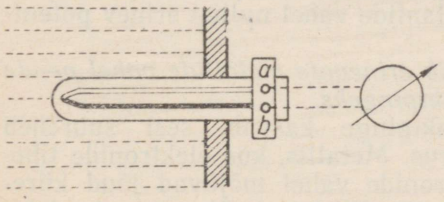
Joon. 54.

1—3%, mistõttu neid ei kasutata vooluallikatena. Erandina kasutatakse neid ainult siis, kui vajatakse väikese võimsusega (kuni 1 W) vooluallikat.

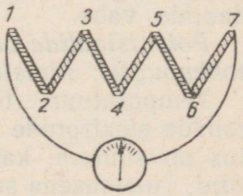
Otstarbekaks osutus aga termopaaride kasutamine teistel eesmärkidel. On kindlaks tehtud, et mõnede termopaaride puhul kehtib küllaltki laiades piirides *võrdeline sõltuvus jootekoha temperatuuri ja tekkiva elektromotoorse jõu vahel.* Seda omadust kasutatakse termoelektrilise termomeetri juures (joon. 55). Viimane koosneb termopaarist ja sellega ühendatud galvanomeetrist, mille skaala on gradueeritud Celsiuse kraadides.

Termopaari materjal on valitud selliselt, et elektromotoorse jõu võrdeline sõltuvus temperatuurist kehtiks võimalikult suures temperatuuride vahemikus (kuni 1600° C). Soojenemisel iga 100 kraadi võrra kasvab näiteks plaatina-roodium-plaatina termopaari emj. vastavalt 0,001 V võrra. Termopaar on suletud portselantorusse. Jootekoht paigutatakse ahju, mille temperatuuri soovitakse mõõta. Klemmid *a* ja *b* ühendatakse galvanomeetriga, mille skaala on gradueeritud kraadides.

Kiirguse soojusliku toime uurimiseks kasutatakse järjestikku ühendatud termopaaridest koosnevat patareid (joon. 56). Paaritud jootekohad (*1, 3, 5, 7* ...) hoitakse ühel ja paarisarvulised (*2, 4, 6* ...) teisel temperatuuril. Termopaari moodustav traat valitakse väikese ristlõikega (et soojusjuhtivus oleks võimalikult väike), jootekohad aga pressitakse väga õhukesteks lehtedeks, et nende pindala oleks suur. Kui peita ühed jootekohad kiirguse eest, teised



Joon. 55.



Joon. 56.

aga värvida mustaks, selleks et nad kiiri paremini neelaksid, ja jätta nad avatuks kiirgusele, siis sellise seadme abil, kui ta on ühendatud tundliku galvanomeetriga, võib mõõta temperatuure kuni sada miljondikku kraadi. Koondavate peeglite kasutamisega on kuni 1,5 km kauguselt võimalik kindlaks teha inimkeha soojuskiirgust.

Selliste seadmete abil on mõõdetud ka ülikaugete tähtede kiirgust.

§ 46. KONTAKTPINGE

Et selgitada termoelektri tekkimise põhjusi, vaatleme seda küsimust põhjalikumalt. On kindlaks tehtud, et metalli sees on vabadel elektronidel märkimisväärne kineetiline energia.

Need elektronid, mille kiirus antud momendil on suunatud juhi pinna poole, võiksid välja lennata, kuid ruumvõre positiivsed ioonid takistavad seda.

Et elektron saaks metallist välja lennata, selleks peab ta tegema tööd teda sinna tagasi tõmbavate jõudude vastu. Seda tööd nimetatakse väljumistööks ja mõõdetakse elektronvoltides.

Elektronvolt (eV) on töö, mida tehakse elektroni ümberpaigutamisel elektriväljas, kui välja punktide vaheline pinge on 1 V.

$$1\ \text{eV} = \frac{4{,}8 \cdot 10^{-10}\,\text{C} \cdot 1\ \text{V}}{3 \cdot 10^{9}} = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\,\text{J}.$$

Tavaliselt on väljumistöö mõne elektronvoldi piirides, kusjuures erinevate metallide puhul on ta erinev. Nii näiteks on väljumistöö volframil 4,5 eV, raual 4,4 eV, tseesiumil 1,9 eV.

Peale selle on kindlaks tehtud, et ühes ja samas metallis on elektronide tihedus (elektronide arv ruumalaühikus) ühesugune, erinevates metallides aga erinev.

Asetame kaks samast metallist plaati tihedalt teineteise vastu. Ühesuguse väljumistöö ja ühesuguse tiheduse tõttu ei teki plaatidel elektronide üle- ega puudujääki. Seetõttu plaatide potentsiaalide vahe on null.

Kui asetada tihedalt vastamisi aga kaks erinevast metallist plaati, siis väljumistööde ja elektronide tiheduste erinevuse tõttu tekib ühel plaadil elektronide ülejääk, teisel aga nende puudujääk, sest elektronide liikumine ühelt plaadilt teisele pole mõlemas suunas ühesugune. Sel juhul tekib plaatide vahel nullist erinev potentsiaalide vahe.

Potentsiaalide vahet, mis tekib erinevate metallide vahel nende kokkupuutel, nimetatakse kontaktpingeks.

Temperatuuri tõustes kontaktpinge kasvab, sest suureneb vabade elektronide liikumise kiirus. Metallis, kus elektronide tihedus on suurem, kasvavad elektronide vahel mõjuvad jõud kiiremini. Tulemusena suureneb ühelt plaadilt teisele üleminevate elektronide arv, mis omakorda põhjustab kontaktpinge kasvu.

Kui võtta kaks erinevast metallist juhet ja joota nende otsad kokku, siis kontaktide erineva temperatuuri korral tekib ahelas elektromotoorsete jõudude vahe, mille tulemusena ilmub ahelasse vool. Sel juhul muundub jootekohtades neelduv soojus vahetult elektrivooluks.

Kontrollküsimusi

1. Millal ja kelle poolt leiutati hõõglamp?
2. Millisel seadusel rajaneb takistustraadiga elektriahjude töö ja kus neid kasutatakse?
3. Mis on lühiühendus?
4. Miks sulavkaitsmetes ei kasutata raskesti sulavaid metalle?
5. Kuidas on ehitatud termoelektriline amper- ja voltmeeter?
6. Kuidas võib soojust vahetult elektrivooluks muundada?
7. Mis on termopaar ja mis on termovool?
8. Milleks kasutatakse termopaare tehnikas?
9. Mis on kontaktpinge?
10. Kuidas seletada termoelektromotoorse jõu ja termovoolu teket ahelas, mis koosneb kahest kokkujoodetud otstega erinevast metallist, kusjuures jootekohti hoitakse erinevatel temperatuuridel?

III PEATÜKK

ELEKTROMAGNETISM

§ 47. VOOLUDE VASTASTIKUNE MÕJU

Vaatleme mõningaid katseid.

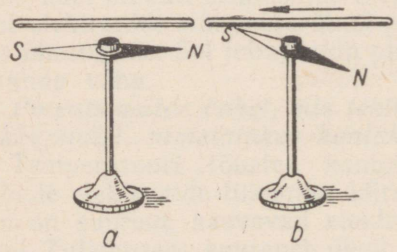
1. Laeme siidniidi otsa riputatud leedripuust kuulikese ja viime ta juhtme lähedusse. Lülime voolu sisse — vool ei avalda laetud kuulikesele mingit mõju. Sellest järeldub, et vooluga juhtme ümber ei esine elektrilisi jõude, järelikult väljaspool juhet ei eksisteeri elektrivälja.

2. Võtame magnetnõela ja asetame tema kohale juhtme, nagu näidatud joonisel 57, *a*. Kui juhet läbib vool, siis kaldub magnetnõel oma esialgsest asendist kõrvale (joon. 57, *b*).

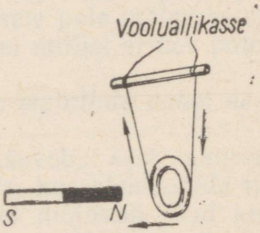
Seega mõjuvad vooluga juhtme ümber jõud, mis panevad magnetnõela liikuma.

3. Riputame isolatsiooniga traadist valmistatud pooli painduvate juhtmete abil üles ning lähendame talle magneti (joon. 58). Lastes voolu läbi pooli, märkame, et pool kas tõmbub magnetile lähemale või tõukub temast eemale (see sõltub voolu suunast poolis). Katse näitab, et *magnetit ja vooluga juhet ümbritsevas ruumis mõjuvad mingid jõud, mis panevad vooluga juhtme liikuma.*

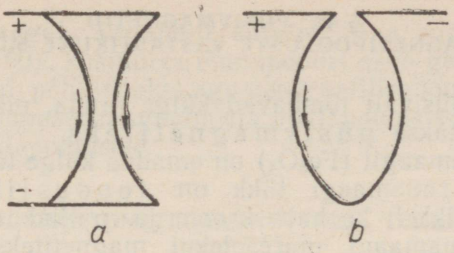
4. Riputame kaks painduvat juhet üles nii, nagu näidatud joonisel 59, ja laseme neist voolu läbi. Näeme, et juhtmed mõjutavad teineteist mingi jõuga.



Joon. 57.



Joon. 58.



Joon. 59.

Kui voolud on samasuunalised, siis juhtmed tõmbuvad (joon. 59, *a*). *Kui aga voolud juhtmetes on vastassuunalised, siis juhtmed tõukuvad* (joon. 59, *b*). Siit järeldub, et *vooluga juhtmete ümber esinevad mingisugused jõud, mis panevad juhtmed liikuma.*

Kõik need katsed viivad järeldusele, et *magneti ja vooluga juhtme ning vooluga juhtmete endi vahel mõjuvad jõud on ühesuguse loomusega. Neid jõude nimetatakse magnetjõududeks.*

§ 48. MAGNETVÄLI

Kui korrata eelmises paragrahvis kirjeldatud katseid vaakuumis, siis jääb tulemus samaks. Sellest järgneb, et magnetjõud mõjuvad ka vaakuumis.

Me juba teame, et kehade vastastikune toime looduses on võimalik ainult mingi materiaalse keskkonna vahendusel. Kuidas aga toimub magneti ja vooluga juhtme vastastikune mõju vaakuumis?

Selle nähtuse mitmekülgse ja sügava tundmaõppimise tulemusena tuldi järeldusele, et *vooluga juhtmete vastastikune mõju toimub elektrivoolu poolt tekitatud materiaalse keskkonna kaudu ja seda keskkonda nimetatakse magnetväljaks.*

Magnetväli ei ole aine. Ta kujutab endast mateeria vormi, mis eksisteerib ruumis pidevalt jaotatuna, erinevalt ainest, mis on koondunud üksikutesse ruumiosadesse.

Mateeriana on magnetväljal olemas energia. Magnetvälja energia on ruumis pidevalt jaotatud. Vool ei mõju voolule hetkeliselt. Magnetväli levib ruumis suure, kuid siiski lõpliku kiirusega — umbes 300 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$. Vooluga juhtme magnetväli ulatub teoreetiliselt lõpmatusse. Seejuures olgu aga märgitud, et kauguse suurenemisel vähenevad magnetjõud väga kiiresti, mistõttu magnetjõudude praktiline mõju on kindlaks tehtav ainult väikestel kaugustel juhtmest.

§ 49. PÜSIVMAGNETID. MAGNETIPOOLUSTE VASTASTIKUNE MÕJU

Kehi, mis püsivalt tõmbavad külge rauda, niklit, koobaltit jt. aineid, nimetatakse püsivmagnetiteks.

Magnetrauamaagil (Fe_3O_4) on omadus külge tõmmata raudesemeid. Sellise rauamaagi tükk on looduslik püsivmagnet. Raud, teras, nikkel, koobalt, kroom ja paljud sulamid muutuvad magnetrauamaagi juuresolekul magnetiteks. Püsivmagneti võib saada ka terasvardast, kui ta asetada alalisvooluga pooli sisse.

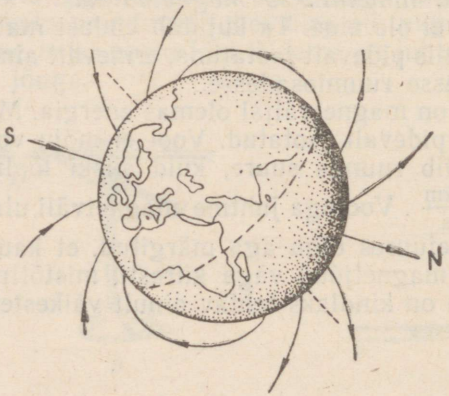
Muide, kõik loetletud kehad, välja arvatud teras ja mõned spetsiaalsed sulamid, kaotavad magnetilised omadused, kui magnetiseerivad kehad eemaldada. Seetõttu on teras (eriti kroomteras, volframteras ja koobaltteras) materjaliks tehismagnetite valmistamisel.

Magneti magnetilisi omadusi võib hinnata kõikide raudesemete kaaluga, mida magnet pärast külgetõmbamist kinni suudab hoida.

Magneti külgetõmbejõud on suurim tema otstel, mida nimetatakse poolusteks. Magneti keskkohale lähenemisel see jõud väheneb ja keskel võrdub nulliga (neutraaljoon).

Kui riputada magnet niidi otsa (või seada nii, et ta ujub veepinnal horisontaalasendis), siis asetub ta selliselt, et üks ots on suunatud põhja, teine lõuna poole. Põhja poole suunatud magneti otsa nimetatakse magnetiliseks põhjapooluseks (N), teist otsa aga magnetiliseks lõunapooluseks (S). Nagu teame, kasutatakse põhja—lõuna suuna määramiseks kompassides magnetnõela, mis saab vabalt horisontaaltasapinnas pöörelda.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et *magnetite samanimelised poolused tõukuvad, erinimelised aga tõmbuvad.* Kompassi magnetnõel võtab kõikjal kindla asendi (mis ligilähedaselt ühtib geograafilise



Joon. 60.

meridiaani suunaga). Järelikult kujutab Maa endast hiiglasuurt magnetit (joon. 60), kusjuures lõunapoolus asub geograafilise põhjapooluse lähedal, põhjapoolus aga geograafilise lõunapooluse lähedal. Seetõttu kompassi magnetnõela põhjapoolus võtab suuna geograafilisele põhjapoolusele.

§ 50. PÜSIVMAGNETI MAGNETVÄLJA TEKKIMINE

Rohkearvuliste katsete põhjal tuldi järelduseni, et magnetväli ja elektrivool on teineteisest lahutamatud. Paigalseisvate elektrilaengute ümber ei ole magnetvälja. Ainult liikuvate laengute ümber on magnetväli, mis teoreetiliselt ulatub lõpmatusse.

Kuidas siis seletada püsivmagneti magnetvälja eksisteerimist? On ju magnetipooluste vastastikune mõju võimalik ainult magnetvälja vahendusel, milles seda mõju antakse edasi kindla kiirusega. Kuidas siis tekib püsivmagneti väli? Sellele küsimusele võib vastata järgmiselt. Iga püsivmagnet kujutab endast metalli, milles leidub vabu elektrone ja elektrone, mis kuuluvad aatomite koosseisu. Kõik need elektronid on pidevas liikumises. Kuid igal liikuval laengul on oma magnetväli ja järelikult on oma magnetväli ka igal elektronil (elektronidel on mass ja laeng). Vabad elektronid liiguvad kaootiliselt. Aatomite koosseisu kuuluvad elektronid tiirlevad mööda kinnisi orbiite, millel on ruumis teatud asend. Mõnede ainete (näiteks raua) aatomites leidub ka selliseid elektrone, mis ümber aatomituuma tiireldes võtavad samaaegselt osa vurritaolisest pöörlemisest ümber oma telje. Selliste elektronide magnetväljad on suhteliselt tugevad ja ruumis niimoodi asetunud, et nad liitudes üksteist tugevdavad. Aatomite elektriväljade vastastikuse mõju tulemusena tekivad kristallvõredes tugevasti magnetiseeritud piirkonnad — domeenid.

Kui panna terasvarras vooluga pooli sisemusse, siis voolu magnetvälja mõjul võtavad domeenid pooli magnetvälja suuna. Pöörlevate elektronide teljed on omavahel paralleelsed. Domeenide vastastikune asend võib säilida ka pärast varda eemaldamist poolist, vaatamata molekulide soojusliikumisele. Seega muutus varras püsivmagnetiks.

Niisiis, *kui elektronide pöörlemisteljed on paralleelsed, siis aatomite magnetväljad tugevdavad liitumisel üksteist ning tulemusena tekib püsiv magnetväli.*

Seda kinnitab rida katseid.

Kui võtta terasvarras ja panna ta ümber pikitelje kiiresti pöörlema, siis varb magnetiseerub. Et ümber oma telje pöörlevaid elektrone võib elementaarvurridena vaadelda, siis peavad nende teljed asetuma paralleelselt üldise pöörlemisteljega.

§ 51. MAGNETVÄLJA JÕUJOONED

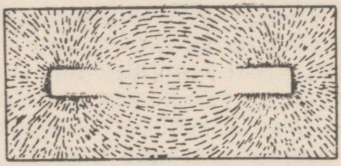
Magnetjõudude suuna kindlakstegemiseks kasutatakse väikesi magnetnõelu.

Magnetjõudude suunaks mingis magnetvälja punktis on võetud kokkuleppeliselt suund, mida näitab sellesse magnetvälja punkti paigutatud magnetnõela põhjapoolus.

Magnetvälja struktuuri uurimiseks on vaja suurt hulka magnetnõelakesi, mis magnetjõudude toimel asetuvad kõik piki teatud jooni.

Magnetvälja jõujoonteks nimetatakse kujuteldavaid jooni, mille suunas asetuvad magnetväljas magnetnõelad.

Jõujoonte näitlikuks kujutamiseks sobib kõige paremini peenike rauapuru, mille iga osake muutub magnetväljas magnetiks.



Joon. 61.

Võtame sirgmagneti, asetame ta horisontaalselt ja katame klaasplaadiga. Puistame klaasile rauapuru ja koputame õrnalt vastu klaasi. Rauapuru paigutub ahelakujuliselt piki jõujooni (joon. 61).

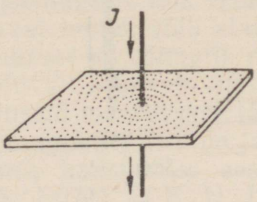
Magnetvälja jõujooned läbivad ka magnetit ennast, kujutades seega kinnisi kõveraid.

Kontrollküsimusi

1. Millise katse abil on võimalik veenduda, et vooluga juhtme ümber puudub elektriväli?
2. Juhet läbiv vool kallutab juhtme lähedal asetsevat magnetnõela esialgsest asendist kõrvale. Millise järelduse sellest võib teha?
3. Kuidas mõjutavad teineteist samasuunalised voolud?
4. Milliseid jõude nimetatakse magnetjõududeks?
5. Mis on magnetväli ja millised on tema omadused?
6. Mis on püsivmagnet?
7. Mida nimetatakse magnetipooluseks?
8. Kuidas seletada elektronteooria põhjal püsivmagneti magnetvälja teket?
9. Kuidas mõjutavad teineteist magnetipoolused?
10. Kuidas mõjub magnetile tugev kuumutamine? Andke seletus.
11. Mida nimetatakse magnetvälja jõujoonteks?
12. Miks saab rauapuru abil uurida magnetvälja jõujoonte struktuuri?
13. Kas saab terasvarrast magneetida nii, et ta mõlemas otsas oleksid samanimelised poolused?
14. Kuidas saab magnetnõela abil kindlaks teha, kas raudvarras on magnet või mitte?
15. Miks tehakse kompassikest vasest, plastmassist vms. materjalist, mitte aga rauast?

§ 52. SIRGVOOLU MAGNETVÄLI

Sirgvoolu magnetvälja struktuuri tundmaõppimiseks teeme järgmise katse. Asetame läbi horisontaalse kartonglehekese vertikaalse juhtme (joon. 62). Laseme läbi juhtme voolu 2 A kuni 4 A



Joon. 62.

ja puistame kartongile peenikest rauapuru. Näeme, et rauapuru asetub kartongil mööda kinnisi kõveraid ümber juhtme. Kartongi nihutamine üles- või allapoole jõujoonte kuju ei muuda.

Selliste katsete põhjal on kindlaks tehtud, et *sirgvoolu magnetvälja jõujooned on kontsentrilised ringjooned, mille keskpunkt asub juhtme teljel ja mis paiknevad juhtmega risti oleval tasapinnal.*

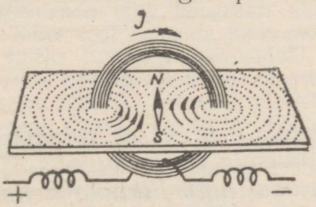
Jõujoonte suuna võib kindlaks teha vertikaalsetele teravikele asetatud magnetnõelakeste abil, kui viia need juhtme lähedusse.

Kui muuta voolu suunda juhtmes, siis jõujoonte kuju ei muutu, vastupidiseks muutub aga jõujoonte suund: magnetnõelad pöörduvad seejuures 180° võrra. Juhet ümbritseva magnetvälja suuna määramiseks võib kasutada järgmist praktilist reeglit: *kui vaadata voolu suunas, siis magnetvälja jõujoonte suund ühtib kellaosuti liikumise suunaga* (kellaosutireegel).

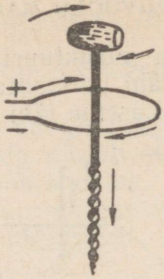
Võib kasutada ka teist reeglit, mida nimetatakse kruvireegliks: *kui kruvi kulgeva liikumise suund ühtib voolu suunaga, siis kruvipea pöörlemise suund ühtib juhet ümbritseva magnetvälja jõujoonte suunaga.*

§ 53. RINGVOOLU MAGNETVÄLI

Ringvoolu magnetvälja tundmaõppimiseks teeme järgmise katse. Juhime läbi rõngaks painutatud juhtme voolu ja puistame ringi tasapinnaga ristuvale kartongile peenikest rauapuru. Ilmneb,



Joon. 63.



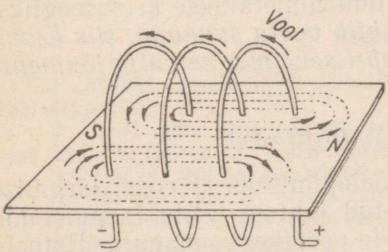
Joon. 64.

et jõujooned ei ole kontsentrilised ringjooned, kuid siiski kinnised kõverad (joon. 63).

Kartonglehele asetatud väikeste magnetnõelakeste abil on võimalik määrata jõujoonte suunda. Selleks kasutatakse kruvireeglit järgmises formuleeringus: *kui kruvi ringvoolu suunas* (joon. 64) *pöörata, siis kruvi kulgev liikumine näitab magnetvälja jõujoonte suunda ringvoolu sees.*

§ 54. VOOLUGA POOLI MAGNETVÄLI

Kui lasta vool läbi mõnest keerust isoleeritud traadist koosneva pooli, siis saame sirgmagneti väljaga sarnaneva magnetvälja (joon. 65). Sellist pooli nimetatakse solenoidiks (kreekakeelsest sõnast «sõlēneidos» — torukujuline).



Joon. 65.



Joon. 66.

Magneti põhjapoolusele vastab see solenoidi ots, kus vool näib liikuvat kellaosuti liikumisele vastassuunas (joon. 66), *lõunapoolusele aga see ots, kus vool näib liikuvat kellaosuti liikumise suunas.* Ringvoolu kohta sõnastatud kruvireegel on rakendatav ka vooluga solenoidi puhul.

§ 55. ELEKTROMAGNET JA SELLE KASUTAMINE

Raud- või terassüdamikuga varustatud solenoidi nimetatakse elektromagnetiks.

Solenoidi läbiva voolu magnetvälja mõjul südamik magneetub ja saadakse tugev elektromagnet, mis erineb püsivmagnetist, sest

1) tema külgetõmbavat toimet võib alati katkestada,
2) külgetõmbejõu suurust on võimalik reguleerida ja
3) tal võib olla tunduvalt tugevam magnetväli.

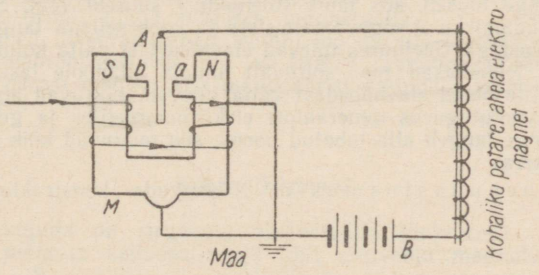
Elektromagneti pooluseid määratakse täpselt samuti nagu solenoidi pooluseid. Elektromagnetite suurus ja kuju võivad olla väga erinevad, sõltuvalt nende kasutamise eesmärgist.

Vene õpetlased B. S. Jacobi ja E. H. Lenz uurisid esimestena elektromagneti külgetõmbejõudu ja leidsid, et see on võrdeline voolutugevuse ruuduga.

Elektromagneteid kasutatakse elektrikõlistites, telegraafiaparaadis, relees, kraanades, dünamotes, elektrimootorites, elektrimõõduriistades, elektrikellades ja reas automaatseadmetes elektrijaamade, telegraafi- ja telefonijaamade, raudteeliinide, hüdrojaamade jne. juhtimiseks.

Väga tugevate elektromagnetite abil eemaldatakse haavadest mürsu- ja miinikilde, silmast rauapuru jne.

Toodud näidetega elektromagnetite kasutamisvõimalused muidugi ei piirdu. Mõnda neist vaatleme lähemalt.



Joon. 67.

1. Relee. Telegraafiaparaat võib töötada ainult teataval voolutugevusel. Side loomisel suurte vahemaade taha telegraafi abil võib liini takistus osutuda nii suureks, et seda läbiv vool ei suuda tööle panna kirjutusseadet. Et suurendada voolutugevust, tuleks tugevasti suurendada liini toitvat patareid või asendada raudjuhtmed vasksetega, mis pole aga majanduslikult otstarbekas. Seepärast kasutatakse väiksetel vooludel töötavat elektromagnetilist releed. Saatejaamast pääseb vool releesse (joon. 67). Viimane koosneb hobuserauakujulisest magnetist *M*, millel asub kaks isoleeritud traadist pooli. Magnetipooluste vahele on paigutatud pehmest rauast plaat — ankur *A*, mis on riputatud nii, et ta tõmbub mõlema pooluse poole ühesuguse jõuga ning ripub seega vabalt vahemikus *ab*. Kui vool saatejaamast läbib relee mähist, siis üks lookmagneti poolustest tugevneb (joonisel tugevneb poolus *N*, sest voolu ja põhjapooluse poolt loodavad magnetväljad ühtivad), teine magnetipoolus aga nõrgeneb.

Plaat (ankur) tõmbub väljaulatuva osa *a* poole ja kohaliku patarei ahel sulgub. Niisiis, relee töölepanemiseks on vaja nõrka voolu, mis lülib sisse kohaliku patarei, see omakorda rakendab tegevusse kirjutusseadme. See nõrk vool aga läbib väikese takistusega ahelat ja seetõttu võib vastav patarei koosneda ainult vähestest elementidest.

Telegrammide andmiseks väga kauge maa taha asetatakse vahejaamadesse relee, mis suleb töötava liini teisele osale voolu andva patarei ahela.

2. K a u g j u h t i m i s e a u t o m a t i s e e r i m i n e. Elektromagnetid etendavad otsustavat osa järjest laienevas mehhaniseerimises ja automatiseerimises. Suur tähtsus on automaatseadmetel elektrijaamades. Ainult automaadid võivad kindlustada keerukate seadmete kiire ning ohutu sisse- ja ümberlülitamise. Automaatjuhtimiseks kasutatakse järgmisi aparaate: maksimaalvoolu relee, minimaalvoolu relee, maksimaal- ja minimaalpinge releed, temperatuurirelee, liini maandatust määrav relee jt.

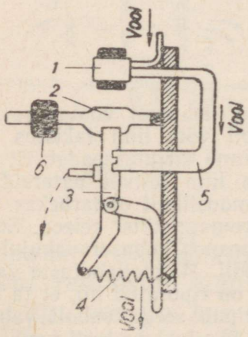
Vaatame näitena elektrijaamades kasutatavat *maksimaalvoolu releed*, mis katkestab ahela, kui vool ületab lubatud piiri (joon. 68).

Vedru *4* tõmbab pidevalt nuga *3* eemale kahvlist *5*, kuid lukusti *2* hoiab nuga kahvlis. Lukusti on valmistatud pehmest rauast, teda hoiab lukustusasendis koormus *6*, mis on arvestatud selliselt, et elektromagnet võib lukusti üles tõmmata, kui teda läbiv vool ületab lubatud piiri. Sel viisil tõmbab elektromagnet *1* lubatust suurema voolu korral lukusti *2* lukustusasendist kõrgemale, vedru *4* mõjul tõmmatakse nuga *3* kahvlist *5* välja ja ahel katkeb.

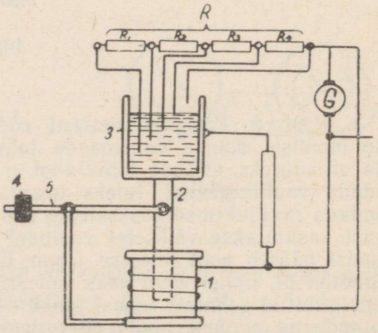
Vaatame *automaatreostaati*, mida kasutatakse generaatori pinge reguleerimiseks (joon. 69).

Solenoid *1* on ühendatud generaatori *G* elektromagnetite mähisega. Raudsüdamik *2*, millele on kinnitatud anum *3* elavhõbedaga, on tasakaalustatud koormusega *4* hooval *5*. Anumasse on viidud generaatori šuntreostaadi *R* juhtmete otsad. Joonisel 69 kujutatud asendis on sektsioonid R_1, R_2 ja R_3 ergutusahelast välja lülitatud, sest nende juhtmete otsad on elavhõbeda kaudu lühistatud. Kui generaatori pinge tõuseb, siis läbib solenoidi *1* suurem vool. Seetõttu tõmbab solenoid raudsüdamikku *2* sügavamalt sisse ja koos sellega langeb allapoole ka anum *3* elavhõbedaga. Seejuures tulevad elavhõbedast välja kolmanda sektsiooni otsad, seejärel teise otsad jne., sõltuvalt anuma allapoole laskumise määrast. Sektsioonid, mille otsad elavhõbedast välja tulevad, lülituvad ahelasse. Tulemusena väheneb voolutugevus generaatori elektromagnetites ja generaatori pinge langeb. Kui pinge langeb alla lubatud normi, siis toimuvad kõik nähtused vastupidises järjekorras.

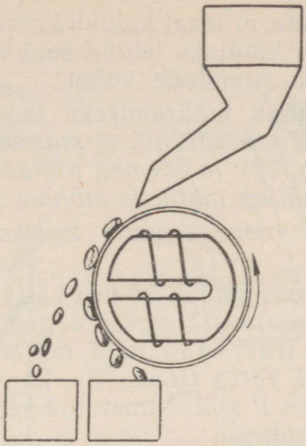
3. S e e m n e p u h a s t u s m a s i n. Nõukogude konstruktorid on loonud



Joon. 68.



Joon. 69.



Joon. 70.

originaalse elektromagnetilise seemnepuhastusmasina, mis võimaldab puhastada tunnis üle 400 kg ristikuseemet umbrohuseemnetest (joon. 70).

Masinas segatakse seemned automaatselt rauapuruga. Ristiku siledate seemnete külge rauapuru ei kleepu, aga umbrohu krobeliste pindadega liitub puru hästi ja seemne pind muutub metalliliseks. Seemned suunduvad kandelaualt valgevasest trumli pinnale, mille sees on tugevad elektromagnetid, mis tekitavad poole trumli pinna ulatuses magnetvälja.

Ristikuseemned libisevad vabalt trumlit mööda alla ja langevad vastavasse kasti. See-eest umbrohuseemned, mis on kaetud rauapuruga, tõmbuvad trumli pinna külge ja pärast magnetvälja mõjusfäärist väljumist langevad trumli alla pandud teise kasti.

Kontrollküsimusi

1. Millise kujuga on sirgvoolu magnetvälja jõujooned?
2. Kuidas määrata kellaosutireegli abil sirgvoolu magnetvälja jõujoonte suunda?
3. Kuidas määrata kruvireegli abil magnetvälja jõujoonte suunda?
4. Kuidas kasutada kruvireeglit ringvoolu magnetvälja jõujoonte suuna määramiseks?
5. Kuidas määrata vooluga pooli magnetipooluseid, teades voolu suunda?
6. Mille poolest sarnanevad silindrilise pooli ja sirgmagneti magnetväljad?
7. Mis on elektromagnet ja kus teda kasutatakse?
8. Millised on elektromagneti põhilised erinevused püsivmagnetiga võrreldes?

§ 56. MAGNETVÄLJA MÕJU VOOLUGA JUHILE. VASAKU KÄE REEGEL

Riputame jäiga traadi kahe painduva juhtme abil horisontaalselt üles nii, et ta asuks hobuserauakujulise magneti pooluste vahel (joon. 71). Lasknud juhtmest läbi voolu joonisel näidatud suunas, märkame, et traat kaldub oma esialgsest asendist kõrvale. Muutes

voolu suunda, veendume, et traat kaldub kõrvale vastassuunas. Selliste katsete põhjal on kindlaks tehtud seos voolu, magnetvälja ja juhi kõrvalekaldumise suundade vahel.

Juhtme liikumissuuna määramiseks kasutatakse vasaku käe reeglit: *kui vasak käsi asetada nii, et magnetvälja jõujooned suubuvad peopessa* (joon. 72) *ja sõrmed näitavad voolu suunda, siis väljasirutatud pöial näitab juhtmele mõjuva jõu suunda.*

Magnetvälja mõju vooluga juhile kasutatakse mitmesugustes seadmetes.

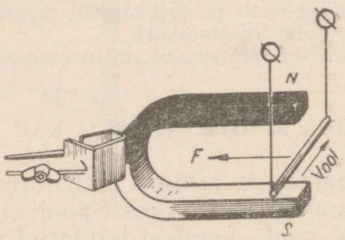
1. Liikuva pooliga mõõteriistad (galvanomeetrid, ampermeetrid, voltmeetrid). Tugeva magneti pooluste vahele on paigutatud isoleeritud traadist raam *M*, mis teda läbiva voolu mõjul pöördub teatava nurga võrra (joon. 73). Raami põhiasend fikseeritakse kahe spiraalvedru *P* abil. Nimetatud vedrude kaudu juhitakse ka vool raami keerdudesse.

Vedru elastsus reguleerib raami pöördenurka, sõltuvalt teda läbiva voolu tugevusest. Suure voolutugevuse korral pöördub raam ka suurema nurga võrra, mida iseloomustab osuti *C* näit skaalal *B*. Selliste galvanomeetrite tundlikkus ulatub kuni 10^{-9} A jaotuse kohta. Kui skaala gradueerida amprites, saadakse ampermeeter. Voltmeeter on ehitatud analoogiliselt, kuid järjestikku raamiga on ühendatud suur takistus. Nimetatud takistus on vajalik, sest lisatakistuse puudumisel läbiks voltmeetrit, mis lülitatakse ahelasse paralleelselt tarbijaga, liiga tugev vool ja see rikuks riista ning tekitaks asjatut energiakulu.

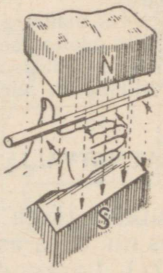
2. Elektrimootor. Mitmed leidurid-on püüdnud voolu ja magneti vastastikust toimet rakendada elektrimootori loomiseks, milles elektrienergia muunduks mehhaaniliseks. Välismaa õpetlased püüdsid elektrimootori loomisel pimesi kopeerida aurumasina ehitust.

Vene akadeemik B. S. Jacobi ei läinud mööda tallatud teid ja lõi 1834. a. esimese pöörleva ankruga elektrimootori maailmas.

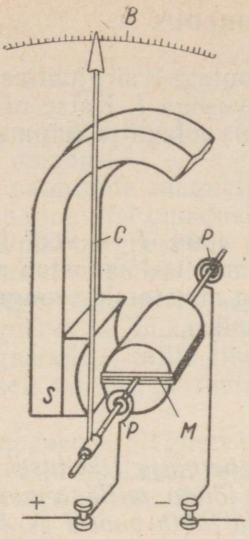
Ta kirjutas: «Esiteks, elektrimootor on aurumasinast tunduvalt odavam, teiseks, kulub vähem, kolmandaks, mootori töö on peaaegu



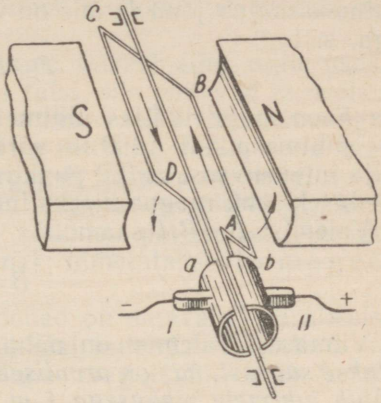
Joon. 71.



Joon. 72.



Joon. 73.



Joon. 74.

mürata, neljandaks, teda ei ähvarda plahvatus, erinevalt aurumasinast ei anna ta suitsu, ei vaja soojendajat ega jahutajat, ja viiendaks, ta ekspluatatsioonikulud on väga väikesed.»

Jacobi konstrueeritud mootor oli üles seatud paadis, mida katsetati Neeval 1838. aastal.

Et mõista kaasaegse elektrimootori tööprintsiipi, vaatleme joonisel 74 toodud skeemi.

Tugeva magneti (või elektromagneti) pooluste vahele on asetatud ristkülikukujuline raam *ABCD*, mis võib vabalt telje ümber pöörelda. Teljele on kinnitatud vasest poolrõngad *a* ja *b*, mis on teineteisest isoleeritud ja ühendatud raami otstega.

Vool juhitakse raami läbi kahe plaadikese (harja), mis on surutud poolrõngaste vastu. Püsivmagneti (elektromagneti) ja voolu magnetväljade vastastikuse mõju tulemusena liigub raami osa *AB* üles — põhjapooluse *N* lähedal, raami osa *CD* aga alla — lõunapooluse *S* ligidal. Kahe sellise jõu (jõupaari) mõjul pöördub raam kuni vertikaalasendini (neutraalasendini). Sellega lõpekski raami pöördumine, kui ei oleks poolrõngaid *a* ja *b*. Inertsi tõttu läbib raam neutraalasendi, kusjuures poolrõngad vahetavad kohad. Tänu sellele muutub raamis automaatselt voolu suund. Uue asendi puhul juhe *AB* laskub (lõunapooluse *S* juures), juhe *CD* aga tõuseb (põhjapooluse *N* juures). Sel viisil tekkis jälle uus jõupaar, mis pöörab raami esialgses suunas (vastupidi kellaosuti liikumisele). Nii saadakse vooluga juhtmekontuuri pidev pöörlemine magnetväljas. Poolrõngaid, mille abil saavutatakse voolu suuna automaatne muutumine, nimetatakse k o l l e k t o r i k s.

Paigutame magnetvälja (risti jõujoontega) sirgjuhtme pikkusega l ja laseme sellest läbi voolu tugevusega I. Katse näitab, et juhtmele mõjub jõud F, mis on võrdeline vooluga ja juhtme pikkusega, s. t.

$$F = B \cdot I \cdot l,$$

kus F on magnetväljas juhtmele mõjuv jõud, I — voolutugevus, l — juhtme pikkus ja B — võrdetegur, mis iseloomustab magnetvälja intensiivsust antud punktis ja mida nimetatakse magnetvälja tiheduseks ehk magnetiliseks induktsiooniks.

Valemist $F = BIl$ saame

$$B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Viimasest valemist on näha, et *magnetvälja tiheduseks nimetatakse suurust, mis on arvuliselt võrdne jõuga, millega magnetväli mõjub juhtmele pikkusega 1 m, kui teda läbib vool 1 A.* Magnetvälja tihedus on v e k t o r i a a l n e s u u r u s. Magnetvälja tiheduse vektori suund ühtib magnetjõu suunaga välja antud punktis.

Tuletame magnetvälja tiheduse ühiku SI-süsteemis.

$$B = \frac{F}{Il}; \quad B = \frac{1\,\mathrm{N}}{1\,\mathrm{A} \cdot 1\,\mathrm{m}} = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}}.$$

Teades, et $1\,\mathrm{N} = \frac{1\,\mathrm{J}}{1\,\mathrm{m}} = \frac{1\,\mathrm{W \cdot s}}{1\,\mathrm{m}} = \frac{1\,\mathrm{AVs}}{1\,\mathrm{m}}$, saame

$$B = 1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} = \frac{1\,\frac{\mathrm{VAs}}{\mathrm{m}}}{\mathrm{Am}} = 1\,\frac{\mathrm{VAs}}{\mathrm{Am^2}} = 1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}}.$$

Korrutist 1 Vs nimetatakse veeberiks (Wb), seepärast

$$1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}} = 1\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m^2}}.$$

Seda magnetvälja tiheduse ühikut nimetatakse teslaks (T). Täiendavaks ühikuks on veel gauss (G):

$$1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}} = 10^4\,\mathrm{Gs}$$

ehk

$$1\,\mathrm{Gs} = 10^{-4}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}}.$$

Toome näite magnetvälja tiheduse arvutamisest.

Juhtmele pikkusega 0,5 m, mis asub magnetväljas risti jõujoontega, mõjub jõud 5 N. Leida magnetvälja tihedus, kui juhet läbib vool 2 A.

Antud: $l = 0{,}5$ m; $I = 2$ A; $F = 5$ N.

Kõik andmed on antud SI-süsteemi ühikutes.

Arvutame:

$$B = \frac{F}{Il}; \quad B = \frac{5\,\mathrm{N}}{2\,\mathrm{A} \cdot 0{,}5\,\mathrm{m}} = 5\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} = 5\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m}^2} = 5\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2} = 5\,\mathrm{T}.$$

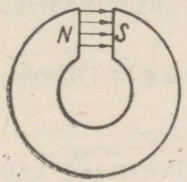
Magnetvälja tihedus ehk induktsioon iseloomustab ka aine magnetilisi omadusi.

Kui paigutada magnetvälja juhtme asemel aine, mille osakestel on magnetilisi omadusi, näiteks raud, siis püüavad ta osakesed asetuda piki magnetvälja jõujooni ja kehas tekib täiendav magnetväli. Seesmise ja välise magnetvälja liitumise tulemusena tugevneb magnetväli aine sees ja nõrgeneb väljaspool seda.

Magnetvälja jõukarakteristikuks ainės on magnetvälja tihedus.

Magnetvälja, mille tihedus on kõikides punktides ühesugune (suuruselt võrdne ja samasuunaline), nimetatakse homogeenseks.

Homogeense magnetvälja jõujooned on omavahel paralleelsed. Sellise välja tekitavad teineteise lähedal asuvad paralleelsed magnetipoolused (joon. 75). Homogeenne magnetväli tekib ka pika pooli sees.



Joon. 75.

Magnetvälja jõujooni kasutatakse nii välja kui ka selle tiheduse näitlikuks kujutamiseks.

On kokku lepitud, et 1 cm² pinda, mis asub risti jõujoontega, läbib nii mitu jõujoont, kui suur on välja tihedus gaussides antud pinna ulatuses.

Kui näiteks tihedus on $1\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}$, siis läbib 1 m² pinda risti sellega 10^4 jõujoont; kui tihedus on $15\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}$, siis läbib 1 m² pinda $15 \cdot 10^4$ jõujoont jne.

§ 58. MAGNETVOOG

Homogeenses väljas on jõujooned omavahel paralleelsed ning magnetvälja tiheduse vektori suund ja arvuline väärtus välja kõikides punktides ühesugune. Läbigu homogeenses väljas tihedusega $B\left(\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}\right)$ pinda S (m²) Φ (kreeka täht «fii») jõujoont.

Jõujoonte arvu, mis läbib antud pinda S, nimetatakse magnetvooks läbi selle pinna.

Kui tähistada magnetvoogu tähega Φ, pindala, mida see magnetvoog läbib, tähega S, ja magnetvälja tihedust tähega B, siis

$$\Phi = B \cdot S.$$

Tuletame magnetvoo ühiku SI-süsteemis:

$$\Phi = 1\,\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot 1\,\text{m}^2 = 1\,\text{Wb} = 1\,\text{Vs}.$$

Magnetvoo ühikuks SI-süsteemis on 1 Wb ehk 1 Vs.
Täiendava ühikuna kasutatakse maksvelli (Mx):

$$1\,\text{Wb} = 10^8\,\text{Mx}; \qquad 1\,\text{Mx} = 10^{-8}\,\text{Wb}.$$

Vaatame näidet. Homogeense magnetvälja tihedus on $4\,\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$. Milline magnetvoog läbib pinda 50 cm², mis asetseb risti jõujoontega? Antud: $B = 4\,\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$, $S = 50\,\text{cm}^2 = \frac{50}{10\,000}\,\text{m}^2 = 0{,}005\,\text{m}^2$.

Asendades suuruste arvulised väärtused magnetvoo valemisse, saame:

$$\Phi = BS; \qquad \Phi = 4\,\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot 0{,}005\,\text{m}^2 = 0{,}02\,\text{Vs}.$$

§ 59. MAGNETILINE LÄBITAVUS

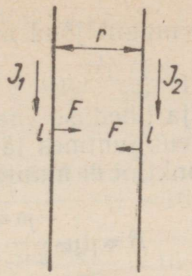
Voolu magnetväli võib igas punktis olla erineva intensiivsusega. Kui võtta kaks paralleelset juhet, milles voolutugevused on vastavalt I_1 ja I_2, siis, mõõtes juhtmete magnetväljade vahel mõjuvaid jõude, on kerge veenduda, et need jõud sõltuvad: esiteks, voolutugevusest, teiseks, juhtmetevahelisest kaugusest ja kolmandaks, selle keskkonna magnetilistest omadustest, milles juhtmed asuvad.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et vooluga juhtmete vahelist jõudu võib SI-süsteemis avaldada valemiga

$$F = \mu_a \frac{I_1 I_2 l}{2\pi r},$$

kus F on juhtmete vahel mõjuv jõud, μ_a (kreeka täht «müü») — keskkonna magnetilisi omadusi väljendav suurus, mida nimetatakse keskkonna absoluutseks magnetiliseks läbitavuseks, I_1 ja I_2 — voolutugevused juhtmetes, r — juhtmetevaheline kaugus, l — lõik, mille ulatuses juhtmed on paralleelsed (joon. 76). Kui voolutugevused on ühesugused ($I_1 = I_2 = I$), siis võtab eespool toodud valem kuju:

$$F = \mu_a \frac{I^2 l}{2\pi r}.$$



Joon. 76.

Jõudu, millega ühe voolu magnetväli mõjutab teise voolu magnetvälja, võib määrata veel valemiga (vt. § 57)

$$F = BIl.$$

Võrreldes neid valemeid, saame:

$$BIl = \mu_a \frac{I^2 l}{2\pi r},$$

kust

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi r}.$$

Sellest

$$\mu_a = \frac{2\pi r B}{I}.$$

Leiame absoluutse magnetilise läbitavuse ühiku SI-süsteemis:

$$\mu_a = \frac{2\pi r B}{I}; \quad \mu_a = \frac{1\,\text{m} \cdot \frac{\text{Ws}}{\text{m}^2}}{1\,\text{A}} = 1\,\frac{\text{Vsm}}{\text{m}^2\text{A}} = 1\,\frac{\text{Vs}}{\text{mA}} = 1\,\frac{\Omega \cdot \text{s}}{\text{m}} = 1\,\frac{\text{H}^1}{\text{m}}.$$

Absoluutsest magnetilist läbitavust võib esitada kahe suuruse korrutisena

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0,$$

kus μ on dimensioonita suurus, mis sõltub keskkonna omadustest, mitte aga ühikute süsteemist, μ_0 aga dimensiooniga suurus, mis ei sõltu keskkonnast, kuid mille arvuline väärtus oleneb ühikute süsteemist.

μ_0 nimetatakse magnetiliseks konstandiks, mille väärtus SI-süsteemis on

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\,\frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

Suurus μ kannab keskkonna suhtelise magnetilise läbitavuse ehk lihtsalt magnetilise läbitavuse nime

[1] Vt. H (henri) lk. 130.

ja näitab, mitu korda on magnetjõud antud keskkonnas suuremad kui vaakuumis.

Vaakuumi puhul $\mu = 1$.

Tähistame magnetvälja tiheduse vaakuumis tähega B_0 ja aines tähega B. Kui voolutugevus juhtmes jääb samaks ja kaugus juhtmest kuni välja antud punktini ei muutu, siis võib kirjutada:

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

ja

$$B_0 = \mu_0 \frac{I}{2\pi r}.$$

Jagades esimese võrduse teisega, saame:

$$\mu = \frac{B}{B_0}.$$

Lähtudes sellest valemist, võime keskkonna suhtelisele magnetilisele läbitavusele anda järgmise määrangu: *keskkonna suhteliseks magnetiliseks läbitavuseks nimetatakse suurust, mis näitab, mitu korda on magnetvälja tihedus antud keskkonnas suurem kui vaakuumis.*

Suhteline magnetiline läbitavus on abstraktne suurus, mis võib olenevalt ainest olla suurem või väiksem kui üks. Nii näiteks raual $\mu = 5000$, niklil $\mu = 300$, volframil $\mu = 1{,}000\,175$, vasel $\mu = 0{,}999\,912$ jne.

Vaatame näiteid.

1. Leiame magnetvälja tiheduse punktis, mis asub õhus 0,2 m kaugusel peenikesest sirgjuhtmest, mida läbib vool 10 A.

On antud:

$$r = 0{,}2\ \text{m}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}; \quad \mu \approx 1, \quad I = 10\ \text{A}.$$

Kasutades valemit $B = \mu_0\mu \cdot \frac{I}{2\pi r}$,

arvutame.

$$B = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 10\ \text{A}}{2\pi \cdot 0{,}2\ \text{m}} = 10^{-5} \frac{\text{HA}}{\text{m}^2} = 10^{-5} \frac{\frac{\text{Vs}}{\text{A}}\,\text{A}}{\text{m}^2} = 10^{-5} \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}.$$

2. Kaks paralleelset 2 m pikkust peenikest juhet asuvad õhus 0,5 m kaugusel teineteisest. Voolutugevus esimeses juhtmes on 10 A, teises 20 A. Leida juhtmetele mõjuv jõud.

On antud:

$$r = 0{,}5\ \text{m}; \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}; \quad \mu \approx 1;$$

$$I_1 = 10\ \text{A}; \quad I_2 = 20\ \text{A}; \quad l = 2\ \text{m}.$$

Leiame juhtmetele mõjuva jõu valemist:

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

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}} \cdot 10\,\mathrm{A} \cdot 20\,\mathrm{A} \cdot 2\,\mathrm{m}}{2\pi \cdot 0{,}5\,\mathrm{m}} = 16 \cdot 10^{-5} \frac{\mathrm{A}^2 \cdot \mathrm{H}}{\mathrm{m}} =$$

$$= 16 \cdot 10^{-5} \frac{\mathrm{A^2Vs}}{\mathrm{mA}} = 16 \cdot 10^{-5} \frac{\mathrm{AV \cdot s}}{\mathrm{m}} = 16 \cdot 10^{-5} \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{m}} = 16 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{N}.$$

§ 60. MAGNETVÄLJA TUGEVUS

Magnetvälja iseloomustamiseks kasutatakse tiheduse mõistet, mis sõltub juhtme geomeetrilisest kujust, asendist, voolutugevusest temas ja keskkonna magnetilistest omadustest. Kasutatakse ka abisuurust, mis ei sõltu keskkonna magnetilistest omadustest, kuid oleneb voolutugevusest ja juhtme kujust. Seda nimetatakse *magnetvälja tugevuseks* antud punktis ja tähistatakse tähega H.

Magnetvälja tiheduse B ja tugevuse H vahel on järgmine seos:

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H,$$

kust

$$H = \frac{B}{\mu_a}.$$

Valemist näeme, et magnetvälja tugevus antud punktis võrdub välja tiheduse ja keskkonna magnetilise läbitavuse suhtega.

Leiame magnetvälja tugevuse ühiku SI-süsteemis.

$$H = \frac{B}{\mu_a}. \qquad H = \frac{1\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}}}{1\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}} = \frac{1\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{m^2}}}{1\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}} = 1\frac{\mathrm{VsAm}}{\mathrm{m^2\,Vs}} = 1\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}.$$

Niisiis on magnetvälja tugevuse ühikuks $1\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}$.

Vahel kasutatakse ka teist magnetvälja tugevuse ühikut, mida nimetatakse örstediks (Oe):

$$1\,\mathrm{Oe} \approx 80\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} = 0{,}8\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{cm}}.$$

Magnetvälja tugevus kujutab endast *vektoriaalset* suurust, mille suund isotroopses keskkonnas ühtib tihedusvektori suunaga.

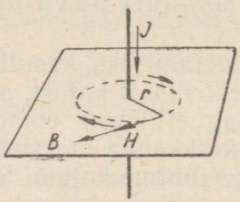
Võrreldes valemit $B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi r}$ valemiga $B = \mu_0 \mu H$, saame

$$\mu_0 \mu H = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi r},$$

kust

$$H = \frac{I}{2\pi r}.$$

Sellest valemist lähtudes võime magnetvälja tugevust defineerida järgmiselt: *magnetvälja tugevuseks välja antud punktis nimetatakse suurust, mis võrdub juhet läbiva voolutugevuse ja antud punkti läbiva jõujoone pikkuse suhtega* (joon. 77).



Joon. 77.

Valemist $H = \frac{I}{2\pi r}$ võib samuti tuletada magnetvälja tugevuse ühiku SI-süsteemis. Kui $I = 1$ A, $2\pi r = 1$ m, siis $H = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}}$.

Üks amper meetri kohta $\left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right)$ *on magnetvälja tugevus, mida tekitab 1-amprine sirgvool välja punktis, mida läbib jõujoon pikkusega 1 m.*

Teiste sõnadega, amper meetri kohta on 1-amprise sirgvoolu magnetvälja tugevus kaugusel $\frac{1}{2\pi}$ ehk 0,16 m sellest juhtmest.

Vaatleme mõningaid näiteid.

1. Sirgjuhet läbib vool tugevusega 25,12 A. Leida magnetvälja tugevus 0,1 m kaugusel juhtmest.

On antud: $I = 25{,}12$ A, $r = 0{,}1$ m.

Leiame magnetvälja tugevuse valemist:

$$H = \frac{I}{2\pi r}; \quad H = \frac{25{,}12 \text{ A}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1 \text{ m}} = 40 \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

2. Milline vool läbib sirgjuhet, kui temast 0,2 m kaugusel on magnetvälja tugevus $10 \frac{\text{A}}{\text{m}}$?

On antud $H = 10 \frac{\text{A}}{\text{m}}$; $r = 0{,}2$ m.

Valemist $H = \frac{I}{2\pi r}$ avaldame voolutugevuse $I = 2\pi r H$.

$$I = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}2\ \text{m} \cdot 10\ \frac{\text{A}}{\text{m}} = 12{,}56\ \text{A}.$$

3. Leida magnetvälja tihedus rauatükis, mis asetseb väljas tugevusega 20 000 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$, kui raua magnetiline läbitavus $\mu = 5000$.

On antud: $H = 2 \cdot 10^4\ \frac{\text{A}}{\text{m}}$; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{H}}{\text{m}}$; $\mu = 5000$.

Tiheduse leiame valemist

$$B = \mu_0 \mu \cdot H.$$

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{H}}{\text{m}} \cdot 5000 \cdot 2 \cdot 10^4\ \frac{\text{A}}{\text{m}} =$$

$$= 4 \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 5 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^4\ \frac{\text{A}}{\text{m}} = 125{,}6\ \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millest sõltub vooluga juhtme liikumise suund magnetväljas?
2. Mille kohta käib vasaku käe reegel ja kuidas see sõnastatakse?
3. Millest sõltub vooluga juhtmele mõjuva jõu suurus magnetväljas?
4. Mida nimetatakse magnetvälja tiheduseks?
5. Kas magnetvälja tihedus on skalaarne või vektoriaalne suurus?
6. Nimetada magnetvälja tiheduse ühik SI-süsteemis.
7. Mis on magnetvoog ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
8. Millistes ühikutes mõõdetakse absoluutset magnetilist läbitavust SI-süsteemis?
9. Millega võrdub magnetiline konstant SI-süsteemis?
10. Mida nimetatakse magnetvälja tugevuseks?
11. Kas magnetvälja tugevus on skalaarne või vektoriaalne suurus?
12. Millise valemi järgi võib arvutada magnetvälja tugevust antud punktis?
13. Millise valemi järgi võib arvutada sirgvoolu magnetvälja tihedust antud punktis?
14. Mille ühik on amper meetri kohta?
15. Juhtmele pikkusega 0,4 m, mis asub magnetväljas risti jõujoontega, mõjub jõud 0,2 kG, kui juhet läbib vool 5 A. Leida välja tihedus.

Vastus: 0,98 $\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

16. Leida magnetvälja tihedus niklis, mis asub magnetväljas tugevusega 50 000 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$, kui nikli magnetiline läbitavus on 300.

Vastus: 18,84 $\frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

17. Sirgjuhet läbib vool 125,6 A. Milline on magnetvälja tugevus õhus 2 m kaugusel juhtmest?

Vastus: 10 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$.

18. Sirgjuhet läbib vool tugevusega 9,42 A. Milllisel kaugusel juhtmest on magnetvälja tugevus õhus 3 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$?

Vastus: 0,5 m.

§ 61. PARAMAGNETILISED, FERROMAGNETILISED JA DIAMAGNETILISED AINED

Uurides erinevate ainete magnetilisi omadusi, tuldi järeldusele, et nende magnetilised läbitavused võivad olla nii suuremad kui ka väiksemad vaakuumi magnetilisest läbitavusest.

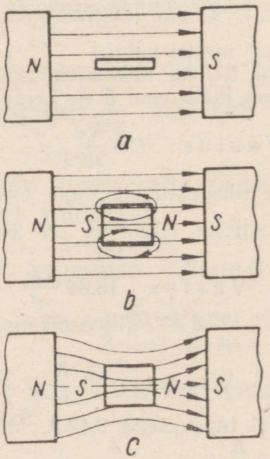
Sõltuvalt magnetilise läbitavuse suurusest eristatakse paramagnetilisi, ferromagnetilisi ja diamagnetilisi aineid.

Paramagnetilisteks nimetatakse selliseid aineid, mille magnetiline läbitavus on pisut suurem kui vaakuumis ($\mu > 1$). Need on näiteks alumiinium, hapnik, õhk jt.

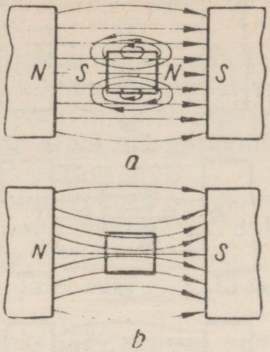
Kui riputada alumiiniumvarras niidi otsa ja asetada ta tugevate magnetipooluste vahele (joon. 78, *a*), siis asetub ta telg piki välja jõujooni. Nii käituvad magnetväljas kõik paramagnetilised ained. Magnetvälja sattudes tugevdavad nad pisut seda otstel oma sisemise magnetvälja arvel (joon. 78, *b* ja *c*). Nähtust võib seletada järgmiselt.

Paramagnetilise aine aatomites on ainult sellised elektronid, mis liiguvad ümber tuuma, kuid ei pöörle ümber telje. Nende elektronide magnetväljad on väga nõrgad, kuid tänu orbiitide omapärasele asendile ruumis, mille puhul magnetväljad tugevdavad üksteist, on aatomi magnetväli nõrkade magnetipoolustega. Välise magnetvälja mõjul moodustuvad sellistest aatomitest ahelad, mis kõik kujutavad endast väga nõrku magneteid. Tulemusena osutub aatomite seesmine magnetväli suunatuks piki välise välja suunda. Seetõttu tugevneb üldine magnetväli varda otste juures ja nõrgeneb varda kõrval.

Ferromagnetilisteks aineteks ehk ferromag-



Joon. 78.



Joon. 79.

neetikuteks nimetatakse selliseid aineid, mille magnetiline läbitavus ületab mitu korda vaakuumi magnetilise läbitavuse.

Siia kuuluvad raud, malm, teras, nikkel, koobalt ja rida magnetilisi sulameid nagu magnetiit jt.

Kui asetada niidi otsa riputatud raudvarras magnetipooluste vahele, siis paigutub ta nii, et telg kulgeb piki välja jõujooni. Nii käituvad kõik ferromagneetikud.

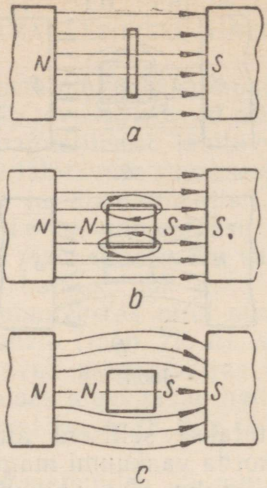
Sattudes magnetvälja nad magneetuvad ja tugevdavad oma magnetismi arvel märgatavalt välist välja pooluste juures (joon. 79, *a* ja *b*). Ferromagneetikutes on magnetvälja tihedus mitu korda suurem kui paramagneetikutes. Seal, kus on vaja saada tugevat magnetvälja, kasutataksegi ferromagneetikuid.

Ferromagnetismi nähtust võib seletada järgmiselt. Ferromagneetikute aatomites leidub elektrone, mis, liikudes ümber tuuma, pöörlevad veel ümber telje. Nende elektronide magnetväli on väga tugev ja ruumis on nad orienteeritud selliselt, et magnetväljad liitudes tugevdavad teineteist. Tulemusena osutuvad ferromagneetikute aatomite väljade poolt moodustatud poolused tunduvalt tugevamaks kui paramagneetikutel. Väljade vastastikuse toime tõttu tekivad kristallvõres iseseisvad magnetiseeritud piirkonnad — domeenid. Välise magnetvälja mõjul toimub domeenide ümbermagneetimine välja suunas. Tulemusena tugevneb magnetväli domeenide sees, mis omakorda tugevdab välist välja ferromagneetiku pooluste lähedal.

Diamagnetilisteks aineteks nimetatakse selliseid aineid, mille magnetiline läbitavus on väiksem kui vaakuumil ($\mu < 1$). Niisugused on vismut, antimon, plii, hõbe, vask, kuld, vesi, argoon, heelium, neoon, krüptoon, ksenoon ning kõik orgaanilised ained, nagu suhkur, tärklis jt.

Kui riputada vaskvarb niidi otsa ja paigutada ta tugevasse magnetvälja, siis asetub ta risti välja jõujoontega, sest ta otsad tõukuvad magnetipoolustest kaugemale (joon. 80, *a*).

Magnetvälja sattunud diamagnetiliste ainete pooluste juures



Joon. 80.

väline magnetväli nõrgeneb. Diamagnetilise aine sees on väli veelgi nõrgem kui väljaspool (joon. 80, *b* ja *c*).

Diamagnetism seletub järgmiselt. Diamagneetikute aatomites liiguvad elektronid ümber tuumade erinevates, enamalt jaolt üksteisele vastupidistes suunades, nii et nende magnetväljad neutraliseeruvad magnetiliselt vastastikku.

Väline magnetväli, mis mõjutab diamagneetiku aatomite elektrone, muudab mõne elektroni liikumise suunda, kuid nende elektronide magnetväljad mõjuvad omakorda välisele väljale. Seetõttu diamagneetik küll veidi magnetiseerub, kuid tema magnetväli on vastupidine välise magnetväljaga ja nõrgendab seda.

§ 62. PÜSIV JA MUUTUV MAGNETVÄLI

Kui juht on liikumatu ja vool ei muutu ei suunalt ega ka suuruselt, siis magnetvälja tihedus kõigis välja punktides ajas ei muutu. Samasugune olukord on liikumatu püsivmagneti korral.

Magnetvälja, mille tihedusvektor üheski punktis ajas ei muutu, nimetatakse p ü s i v a k s m a g n e t v ä l j a k s.

Kui aga: 1) liigutada vooluga juhet, 2) muuta temas voolutugevust (suurendada või vähendada seda reostaadi abil), 3) muuta voolu suunda juhtmes, siis muutub magnetväli ja muutub ka iga tema punkti tihedusvektor (nii ajas, suunalt kui ka mõlemas osas).

Liigutades püsivmagnetit, saame samuti muutuva magnetvälja.

Magnetvälja, mille tihedusvektor kõikides punktides suuruse või suuna poolest ajas muutub, nimetatakse muutuvaks.

Muutuval magnetväljal on suur tähtsus ferromagneetikute omaduste tundmaõppimisel.

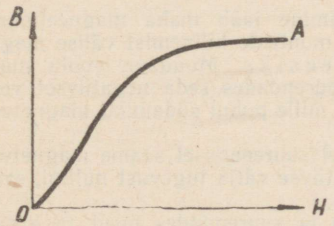
Kui vooluga pooli sisemusse asetada ferromagnetilisest materjalist (rauast, terasest, niklist, koobaltist või mõnest magnetilisest sulamist) südamik, siis pooli magnetvälja induktsioon kasvab ferromagneetiku magnetvälja arvel märgatavalt. Selle nähtuse olemust valgustatakse järgmises paragrahvis.

Kui suurendada voolutugevust poolis, siis suureneb ka pooli magnetväli ja koos sellega südamiku induktsioon, kuid mitte võrdeliselt voolutugevusega. Sellest järeldub, et ferromagneetiku magnetiline läbitavus ei ole jääv suurus, vaid muutub sõltuvalt välisest väljast.

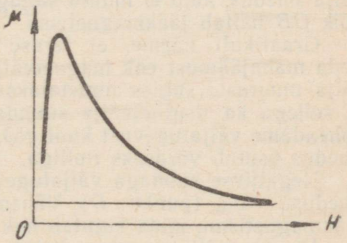
Tõepoolest, kui μ oleks jääv suurus, siis välja tihedus $B = \mu\mu_0 H$ muutuks võrdeliselt voolutugevusega ja graafik kujutaks endast koordinaatide algusest väljuvat sirget.

Moskva ülikooli professori A. G. Stoletovi 1872. aastal tehtud uurimised näitasid, et ferromagneetiku magneetumist kujutab graafiliselt kõver, mis on iseloomulik igale ferromagnetilisele ainele (terase magneetumise graafik on kujutatud joon. 81).

Sõltuvalt vooluga pooli magnetvälja tugevuse kasvamisest suureneb välja suunas ümbermagneetunud domeenide arv, mistõttu südamikus välja tihedus kasvab ja kõver graafikul kulgeb tõusvalt, kuni tihedusel on maksimaalne väärtus (punkt A).



Joon. 81.



Joon. 82.

Kui ehitada mingi ferromagneetiku magnetilise läbitavuse ja välise magnetvälja tugevuse vahelise sõltuvuse graafik, siis saame omapärase kõvera, millel on selgelt eraldatav magnetilise läbitavuse maksimaalväärtus vastavalt magnetvälja tugevuse teatavale väärtusele (joon. 82).

Graafikult on näha, et μ kasvab H kasvades kiiresti, ja saavutanud maksimumi, hakkab aeglaselt vähenema, lähenedes vaakuumi magnetilise läbitavuse väärtusele.

Kontrollküsimusi

1. Milliseid aineid nimetatakse paramagnetilisteks, ferromagnetilisteks ja diamagnetilisteks?
2. Tooge näiteid paramagnetiliste, ferromagnetiliste ja diamagnetiliste ainete kohta.
3. Kuidas seletada elektronteooria seisukohalt paramagnetismi, ferromagnetismi ja diamagnetismi?
4. Millist magnetvälja nimetatakse püsivaks?
5. Kuidas saadakse püsivat magnetvälja?
6. Millist magnetvälja nimetatakse muutuvaks?
7. Kuidas saadakse muutuvat magnetvälja?

§ 63. FERROMAGNETILISTE KEHADE MAGNEETIMINE JA ÜMBERMAGNEETIMINE

Võtame pooli ja asetame sellesse terassüdamiku (joon. 83). Suurendades reostaadi abil voolutugevust poolis, suurendame magnetvälja tugevust pooli sees, mistõttu kasvab ka magnetvälja tihedus südamikus. Viimase kindlakstegemiseks asetame pooli magnetvälja vertikaalse osuti, mis võib vabalt horisontaaltelje ümber pöörduda.

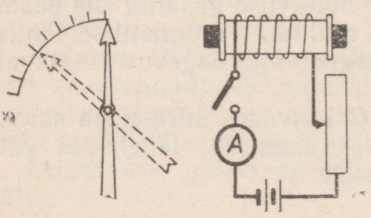
H ja B vaheline sõltuvus on kujutatud kõveraga OA (joon. 84). Kui veelgi suurendada H, siis B enam ei kasva, sest kõver on juba peaaegu horisontaalne. Viimane kõvera osa vastab südamiku magnetilisele küllastatusele, s. t. sellisele olukorrale, kus elementaarmagnetid (domeenid) on täielikult orienteerunud välise välja suunas.

Vähendame nüüd väljatugevust kuni nullini. Seejuures väheneb ka magnetvälja tihedus, kuid ei muutu sugugi nulliks. H ja B sõltuvust kujutab kõver AB. Lõik OB näitab jääkmagnetismi.

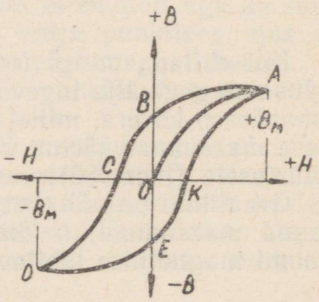
Graafikult näeme, et terase demagneetimine jääb maha magneetimisest. Seda mahajäämust ehk magnetvälja tiheduse muutuste hilinemist välise magnetvälja muutuste suhtes nimetatakse *hüstereesiks*. Muudame voolu suunda ja sellega ka magnetvälja suunda poolis. Suurendades seda negatiivset voolu, vähendame väljatugevust kuni väärtuseni OC, mille puhul südamiku magnetvälja tihedus osutub võrdseks nulliga.

Negatiivse suunaga väljatugevuse edasisel suurenemisel saame magnetvälja tiheduse $-B_M$ (punktis D). Vähendades negatiivse välja tugevust nullini, saame jääkmagnetismi, mida kujutab lõik OE.

Muutes väljatugevuse suuna positiivseks ja suurendades pisut ta arvulist



Joon. 83.



Joon. 84.

väärtust kuni väärtuseni *OK*, saame nulliga võrduva tiheduse. Edasi väljatugevust suurendades kasvab tihedus väärtuseni $+B_M$.

Näeme, et ühes voolutugevuse muutumise tsüklis saime terase ümbermagneetimist iseloomustava kinnise kõvera. Seda kõverat *ABCDEKA* nimetatakse hüstereesisilmuseks.

Terase ümbermagneetimine on seotud energiakadudega, sest osa energiast muundub soojuseks ja soojendab südamikku.

Teooria näitab, et hüstereesisilmuse pindala on võrdeline ühes ümbermagneetimise tsüklis kulutatud energiaga.

Ferromagnetilisi materjale jaotatakse pehmeteks ja kõvadeks. Pehmete materjalide hüstereesisilmuse pindala on väike, kõvadel aga märkimisväärselt suur.

Terase ümbermagneetimise nähtust uuris esimesena vene õpetlane A. G. Stoletov 1872. a.

IV PEATÜKK

ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON

§ 64. ELEKTROMAGNETILISE INDUKTSIOONI NÄHTUS

1820. a. tegi taani füüsik Oersted kindlaks elektrivoolu magnetilise toime. Voolu magnetvälja toimel pöördus juhtme lähedale paigutatud magnetnõel esialgsest asendist kõrvale.

Inglise füüsik Faraday tegi selle põhjal järelduse: *kui suletud ahelas kulgev vool paneb magneti liikuma, siis vastupidi — magneti liikumine peaks põhjustama voolu ilmumise suletud ahelas.*

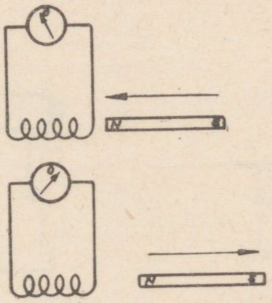
Järelduse õigsust tõestas Faraday 1831. a. rea katsetega.

Elektrivoolu, mis tekib suletud ahelas muutuva magnetvälja mõjul, nimetatakse induktsioonivooluks ja nähtust ennast elektromagnetiliseks induktsiooniks.

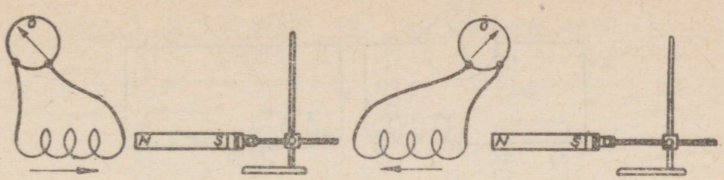
§ 65. INDUKTSIOONIVOOLU SAAMISE PÕHITINGIMUSED

Vaatleme Faraday katseid, mis selgitavad induktsioonivoolu saamise tingimusi.

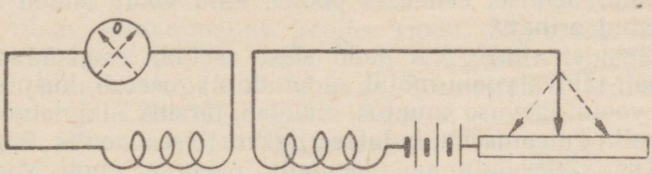
1. Kinnises kontuuris (joon. 85) tekib induktsioonivool, kui viia magnet kontuuri sisse või eemaldada ta sealt. Seejuures kaldub



Joon. 85.



Joon. 86.



Joon. 87.

galvanomeetri osuti magneti kontuuri sisse liikumisel ühele ja kontuurist eemaldumisel teisele poole: järelikult muutub induktsioonivoolu suund.

Mida tugevam on magnet, mida kiiremini ta liigub ja mida suurem on pooli keerdude arv, seda suurem on tekkiva induktsioonivoolu tugevus.

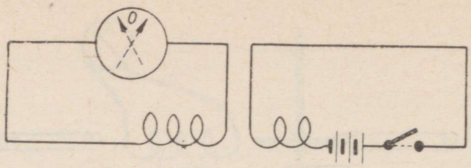
Kui asetada magnet pooli lähedusse või koguni sisse, siis liikumatu magneti korral voolu ei teki, vaatamata magneti tugevusele ja pooli keerdude arvule. Sellest järeldub, et induktsioonivoolu saamiseks suletud ahelas ei piisa ainult magnetvälja olemasolust, vaid on ka vajalik, et see muutuks.

Kui magnet läheneb suletud poolile, siis magnetvoog pooli sees suureneb ja tulemusena tekib vool.

Magneti eemaldamisel magnetvoog pooli sees väheneb, mis jällegi indutseerib voolu, kuid esialgsega vastupidise suunaga.

2. Võtame isoleeritud traadist pooli ja liigutame seda liikumatu magneti suhtes (joon. 86). Kui pooli otsad on ühendatud galvanomeetriga, siis näeme, et pooli liikumisel magneti suhtes indutseeritakse poolis vool. Seda oleks võinud ette näha ka esimese katse põhjal, teades, et liikumine on alati suhteline. Ka vaadeldaval juhul magnetvoog pooli sees muutub, sest pooli lähendamisel magnetile suureneb pooli läbivate jõujoonte arv ja pooli eemaldamisel magnetist väheneb see vastavalt.

3. Kui paigutada kõrvuti kaks isoleeritud traadist pooli, ühendada teine pool galvanomeetriga, esimene aga patareiga, nagu näidatud joonisel 87, siis voolu muutumisel esimeses poolis indutseeritakse teises vool.



Joon. 88.

Vool indutseeritakse teises poolis nii voolutugevuse vähenemisel kui ka suurenemisel esimeses poolis, kuid voolu suund on kummalgi juhul erinev.

4. Efekt suureneb, kui pooli sisse asetada raudsüdamik. Esimest pooli läbiva voolu mõjul südamik magneetub, kusjuures igasugune voolutugevuse muutus muudab järsult magnetvoogu läbi teise pooli. Tulemusena indutseeritakse teises poolis tugev vool.

5. Kui katkestada ja ühendada esimese pooli vooluahelat (joon. 88), siis tekib teises kinnises ahelas induktsioonivool, mille suund on esimese ahela sisse- ja väljalülitamise korral erinev. Ka sel juhul tekivad teist pooli läbiva magnetvoo järsud muutused. Tõepoolest, kui esimene ahel on katkestatud, siis võrdub magnetvoog nulliga. Ahela sulgemisel tekib magnetväli, mille magnetvoog kasvab peaaegu hetkeliselt nullist kuni antud väärtuseni. See magnetvoog läbib teise ahela pooli ja indutseerib viimases emj.

Voolu katkestamisel esimeses ahelas kahaneb magnetvoog nullini. Samuti väheneb magnetvoog ka teise pooli sisemuses, nii et tekib esialgse suunaga vastupidine induktsioonivool.

Selliste katsete põhjal avastas Faraday elektromagnetilise induktsiooni seaduse, mis kõlab järgmiselt: *induktsioonivool tekib suletud ahelas ainult selle ahela kontuuri läbiva magnetvoo muutumisel ja eksisteerib kogu magnetvoo muutumise vältel.*

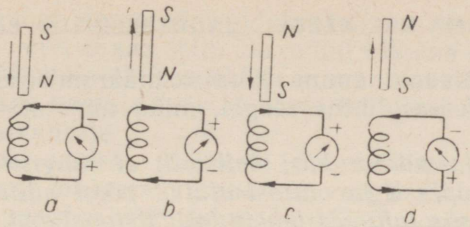
Voolu saab indutseerida ainult suletud ahelas, kusjuures voolu tugevus oleneb ahela takistusest.

Indutseeritud emj. tekib ka avatud ahelas, kusjuures emj. suurus ei olene ahela takistusest.

Seetõttu on elektromagnetilise induktsiooni tundmaõppimisel peamine tähtsus indutseeritud emj.-l ja induktsiooniseadust võib sõnastada ka järgmiselt: *igasugune magnetvoo muutus läbi kontuuri pinna tekitab selles kontuuris indutseeritud emj.*

§ 66. INDUKTSIOONIVOOLU SUUND. LENZI REEGEL

Võtame galvanomeetriga ühendatud pooli ja lähendame sellele magneti. Galvanomeeter näitab teatava suunaga induktsioonivoolu. Kasutades kellaosuti reeglit, võib kindlaks määrata ka pooli poolused. Joonisel 89 on kujutatud katse mitmesuguseid variante. Ilmneb, et magneti lähendamisel poolile tekib viimase magnetile



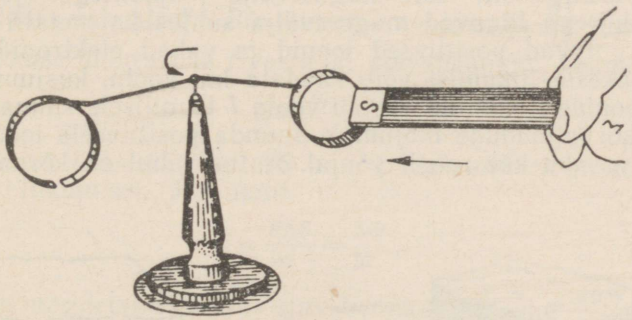
Joon. 89.

lähemas otsas samanimeline poolus (joon. 89, *a*, *c*). Kui aga eemaldada magnet poolist, tekib pooli magnetile lähemas otsas vastandnimeline poolus (joon. 89, *b*, *d*). See näitab, et induktsioonivoolu magnetväli takistab magneti liikumist.

Energia jäävuse ja muundumise seaduse põhjal muundub magneti liigutamisel sooritatud mehhaaniline töö elektrivoolu energiaks.

Seda laadi katseid korraldas aastail 1833—1834 vene õpetlane E. H. Lenz. Katsete tulemusi üldistades sõnastas ta induktsioonivoolu suuna määramiseks reegli, mis kannab tema nime.

Lenzi reegel kõlab järgmiselt: *induktsioonivoolu suund on alati selline, et ta magnetväli takistab induktsioonivoolu põhjustava magnetvoo muutumist.*



Joon. 90.

Joonisel 90 on näidatud Lenzi reeglit illustreeriv katseseade. Kaks alumiiniumrõngast, millest üks on kinnine ja teine avatud, on tasakaalustatud kangil, mis võib teravikule asetatuna horisontaaltasapinnas vabalt pöörduda. Magneti viimisel kinnisesse rõngasse indutseeritakse viimases vool, mille magnetväli takistab magneti liikumist. Seetõttu hakkab süsteem magneti liikumise suunas pöörduma. Magneti nihutamisel avatud rõnga suhtes sellist pöördumist ei esine.

Induktsioonivoolu suuna kindlaksmääramiseks liikuvas sirgjuhtmes on olemas lihtne reegel, mida nimetatakse parema käe reegliks.

Kui asetada parem käsi selliselt, et magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa ja väljasirutatud pöial näitab juhtme liikumise suunda, siis juhtmes tekkiv induktsioonivool kulgeb sõrmede suunas (joon. 91).

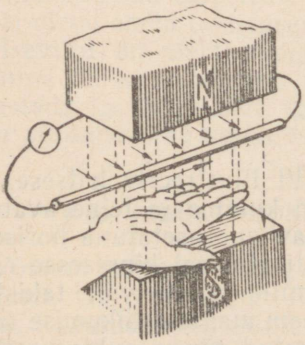
Me teame, juba, et indutseeritud emj. ja voolu tekkimine on seotud juhtmekontuuri pinda läbiva magnetvoo muutumisega.

Kui liikumatu metalljuhe asetseb püsivas magnetväljas, siis indutseeritud emj. tekkida ei saa, sest magnetvoog läbi kontuuri pinna ei muutu. Nähtuse füüsikalist olemust mõista pole raske, kui meenutada, et metallides leidub kaootiliselt liikuvaid vabu elektrone. Igale liikuvale elektronile mõjub magnetväli teatava jõuga, mille suund sõltub välise magnetvälja suunast ning elektroni kiiruse suunast antud momendil.

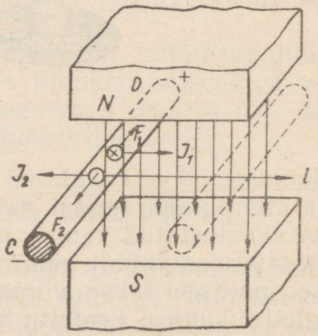
Magnetvälja mõju kaootiliselt liikuvatele elektronidele osutub keskmiselt kõikides suundades ühesuguseks, nii et mingit voolu liikumatus juhtmes ei teki.

Indutseeritud emj. tekkimise põhjuseks on juhtme liikumine magnetväljas. Mis siin sisuliselt toimub?

Liikugu juhe *CD* kiirusega *v* homogeenses magnetväljas iseendaga paralleelselt, risti magnetvälja jõujoontega (joon. 92). Niisama kiiresti liiguvad magnetvälja suhtes ka metalli kristallvõresse kuuluvad positiivsed ioonid ja vabad elektronid. Nende laetud osakeste liikumist võib vaadata kui voolu, kusjuures positiivsete ioonide liikumine vastab voolu *I* tehnilisele suunale. Magnetiliste kõrvaljõudude mõjumise suunda positiivsele ioonile võib määrata vasaku käe reegli põhjal. Antud juhul on kõrvaljõud F_1



Joon. 91.



Joon. 92.

punktis D piki juhet suunatud, kuid kristallvõre koosseisu kuuluvad positiivsed ioonid ei saa selle jõu mõjul liikuma hakata.

Elektronide liikumine kiirusvektori v suunas vastab voolule I_2, mis on vastupidine voolule I_1, sest voolu tehniline suund on alati vastupidine füüsikalisele.

Vabadele elektronidele mõjuvate magnetiliste kõrvaljõudude suuna võib samuti määrata vasaku käe reegli abil. Sel juhul on kõrvaljõud F_2 suunatud piki juhet punkti C poole ja paneb ka elektronid selles suunas liikuma.

Elektronide ümberpaigutumise tulemusena tekib juhtme otsas C elektronide ülejääk, otsas D aga puudujääk, mis tekitab potentsiaalide vahe juhi otstel ehk indutseeritud emj.

Katsetega on kindlaks tehtud, et juhtme liikumisel homogeenses magnetväljas risti jõujoontega sõltub tekkiva emj. suurus magnetvälja tihedusest B, juhtme liikumise kiirusest v ja juhtme pikkusest l ning väljendub valemiga

$$E = Bvl.$$

Kui juhe liigub paralleelselt jõujoontega, siis elektronide liikumist põhjustavaid magnetilisi kõrvaljõude ei teki ja indutseeritud emj. võrdub sel juhul nulliga. Seda kinnitavad ka katsed.

Võib tõestada, et juhtme liikumisel jõujoonte suhtes mingi nurga α all on tekkiv emj. võrdeline selle nurga siinusega, s. t.

$$E = Blv \sin \alpha.$$

Asendades valemis $E = Blv$ kiiruse v avaldisega $\frac{\Delta s}{\Delta t}$, kus s tähistab teepikkuse muutust ja t vastavat ajavahemikku, saame

$$E = \frac{Bl\Delta s}{\Delta t}.$$

Tähistame $l\Delta s = \Delta S$, kus ΔS on juhtmekontuuri pindala muutus tema liikumisel. Järelikult

$$E = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

kus $\Delta \Phi$ on magnetvoo muutus ajavahemikus Δt, suhe $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ aga magnetvoo muutumise kiirus.

Lenzi reeglist järeldub, et indutseeritud emj. takistab teda põhjustava magnetvoo muutumist.

Et tuletada valemit indutseeritud emj. jaoks kooskõlas mainitud tingimusega, on vaja valemi parempoolse osa märk muuta vastupidiseks.

Seega SI-süsteemi jaoks saaksime valemi

$$E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

mis kujutab endast üldvalemit indutseeritud emj. jaoks.

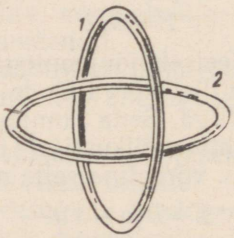
Juhtmes indutseeritava emj. suurus on võrdeline juhtmekontuuri pinda läbiva magnetvoo muutumise kiirusega.

Indutseeritud emj. ühiku leiame saadud valemist:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}; \quad E = \frac{1\ \text{Wb}}{1\ \text{s}} = 1\ \frac{\text{Vs}}{\text{s}} = 1\ \text{V}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mis on elektromagnetiline induktsioon?
2. Öelge Faraday induktsiooniseadus.
3. Millest räägib Lenzi reegel?
4. Milles seisab parema käe reegel ja millal võib seda kasutada?
5. Miks ei teki voolu galvanomeetriga ühendatud poolis, kui magnet on pooli sees paigal?
6. Kaks ringjuhet on paigutatud teineteise suhtes risti, nagu näidatud joonisel 93. Selgitada, miks ei teki indutseeritud voolu juhtmes *1* voolu muutumisel juhtmes *2*?



Joon. 93.

7. Teraslattide ja -rööbaste homogeensuse tundmaõppimiseks kasutatakse defektoskoopi, mis koosneb poolist ja sellega ühendatud galvanomeetrist. Pool paigutatakse latile, latt magnetiseeritakse ja nihutatakse defektoskoopi pikki latti edasi. Lati mittehomogeensuse korral tekib galvanomeetris vool. Kuidas seda seletada?
8. Millal tarbib elektrimootor rohkem energiat, kas ankru kiirel või aeglasel pöörlemisel? Miks?
9. Leida magnetväljas tihedusega $2\ \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$ liikuva juhtme pikkus, kui temas indutseerub emj. 20 V. Juhe liigub kiirusega $8\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ risti jõujoontega.

Vastus: 1,25 m.

10. Leida magnetvälja tihedus, kui 2 m pikkuse juhtme otstel indutseerub 0,01 V suurune emj. juhtme liikumisel 30° nurga all jõujoonte suhtes kiirusega $5\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$?

Vastus: $0{,}002\ \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}$.

11. Rong liigub kiirusega $54\ \frac{\text{km}}{\text{h}}$. Maa magnetvälja tihedus vertikaalsuu-

nas on 0,000 05 $\frac{Vs}{m^2}$. Määrata potentsiaalide vahe vaguni telje otstel, kui telje pikkus on 1,6 m.

Vastus: 0,0012 V.

12. Määrata potentsiaalide vahe lennuki tiibade otstel, kui lennuk lendab horisontaalsuunalise kiirusega 1080 $\frac{km}{h}$, tiibade ulatus on 10 m ja Maa magnetvälja tihedus vertikaalsuunas on 0,000 05 $\frac{Vs}{m^2}$.

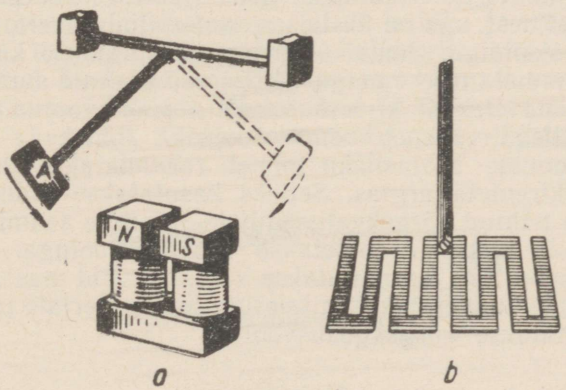
Vastus: 0,15 V.

§ 68. PÖÖRISVOOLUD

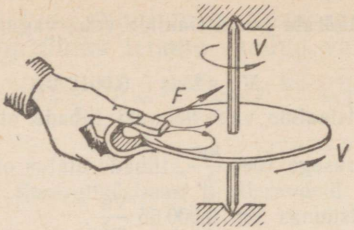
Induktsioonivoolud võivad tekkida niihästi juhtmes kui ka mistahes massiivses juhis. Kui massiivne juht liigub magnetväljas, siis on tekkivad voolud juhi väikese takistuse tõttu lühisvoolud. Selliseid voole nimetatakse pöörisvooludeks ehk Foucault' vooludeks vastavalt prantsuse õpetlase nimele, kes avastas ja uuris seda nähtust.

Lenzi reegli kohaselt *on pöörisvoolude suund selline, et nende poolt tekitatud magnetväli takistab juhi liikumist.*

Võtame massiivse alumiiniumpendli ja paneme ta võnkuma tugeva elektromagneti pooluste vahele (joon. 94, *a*). Niikaua kui elektromagnetit toitev vool pole sisse lülitatud, võngub pendel vabalt. Voolu sisselülitamisel elektromagneti poolidesse sumbub pendli võnkumine õige kiiresti. Kui aga korrata sama katset paljude sisselõigetega varustatud pendliga (joon. 94, *b*), siis pidurdub pendel väga nõrgalt. Massiivse pendli liikumist pidurdavad vastavalt Lenzi reeglile pendlis tekkivad pöörisvoolud. Sisselõiked vähendavad tunduvalt pöörisvoole ja seetõttu pidurdub pendel nõrgalt.



Joon. 94.



Joon. 95.

Pöörisvoolude pidurdavat toimet kasutatakse galvanomeetrites osutite võnkumise sumbutamiseks.

Vooluarvestites on kerge alumiiniumketas kinnitatud vertikaaltelje külge ja võib vabalt elektromagneti pooluste vahel pöörduda. Elektromagneti poolidesse lülitatud vahelduvvoolu toimel tekivad kettas pöörisvoolud. Muutuva magnetvälja ja pöörisvoolude magnetvälja vastastikuse mõju tõttu hakkab ketas pöörduma, sest Lenzi reegli kohaselt tekib kettas igal ajahetkel vool, mis on suunalt vastupidine elektromagneti voolule. Aga nagu teada, tõukuvad sellised voolud. Et ketas ei hakkaks kiirenevalt pöörlema, vaid säilitaks ühtlase liikumise, kasutatakse ketta magnetilist pidurdamist. Sel eesmärgil rakendatakse püsivat hobuserauakujulist magnetit, mille pooluste vahele paigutatakse arvesti ketas. Püsiva magnetvälja toimel tekkivad pöörisvoolud pidurdavad vastavalt Lenzi reeglile ketta pöördumist (joon. 95).

Magnetväljas liikuvates (mootorite ankrud) või liikumatult vahelduvas magnetväljas asuvates massiivsetes juhtides (elektromagnetite südamikud) eraldub pöörisvoolude toimel suur hulk soojust, mis põhjustab asjatuid energiakadusid. Selle vältimiseks ei tehta dünamote ja elektrimootorite ankruid ning elektromagnetite ja transformaatorite südamikke massiivsetest osadest, vaid õhukestest plaatidest, mis on üksteisest isoleeritud paberi, laki või metalli enda oksiidiga. Samal eesmärgil kasutatakse ka räniterast. Räni ei muuda terase magnetilisi omadusi, kuid suurendab märgatavalt tema elektritakistust, mistõttu pöörisvoolud nõrgenevad ja koos sellega väheneb nende soojuslik toime.

Pöörisvoolude soojuslikku toimet rakendatakse ka kasulikult, näiteks elektrometallurgias. Selleks kasutatakse induktsioonahje, mis on ette nähtud kõrgekvaliteediliste sulamite saamiseks. Niisuguste ahjude mähiseid toidetakse vahelduvvooluga.

Induktsiooni teel kuumutatakse karastatavaid masinaosi ja lõikeinstrumente, kuivatatakse mitmesuguseid materjale jne. Neil juhtudel kasutatakse kõrgsagedusvoolu.

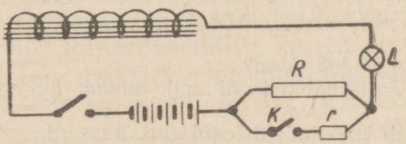
Indutseeritud emj. tekib ahelas ka siis, kui muutub sedasama ahelat läbiv vool. Niisugust nähtust nimetatakse eneseinduktsiooniks.

Eneseinduktsiooni jälgimiseks koostame ahela, nagu näidatud joonisel 96. Laseme akumulaatorite patareist ($U=6$ V) voolu läbi suure raudsüdamikuga pooli 8-voldisesse lampi, mis on pooliga ühendatud järjestikku. Lamp hakkab kahvatult helendama, sest pinge pole vajalikult suur ja peale selle peab vool läbima lisatakistuse R.

Lülitame ahelasse takistiga R paralleelselt ühendatud väikese takistuse r. Ahela takistus väheneb järsult ja samal momendil kustub lambike täielikult, hakates seejärel eredamalt hõõguma kui varem. Ohmi seaduse kohaselt peaks takistuse hüppeline vähendamine suurendama vastavalt hüppeliselt voolutugevust. Kuidas seletada niisugust esimesel pilgul imelikuna paistvat nähtust? Voolutugevuse suurenemisel juhis kasvab samaaegselt ka magnetvoog läbi juhtmekontuuri pinna. Tulemusena tekib ahelas Lenzi reegli kohaselt eneseinduktsioonivool, mille magnetväli takistab esialgse magnetvoo kasvu.

Suures raudsüdamikuga poolis muutub tugevasti ka magnetvoog, mistõttu patareist tuleva voolu suhtes indutseeritakse vastupidine vool ja lamp kustub. Kui magnetvoo muutumine lõpeb ja väli jääb püsivaks, siis eneseinduktsioonivoolu ei teki ja esialgne vool läbib täielikult lampi.

Lülitame paralleeltakisti r välja (joon. 96). Ahela takistus suureneb hüppeliselt, lamp sähvatab korraks eredalt põlema, seejärel muutub aga jällegi tuhmiks. Takistuse järsul suurenemisel peaks hüppeliselt vähenema ka voolutugevus ja lambi hõõgumine peaks hetkeliselt nõrgenema. Ometi toimus meie katses kõik vastupidi. Miks hakkas lamp eredalt põlema? Voolutugevuse vähenemisega ahelas vähenes ka magnetvoog läbi juhtmekontuuri pinna. Seetõttu indutseerus ahelas Lenzi reegli kohaselt vool, mille suund ühtis patareist tuleva voolu suunaga, liitus sellega ja tugevdas voolu läbi lambi. Kui aga magnetväli stabiliseerus, siis voolu enam ei indutseeritud, lamp toitus jällegi patarei nõrgast voolust ja põles tuhmilt. Kui me oleksime ühendanud ja katkestanud kogu ahela, siis oleks vaadeldav nähtus toimunud tunduvalt tugevamini, sest



Joon. 96.

voolutugevuse muutused oleksid olnud suuremad. Analoogilisi katseid tegi 1835. a. Faraday. Katsete põhjal jõudis ta järgmisele seadusele: *ahela sulgemisel tekkiv eneseinduktsioonivool on esialgse voolu suunaga vastupidine, ahela katkestamisel tekkiv vool aga sellega samasuunaline.*

Eneseinduktsiooni nähtus on täielikult seletatav energia jäävuse ja muundumise seaduse põhjal. Miks hilineb esialgse voolu kasv elektromagnetit sisaldava ahela sulgemisel? Sellepärast, et vooluallikas kulutab märgatava hulga energiast elektromagneti magnetvälja energia suurendamiseks. Ahela katkestamisel peab magnetvoog kaduma. Kuid välja energia ei saa kaduda, vaid ta muundub elektrivoolu energiaks.

Suurt elektromagnetit sisaldava ahela katkestamisel tekib katkestuskohal säde, vahel aga isegi elektrikaar. Kui katkestatakse väga kiiresti, siis võib tekkida ka väga tugev eneseinduktsioonivool. See vool võib kahjustada elektromagneti mähisetraadi isolatsiooni ja rikkuda ahelasse lülitatud seadmeid. Selle vältimiseks vähendatakse enne ahela katkestamist voolutugevust ja katkestid asetatakse sädelemise kõrvaldamiseks tugeva isoleeriva toimega vedelikku (näiteks õlisse). Omainduktsiooni emj. sõltub magnetvälja jõujoonte arvu muutumise kiirusest selle juhtme ümber, milles toimub voolutugevuse muutumine. Toimugu väikese ajavahemiku Δt jooksul voolutugevuse muutus ΔI. Sel juhul eneseinduktsiooni emj.

$$E = -L\frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Suurust L nimetatakse induktiivsuseks. *Juhi (pooli) induktiivsust iseloomustab emj., mis tekib voolutugevuse muutumisel temas 1 A võrra 1 s. jooksul.* Induktiivsuse ühikuks on henri (H). Kui $\Delta t = 1$ s., $\Delta I = 1$ A, $E = 1$ V, siis $L = 1$ H.

Henri on sellise juhi induktiivsus, milles voolu muutumisel kiirusega 1 $\frac{A}{S}$ tekib eneseinduktsiooni emj. 1 V.

Eneseinduktsiooni nähtust kasutatakse raadio- ja televisioonitehnikas.

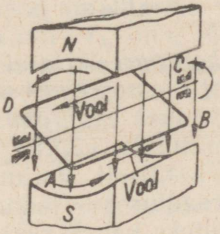
Kontrollküsimusi

1. Mida kujutavad endast pöörisvoolud?
2. Milles seisab pöörisvoolude kahjulik toime ja kuidas seda vähendada?
3. Kus võib pöörisvoole kasulikult rakendada?
4. Elektrienergia arvestites pöördub ketas püsivmagneti pooluste vahel, mis pidurdab ketta pöördumist. Miks tugevneb pidurdumine ketta pöörlemise kiirenedes?
5. Mis on eneseinduktsioon?
6. Milline on eneseinduktsiooni emj. suund, kui sulgeda või katkestada alalisvoolu ahelat?
7. Millest sõltub eneseinduktsiooni emj. suurus?
8. Millal on enseinduktsiooni emj. suurem, kas ahela sulgemisel või katkestamisel? Miks?

9. Miks kasutatakse eneseinduktsiooni emj. saamiseks suure keerdude arvu ja raudsüdamikuga pooli?
10. Milles seisab eneseinduktsiooni kahjulik toime ja kuidas seda vähendada?
11. Kus leiab eneseinduktsioon kasutamist?
12. Mis on juhi induktiivsus ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?

§ 70. JUHTMEKONTUURI PÖÖRLEMINE HOMOGEENSES MAGNETVÄLJAS. SINUSOIDAALNE VAHELDUVVOOL

Võtame ristkülikukujulise raami ja paigutame ta homogeensesse magnetvälja. Pöörame raami kellaosuti liikumisele vastassuunas. Juhtmelõikudes *AB* ja *CD* tekib sel juhul induktsioonivool, mille suuna võime kindlaks määrata parema käe reegli abil (joon. 97).



Joon. 97.

Juhtmes *AB* on vool suunatud punktist *A* punkti *B* seni, kuni juhe liigub äärmisest vasakpoolsest asendist äärmise parempoolse asendini. Juhtmes *CD* on vool suunatud punktist *C* punkti *D* seni, kuni juhe liigub äärmisest parempoolsest asendist äärmisse vasakpoolsesse asendisse.

Need voolud liituvad ja suletud raamis tekib ringvool.

Pärast raami pöördumist 180° võrra muutub voolutugevus kummaski juhtmes vastupidiseks. Juhtmetes *AB* ja *CD* tekkiva indutseeritud emj. hetkväärtust võib arvutada valemiga

$$E_1 = Blv \sin \alpha,$$

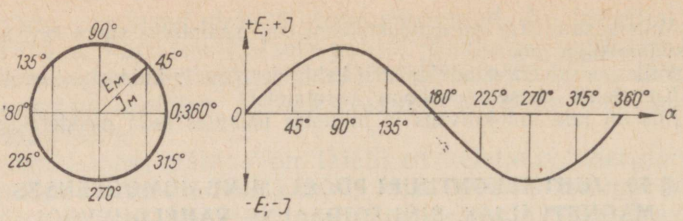
kus α on nurk jõujoonte ja juhtme liikumise suundade vahel antud hetkel.

Kogu raami emj.

$$E = 2Blv \sin \alpha.$$

Sellest valemist on näha, et kui $\alpha = 0$, siis $\sin \alpha = 0$ ja $E = 0$. See vastab raami horisontaalasendile, kui ta pind on risti jõujoontega ja kontuuri läbib maksimaalne magnetvoog.

Kui $\alpha = 90°$, siis $\sin \alpha = \sin 90° = 1$ ja $E = 2Blv$, s. t. E saavutab absoluutväärtuselt maksimumi. See vastab raami vertikaalasendile, kui raami tasapind on paralleelne jõujoontega ja kontuuri läbiv magnetvoog võrdub nulliga.



Joon. 98.

Tähistades emj. maksimaalväärtuse $E_M = 2Blv$, saame

$$E = E_M \sin \alpha.$$

Valemist on näha, et *kontuuri ühtlasel pöörlemisel homogeenses magnetväljas toimub igal ajamomendil indutseeritud emj. muutus vastavalt pöördenurga siinuse muutumise seadusele.*

Indutseeritud emj. muutumist kontuuris sõltuvalt tema pöördenurgast võib kujutada graafiliselt. Valime mastaabi emj. jaoks ja võtame sellel E_M ringi raadiuseks (joon. 98). Jaotame ringi mitmeks võrdseks osaks (näiteks kaheksaks) ja tõmbame jaotuspunktidest ristlõigud ringi horisontaaldiameetrile. Siis nende ristlõikude pikkused kujutavadki antud pöördenurkadele vastavaid emj. hetkväärtusi.

Teades, et ringjoone pikkus $2\pi r = 2\pi E_M$, arvutame selle ning kujutame sirgjoonel, mis on jaotatud täpselt samaks arvuks võrdseteks osadeks nagu antud ringjoongi.

Jaotuspunktidest tõmbame antud lõigule ristlõigud, mille pikkused võtame võrdseteks emj. vastavate hetkväärtustega. Kui nende lõikude otspunktid ühendada sujuva joonega, siis saame emj. muutumise graafiku kontuuri ühe pöörde ulatuses, s. t. pöörlemisperioodi T vältel. See graafik on sinusoid.

Ohmi seadusest võib välja arvutada suletud kontuuri antud hetkel läbiva voolutugevuse

$$i = \frac{E}{R} = \frac{E_M \sin \alpha}{R}.$$

Valemis võrdub $\frac{E_M}{R}$ suurima vooluga ja selle tähistame

$$I_M = \frac{E_M}{R}.$$

Seega

$$i = I_M \sin \alpha.$$

Valemist on näha, et *juhtmekontuuri ühtlasel pöörlemisel homo-*

geenses magnetväljas toimub igal ajahetkel voolu tugevuse muutumine vastavalt pöördenurga siinuse muutumisele.

Valides analoogiliselt mastaabi voolutugevuse jaoks ja võttes selles I_M ringi raadiuseks, on kerge ehitada induktsioonivoolu muutumise graafikut sõltuvalt kontuuri pöördenurgast, nagu me seda tegime emj. korral.

Graafik kujutab endast samuti sinusoidi. Voolutugevuse ja emj. graafikust on näha, et indutseeritud emj. ja vool kontuuris muutuvad nii suuruse kui suuna poolest. Iga 180-kraadise pöörde järel muutuvad voolu ja emj. märgid vastupidisteks.

Vahelduvvoolu, mille suurus ja suund muutuvad perioodiliselt vastavalt nurga siinuse muutumisele, nimetatakse sinusoidaalseks vahelduvvooluks.

Sellist voolu kasutatakse laialdaselt tehnikas.

Valemitele $E=E_M \sin \alpha$ ja $i=I_M \sin \alpha$ võib anda teise kuju.

Kui ω on raami pöörlemise nurkkiirus, t — pöörlemise aeg ja α — pöördenurk, siis $\alpha=\omega t$. Teades, et

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi f,$$

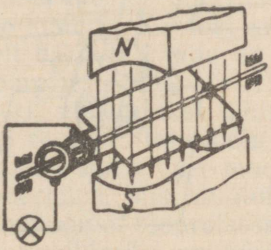
kus T on voolu periood ja f sagedus, võib kirjutada

$$E=E_M \sin \omega t=E_M \sin \frac{2\pi t}{T}=E_M \sin 2\pi f t.$$

Standardseks tööstusvoolu sageduseks Nõukogude Liidus on 50 Hz. Traatsides kasutatakse sagedusi 500 kuni 5000 Hz, elektrotermias (soojendamisel pöörisvooludega) — sagedusi 50 kuni 10^6 Hz, raadiotehnikas — sagedusi 10^6 kuni 10^9 Hz.

Joonisel 99 on näidatud lihtsaima vahelduvvoolugeneraatori skeem. Skeemilt on näha, et magnetväli tekitatakse magneti (või elektromagneti) poolt, mida nimetatakse **induktoriks**.

Vool indutseerub juhtmes, mida nimetatakse **ankruks**. Vool kulgeb välisahelasse läbi rõngaste ja harjade, mis on ühendatud libiseva kontaktiga. Sellega saavutatakse pidev ühendus paigalseisvate juhtmete (mis on ühendatud harjadega) ja pöörleva ankru



Joon. 99.

(mille otsad on ühendatud rõngastega) vahel. Rõngad on teineteisest isoleeritud.

Et saada alalisvoolu, mis on vajalik tööstuses (elektrokeemia), transpordis (elektriveokid), sides jne., alaldatakse vahelduvvoolu. Seda võib teha mitut moodi. Üheks viisiks on mehhaaniline alaldamine, kus kasutatakse vahetult generaatoris olevat lamellkollektorit.

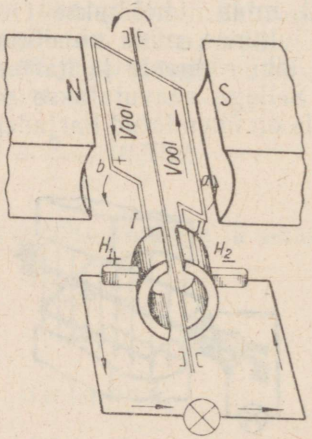
Lihtsamaks kollektoriks on poolrõngaskollektor, mis koosneb kahest teineteisest isoleeritud metallpoolrõngast. Ankru mähise üks ots ühendatakse ühe poolrõngaga (I) ja teine ots teise poolrõngaga (II) (joon. 100).

Ankru pöörlemisel vastu kellaosuti liikumise suunda väljub poolraamist *b* vool (+) esimesele poolrõngale ja seejärel esimesele harjale H_1. Läbides välisahela, pöördub vool (−) teisele harjale H_2 ja kulgeb läbi teise poolrõnga poolraami *a*.

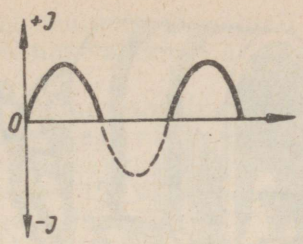
Raami pöördumisel 180° võrra võtab poolraami *b* koha poolraam *a* ja seejuures temas tekkiv vool (+) väljub teisele poolrõngale. Kuid see poolrõngas on nüüd kokkupuutes esimese harjaga, s. t. ta pöördus koos raamiga 180° võrra. Järelikult läbib välisahelat uuesti vool esimeselt harjalt teisele.

Näeme, et raami pöördumisel pöördub ka kollektor, kuid harjad jäävad paigale.

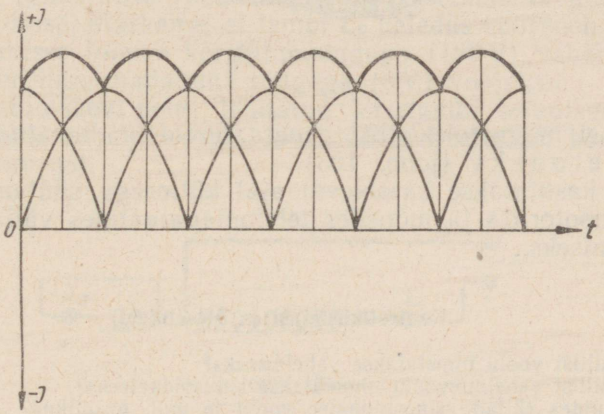
Seejuures tuleb välisahelasse ainult ühesuunaline vool, mille tugevus muutub, nagu näha graafikult (joon. 101). Saadakse pulseeriv vool. Et voolu kõikumine oleks väiksem, tehakse ankrumähis mitmest sektsioonist, mis on paigutatud üksteise suhtes teatava nurga all ja ühendatud omavahel kummaski ankrupooles järjes-



Joon. 100.



Joon. 101.



Joon. 102.

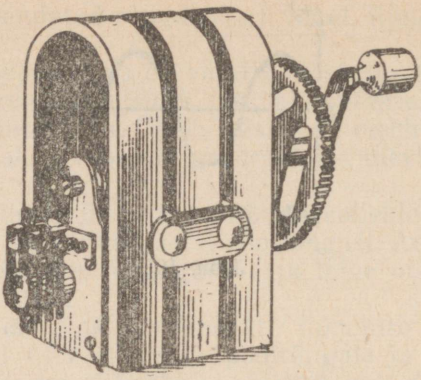
tikku. Niisuguse ühenduse korral ei lange voolutugevus välisahelas nullini. Suure sektsioonide arvu korral pole ka voolutugevuse kõikumised märkimisväärsed (joon. 102).

Tavaliselt on ankrus umbes 100 sektsiooni. Kollektori lamellide arv on võrdne sektsioonide arvuga. Igas kollektori lamellis on ühendatud ühe sektsiooni lõpp ja järgmise algus. Sel viisil on kõik sektsioonid kummaski ankrupooles omavahel järjestikku ühendatud (kollektori lamellide kaudu). Kumbki ankrupool on aga ühendatud harjaga, järelikult harjade kaudu on mõlemad ankrupooled omavahel ühendatud paralleelselt.

Alalisvoolugeneraatorit nimetatakse dünamoks. Dünamo ehitus ei erine oluliselt millegi poolest alalisvoolu mootori ehitusest.

Kui panna elektrimootori ankur teise mootori abil (näiteks sisepõlemismootori abil) pöörlema, siis muutub elektrimootor vooluallikaks. Järelikult on dünamo tööprotsess pööratav.

Generaatorit, milles induktoriks on püsivmagnet, nimetatakse magnetelektriliseks.



Joon. 103.

Väikesi magnetelektrilisi generaatoreid on hakatud nimetama magneetodeks (joon. 103).

Neid kasutatakse käesoleval ajal küttesegu süütamiseks sisepõlemismootorites ja mõnedes telefoniaparaatides väljakutsekõlistite toitmiseks.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millist voolu nimetatakse vahelduvaks?
2. Millist vahelduvvoolu nimetatakse sinusoidaalseks?
3. Kuidas ehitada sinusoidaalse voolu ja emj. graafikud?
4. Millistest osadest koosneb lihtsaim vahelduvvoolugeneraator?
5. Kuidas saab generaatoris vahelduvvoolu muundada alaliseks?
6. Leida maksimaalne emj., teades, et raami 30-kraadise pöördenurga korral on indutseeritud emj. hetkväärtus 110 V.

Vastus: 220 V.

7. Leida raami pöördenurk homogeenses magnetväljas, teades, et voolutugevuse maksimaalväärtus on $100\sqrt{2}$ A ja vool antud hetkel on 100 A.

Vastus: 45°.

§ 71. VAHELDUVVOOLU TRANSFORMEERIMINE. TRAFO

Tehnikas ja igapäevases majapidamises kasutatava voolu pinge ei ületa tavaliselt 220 V, samal ajal kui elektrienergia ülekandeliinides on pinge väga kõrge, ulatudes kümnetesse ja sadadesse tuhandetesse voltidesse.

Tihti tuleb mõnes elektriseadmes ja -aparaadis, isegi ühe ja sama aparaadi juures, kasutada erinevaid pingeid. Näiteks raadiovastuvõtjates kasutatakse lampide kütteks mõnevoldist pinget, kuid tema võimendis vajatakse pingeid mõnesaja voldini. Järelikult tekib vajadus muuta vahelduvvoolu pinget.

Vahelduvvoolu pinge muutmist üheaegselt voolutugevuse muutmisega samal sagedusel nimetatakse *vahelduvvoolu transformeerimiseks*.

Seadet, mis on ette nähtud vahelduvvoolu transformeerimiseks, nimetatakse *transformaatoriks* ehk *trafoks*.

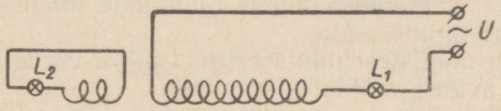
Trafo töö põhineb elektromagnetilise induktsiooni nähtusel.

Võtame lambi L_1 pingel 127 V, ühendame ta järjestikku suure keerdude arvuga pooliga ja lülitame 120 V pingega vahelduvvooluvõrku (joon. 104). Seejärel võtame lambi L_2 pingel 8 V, ühendame järjestikku pooliga, millel on mõned keerud, ja lähendame seda pooli suuremale poolile. Märkame, et lamp L_2 süttib ja ta kütteniidi heledus poolide lähenemisel kasvab.

Võtame latikujulise raudsüdamiku ja asetame ta pikuti väiksema pooli sisse. Märkame, et lambi L_2 heledus suureneb.

Selles katses toimus kõrgema pingega (120 V) vahelduvvoolu transformeerimine madalama pingega (8 V) vooluks.

P. N. Jablotškovi poolt leiutatud kaarlambi toitmiseks vajati madalpingelist vahelduvvoolu, kuid liinijuhtmetes oli kõrgepingeline vahelduvvool.



Joon. 104.

See asjaolu sai tõukeks transformaatori leiutamisele 1876. a. P. N. Jablotškovi transformaator kujutas endast kahe isoleeritud traadist pooliga latikujulist raudsüdamikku.

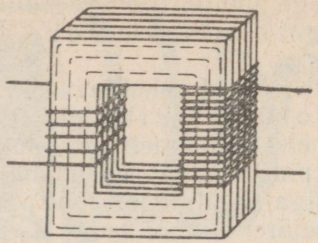
Aastal 1882 täiustas J. F. Ussagin transformaatorit — ta võttis kasutusele suletud südamiku.

Kaasajal koosneb transformaator suletud terassüdamikust, millele on asetatud kaks pooli. Poolid ei ole omavahel elektriliselt ühendatud (joon. 105).

Südamik on raamikujuline. Ta koosneb üksikutest teraslehtedest, mis ümbermagneetimisel oluliselt ei kuumene. Pöörisvooludega kaasnevate energiakulude vältimiseks (nende arvel soojeneks südamik asjatult) on kõik lehekesed üksteisest isoleeritud. Seda mähist, mis lülitatakse vahelduvvooluvõrku, nimetatakse primaarmähiseks. Seda aga, milles indutseeritakse vool, nimetatakse sekundaarmähiseks.

Primaarmähist läbiv vahelduvvool tekitab trafo südamikus vahelduva magnetvoo, mis sekundaarmähist läbides indutseerib seal vahelduva emj.

Kui võtta primaarmähis väikese ja sekundaarmähis suure keer-



Joon. 105.

dude arvuga, siis pinge sekundaarmähises on suurem primaarmähisele rakendatud pingest ja trafot nimetatakse pinget tõstvaks trafoks.

Kui aga võtta primaarmähis suure ja sekundaarmähis väikese keerdude arvuga, siis on sekundaarmähise pinge väiksem primaarmähisele rakendatud pingest ja trafot nimetatakse pinget madaldavaks trafoks.

Et mõlemaid trafo mähiseid läbib üks ja seesama magnetvoog, siis igas keerus, vaatamata sellele, kummale mähisele ta kuulub, indutseerub ühesugune emj.

Sel viisil on mähistes indutseeritud emj.-d võrdelised keerdude arvudega vastavates mähistes.

Kui tähistada primaarmähise keerdude arv tähega w_1 ja sekundaarmähise keerdude arv tähega w_2 ning tähtedega E_1 ja E_2 vastavad emj.-d primaar- ja sekundaarmähises, siis

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Pinge U_1, mis on rakendatud primaarmähisele, on pisut suurem temas indutseeritavast emj.-st E_1, kuid neid võib lugeda peaaegu võrdseteks eeldusel, et pooli oomiline takistus on väike.

Pinge U_2, mille annab sekundaarmähis välisahelale, on pisut väiksem mähises indutseerunud emj.-st E_2, ent ka neid võib lugeda peaaegu võrdseteks, kui eeldada, et mähise takistus on väike.

Niisiis saame:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2}.$$

Pingete suhe primaar- ja sekundaarmähiste otstel on ligikaudu võrdne nende keerdude arvu suhtega.

Primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhet nimetatakse trafo ülekandearvuks (k):

$$k = \frac{w_1}{w_2}.$$

Võimsate trafode kasutegur ulatub kuni 99%-ni, mistõttu primaar- ja sekundaarmähiste võimsusi võib praktiliselt võrdseteks lugeda, s. t.

$$I_1U_1 = I_2U_2,$$

kust

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Kuid $\frac{U_2}{U_1} \approx \frac{w_2}{w_1}$, mistõttu

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

Voolutugevused primaar- ja sekundaarmähistes trafo koormamisel on ligikaudu pöördvõrdelised nende mähiste keerdude arvuga.

Ülesanne 37. Pinget tõstva trafo primaarmähises on 80 ja sekundaarmähises 1280 keerdu. Pinge primaarmähise otstel on 120 V ja vool sekundaarahelas 0,25 A. Leida trafo kasulik võimsus.

Antud (SI-süsteem)

$w_1 = 80$ keerdu;

$w_2 = 1280$ keerdu;

$U_1 = 120$ V;

$I_2 = 0{,}25$ A.

P_k — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Pinge sekundaarmähise otstel:

$$U_2 = \frac{U_1w_2}{w_1}.$$

b) Trafo kasulik võimsus:

$$P_k = I_2U_2 = \frac{I_2U_1w_2}{w_1}.$$

2. Arvutame:

$$P_k = \frac{0{,}25\ \text{A} \cdot 120\ \text{V} \cdot 1280\ \text{keerdu}}{80\ \text{keerdu}} = 480\ \text{W}.$$

Ülesanne 38. Raadiosaadete transleerimisel kasutatakse pinget 480 V-lt kuni 30 V-ni madaldavat trafot. Trafo kasutegur on 96%. Leida trafo võimsus, kui ta sekundaarahelas on 100 reproduktorit, millest igaüks tarbib voolu 0,008 A.

Antud (SI-süsteem)

$U_1 = 480$ V;

$U_2 = 30$ V;

$I_2 = 0{,}008$ A;

$n = 100$;

$\eta = 96\% = 0{,}96$.

P_{kul} — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Trafo kasulik võimsus

$$P_k = I_2U_2 \cdot n.$$

b) kulutatud võimsus

$$P_{kul} = \frac{P_k}{\eta} = \frac{I_2U_2n}{\eta}.$$

2. Arvutame:

$$P_{kul} = \frac{0{,}008\ \text{A} \cdot 30\ \text{V} \cdot 100}{0{,}96} = 25\ \text{W}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse vahelduvvoolu transformeerimiseks?
2. Mis on trafo ja kuidas ta on ehitatud?
3. Miks kasutatakse trafodes terasest, mitte aga puidust või vasest südamikke?
4. Miks ei tehta trafo südamikke massiivsetest osadest?
5. Mis otstarbel kasutatakse trafo südamikes räniterast?
6. Miks trafo undab töötamisel, kui südamiku plaadid on halvasti kinnitatud?
7. Miks trafo ei tööta alalisvooluga?
8. Mida nimetatakse trafo ülekandearvuks?
9. Millal nimetatakse trafot pinget tõstvaks ja millal pinget madaldavaks?
10. Kuidas tõestada, et $\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}$?
11. Kuidas tõestada, et $\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}$?
12. Leida kellatrafo ülekandearv, kui trafo toitub võrgust pingega 220 V ja transformeeritud pinge on 2 V.

Vastus: 110.

13. Elektrikaar peab töötama 40 V pingel, kuid võrgus on pinge 220 V. Mitu keerdu peab olema trafo sekundaarmähisel, kui primaarmähisel on 385 keerdu?

Vastus: 70.

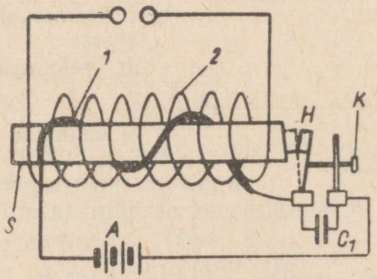
14. Pinget tõstva trafo primaarmähisel on 80 keerdu, sekundaarmähisel aga 2000. Millist pinget võib saada sekundaarmähise otstel, kui trafo lülitada võrku pingega 110 V?

Vastus: 2750 V.

§ 72. SÄDEINDUKTOR

Kõrgepingelise vahelduvvoolu saamiseks madalpingelise alalisvooluallika abil kasutatakse sädeinduktorit ehk induktsioonpooli. Väliskujult meenutab see avatud südamikuga transformaatorit, kuid erineb viimasest selle poolest, et primaarmähist ei läbi mitte vahelduvvool, vaid perioodiliselt katkev alalisvool (joon. 106).

Sädeinduktor koosneb raudsüdamikust *S* ja kahest mähisest.



Joon. 106.

Primaarmähis *1* on valmistatud jämedast isoleeritud traadist vähese keerdude arvuga. Sekundaarmähise *2* keerdude arv on aga suur ja ta on valmistatud peenest isoleeritud traadist. Primaarmähise ahelasse lülitatakse madalpingeline vooluallikas *A*. Sulgedes ja lahutades primaarahelat, saame südamikus muutuva magnetvoo, mis sekundaarmähises indutseerib vahelduva emj.

Et primaarahelas ei ole sinusoidaalne vahelduvvool, vaid perioodiliselt katkev alalisvool, siis on vool ka sekundaarmähises küll vahelduv, kuid mitte sinusoidaalne.

Mida suurem on sekundaarmähise keerdude arv ja mida kiiremini katkestatakse voolu primaarahelas, seda suurem emj. indutseeritakse sekundaarmähises.

Suhteliselt kiiresti ja automaatselt katkeva voolu saamiseks primaarmähises kasutatakse haamerkatkestit, mille töö sarnaneb elektrikõlisti katkesti tööga.

Voolu sisselülitamisel primaarmähisesse magneetub raudsüdamik ja tõmbab enda poole haamrikest *H*. Sellega aga katkeb ahel haamrikese ja tema vastu ulatuva kruvi *K* vahel, vool lülitub välja ja südamik demagneetub. Toe elastsuse tõttu eemaldub haamrike südamikust ning ühendatakse kruviga *K*. Sellega primaarmähis suletakse ning kogu protsess kordub. Eneseinduktsiooni tõttu tekib voolu katkestamisel haamrikese ja kruvi vahel säde. Selle vähendamiseks lülitatakse ahelasse kondensaator *C*. Väikseid sädeinduktoreid kasutatakse sisepõlemismootorite süüteseadmetes küttesegu süütamiseks silindris.

Suuri sädeinduktoreid, mis annavad kuni miljonivoldist pinget, kasutatakse uurimislaboratooriumides.

Kontrollküsimusi

1. Kuidas on ehitatud sädeinduktor?
2. Millisel nähtusel põhineb sädeinduktori töö?
3. Kus kasutatakse sädeinduktorit?
4. Millal indutseeritakse sädeinduktori sekundaarahelas suurem emj., kas primaarahela voolu sisse- või väljalülitamisel?
5. Milleks on sädeinduktori alalisvooluahelas kondensaator?

§ 73. ELEKTRIENERGIA ÜLEKANNE SUURTELE KAUGUSTELE

Seda, et elektrivool võib juhet mööda suurtele kaugustele jõuda, teati juba 19. sajandi alguses. Nii näiteks lõhkas vene õpetlane P. L. Šilling miine teatud kauguselt elektrivoolu abil, mis juhiti miinidesse mõnesaja meetri pikkuste juhtmete abil. 1832. a. leiutas ta elektromagnetilise telegraafi ja ehitas Peterburi telegraafiliini Talvepalee ja teedeministeeriumi vahele.

Elektrienergia ülekandmine ei pakkunud neil juhtudel erilisi raskusi, sest edasiantav võimsus oli väike. Et üle kanda energiat võimsusega sadu ja tuhandeid kilovatte, on vaja ka sadadesse

tuhandetesse voltidesse ulatuvaid pingeid, mida vahetult dünamolt saada pole võimalik. Suure võimsusega elektrienergiat ei õnnestunud üle kanda kuni 19. sajandi II pooleni.

Selleks ajaks oli Moskva ülikooli laborant I. F. Ussagin täiustanud transformaatorit (1882. a.), mille abil sai laiades piirides muuta vahelduvvoolu pinget.

Ülesanne oli püstitatud järgmiselt: vahelduvvoolugeneraatorist kulgeb vool pinget tõstvasse transformaatorisse ja seejärel läheb väga kõrge pinge all ülekandeliinidesse. Liini teises otsas kulgeb vool pinget madaldavasse transformaatorisse, seejärel aga tarbijatesse.

Praegu toimub elektrienergia ülekanne just ülalpool märgitud viisil, kuid noil aegadel oli küsimuse lõplik lahendamine seotud veel ühe suure raskusega.

Asi on selles, et vahelduvvoolu tööstuslikuks rakendamiseks on vaja ka vahelduvvoolumootoreid. Tolle aja mootoritel oli aga veel palju puudusi. Üks peamistest seisis selles, et vahelduvvooluvõrku lülitatud elektrimootorid ei hakanud ise tööle, vaid nende rootoritele oli vajalik eelnevalt anda teatud pöörlemiskiirus, peale selle võisid kõik mootorid töötada ainult ühesuguse kiirusega, sõltumata pooluste arvust ja vahelduvvoolu sagedusest.

Selliste oluliste puuduste tõttu osutus vahelduvvoolu ülekanne suurtele kaugustele ebaotstarbekaks.

Maailma elektrikute ees seisis keeruline ülesanne — luua täiuslikum vahelduvvoolumootor. Selle lahendamine õnnestus hiilgavalt andekal leiduril M. Dolivo-Dobrovolskil.

1889. a. leiutas ta uut tüüpi elektrimootori (kolmefaasilise voolu mootori), seejärel aga konstrueeris ka kolmefaasilise voolu generaatori ja transformaatori.

Kolmefaasilise voolu all mõeldakse süsteemi kolmest vahelduvvoolust, mis on faasis üksteise suhtes 120° võrra nihutatud.

M. Dolivo-Dobrovolski tõestas teoreetiliselt ja praktiliselt, et kolmefaasiline vool tekitab pöörleva magnetvälja, ja ehitas selle põhjal võrdlemisi lihtsa, kuid täiustatud vahelduvvoolumootori, mida hakati nimetama asünkroonmootoriks ja mis leidis laialdast kasutamist tööstuses.

1891. a. teostas M. Dolivo-Dobrovolski 300 kW võimsusega vahelduvvoolu ülekande 175 km kaugusele. Seejuures kasutati kolmefaasilise voolu transformaatorit, kusjuures energiakadu ei ületanud 25%.

Arenev tööstus seadis leidurite ette küsimuse elektrienergia ülekandmiseks ülisuurtele kaugustele, tuhandete kilomeetrite taha.

M. Dolivo-Dobrovolski 1919. a. tehtud teoreetilised uurimused viisid järeldusele, et vahelduvvoolu ülekandeliini pikkus ei või kasvada piiramatult, sest vahelduvvoolumasinad ülekandeliini kummaski otsas peavad töötama täielikus kooskõlas. Mida pikem on aga liin, seda raskem on seda tingimust täita.

Nõukogude spetsialistid ehitasid 400 000 V pingega vahelduvvoolu ülekandeliini pikkusega üle 1200 km, Volgogradist kuni Moskvani.

1919. a. väljendas M. Dolivo-Dobrovolski mõtet, et vahelduvvoolu on otstarbekas säilitada ainult elektrienergia tootmise ja tarbimise kohas, ülisuurtele kaugustele ulatuvates ülekandeliinides tuleks aga kasutada kõrgepingelist alalisvoolu.

Akadeemik Tšernõšovi uurimised näitasid, et ühesuguse isolatsiooni korral talub alalisvooluliin kaks korda suuremat pinget kui vahelduvvooluliin ning ülipikkades ülekandeliinides vajatakse alalisvoolu korral tunduvalt vähem juhtmeid, mis teeb ülekande kaks korda odavamaks ja süsteemi töökindlamaks.

Elektrienergia ülekanne alalisvooluga kujutab endast ülirasket ülesannet, mille juures tuleb silmas pidada järgmist.

Elektrienergiat toodetakse tavalistes vahelduvvoolugeneraatorites. Pinge tõstetakse transformaatori abil 400 000 kuni 600 000 V-ni. Seejärel alaldatakse vool ja antakse juhtmete kaudu edasi tuhandete kilomeetrite kaugusele. Liini teises otsas muundatakse vool spetsiaalsete seadmete (invertorite) abil uuesti vahelduvaks. Lõpuks kulgeb vool transformaatorisse, kus pinget madaldatakse kuni tarbijatele vajaliku pingeni.

Alaldite ja invertorite väljatöötamine osutus erakordselt raskeks, sest ülekantavad võimsused on ülisuured — mitmed miljonid kilovatid.

Esimene kõrgepingeline alalisvoolu ülekandeliin ehitati 1963. a. Volgogradist kuni Donbassini.

§ 74. NÕUKOGUDE LIIDU ELEKTRIFITSEERIMINE

Juba kodusõja ajal esitas V. I. Lenin geniaalse plaani Venemaa elektrifitseerimiseks.

1920. a. jaanuaris tegi Lenin G. M. Kržižanovskile ülesandeks juhtida Venemaa elektrifitseerimise riikliku komisjoni tööd ja koostada noore Nõukogude riigi elektrifitseerimise perspektiivplaan (GOELRO). Kržižanovski asus Lenini ülesannet innukalt täitma. Kakssada parimat teadlast ja inseneri koostasid 1920. aastal mõne kuu jooksul Kržižanovski juhtimisel küllaltki rasketes tingimustes kuulsa GOELRO plaani.

Oma ettekandes sellest plaanist 1920. a. detsembris ütles V. I. Lenin: «Minu arvates on see partei teine programm... Elektrifitseerimise plaanita me tegelikule ülesehitustööle üle minna ei suuda.»

Selle plaani kohaselt tuli 10—15 aasta jooksul ehitada 30 rajoonielektrijaama koguvõimsusega 1,5 miljonit kW. Juba 1932. a. oli GOELRO plaan ligi kahekordselt ületatud.

1950. a. ületas Nõukogude Liidu elektrijaamade koguvõimsus

22 miljonit kW, elektrienergia aastane kogutoodang aga 82 miljardit kWh.

1958. a. ulatus kõigi elektrijaamade aastane kogutoodang 230 miljardi kWh, 1965. a. aga juba 500—520 miljardi kWh, mis moodustab 210—220% 1958. a. toodangust.

Kõrvuti hüdroelektrijaamade ehitamisega meie maa suurtele jõgedele kerkisid odava kivisöe, loodusliku gaasi ja masuudi baasil ka soojuselektrijaamad, sest nende ehitamine läheb kiiremini ja on odavam.

Elektrijaamade töö muutub kasulikumaks, kui jaamad ühendada ühisesse kõrgepingevõrku. Sel juhul jaotub ühe elektrijaama avarii korral tema koormus ülejäänud elektrijaamade vahel ning tarbijad võivad häireteta saada elektrienergiat.

Käesoleval ajal on loodud rida ühendatud energiasüsteeme: Moskva oblast, Leningradi oblast, Donbass jne.

Aastail 1959—1965 loodi ühtsed energiasüsteemid NSV Liidu Euroopa-osas ja Kesk-Siberis, loode- ja idapiirkondades, Kasahstanis ja Kesk-Aasias.

Edaspidi ühendatakse kõik Nõukogude Liidu elektrijaamad ühtsesse energiasüsteemi.

Kontrollküsimusi

1. Kuidas teostub elektrienergia ülekanne suurtele kaugustele vahelduvvoolu korral?
2. Kuidas teostub elektrienergia ülekanne suurtele kaugustele alalisvoolu korral?
3. Milleks on vajalik Nõukogude Liidu elektrifitseerimine ja kuidas seda tehakse?
4. Millised abinõud on seitsme aasta plaanis ette nähtud Nõukogude Liidu elektrifitseerimise alal?
5. Mis on ühtne energiasüsteem?

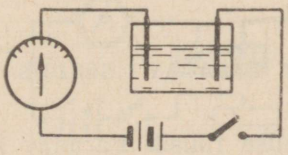
V PEATÜKK

ELEKTRIVOOL ELEKTROLÜÜTIDES

§ 75. ELEKTROLÜÜSI MÕISTE

Koostame ahela patareist, galvanomeetrist, lülitist ja anumast keemiliselt puhta veega, millesse on asetatud süsielektroodid (joon. 107). Ahela sulgemisel lüliti abil galvanomeeter voolu ei näita. Järelikult keemiliselt puhas vesi elektrivoolu ei juhi.

Lisame veele mõne tilga mingit hapet (näiteks soolhapet) — kohe näitab galvanomeeter voolu tekkimist ahelas. Järelikult on nõrk happe lahus elektrijuht. Koos sellega näeme gaaside eraldumist süsielektroodidelt. Voolu läbiminekuga kaasneb lahuse koosseisu kuuluvate ainete eraldumine. Sellist nähtust nimetatakse elektrolüüsiks, elektrit juhtivat vedelikku aga elektrolüüdiks.



Joon. 107.

Katsete põhjal on kindlaks tehtud, et elektrijuhtideks on hapete, soolade ja aluste vesilahused. Teiste ainete lahused (näiteks suhkrulahus) ei ole elektrijuhid.

§ 76. ELEKTROLÜÜTILINE DISSOTSIATSIOON

Kui lisada veele mingit lahustuvat soola, alust või hapet, siis need ained jagunevad molekulideks. Arrheniuse poolt 1888. a. sooritatud katsete põhjal loodud teooria järgi laguneb teatav hulk lahustuvat ainet koostisosadeks. Aatomid või aatomite grupid, mis

molekulide lagunemisel moodustuvad, osutuvad elektriliselt laetuiks ja Faraday ettepaneku kohaselt nimetatakse neid ioonideks («iōn» tähendab kreeka keeles «minev»). *Molekulide ioonideks lagunemise protsessi aine lahustumisel nimetatakse elektrolüütiliseks dissotsiatsiooniks* (*dissociatio* tähendab ladina keeles «lagunemine»). Ioonid erinevad tavalistest aatomitest oma füüsikalis-keemiliste omaduste poolest. Nii näiteks NaCl lahustumisel vees laguneb soola molekul positiivseks naatriumi iooniks (Na^+) ja negatiivseks kloori iooniks (Cl^-). Naatriumi ioonid eksisteerivad vees, samal ajal kui naatriumi aatomid ei saa vees eksisteerida tugeva vastastikuse mõju tõttu hüdroksüülrühmaga OH. Ioonolekus klooril ei ole lõhna, kuna tavalisel klooril on tugev iseloomulik lõhn.

Me juba teame, et vedeliku molekul on pidevas kaootilises liikumises. Täpselt sama peab ütlema ka ioonide kohta. Kui erinimelised ioonid teineteisele nii lähedale satuvad, et hakkavad mõjuma nendevahelised tõmbejõud, siis võivad ioonid ühineda, moodustades lahustatud aine molekuli. *Neutraalsete molekulide tekkimise protsessi nimetatakse molisatsiooniks.*

Nõrkades lahustes ületab dissotsiatsioon molisatsiooni, ja seetõttu leidub seal alati vabu ioone. Kui asetada lahusesse elektroodid ja tekitada nende vahel teatav pinge, siis hakkavad ioonid korrapäraselt liikuma. Positiivsed ioonid (katioonid) liiguvad negatiivse elektroodi (katoodi) poole, negatiivsed ioonid (anioonid) aga positiivse elektroodi (anoodi) poole. Seega *kujutab vool elektrolüütides endast ioonide korrastatud liikumist.*

§ 77. FARADAY I SEADUS

1833. a. avastas inglise füüsik Faraday katsete põhjal kaks elektrolüüsi seadust, mis kannavad tema nime.

Faraday I seadus kõlab järgmiselt: *elektrolüüsil elektroodil eraldunud aine mass on võrdeline elektrolüüti läbinud elektrihulgaga,* s. t.

$$m = k \cdot q,$$

kus m on eraldunud aine mass milligrammides, q — elektrolüüti läbinud elektrilaeng kulonites ja k — võrdetegur, mida nimetatakse aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks.

Kui $q = 1$ C, siis $m = k$. Järelikult on elektrokeemiline ekvivalent arvuliselt võrdne aine massiga, mis on eraldunud, kui lahust on läbinud laeng 1 C.

Järgnevalt on toodud mõnede ainete elektrokeemilised ekvivalendid:

Aine	Elektrokeemiline ekvivalent $\left(\frac{mg}{C}\right)$	Aine	Elektrokeemiline ekvivalent $\left(\frac{mg}{C}\right)$
Alumiinium	0,093	Nikkel	0,3
Hõbe	1,118	Tsink	0,34
Kuld	0,68	Vask	0,33

Teades, et voolutugevus

$$I=\frac{q}{t},$$

saame: $q=It$. Sel puhul võib Faraday I seadusele anda järgmise kuju:

$$m=k\,It.$$

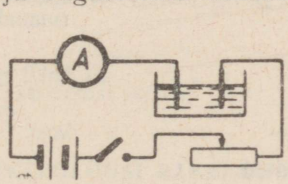
Elektrolüüsil elektroodil eraldunud aine mass on võrdeline voolutugevuse ja ajaga.

Laboratoorne töö nr. 3. Vase elektrokeemilise ekvivalendi määramine.

Töövahendid. Aku, elektrolüütiline vann vaskvitrioli vesilahusega, kaks vaskelektroodi, alalisvoolu ampermeeter 0,1-ampriste jaotustega, liugkontaktiga reostaat, kaalud, vihid kuni 0,01 G, ajamõõtja, elektripliit, veenõu, lüliti.

Töö käik

1. Koostada ahel, nagu näidatud skeemil (joon. 108).
2. Sulgeda ahel ja reguleerida reostaadi abil voolutugevus 0,5 A piiresse.



Joon. 108.

3. Katkestada ahel, võtta katood välja, puhastada, pesta vees ja kuivatada elektripliidil. Seejärel kaalumisega mõõta katoodi esialgne mass (m_1).
4. Asetada katood elektrolüütilisse vanni, sulgeda ahel ja käivitada samaaegselt ajamõõtja.
5. 15—20 minuti jooksul jälgida, et voolutugevus ei muutuks. Voolutugevus üles märkida.
6. Katkestada ahel ja määrata katseks kulunud aeg.
7. Võtta katood vannist välja, pesta ettevaatlikult vees, kuivatada elektripliidil ja mõõta teistkordselt mass (m_2).
8. Arvutada vase elektrokeemiline ekvivalent valemist

$$k=\frac{m_2-m_1}{It}.$$

9. Korrata katset ja arvutada elektrokeemilise ekvivalendi keskmine väärtus k_k.

10. Teades, et tabelis $k = 0{,}329 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$, leida absoluutne viga

$$\Delta k = k - k_k.$$

11. Leida relatiivne viga $\left(\frac{\Delta k}{k} \cdot 100\%\right)$.

12. Mõõtmiste ja arvutuste tulemused kanda tabelisse:

Katse nr.	m_1	m_2	$m_2 - m_1$	I	t	k	k_k	$\Delta k = k - k_k$	$\frac{\Delta k}{k} \cdot 100\%$
1									
2									
3									

Ülesanne 39. Toodete nikeldamisel 1 h jooksul saadi neil 0,01 mm paksune niklikiht. Leida voolu tihedus amprites ruutdetsimeetri kohta.

Antud (SI-süsteem)

$h = 0{,}01 \text{ mm} = 10^{-5} \text{ m}$;

$k = 0{,}3 \frac{\text{mg}}{\text{C}} = 3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{C}}$;

$t = 1 \text{ h} = 36 \cdot 10^2 \text{ s}$;

$D = 8{,}8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 88 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$j = \frac{I}{S}$ — ? (j — voolu tihedus)

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Elektrolüüsil eralduva nikli ruumala:

$$V = S \cdot h.$$

b) Nikli mass:

$$m = D \cdot V = D \cdot Sh,$$

kust

$$S = \frac{m}{Dh}.$$

c) Nikli mass Faraday I seaduse põhjal $m = kIt$, kust

$$I = \frac{m}{kt}.$$

d) Voolu tihedus $j = \frac{I}{S} = \frac{\frac{m}{kt}}{\frac{m}{Dh}} = \frac{Dh}{kt}$.

2. Arvutame:

$$j = \frac{88 \cdot 10^2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 10^{-5} \text{ m}}{3 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{A} \cdot \text{s}} \cdot 36 \cdot 10^2 \text{ s}} \approx 81{,}5 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} = 0{,}815 \frac{\text{A}}{\text{dm}^2}.$$

Ülesanne 40. Kui palju eraldub rafineerimisel 8 h jooksul puhast vaske, kui kõikide järjestikku ühendatud vannide klemmide pinge on 120 V, polarisatsiooni emj.[1] on 70 V ja vannide sisetakistus 5 Ω?

Antud (SI-süsteem)

$t = 8\ \text{h} = 288 \cdot 10^2\ \text{s}$;

$U = 120\ \text{V}$;

$E = 70\ \text{V}$;

$R = 5\ \Omega$;

$k = 0{,}33\ \frac{\text{mg}}{\text{C}} = 33 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kg}}{\text{C}}$.

m — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks:

a) Voolutugevus ahelaosas vastavalt Ohmi seadusele:

$$I = \frac{U - E}{R}.$$

b) Katoodil eraldunud vase mass vastavalt Faraday I seadusele:

$$m = k \cdot I \cdot t \text{ ehk } m = \frac{k(U-E)t}{R}.$$

2. Arvutame:

$$m = \frac{33 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kg}}{\text{C}}\ (120\ \text{V} - 70\ \text{V}) \cdot 288 \cdot 10^2\ \text{s}}{5\ \Omega} =$$

$$= \frac{33 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kg}}{\text{C}} \cdot 50\ \text{V} \cdot 288 \cdot 10^2\ \text{s}}{5\ \frac{\text{V}}{\text{A}}} =$$

$$= 33 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{kg}}{\text{C}} \cdot 10\ \text{A} \cdot \text{s} \cdot 288 = 0{,}095\ \text{kg} = 95\ \text{g}.$$

[1] Vt. lähemalt polarisatsioonist lk. 155.

§ 78. ELEKTROLÜÜSI RAKENDUSI TEHNIKAS

1. Galvanosteegia. Metallesemete katmist teise metalli õhukese kihiga elektrolüüsi abil nimetatakse galvanosteegiaks (näiteks nikeldamine, kuldamine, hõbetamine jne. on galvanosteegilised protsessid). Seda tehakse kas kehade kaitsmiseks korrosiooni vastu, suurema vastupidavuse või ilu saavutamise eesmärgil (dekoratiivkatmine).

Esemeid, mida soovitakse katta teise metalli kihiga, valmistatakse eelnevalt hoolega ette: neid poleeritakse ja puhastatakse rasvast. Ettevalmistatud ese paigutatakse elektrolüüsivanni katoodiks. Anoodiks valitakse metall, millega soovitakse antud keha katta. Elektrolüüdiks valitakse anoodi metalli soola vesilahus. Näiteks mingi metalleseme nikeldamisel valitakse elektrolüüdiks nikkelsulfaadi ($NiSO_4$) vesilahus. Katoodiks on nikeldatav ese, anoodiks aga nikkelplaat.

2. Poorne kroomimine. Suurt huvi pakub nõukogude inseneri J. S. Voronitsõni leiutatud nn. poorne kroomimine.

On teada, et kroomil on suur tugevus, hea soojusjuhtivus, väike hõõrdetegur ja suur korrosioonikindlus. Seetõttu oleks sisepõlemismootorite valmistamisel otstarbekas katta nende silindrite ja kolbide tööpinnad kroomikihiga.

Kuid kroomi laialdast kasutamist mootoriehituses segas üks oluline asi: kroomi siledal pinnal ei püsinud õli, mis oleks määrinud hõõrduvaid pindu.

Seetõttu tekkis kuiv hõõrdumine ja silindri seinad kriimustusid.

Insener J. S. Voronitsõn töötas välja uue kroomimisviisi. Silindri tööpind (peegelpind) kaetakse elektrolüütilisel teel 0,15—0,20 mm paksuse kroomikihiga. Seejärel muudetakse elektrolüütilises vannis voolu suunda — silindri sisepind muudetakse anoodiks. Seejuures hakkab pealekantud kroomikiht lagunema, lahustudes elektrolüüdis.

Lagunemisel kattub pind rohkearvuliste väikeste kanalikestega. Niipea kui kanalid saavutavad vajalikud mõõtmed, katkestatakse protsess.

See operatsioon andis määratu suure efekti. Säilisid kõik kroomitud pinna positiivsed omadused, kadus aga täielikult võimalus kuiva hõõrdumise tekkeks, sest õli seisab hästi peenikestes kanalites.

3. Suurte metallkonstruktsioonide katmine kaitsemetalli kihiga. Ühe metalli katmine teisega leiab praktikas laialdast rakendamist. Seejuures saab galvaanilisi vanne kasutada ainult suhteliselt väikeste esemete katmisel. Kuidas aga katta ülisuurt eset? Seda on võimalik teha meetodil, mille leiutas nõukogude insener J. J. Varšavski.

Meetod on järgmine. Isoleeritud metallelektrood, mis lõpeb kummiga kaetud peenikestest metallniitidest koosneva harjaga, ühendatakse vooluallika positiivse poolusega.

Katoodiga ühendatud harja, mida pidevalt niisutatakse vajaliku metalli soola sisaldava elektrolüüdiga, nihutatakse mööda kaetava konstruktsiooni pinda. Metall eraldub lahusest ja katab toote pinna. Sel kombel osutus võimalikuks efektiivselt katta igasuguste mõõtmetega esemete pindu.

4. Galvanoplastika. Paksemate (kuni mõni millimeeter) katete saamist elektrolüüsi teel nimetatakse galvanoplastikaks. Selle meetodi avastas vene õpetlane B. S. Jacobi 1838. a.

Ühe katse ajal võttis B. S. Jacobi katoodiks vaskplaadi, millele oli graveeritud tema perekonnanimi. Elektrivool kandis plaadile vasekihi. Eraldanud selle kihi plaadilt, märkas Jacobi kihil oma perekonnanime täpset tõmmist. Määrinud tõmmise värviga ja vajutanud selle paberile, veendus teadlane, et tõmmis kujutab endast originaali täpset koopiat.

Edasi valmistas Jacobi mõnest metallesemest vahast pöörd-

koopiad, kattis need peenikese grafiidipuruga ja asetas vaskvitrioliga elektrolüüsivanni katoodiks.

Vahavormi kattev mõnemillimeetrine vasekiht võttis täpselt originaali kuju. Seda meetodit hakati hiljem kasutama bareljeefide valmistamiseks. Varem tehti vorme, millele sadestus metallikiht, mitmest osast ja ka skulptuure valmistati mitme omavahel hiljem ühendatava tükina. Nähtavad ühenduskohtade jäljed aga vähendasid skulptuuride kunstilist väärtust.

Kaasajal on välja töötatud uus galvanoplastika tehnoloogia. Selle alusel võib monumentaalseid skulptuure saada monoliitsetena, s. t. ilma ühegi ühenduskoha jäljeta, mis tõstab skulptuuri kunstilist kvaliteeti.

Seejuures väheneb skulptuuride kaal kuni 10 korda ja hoitakse kokku palju metalli.

Seda saavutatakse järgmiselt.

Skulptor teeb monumentaalse savimudeli. Seejärel võetakse sellest kipsvorm, mille sisse jääb savist originaal. Savi uhutakse vee abil kipsvormist välja (originaal hävib) ja saadakse kipsist negatiiv, s. t. mudeli negatiivne kujutis.

Vorm kuivatatakse ja kaetakse vahakihiga, et hoida teda niiskuse eest. Seejärel kantakse ta sisepinnale õhuke grafiidi- või hõbedakiht, mis tagab sisepinna elektrijuhtivuse. Vorm asetatakse elektrolüüsivanni katoodiks. Vaskvitrioli elektrolüüsi tulemusena sadestub vormi sisepinnale 3—5 mm paksune vasekiht.

Seejärel kipsvorm purustatakse ja vaskvorm kaetakse väljastpoolt galvaanilisel teel pronksiga. Kui on vaja säilitada ka esialgset skulptori loodud kuju, siis tehakse kaks kipsvormi.

Esialgu tehakse vorm üksikutest osadest, vabastatakse siis alus ja täidetakse vorm saviga. Eemaldades nüüd osadena tehtud vormi, valmistatakse uus, juba monoliitne kipsvorm.

Uut galvanoplastika tehnoloogiat kasutatakse meie maal laialdaselt.

Suur tähtsus on grammofoniplaatide matriitside elektrolüütilisel valmistamisel.

Esialgu kirjutatakse heli õhukese vahakihiga kaetud klaasplaadile. Saadud plaat kaetakse grafiidipuruga (kerge harjakese abil), et ta pind muutuks elektrijuhiks. Seejärel saadakse vaskvitrioli elektrolüüsi abil reljeefne äratõmme, mida nimetatakse matriitsiks.

Viimane kujutab endast negatiivi (igale sügavamale moodustisele klaasplaadil vastab samakujuline väljaulatuv osa vaskplaadil). Matriitsi abil võib valmistada suure hulga plastmassist grammofoniplaate, mis on originaaliga väga sarnased.

Galvanoplastika meetoditega tehakse ka klišeesid trükikodadele, kusjuures vaskklišee annab kuni 40 000 ja kroomitud vaskklišee kuni 1 500 000 tõmmist. Galvanoplastika avas laialdased võimalused mitmesuguste pressvormide valmistamiseks plastmassist,

kummist ja metallist esemete tootmisel. Sellega hoitakse kokku kõrge kvalifikatsiooniga treialite ja graveerijate väärtuslikku tööaega.

5. Metallide rafineerimine. Puhtaid metalle saadakse peamiselt elektrolüüsi teel. Sellist puhaste metallide saamise viisi nimetatakse metallide rafineerimiseks. Kaasaegses elektrotehnikas vajatakse paljudel juhtudel täiesti puhast vaske. Seda toodetakse järgmiselt.

150 kg kuni 280 kg raskused puhastamata vase tükid asetatakse anoodiks ja elektrolüüdiks võetakse vaskvitrioli lahus lahjendatud väävelhappes. Katoodidena kasutatakse õhukesi, kergelt rasvatatud vasklehekesi. Seejärel lülitatakse sisse alalisvool, mille tihedus katoodi pinna suhtes ei tohi ületada 250 A/dm^2. Puhas vask koguneb katoodile ja anood lahustub, seejuures lahustub ainult vask, jäätmed aga sadestuvad vanni põhja. Nimetatud sadestuses sisaldub mõnikord väärismetalle (kuni 3% kulda, kuni 30% hõbedat). Analoogiliselt toimub ka kulla, hõbeda, tina, tsingi jt. metallide rafineerimine.

6. Alumiiniumi tootmine. Iga aastaga leiab alumiinium üha laialdasemat kasutamist nii puhtal kujul kui ka sulamitena (lennukitööstuses, elektrotehnikas, majapidamises jne.). Alumiinium moodustab kuni 8% maakoorest. Esimest korda saadi alumiiniumi keemilisel teel 1827. a. ja elektrolüütiliste meetoditega 1857. a.

Tänapäeval saadakse alumiiniumi põhiliselt elektrolüütiliselt tänu sellele, et hüdroelektrijaamades toodetakse odavat elektrienergiat. Selleks kasutatakse suuri süsitiigleid.

Tiiglid täidetakse Al_2O_3-ga, mida saadakse boksiidist (alumiiniumi sisaldav maak). Tiigel etendab katoodi osa, anoodideks on aga süsivardad. Alalisvoolu mõjul tekib elektrikaar, mis sulatab Al_2O_3 ja seejärel toimub elektrolüüs. Puhas alumiinium eraldub katoodile, s. t. tiigli põhja. Aeg-ajalt lastakse seda tiigli põhjas oleva ava kaudu välja. Selliselt toodetakse ka teisi metalle, nagu magneesiumi, kaaliumi, naatriumi jt.

Elektrolüüsi abil ei saada mitte ainult metalle. Juba 1888. a. töötas vene leidur D. A. Latšinov välja menetluse vesiniku ja hapniku tööstuslikuks tootmiseks elektrolüüsi abil. Odava elektrienergia tõttu kasutatakse seda meetodit tööstuses praegu laialdaselt.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse elektrolüütiliseks dissotsiatsiooniks?
2. Mida kujutab endast elektrivool elektrolüütides?
3. Mis on elektrolüüs?
4. Kuidas formuleeritakse Faraday I seadus?
5. Mis on elektrokeemiline ekvivalent?

6. Ahelasse on lülitatud järjestikku kolm elektrolüüsivanni 1) hõbedasoola lahusega, 2) vasesoola lahusega, 3) alumiiniumisoola lahusega. Kuidas suhtuvad omavahel eraldunud ainete massid?

Vastus: $m_1 : m_2 : m_3 = k_1 : k_2 : k_3 =$

$= 1{,}118 : 0{,}33 : 0{,}093.$

7. Milline peab olema voolutugevus, et 2 h jooksul saada 8,049 g hõbedat?

Vastus: 1 A.

8. Millega võrdub alumiiniumi elektrokeemiline ekvivalent, kui 28 kg alumiiniumi saamiseks 1 min. jooksul tarvitati 8 V pinget takistusel 1,2 Ω (polarisatsiooni emj. oli 2 V).

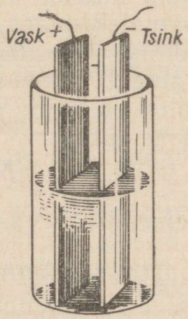
Vastus: $0{,}093 \frac{\text{mg}}{\text{C}}$.

9. Mis on galvanosteegia ja millistel eesmärkidel seda kasutatakse?
10. Mis on poorne kroomimine ja kus seda kasutatakse?
11. Mis on galvanoplastika ja kus seda kasutatakse?
12. Kuidas rafineeritakse metalle?
13. Kuidas toodetakse alumiiniumi?

§ 79. GALVAANIELEMENDID. VOLTA ELEMENT

Juba 1799. a. avastas Volta, et happe vesilahusesse asetatud kahe erineva metallplaadi vahel tekib pinge. Nii näiteks tekib väävelhappe lahuses tsink- ja vaskplaadi vahel pinge umbes 1 V. Kui ühendada need plaadid juhtmega, siis tekib ahelas vool ja lahuses toimuvad teatavad keemilised protsessid. Üldiselt moodustavad kaks erinevat metallplaati nendega keemiliselt reageerivasse elektrolüüti asetatuna keemilise vooluallika, mida nimetatakse *galvaanielemendiks* (joon. 109).

Vaatame nähtusi, mis toimuvad Volta elemendis. Keemilise energia elektrienergiaks muundumise teooria kujunes välja alles sada aastat pärast esimese elemendi valmistamist (1889. a.). Selle teooria kohaselt on igal metallil teatav lahustumiskiirus. Seetõttu iga vedelikku (siinjuures ka puhtasse vette) asetatud metall lahus-



Joon. 109.

tub. Volta elemendis hakkab tsink väävelhappes lahustuma. Iga tsingi aatom jätab plaadile kaks elektroni ja läheb positiivse tsingi ioonina lahusesse. Selle tulemusena laetakse tsinkplaat negatiivselt ja lahus positiivselt. Tsingi lahustumine kestab seni, kuni tsinkplaadi ja lahuse vahel tekib niisugune pinge, mis takistab edasist lahustumist. Tähendab, lahustumiskiirusega on määratud potentsiaalide vahe elektroodi ja elektrolüüdi vahel. Vasel on suhteliselt väike lahustumiskiirus, mistõttu vaskplaadi ja lahuse vahel tekib ka suhteliselt väike pinge. Kui plaadid juhtmega ühendada, siis tsinkelektroodi elektronid (seal on neid palju) hakkavad mööda juhet vaskplaadi poole liikuma (seal on neid vähe). Elektronide lahkumine tsinkplaadilt rikub tsingi ning lahuse vahelise pinge tasakaalu, mistõttu tsingi lahustumine jätkub. Vaskplaadile voolavad elektronid lähevad plaadilt üle vase ioonidele (Cu^{++}), mis asuvad plaadi lähedal lahuses, samuti ka lahuses paiknevatele vesiniku (H^+) ioonidele (need ilmuvad sinna väävelhappe dissotsiatsiooni tulemusena). Lahuses toimub vesiniku ioonide liikumine vaskplaadi poole. Happejäägi (SO_4^{--}) ioonid aga liiguvad tsinkplaadi poole. Nii tekib elektrilaengute pidev suunatud liikumine tsingi ja väävelhappe vastastikuse keemilise toime tõttu.

Vaskplaati nimetatakse elemendi positiivseks, tsinkplaati aga negatiivseks klemmiks.

Avatud klemmide potentsiaalide vahet nimetatakse elemendi emj.-ks.

Mistahes galvaanielemendi emj. ei sõltu ta plaatide mõõtmetest, kuid oleneb plaatide ainest ja lahuse keemilisest koosseisust.

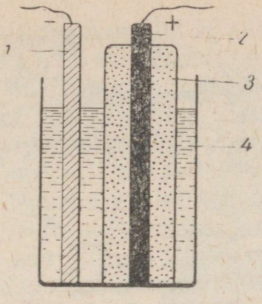
§ 80. VOLTA ELEMENDI POLARISATSIOON. LECLANCHÉ ELEMENT

Katsed näitavad, et suletud Volta elemendi pinge väheneb kiiresti, sest tsingi ja väävelhappe reageerimisel eralduvatest vsinikumullikestest moodustub vaskelektroodil halva elektrijuhtivusega kiht, mis suurendab elemendi sisetakistust ja tekitab vastuelektromotoorse jõu, see vähendab elemendi emj. 1,10 voldilt kuni 0,77 voldini. Niisugust nähtust nimetatakse elemendi polarisatsiooniks ja tekkivat vastuelektromotoorset jõudu polarisatsiooni emj.-ks. Polarisatsiooninähtuse kõrvaldamist nimetatakse depolariseerimiseks ja aineid, mille abil seda tehakse, depolarisaatoriteks. Volta elementi ei kasutata praktikas just tema tugeva polarisatsiooni tõttu.

Polarisatsiooninähtust uuris põhjalikult vene õpetlane A. S. Saveljev 1845. a.

Mittepolariseeruva elemendina vaatleme Leclanché elementi (joon. 110).

See koosneb tsink- ja süsielektroodidest, mis on paigutatud salmiaagi vesilahusesse. Süsi on elemendi positiivseks elektroodiks, tsink aga negatiivseks. Süsielektrood on ümbritsetud mangaandi-



Joon. 110.

oksiidi kihiga, mis etendab depolarisaatori osa. Elemendi emj. on 1,5 V. Elemendi sulgemisel astub tsink salmiaagiga keemilisse reaktsiooni ($Zn+2NH_4Cl=ZnCl_2+2NH_3+2H$). Elektronid liiguvad välisahelas tsingilt söele, mistõttu süsi osutub negatiivselt laetuks. Vesiniku ioonid (mis on positiivselt laetud) liiguvad lahuses söe poole, ja saanud sealt igaüks ühe elektroni, muutuvad neutraalseteks aatomiteks. Seejärel astub vesinik keemilisse reaktsiooni mangaandioksiidiga, moodustades vee ja mangaanhapendi ($2H+MnO_2=H_2O+MnO$). Tänu vesiniku hapendumisele kõrvaldub elemendi polarisatsioon. Pikemaajalise töötamise tulemusena siiski mõningane polariseerumine toimub, sest depolarisaator on tahkes olekus ja vesinik hapendub seetõttu aeglaselt. Kui ahel on avatud, siis neeldub teatava aja möödumisel kogu sadestunud vesinik lõplikult ja elemendi emj. kasvab jällegi peaaegu 1,5 voldini. Lühemat aega võib elementi koormata kuni 3-amprise vooluga, seepärast kasutatakse Leclanché' elementi seal, kus on vaja lühiajalist voolu (näiteks elektrikõlistites, taskulampides, välitelefonides jne., kus neid tuntakse nn. kuivelementide nime all). Kuivelementides kasutatakse vedela elektrolüüdi asemel salmiaagilahusega hästi immutatud aineid (näiteks saepuru vms.).

§ 81. AKUMULAATORID. AKUMULAATORI MAHTUVUS. AKUMULAATORITE KASUTAMINE

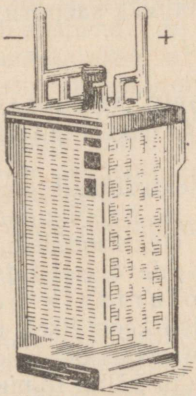
Väävelhappe lahuse elektrolüüsil eraldub katoodil vesinik ja anoodil hapnik. Vesiniku- ja hapnikumullikesed, mis sadestuvad väävelhappe elektrolüüsil elektroodidele, kaovad neilt mõne aja pärast. Toimub nende gaaside dissotsiatsioon ja tekib lühiajaline vool, mida nimetatakse polarisatsioonivooluks. Kui võtta elektroodid, mis elektrolüüsil keemiliselt muutuvad, siis on võimalik saada pikemaajalist polarisatsioonivoolu ja tunduvalt suurema pingega. Polarisatsioonivoolu vältel toimuvad protsessid taastavad elektroode. Seega on võimalik ehitada selline seade, mis muudab

elektrienergia keemiliseks ja hiljem keemilise energia uuesti elektrienergiaks. Seda nimetatakse akumulaatoriks. Niisiis, akumulaatorite töö rajaneb elektroodide polarisatsiooninähtusel.

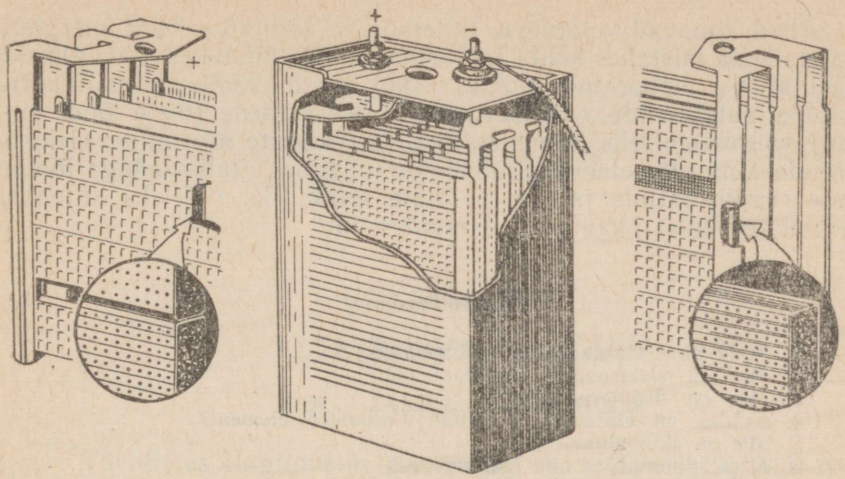
Elu püstitas elektrotehnikute ette aktuaalse probleemi — talletada generaatoritest saadav elektrienergia ja kasutada seda, kui tekib vajadus. Esimesed selleks otstarbeks sobivad akumulaatorid valmistati 1859. a. Elektrolüüdina kasutati väävelhappe lahust ja elektroodidena pliiplaate. Alalisvoolu sisselülimisel eraldus katoodil vesinik ja anoodil hapnik, mis ühines plii välispinnaga, moodustades pliidioksiidi (PbO_2). Nii kaasneb akumulaatori laadimisega tema elektroodide keemilise koostise muutumine. Akumulaatori lülitamisel mingit takistust omavasse vooluahelasse ta tühjeneb, sellega kaasneb elektroodide keemiline taastumine.

Kaasaegne akumulaator koosneb urbse välispinnaga raamidest või plaatidest, mis on asetatud väävelhappe lahusesse (joon. 111). Plaatide vabasse ruumi pressitakse pliiühendeid — anoodplaati pliimennikut ja katoodplaati pliisilu.

Poorse plii kasutamise idee akumulaatorite formeerimisel väljendas esmakordselt 1888. a. vene õpetlane D. A. Latšinov. Elektrolüüdiks on 20-protsendiline väävelhappe lahus. Laadimisel toimub väävelhappe elektrolüüs ja sekundaarsete reaktsioonide tulemusena muutub elektroodide keemiline koostis: anood muutub pliidioksiidiks (PbO_2), katood aga puhtaks pliiks. Akumulaatori tühjenemisel toimuvad kõik protsessid vastupidises suunas ja keemiline energia muundub elektriliseks. Katsetega on kindlaks tehtud, et emj. tõuseb kuni 2,7 voldini, kuid tühjenemisel langeb kiiresti kuni 2 voldini, jääb kauaks sellele tasemele ning alles hulga aja pärast hakkab aeglaselt langema. Alla 1,85 V ei ole otstarbekas akut tühjendada, sest vastasel korral tema mahtuvus ja kasutegur langevad märgatavalt. Seade võib kergesti rikki minna siis, kui laadimisel kasutatakse voolu, mille tihedus ületab 0,5 A plaadi 1 dm^2



Joon. 111.



Joon. 112.

kohta, või võetakse temast liiga tugevat voolu (lühiühenduse korral) või hoitakse teda liiga kaua laadimata. Pliiakude puudusteks on nende suur kaal ning kerge rikkiminek põrutuste mõjul ja tühjendamisel alla 1,8 V. Käesoleval ajal hakatakse happeakumulaatoreid asendama leelisakudega, mis kaaluvad vähem, taluvad suuri tühjendusvoole, on mehhaaniliselt vastupidavad ja mida võib täielikult tühjendada.

Kaasaegne leelisaku (joon. 112) koosneb raudkorpusest, mis sisaldab 20-protsendilist kaaliumhüdroksiidi vesilahust. Positiivne elektrood koosneb nikeldatud raudvõrest, mis on täidetud nikkeloksiidi ja grafiidipulbriga. Negatiivne elektrood koosneb raudhapendist. Leelisakus toimuvad reaktsioonid ei ole veel täielikult välja selgitatud. Raudnikkelaku emj. on ca 1,3 V.

Akud on erineva mahtuvusega. *Aku mahtuvuseks nimetatakse elektrihulka, mida seade võib tühjenemisel anda.*

Mahtuvust mõõdetakse ampertundides (Ah). Üks ampertund on 3600 kulonit. Pliiakude mahtuvus ulatub 5 kuni 1000 Ah-ni, seejuures tema kaalu igale kilogrammile vastab 5,5 kuni 6 Ah. Kui aku mahtuvus on 10 Ah, siis see tähendab, et aku võib anda 1 A voolu 10 h või 2 A voolu 5 h jooksul või 0,5 A voolu 20 h jooksul jne. Kombinatsioone saab olla väga palju, kuid kaugeltki kõik pole praktiliselt rakendatavad, sest happeakud annavad tühjenemisvoolu suhteliselt kitsastes piirides. Happeakude kasutegur on umbes 80%. Kui tühja aku laadimisel antud energia märkida tähega A_l ja aku tühjenemisel saadud energia tähega A_t, kasutegur aga tähega η, siis

$$\eta = \frac{A_t}{A_l}.$$

Akud annavad võimaluse talletada ja säilitada elektrienergiat, kanda seda mistahes kohta ja kasutada seda mistahes ajal. Akusid kasutatakse laboratooriumides (kui häid alalisvooluallikaid), autode, autobusside, raudteevagunite ja traktorite (öiste tööde puhul) valgustamiseks, energiaallikatena väikeste dresiinide, elektrikärude ning allveelaevade mootorite toitmisel, alalisvooluga töötavate raadiosaatjate ja -vastuvõtjate toitmiseks (näiteks autodes, lennukites jne.), kaevanduslampides jm.

Kontrollküsimusi

1. Mida nimetatakse galvaanielemendiks?
2. Mis on elektroodide polarisatsioon?
3. Mis on depolarisatsioon?
4. Kuidas on ehitatud ja töötab Leclanché element?
5. Mis on akumulaator?
6. Mida nimetatakse aku laadimiseks?
7. Mida nimetatakse aku tühjenemiseks?
8. Millise täienduse akumulaatorites tegi vene õpetlane D. A. Latšinov?
9. Mis on aku mahtuvus ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
10. Kus kasutatakse akumulaatoreid?

VI PEATÜKK

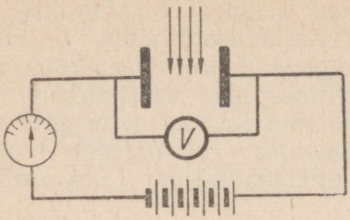
ELEKTRIVOOL GAASIDES

§ 82. GAASIDE IONISATSIOON

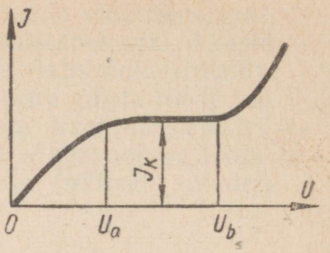
Tavalistes tingimustes on gaasid halvad elektrijuhid. Nende juhtivust on võimalik suurendada soojendamise või mitmesuguse kiirguse abil, näiteks kiiritamisel ultravioletsete, röntgeni-, katood-, radioaktiivsete ainete jt. kiirtega. Nende nn. ionisaatorite mõjul toimub gaaside ionisatsioon. Gaasi elektrijuhtivus oleneb aga ionisatsiooni suurusest.

Uurides eksperimentaalselt elektrilahendusi gaasides, jõudsid teadlased järeldusele, et gaasi ionisatsioon tähendab elektroni väljalöömist molekulist. Vabanenud elektron võib kohtumisel ühineda neutraalse molekuliga ning muuta see negatiivselt laetud iooniks. Elektroni kaotanud molekul aga muutub ise positiivselt laetud iooniks. Ent isegi tugevad ionisaatorid ei ioniseeri gaasi kuigi märkimisväärselt. Näiteks 1 mg puhast raadiumisoola võib ühe sekundi jooksul ioniseerida lähemates õhukihtides vaid ühe sajast miljonist molekulist. Samaaegselt gaasi ionisatsiooniga toimub ka pidev rekombinatsioon, s. o. neutraalsete molekulide tekkimine, mistõttu gaas juhibki elektrit ainult ionisaatori vahendusel ning kaotab kiiresti oma juhtivuse ionisaatori eemaldamisel.

Gaasi juhtivust uuritakse järgmiselt: plaatkondensaatori plaadid ühendatakse patarei poolustega. Voolu mõõtmiseks on ahelasse lülitatud ülitundlik galvanomeeter, potentsiaalide vahe mõõtmiseks — voltmeeter (joon. 113). Ionisaatori puudumisel galvanomeeter voolu ei näita. Kiiritades gaasi aga näiteks röntgenikiirtega, märkame voolu ilmumist ahelas. Suurendades pinget näeme, et ka voolutugevus hakkab kasvama ja seejuures võrdeliselt pingega. Seega voolutugevus gaasis allub madalatel pingetel Ohmi seadusele. Teatud pinge väärtusest alates hakkab vool kasvama üha aeglasemalt ja jääb lõpuks, vaatamata pinge edasisele suurendamisele, muutumatuks. *Voolu, mille tugevus ei sõltu enam pingest, nimetatakse küllastusvooluks.* Küllastusvool ei allu Ohmi seadusele. Kui aga pinget veelgi tunduvalt suurendada, siis hakkab voolutugevus jälle kiiresti kasvama ning võib saavutada hiiglasuuri



Joon. 113.



Joon. 114.

väärtusi — tekib säde. Joonisel 114 on graafiliselt kujutatud voolutugevuse muutumine gaasis sõltuvalt pinge muutustest. Vahemikus U_a kuni U_b esineb küllastusvool. Pinge edasisel suurendamisel tekib sädelahendus, kusjuures vool kasvab väga suureks. Vaatleme lähemalt nende nähtuste põhjusi.

Madala pinge korral ei jõua kõik ionisaatori poolt tekitatud ioonid elektroodideni ja seepärast jääb voolutugevus ahelas väikseks.

Pinge suurenemisel kasvab elektroodideni jõudvate ioonide arv ja vastavalt Ohmi seadusele suureneb ka vool. Kui pinge saavutab väärtuse, mil kõik sekundi jooksul tekkinud ioonid jõuavad elektroodideni, siis on voolutugevus maksimaalne — tekib küllastusvool. Kerkib küsimus: mille arvel suureneb vool edaspidi, kui pinget veelgi tunduvalt suurendada? Nähtust võib selgitada järgmiselt: elektrivälja toimel saavutavad elektronid küllalt suure kiiruse. Näiteks kui elektroodidevaheline kaugus on 1—2 cm ja pinget suurendada mitmekümne tuhande voldini, siis elektronide kiirus kasvab niivõrd, et kokkupõrkel neutraalse molekuliga võivad nad sellest välja lüüa elektroni. Seetõttu suureneb tunduvalt ioonide arv gaasis. Kiiresti liikuv elektronide «laviin» tekitab elektroodide vahel sädeme. Et ioonide rõhk elektrisädemes ulatub mitmesaja atmosfäärini, siis võib selline säde lüüa läbi niihästi paberist ja kartongist kui klaasist või vilgukivist. Niisiis, kui gaasis on kas või üksainus vaba elektron, siis kõrge pinge toimel gaas ioniseerub hüppeliselt (põrgete tulemusena) ning muutub juhiks. Seda nähtust nimetatakse *tõukeionisatsiooniks.*

Tuleb pöörata tähelepanu asjaolule, et gaasides ei teki ioonid mitte molekulide lagunemisel nagu elektrolüütides.

Gaasi ioniseerumisel ühed molekulid kaotavad elektrone, teised samaaegselt haaravad vabanenud elektrone endale, muutudes ioonideks.

Ioonid, jõudes elektroodideni, annavad ära ülearused elektronid või seovad endaga puuduvad elektronid ja muutuvad seega neutraalseteks molekulideks, s. o. difundeeruvad tagasi gaasi, seepärast ei sadestu gaasi koostisosad elektroodidel, nagu see toimub elekt-

rolüütides. Tähendab, Faraday I seadust gaasidele rakendada ei saa.

Me teame, et vool elektrolüütides kujutab endast ioonide suunatud liikumist. Mida aga kujutab endast vool gaasides?

Elektrivool gaasides kujutab endast ioonide ja vabade elektronide suunatud liikumist.

§ 83. LAHENDUSED GAASIDES NORMAALRÕHUL

Elektrivoolu gaasis nimetatakse tavaliselt lahenduseks. Elektroodide kõrge pinge juures võib toimuda gaasi hüppeline ionisatsioon, nii et antud gaasis tekib lahendus.

Normaalrõhul tuntakse kolme liiki lahendusi: 1) vaikne lahendus, 2) sädelahendus ja 3) kaarlahendus.

1. Vaikne lahendus jaguneb pime-, pintsel- ja koroonalahenduseks.

a) Pimelahendus tekib kõige sagedamini väikese potentsiaalide vahe korral teraviku ja plaadi vahel. Tema olemasolu võib avastada elektromeetri abil (juhi potentsiaali vähenemise kaudu).

b) Pintsellahendus tekib kõige sagedamini plaadi ja teraviku vahel kindla potentsiaalide vahe korral. Selliseid lahendusi esineb ka looduses, sageli just mägedes. Neid nimetatakse Elmo tuledeks. Elmo tuled ilmuvad siis, kui atmosfääri alumiste kihtide elektrostaatiline pinge on küllaltki suur, ja paistavad helesinise helendusena kõrgete esemete, nagu näiteks mastide tippudel, puude kroonidel jms. 1897. aastal jälgis Elmo tulesid Kaukasuses tuntud vene alpinist Pastuhhov.

Tema sõnade järgi oli «kogu ümbritsev ruum täidetud tuledega. Minu kaaslaste vurrud, kulmud ja juuksed helendusid, nende viltsaapad näisid hõõguvat».

Elmo tuled esinevad peamiselt äikese ja tormi ajal suvel või siis talvel suurte tuiskudega.

c) Lahendust, mille puhul helenduvad elektroodidelähedased õhukihid, nimetatakse koroonalahenduseks, sest kiirgus meenutab mõnikord päikese krooni. Koroona tekkimisel esineb lahendus ühe elektroodi läheduses, kuid ei ulatu teise elektroodini. Koroonalahendus võib tekkida ka kõrgepingeliinidel ja suurendada energiakadu.

Koroonalahendust kasutatakse edukalt mitmesugustes tehnikaharudes, näiteks küttegaaside puhastamiseks. Lahendusel annavad ioonid oma laengu ära gaasis olevatele tolmukübemetele ja teistele tahketele osakestele. Selle tulemusena eemalduvad need osakesed koroneerivatest elektroodidest ja sadestuvad maandatud esemetele.

Samal printsiibil töötavad iga liiki elektriseparaatorid ja -filtrid, näiteks küttegaaside puhastamise filter. Viimane kujutab endast maandatud metallkambrit, mis on vaheseintega osadeks jaotatud. Vaheseinte vahele on tõmmatud isoleeritud juhtmed. Kambri seinte

ja juhtmete vahel tekitatakse kõrgepinge, mis kutsub esile juhtmete koroneerimise. Tolmu-, tahma- ja räbuosakesed elektriseeruvad ning tõukuvad juhtmetest eemale, sadestudes metallkambri seintele. Siit omakorda satuvad osakesed vastuvõtjatesse. Puhastatud küttegaasid lahkuvad korstna kaudu. Elektrifiltrite abil on võimalik kaitsta linnade ja asulate õhku saastumise eest.

Koroonalahendust kasutatakse Moskvas ja Kiievis ka allmaaraudteede puhastamiseks tolmust.

2. Sädelahendus. Lahendus esineb sädeme kujul näiteks kondensaatori plaatide vahel või sädeinduktori mähiste otstel. Sädelahendus tekib siis, kui pinge elektrivälja kahe punkti vahel saab niivõrd suureks, et gaasis tekib tõukeionisatsioon. Seejuures leiab aset lühiajaline lahendus — säde. Üks suurimaid sädelahendusi on välk, mis tekib suurte pingete korral kas pilvede või pilvede ja maa vahel. Välgu pikkus võib olla üle 50 km ja voolutugevus kuni 20 000 A. Arvutused näitavad, et sel juhul on välgu otste potentsiaalide vahe üle 150 miljoni voldi, välgukanali laius umbes 0,5 m ja tema kestus kõigub 0,001 sekundist kuni 0,2 sekundini. Välguga kaasneb alati müristamine. Äike on juba vanadest aegadest peale mõjutanud inimese kujutlusvõimet.

Kõikide aegade usundid on püüdnud neid loodusnähtusi ära kasutada inimesi hirmutavate legendide loomiseks. M. V. Lomonossov, G. V. Rihman ja ameerika teadlane Franklin uurisid XVIII sajandi keskel välgu loomust ja tõestasid väga julgete katsete varal äikese elektrilist olemust. Nad näitasid, et välk ja müristamine ei erine millegagi elektriseeritud klaaskera abil saadud sädemest ja seda saatvast raginast.

M. V. Lomonossov töötas välja ka atmosfäärielektri tekkimise teooria. Ta põhjendas välgu tekkimist tõusvate ja langevate ebaühtlaselt soojenenud õhumasside liikumisega. Veeauru osakesed, mis liiguvad koos õhuga, elektriseeruvad hõõrdumise tõttu.

Märkimisväärselt palju katseid atmosfäärielektri uurimisel tegi G. V. Rihman. 1753. a. hukkuski ta välgulöögi tagajärjel.

Kirik kuulutas välja sõjakäigu nende teadlaste vastu, kes uurisid äikest. Rihmani surma tõlgendasid nad kui «jumala nuhtlust» teadlase «jultumuse» eest. Lomonossov aga ei katkestanud vaatlusi, vaid jätkas atmosfäärielektri tundmaõppimist.

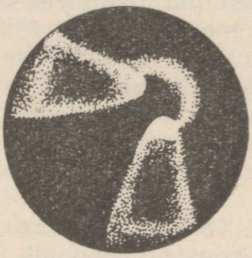
XIX sajandi lõpul uuris vene teadlane N. A. Gezehus (1844—1919) keravälku laboratoorsetes tingimustes ja tuli järeldusele, et keravälk koosneb elektrilaengute mõjul põlevast lämmastikust. Äikese purustav toime on väga suur. Lahendus, soojendades õhusammast, mida mööda liigub välk, paisutab seda peaaegu silmapilkselt, plahvatuslikult. Plahvatus võib purustada ümbruskonnas hulgaliselt esemeid — korstnaid, kivikatuseid jm.

Pärast sädelahenduse põhjalikku uurimist leidis see kasutamist tööstuses kõvade sulamite töötlemisel.

Nõukogude insenerid B. R. Lazarenko ja N. I. Lazarenko töö-

tasid välja meetodi metallide töötlemiseks elektrisädeme abil. Sel juhul kasutatakse sädet puuri ja treitera asemel. Niisugusele töötlusele alluvad kõige tugevamadki sulamid ja isegi teemant. Töödeldav detail paigutatakse õlisse või petrooleumi ja ühendatakse alalisvooluallika positiivse poolusega. Negatiivne poolus ühendatakse elektroodiga, mille kujust oleneb ava või süvendi kuju metallis. Sädelahendus sulatab ja isegi aurustab töödeldava eseme kristallikesed, mis, olles end metallist lahti rebinud, ei jõuagi katoodini, vaid jäävad õlivanni. Võrreldes mehhaanilise töötlemisega on sellel meetodil rida eeliseid.

3. Elektrikaarlahendus. Kui elektroodidevaheline kaugus on väike, siis algab nende vahel lahendus, elektroodid soojenevad ja ruum täitub nende ainete gaaside ja aurudega, millest koosnevad elektroodid. Tekib elektrikaar (joon. 115). Nähtuse avas-



Joon. 115.

tas 1802. a. vene teadlane V. V. Petrov, seetõttu nimetatakse kirjeldatud lahendust nüüd Petrovi kaareks. Erinevalt sädelahendusest kujutab see endast pidevat lahendust, mis ei toimu mitte eriti kõrge pinge juures (tavaliselt 40 V), kuid voolutugevus on seejuures suur (kuni 3000 A). Petrovi kaare tekitavad katoodilt lähtuvad elektronid. Selle tõestas nõukogude teadlane V. F. Mitkevitš.

Kõige sagedamini kasutatakse elektrikaare saamiseks süsielektroode, mille otsad lähendatakse teineteisele. Elektroodidele rakendatakse 35- kuni 40-voldine pinge ja viiakse nad siis kokkupuutesse. Elektroodide puutekohta läbib tugev vool. Et puutekoha takistus on väga suur, siis eraldub siin ka palju soojust, millest tingitult pulkade otsad hakkavad kiiresti heledalt hõõguma. Eemaldades nüüd elektroode, näeme, et vool säilib helenduva kaare näol elektroodide otste vahelises kuumendatud õhus.

Kaare põlemisel katoodi ots teravneb, anoodil tekib aga süvend (kraater). Positiivse süsielektroodi temperatuur tõuseb kuni 3900 °C, negatiivse süsielektroodi temperatuur jääb aga 2500 °C piiridesse. Elektrikaart kasutatakse võimsa valgusallikana prožektorites, kinoprojektsiooniaparaatides ja majakates. Kaare kõrge temperatuur võimaldab teda kasutada ka elektrikeevitusel elektrometallurgias.

Kaarlamp. Esimesed katsed elektrikaare kasutamiseks valgusallikana tegi B. S. Jacobi 1844. aastal.

Kaare toiteallikaks oli võimas galvaanielementide patarei (185 elementi). Seadmel oli mitmeid puudusi, kuid ta oli tõukeks edasistele otsingutele selles suunas.

Loominguliste otsingute tulemusena konstrueeris V. I. Tšikalev 1874. a. kaarlambile kvaliteetse elektromagnetregulaatori (diferentsiaalregulaatori). Seda kasutatakse tänapäevalgi võimsates prožektorites süte automaatseks lähendamiseks vastavalt nende ärapõlemisele.

Originaalse konstruktsiooni, kus kaarlamp põleb ilma regulaatorita, töötas 1876. a. välja vene leiutaja P. N. Jablotškov. Tema kaarlampi nimetatakse «Jablotškovi küünlaks».

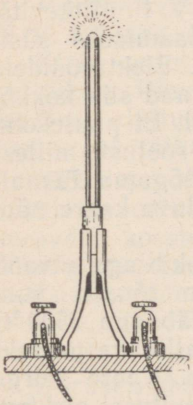
«Jablotškovi küünal» koosnes kahest vertikaalselt asetatud söepulgast (joon. 116), mis olid teineteisest eraldatud tulekindla materjaliga (kaoliiniga, lubjaga, magneeesiumiga jne.). Süte ülemised otsad olid ühendatud grafiitsillakesega — sütikuga. Pärast sillakese ärapõlemist tekkis paralleelsete elektroodide vahel kaar.

Süte ühtlase põlemise tagas vahelduvvoolu kasutamine. Isoleeraine aurustus vastavalt süte põlemisele.

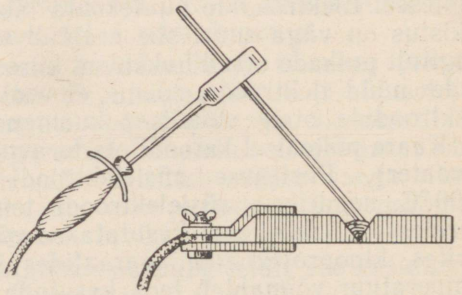
Jablotškovi leiutisel oli suur tähtsus vahelduvvoolu elektrotehnika arengus.

Elektrikeevitus. 1882. a. kasutas vene insener N. N. Benardos kaarleeki metallkonstruktsioonide keevitamiseks. Elektrikeevitus Benardose meetodil toimus süsielektroodi abil. Kaarleek, mis tekkis metalldetaili ja süsielektroodi vahel, sulatas üles teatud hulga metalli ja ühendas metalliosad sel kombel üheks terviklikuks detailiks. Sellel meetodil oli mitmeid puudusi:

1) keevitusõmblus tuli rabe, sest süsielektroodilt sattus metalli süsinikku;



Joon. 116.



Joon. 117.

2) õmblus ei olnud küllalt tugev, sest metall «põles» kaarleegi liiga kõrge temperatuuri tõttu läbi.

1889. a. tegi vene insener N. G. Slavjanov ettepaneku kasutada elektrikeevitusel kaarleegi abil metallelektroodi (joon. 117), mis koosneb samast metallist nagu uuritav detailgi.

Sellisel menetlusel oli häid külgi:

1) kaarleegi temperatuur metallelektroodi kasutamisel ei olnud nii kõrge kui süsielektroodide puhul, mistõttu õmblus «ei põlenud läbi» ning tuli seepärast tunduvalt pikaealisem;

2) õmblus ei olnud rabe, sest see ei sisaldanud süsinikku.

Paralleelselt kaarleegi abil keevitamisega kasutatakse tehnikas laialdaselt ka kontaktkeevitust. Siin surutakse keevitatavad osad teineteise vastu ja kasutatakse neid kui elektroode. Kokkupuutepindade vahel tekib väga suur takistus, mistõttu suure voolutugevuse korral eraldub seal palju soojust. Soojuse eraldumine kutsub esile metalli pehmenemise ja keevitamine toimub jõudude toimel, mis suruvad keevitatavad osad teineteise vastu.

Tänapäeval leiab elektrikeevitus laialdast kasutamist just metallide töötlemisel. Mitmesugustes tehnikaharudes on ta tõrjunud välja neetimismeetodi, näiteks juhtmete, raudteeröövaste, fermide, malmtorude, -tsisternide jne. valmistamisel. Erakordselt tähtis on elektrikeevitus remonditöödel, näiteks pragude jootmisel, purunenud hammaste paigaldamisel hammasratastes, katki läinud masinadetailide ühendamisel jne. Elektrikeevituse abil on võimalik taastada kulunud ja vigastatud masinaosi, mis muidu oleksid muutunud vanametalliks. Keevisõmblusel on rida eeliseid, võrreldes neetühendusega: ta on ökonoomsem, kergendab konstruktsiooni, seda on lihtne kasutada väga mitmesuguse profiiliga detailide juures, võimaldab tööaega kokku hoida, maksumus on väiksem, garantii vastupidavuseks suurem.

Viimastel aastatel on nõukogude teadlane Ukraina Teaduste Akadeemia tegevliige, sotsialistliku töö kangelane J. S. Paton teoreetiliselt välja töötanud ja juurutanud tööstusesse automatiseeritud elektrikiirkeevituse.

Meetodi elektrikeevituseks ja metalli lõikamiseks vee all leiutas nõukogude akadeemik K. K. Hrenov. See meetod võimaldab remontida laevu merel, lõigata ja keevitada metallkonstruktsioone vee all, kasutamata seejuures kessoone.

E l e k t r i k a a r a h j u d. Esimesed elektrikaarahjud, mida kasutati metallide sulatamiseks, projekteeris vene leidur A. N. Lodõgin. Ahi ehitatakse tulekindlast materjalist (šamotist või magnesiidist). Elektrikaare tekitamiseks asetatakse ahju läbi spetsiaalsete avade süsipulgad-elektroodid. Temperatuur ahjus tõuseb kuni 4000 °C. Sellisel temperatuuril sulavad kõik raskelt sulavad elemendid, välja arvatud süsinik, mis muutub kohe auruks. Need ahjud on väga vajalikud nii tehnikas kui ka teaduslikus uurimistöös. Ahjudes saadakse suurel hulgal plaatina, kroomi, molübdeeni, volframit,

vanaadiumi. Selgus, et kaare kõrge temperatuur põhjustab paljude metallide keemilise reageerimise süsinikuga, mille tulemusena saame ühendid, mida nimetatakse karbiidideks. Sel teel saadi karborundi ehk ränikarbiidi (räni ja süsiniku ühendit); kaltsiumkarbiidi (süsiniku ja kaltsiumi ühendit), lämmastikhapendeid, millest omakorda valmistatakse lämmastikhapet ja selle sooli.

Metallide sulatamiseks kasutatavate tööstuslike elektrikaarahjude kasutegur on kuni 78% ning ühe tonni sulami tootmiseks kulutavad nad 700 kWh elektrienergiat.

Kontrollküsimusi

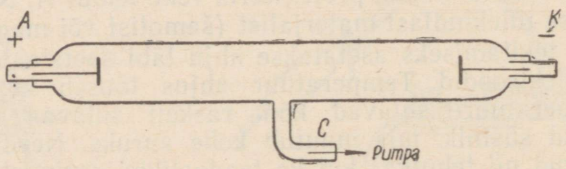
1. Mis on gaasi ionisatsioon ja ioonide rekombinatsioon?
2. Millised meetodid on olemas gaaside ioniseerimiseks?
3. Mis on küllastusvool ja kuidas ta tekib?
4. Millised elektrilahenduse liigid esinevad gaasis normaalrõhul ja millistel tingimustel nad tekivad?
5. Kus kasutatakse vaikset, säde- ja koroonalahendust?

§ 84. LAHENDUS HÕRENDATUD GAASIDES

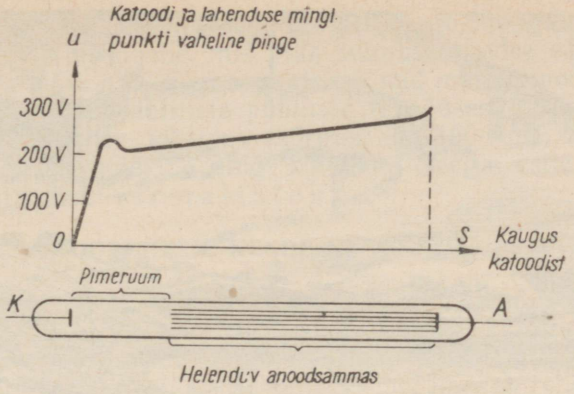
Lahendust hõrendatud gaasides võib jälgida järgmise katse abil. Võtame pika klaastoru, mille kummassegi otsa on joodetud elektroodid — väikesed metallplaadid *A* ja *K* — ning ühendame need kõrgepingeallikaga, näiteks elektrofoormasina või induktsioonpooliga.

Elektrilahenduse jälgimiseks mitmesugustel rõhkudel tuleks toru külgseinas oleva ava *C* kaudu ühendada vaakuumpumbaga. Kuni toru on täidetud normaalrõhul oleva õhuga, ei märka me torus mingeid erilisi nähtusi, sest sellistel tingimustel õhk ei juhi elektrit. Vabu elektrone ja tõukeionisatsiooni tagajärjel tekkinud ioone ei ole küllalt palju, sest ioone tekitavate elektronide lennu vaba tee pikkus on liiga väike.

Jättes pinge samaks, rakendame tööle vaakuumpumba. Mõne aja pärast võime torus märgata kitsast roosakasvioletselt helendavat riba. Hõrendusel 1 kuni 3 mm Hg tekib katoodi juures lühike helesinine helenduv sammas, sellele järgneb tume ruum, mille taga pikk roosalt helenduv sammas ulatub anoodini. Hõrendusel kuni 0,1 mm Hg suureneb katoodi pimeruum tunduvalt mõlemas suunas, kuni hõrendusel 0,001 mm Hg helendus kaob täiesti. Niisugust



Joon. 118.



Joon. 119.

elektrilahendust hõrendatud gaasis nimetatakse huumlahenduseks.

Huumlahenduse olemuse uurimiseks mõõtsid teadlased potentsiaalide vahet katoodi ja lahenduse mitmesuguste punktide vahel, kasutades selleks toru sisse viidud sondi.

Kui katoodi potentsiaal lugeda kokkuleppeliselt võrdseks nulliga, siis potentsiaali jaotust piki toru väljendab kõver joonisel 119.

Graafikult on näha, et anoodist kaugenemisel väheneb potentsiaal aeglaselt ja langeb järsult katoodi lähedal, pimeruumi piirkonnas. Viimast nimetatakse katoodi potentsiaalilanguseks ja see võib kõikuda piirides 100 V kuni 300 V, olenevalt gaasi olekust, rõhust ja katoodi materjalist.

Millised muutused toimuvad siis gaasis huumlahenduse korral? Igas gaasis leidub alati vähesel määral elektrone. Kui hõrendatud gaasiga täidetud torus tekitada elektriväli, siis vabad elektronid liiguvad anoodi suunas. Läbides katoodi potentsiaalilanguse piirkonna, kus elektriväli kasvab väga tugevaks, saavad elektronid suure kiirenduse. Sellest tingituna omandavad nad ka suure kiiruse ja kineetilise energia, millele muidugi aitab kaasa elektronide vaba tee pikkuse kasvamine gaasi hõrendamisel.

Kui elektronide kineetiline energia ei ole veel küllalt suur, siis kokkupõrkel neutraalsete molekulidega ei suuda nad viimaseid ioniseerida. Seepärast esinebki torus pimeruumi piirkond. Selle läbimisel on elektronide kineetiline energia kasvanud aga juba niivõrd suureks, et kokkupõrkel neutraalsete gaasimolekulidega suudab ta neist välja lüüa elektrone, tekitades sel viisil ioone, mis muudavad gaasi elektrijuhiks. Tekib kiirgus.

Kokkupõrke tulemusena suureneb ka molekuli siseenergia. Niisugust molekuli nimetatakse ergutatud molekuliks. Kui molekul annab põrkel ära elektroni, muutub ta positiivseks iooniks. Kui aga elektroni kineetilisest energiast ei piisa kirjeldatud nähtuse esile-



Joon. 120.

kutsumiseks, siis võib ta ka ühineda molekuliga ning tekib negatiivne ioon.

Samaaegselt ioonide tekkimisega esineb hõrendatud gaasis ka rekombinatsioon, s. o. positiivsed ja negatiivsed ioonid ühinevad kokkupõrkel ning moodustavad neutraalseid molekule. Rekombinatsioon võib toimuda ka elektroni ja positiivse iooni ühinemisel. Nii molekulide üleminekul ergutatud olekust normaalsesse kui ka rekombinatsioonidel eraldub energiat valguskiirgusena, millega ongi seletatav gaasi helendumine huumlahendusel.

Hõrendusel 0,001 mm Hg helenduv sammas kaob, sest sellisel hõrendusel kohtavad elektronid oma teel väga vähe molekule.

Täites toru erinevate gaasidega, muutub helenduse värvus. Näiteks neooni helendus on punane, argoonil sinine, heeliumil kollane. Gaaside helendumist elektrivoolu toimel kasutatakse valgustustehnikas gaaslahendustorude ja -lampide näol. Gaaslahendustorusid kasutatakse dekoreerimisel, kaupluste vitriinide valgustamisel, reklaamiks jm.

Nõukogude Liidus töötati S. I. Vavilovi juhtimisel välja gaaslahenduslampide konstruktsioonid, mis annavad päevavalgusest vaid õige vähe erinevat valgust. Päevavalguslambi seinad on kaetud erilise ainega (luminofooriga), mis kiirgab huumlahendusega kaasneva nähtamatu kiirguse toimel päevavalgusega sarnanevat valgust.

Gaaslahendustorud ja -lambid on tunduvalt ökonoomsemad elektrihõõglampidest. Et gaaslahendusallikates muudetakse elektrienergia otseselt valguseks, siis on nende kasutegur tunduvalt kõrgem. Valgustustehnikas on laialt levinud neoonlambid. Neid kasutatakse signaalaparatuuris jt. seadeldistes.

Samasugune lahendus nagu hõrendatud gaasides esineb loo-

duses ka virmaliste näol (joon. 120). Päikese hõõguvalt pinnalt kiirgab ohtrasti elektrone, mis Maa suunas liikudes satuvad selle magnetvälja mõju alla. Siin suunatakse nad magnetipooluste sihis, mis asetsevad geograafiliste pooluste läheduses. Atmosfääri ülemistes, hõredamates kihtides (kõrgus üle 100 km), ioniseerivad elektronid gaasi molekule ning kutsuvad seega esile helenduse, mida nimetatakse *virmalisteks*.

§ 85. KATOODKIIRED, NENDE OLEMUS JA OMADUSED

Juba ammu on teadlasi huvitanud elektrilahendus hõrendatud gaasides. 1880. a. tehtud uurimiste põhjal kinnitas teadlane Crookes, et gaasi helendus kaob täielikult, kui hõrendus torus saavutab miljondiku atmosfääri, ja selle asemel hakkab rohekalt helenduma katoodi vastas asuv toru osa.

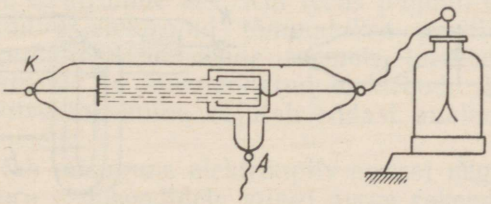
Järelikult pidid katoodi pinnalt väljuma nähtamatud kiired, mis tekitasid helenduse. Neid kiiri hakati nimetama *katoodkiirteks*.

Praegu on tõestatud, et katoodkiired kujutavad endast katoodist väljunud elektronide voogu. Seda seisukohta kinnitavad mitmed katsed.

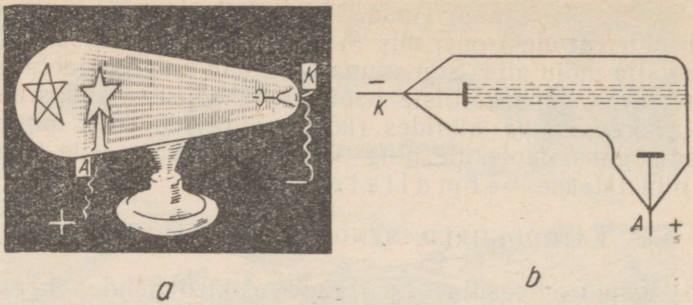
1) 1895. a. suunas teadlane Perrin katoodkiired Crookesi torru asetatud silindrisse. Ühendanud silindri elektroskoobiga, registreeris viimane negatiivset laengut (joon. 121).

Negatiivselt elektriseeritud keha tõukab katoodkiiri, positiivselt elektriseeritud keha tõmbab. Seda on võimalik avastada toru seinal oleva heleda valguslaigu (toru helendub selles punktis, kuhu langeb katoodkiirte kimp) kõrvalekaldumise põhjal elektriseeritud keha mõjul.

Katsete tulemusena määrati kindlaks katoodkiirte omadused: katoodkiired on nähtamatud kiired; nad kutsuvad esile mõne aine külmhelenduse; nad pidurduvad (ei läbi) valgust mitteläbilaskvates kehades; levivad sirgjooneliselt (see järeldub varjude tekkimisest toru seinale, kui katoodkiirte teele asetada läbipaistmatuid esemeid; joon. 122, *b*); väljuvad katoodist alati normaali suunas, olenemata anoodi asendist (joon. 122, *b*); neil on soojuslik toime (tükike plaatina nõgusa katoodi fookuses sulab); nad ioniseerivad gaase; kalduvad elektrivälja toimel esialgsest suunast



Joon. 121.



Joon. 122.

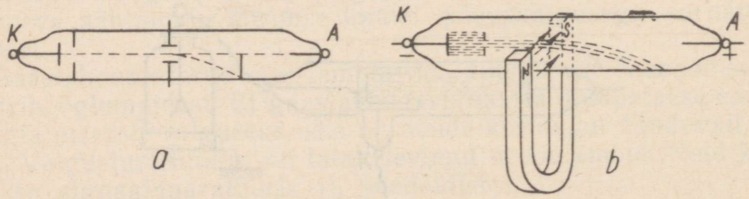
kõrvale (joon. 123, *a*); kalduvad magnetvälja toimel esialgsest suunast kõrvale (joon. 123, *b*).

Kõik need omadused tõestavad, et katoodkiired on katoodist väljuv elektronide voog tugevasti hõrendatud gaasis. Elektronide eraldumise põhjuseks on gaasis olevate positiivsete ioonide põrked vastu katoodi.

Uurime katoodkiirte tekkimist lähemalt. Vaatamata suurele hõrendusele on torus veel küllaldane hulk molekule ja vabu elektrone.

Teame juba, et huumlahenduse korral on katoodi läheduses väga järsk potentsiaalilangus. Katoodist eemaldunud elektronid saavad seega suure kiirenduse. Küllaltki kõrge hõrendus tagab ka suure vaba tee pikkuse, mistõttu elektronide kiirus kasvab väga suureks, kuni $10^{10}\ \frac{cm}{s}$. Põrgates kokku molekulidega, ioniseerivad nad neid. Anoodilt tõukuvad positiivsed ioonid liiguvad katoodi poole, ja jõudes katoodi potentsiaalilanguse piirkonda, omandavad samuti suure kiiruse suurusjärgus $10^7\ \frac{cm}{s}$.

Pommitades katoodi, löövad nad selle pinnalt välja elektrone. Need läbivad tugeva elektrivälja katoodi potentsiaalilanguse piirkonnas, omandavad suure kiiruse ning tekitavad oma teel hulgaliselt uusi positiivseid ioone ja vabu elektrone. Selle tulemusena tekib mingil pingel elektronide voog, mis väljub katoodist normaali suunas ning mida nimetatakse katoodkiirteks.



Joon. 123.

Edasised uurimised näitasid, et katoodi pommitavad positiivsed ioonid löövad selle pinnast välja niihästi elektrone kui ka neutraalseid metalli aatomeid, miile tulemusena katoodi metall kulub (lendub). Kõige tunduvamalt kuluvad vismut, antimon, plii, kaadmium, hõbe ja kuld. Lendumisnähtuse tõttu võib vanades katoodtorudes märgata metalli sadestumist seintele. Katoodi lendumine on seda intensiivsem, mida suurem on katoodi pommitavate ioonide mass ja mida suurem on voolutihedus. Vähelenduvad katoodid valmistatakse alumiiniumist, volframist, plaatinast või vasest. Nähtust on ära kasutatud ka tehnikas klaasi, vilgukivi jt. ainete katmiseks õhukese metallikihiga, näiteks fotoelementide, raadiolampide, optiliste seadmete jms. valmistamisel, kus on vaja katta pinda õhukese metallikihiga.

Kontrollküsimusi

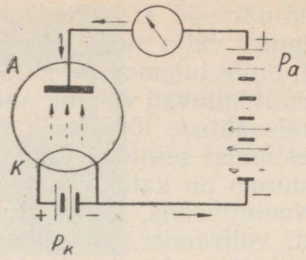
1. Kuidas kulgeb elektrilahendus hõrendatud gaasides?
2. Kus kasutatakse lahendusi hõrendatud gaasides?
3. Millised on katoodkiirte omadused?
4. Mida kujutavad endast katoodkiired?

§ 86. TERMOEMISSIOON

Õppides tundma katoodkiiri, tegime kindlaks, et nad on elektronide voog, mida positiivsed ioonid katoodi pinnalt välja löövad. Suurendanud hõrendust katoodtorus kuni miljondiku mm Hg, näeme, et katoodkiiri ei teki, vaatamata pinge suurendamisele, sest gaasi molekule torus praktiliselt enam ei ole. Elektronide eraldumiseks katoodi pinnast on nüüd vaid üks võimalus — tekitada küllalt tugev elektriväli. Niisuguse välja tekitamiseks on vaja pinget suurusjärgus mõni miljon volti sentimeetri kohta. Siit on selge, kui võrd raske on tekitada katoodkiiri vaakuumis külma katoodi korral. Ent tarvitseb vaid katoodi kuumutada, kui juba üsna madalal pingel eraldub katoodist elektronide voog. Antud juhul väljuvad elektronid katoodi pinnalt vabade elektronide soojusliikumise tagajärjel. Elektronide väljumist kuumutatud keha pinnalt nimetatakse termoemissiooniks.

Toru elektroodidele rakendatud pinge ei mõjuta katoodist sekundis väljalendavate elektronide arvu. See oleneb vaid katoodi temperatuurist. Mida kõrgem see on, seda suurem on ajaühikus katoodi pinnalt eralduv elektronide arv. Kui torus puudub elektriväli, siis katoodist väljunud elektronid tõmmatakse positiivsete ioonide poolt tagasi metalli, kuid nende asemele tulevad metalli pinnalt uued elektronid ja kuumendatud elektroodi lähedusse tekib elektronpilv. Pilve tekkimine kujutab endast analoogilist nähtust vedeliku auramisega.

Seega kujutab niisugune elektronpilv endast negatiivset ruumlaengut. Kui toru elektroodidele mingi pinge rakendada, siis hakkavad elektronid katoodilt anoodile liikuma. Mõnede lisandite ole-



Joon. 124.

masolu katoodi aines mõjutab tunduvalt elektronide emissioonivõimet. Juba väikeste tooriumi annuste lisamisel volframile (1—2%) suureneb elektronide emissioon mitu tuhat korda. Samasuguse emissiooni suurenemise kutsuvad esile ka paljude metallide hapendid. Tooriumi lisandiga ja oksüdeeritud volfram on leidnud laialdast kasutamist paljudes seadmetes, kus rakendatakse elektronide emissiooni, näiteks elektronlampides (raadiolampides) ja röntgenitorudes.

Elektronide eraldumist kuumutatud hõõgniidist pandi esmakordselt tähele 1883. a. järgmise katse juures: süsiniidiga lambi klaasballooni oli joodetud metallplaadike *A* (joon. 124). Õhk pumbati balloonist välja. Plaadike ühendati patarei positiivse poolusega, lambi niit aga sama patarei negatiivse poolusega. Ahelasse lülitatud galvanomeeter võimaldas registreerida voolu ahelas. Seni, kui niiti ei kuumutatud, polnud vooluringis ka mingit voolu — järelikult elektroodide väikese pinge korral osutus hõrendatud gaas mittejuhtivaks keskkonnaks. Kui aga niiti kuumutati, võis märgata galvanomeetri osuti kõrvalekaldumist — vaatamata hõrendusele tekkis vool. Nähtust ei suudetud kaua seletada ja alles aastaid hiljem mõisteti tema olemust.

Positiivselt laetud plaadike *A* tõmbab enda poole hõõgniidist väljunud elektrone. Elektronide liikumise suund on märgitud joonisel nooltega. Voolu hoiab alal anoodpatarei P_a, mille positiivne poolus on ühendatud plaadiga *A* (anoodiga) ja negatiivne poolus kütteniidiga *K* (katoodiga).

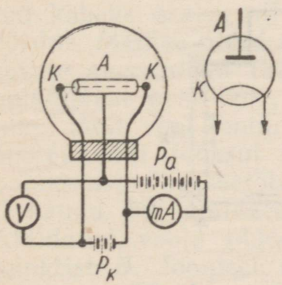
Kui lülitada patarei P_a ahelasse nii, et tema negatiivne poolus ühendada anoodiga *A*, positiivne aga katoodiga *K*, siis galvanomeeter voolu ei näita. Põhjuseks on asjaolu, et anood *A*, olles laetud negatiivselt, ei tõmba, vaid tõukab kütteniidist väljunud elektrone. Järelikult juhib selline lamp voolu ainult ühes suunas: katoodilt anoodile. Kui ühendada anood *A* ja katood *K* vahelduvvooluallikaga, siis läbib lampi vool ainult sel juhul, kui anoodil *A* on positiivne potentsiaal.

Järelikult võib selline lamp muuta vahelduvvoolu alalisvooluks, s. o. eşineda alaldina.

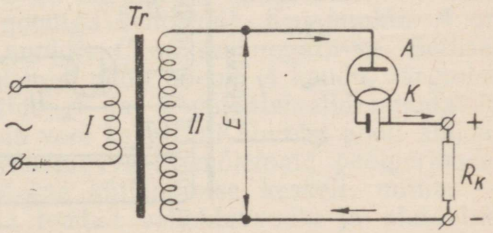
§ 87. KAHE ELEKTROODIGA ELEKTRONLAMP (DIOOD)

Kaasaegne elektronlamp koosneb klaas- või metallballoonist, millest õhk on peaaegu täielikult välja pumbatud. Viimane protseduur on hädavajalik elektronlambi töötamiseks ja tema ea pikendamiseks. Kolvis olevad õhu molekulid ioniseeruksid, ning põrgates kokku kütteniidiga, annaksid osa oma energiast sellele üle. See tõstaks aga kütteniidi temperatuuri kuni ülekuumenemiseni ja tema tööiga väheneks tunduvalt. Gaasi ioonid raskendaksid ka lambi õiget ekspluateerimist ja segaksid raadioaparatuuri häälestamist ning reguleerimist. Kaasaegsetes lampides valitseb hõrendus kuni 10^{-9} mm Hg. Ballooni on paigutatud raskesti sulavast metallist valmistatud kütteniit. Seda kuumutatakse temperatuurini, mille juures hakkavad eralduma elektronid. Kütteniiti ümbritseb metallsilinder, mis on ühendatud patarei positiivse poolusega ning seetõttu nimetatakse seda anoodiks, kütteniiti aga katoodiks. Anoodi ja katoodi sisaldavat elektronlampi nimetatakse kahe elektroodiga elektronlambiks ehk dioodiks (joon. 125). Anoodi *A* ja kütteniidi *KK* otsad ühendatakse metallist jalakeste külge lambi soklil, joonisel ei ole neid näidatud. Joonisel 125 paremal on toodud dioodi tingmärk. Kahe elektroodiga elektronlampi, mida kasutatakse vahelduvvoolu alaldamiseks, nimetatakse kenotroniks. Joonisel 126 on toodud kenotroniga vahelduvvoolu alaldi põhimõtteskeem. Toru anoodahelasse on ühendatud transformaatori *Tr* sekundaarmähis ja paralleelselt sellega koormustakisti R_k, mis on alaldatud voolu tarbijaks. Transformaatori sekundaarmähise otstel on vahelduv elektromotoorne jõud *E*. Kenotroni anoodil on seega vahelduv potentsiaal, kord positiivne, kord negatiivne. Sinusoidaalse vahelduvvoolu positiivse poolperioodi jooksul läbib kenotroni vool, negatiivse poolperioodi jooksul aga voolu pole. Anoodahelas tekib pulseeriv vool. Joonisel 127 on kujutatud sellise pulseeriva voolu graafik. Skeemil toodud alaldi alaldab vahelduvvoolu ainult ühe poolperioodi vältel, mistõttu seda nimetatakse poolperioodalaldiks.

Käesoleval ajal ei köeta kenotroni kütteniiti mitte alalisvooluga,



Joon. 125.

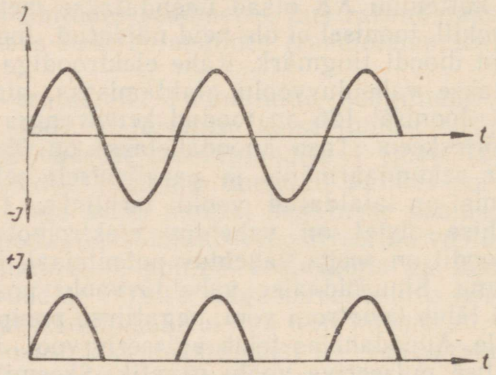


Joon. 126.

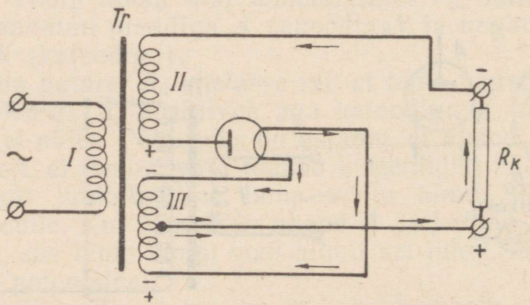
vaid vahelduvvooluga. Selleks ühendatakse kütteniit pinget madaldava transformaatori sekundaarmähisega. Kuid kaua aega ei suudetud siin alalisvoolu asendada vahelduvvooluga, sest vahelduvvooluga kuumutatav kütteniit kiirgas elektrone ebaühtlaselt.

Nõukogude akadeemik A. A. Tšernõšov konstrueeris erilise ehitusega katoodi: vooluga kuumutatav kütteniit asetses portselansilindri kanalikestes. Silinder kaeti erilise seguga, mis kuumutamisel kergesti elektrone eraldab. Kütteniiti kuumutati vahelduvvooluga ja kütteniit omakorda kuumutas portselanist silindrikest.

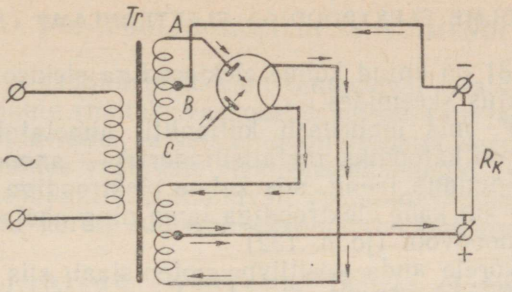
Et silinder ei jõudnud voolu suuna muutumise jooksul jahtuda, jäi tema temperatuur püsivaks, järelikult ka elektrone eraldus metalli pinnalt ühtlaselt. A. A. Tšernõšovi süsteemi katoodid said nimeks kaudse küttega katoodid. Joonisel 128 on skemaatiliselt kujutatud elektronlambi abil töötav vahelduvvoolu alaldamisseade. Lambi katoodi kuumutamiseks kasutatakse siin vahelduvvoolu. Vahelduvvool, läbides transformaatori *Tr* primaarmähist, indutseerib II ja III mähises vahelduva emj. II mähises indutseeritud emj.



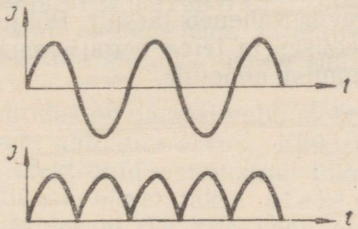
Joon. 127.



Joon. 128.



Joon. 129.



Joon. 130.

on suurem primaarmähise pingest. See mähis ühendatakse kenotroni anoodiga. III mähises indutseeritakse väiksem emj. ning see mähis ühendatakse kütteniidiga. Voolu suund on joonisel näidatud nooltega. Alaldatud voolu pluss võetakse küttemähise III keskelt, selleks et kütteniidi mõlemaid pooli läbiks võrdne anoodvool.

Poolperioodalaldid ei ole leidnud laialdast kasutamist järgmistel põhjustel: 1) nad alaldavad voolu vaid ühe poolperioodi jooksul; 2) alaldatud vool on pulseeriva iseloomuga; 3) neil on väike kasutegur.

Sobivam on kasutada vahelduvvoolu alaldamiseks täisperioodalaldit (joon. 129). Transformaatori *Tr* sekundaarmähis on jaotatud kaheks osaks, nii et pinge punktide *AB* ja *BC* vahel oleks võrdne. Mähise otsad *A* ja *C* on ühendatud samas balloonis asetsevate anoodidega (kahe anoodiga kenotron). Kui punktis *A* on potentsiaal positiivne, siis punktis *C* on see negatiivne. Sellisel juhul läbib vool kenotroni ülemist poolt anoodi *A* kaudu. Järgmise poolperioodi jooksul punktide *A* ja *C* potentsiaalid muudavad polaarsust ning seetõttu läbib vool kenotroni alumist poolt anoodi *C* kaudu. Nii alaldatakse vahelduvvoolu mõlemaid poolperioode. Alaldatud voolu pluss võetakse küttemähise keskelt, miinus — punktist *B*. Joonisel 130 on toodud vahelduvvoolu ja alaldatud voolu graafikud.

§ 88. KOLME ELEKTROODIGA ELEKTRONLAMP (TRIOOD)

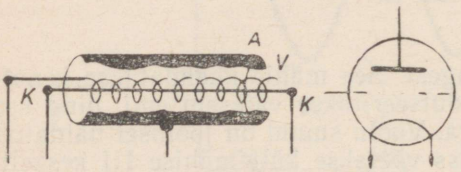
Joonisel 131 on antud kolme elektroodiga elektronlambi ehitus ja tema tähistus skeemides.

Spiraali *V*, mis ümbritseb kütteniiti, nimetatakse võreks. Kütteniit *KK* on katoodiks, metallsilinder *A* — anoodiks.

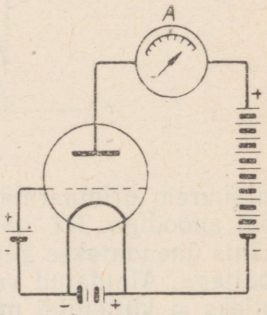
Kui võrel puudub laeng, siis kolme elektroodiga elektronlamp töötab samuti kui kahe elektroodiga lamp ning ahelas tekib teatud väärtusega anoodvool (joon. 132).

Kui aga võrele anda positiivne potentsiaal, siis voolutugevus anoodahelas kasvab järsult. Anoodvool suureneb seetõttu, et võre asetseb katoodi läheduses ja tema positiivne elektriväli mõjutab tunduvalt elektrone, aidates neil liikuda anoodile.

Kui anda aga võrele ükskõik kui väike negatiivne potentsiaal, siis anoodvoolu tugevus väheneb järsult. Põhjus on selles, et võre asetseb katoodi läheduses ja tema negatiivne väli takistab tunduvalt elektronide liikumist anoodile.



Joon. 131.



Joon. 132.

Kui võre negatiivset potentsiaali suurendada teatud väärtuseni, siis võib ta täielikult peatada elektronide liikumise anoodile ning anoodvool muutub võrdseks nulliga. Isegi tühiselt väikese pingekõikumise korral kütteniidi ja võre vahel esinevad tunduvad muutused anoodvoolus. See näitab, et väga väikese võimsusega toiteallika abil võib võre juhtida mitu korda võimsamat anoodpatareid.

Järelikult kolme elektroodiga elektronlampi võib kasutada võreahelasse antava voolu ja pinge võnkumiste võimendamiseks, mida ka laialdaselt tehakse.

§ 89. POOLJUHTALALDI JA -VÕIMENDI

Elektro- ja raadiotehnikas on tänapäeval laialdast kasutamist leidnud pooljuhid (näiteks vaskoksiid, seleen, räni ja germaanium). Alalditel, võimenditel ja teistel pooljuhtidega seadmetel on rida eeliseid, võrreldes vastavate elektronseadmetega: 1) nad on väiksemad; 2) mehhaaniliselt tunduvalt vastupidavamad; 3) töökindlamad; 4) mitu korda suurema ekspluatatsioonieaga; 5) suurema kasuteguriga.

1. Pooljuhtide juhtivus. Selleks et mõista pooljuhtseadme tööd, selgitame kõigepealt, kuidas juhib voolu pooljuht.

Pooljuhtides eristatakse nn. elektron- ja aukjuhtivust. Metallidel on elektronjuhtivus. Igas metallis leidub vabu elektrone, mis liiguvad terve tüki ulatuses korrapäratult. Metallis olevate vabade elektronide arv on alati suurem tema aatomite arvust. Elektrivälja abil on võimalik tekitada metallis nende suunatud liikumist, s. o. elektrivoolu.

Mõnedes pooljuhtides on samuti vabu elektrone, kuid nende arv on tunduvalt väiksem aatomite arvust. Elektrivälja mõjul võib ka pooljuhis tekitada elektronide suunatud liikumise, s. o. elektrivoolu. Sellist juhtivust nimetatakse elektronjuhtivuseks.

Mõnedes pooljuhtides ei ole aga vabu elektrone, kuid leidub positiivseid ioone. Iga kristallvõre sõlmpunktis asetsev ioon erineb aatomist selle poolest, et tal puudub üks elektron, mistõttu selliseid sõlmpunkte hakati aukudeks nimetama. Soojusliikumine võib esile kutsuda võre naaberaatomi elektroni ülemineku auku. Tulemusena tekib uus auk võre selles sõlmpunktis, kust lahkus elektron, ja kaob endine auk võre selles sõlmpunktis, kuhu tuli elektron. Aukude liikumine pooljuhis elektrivälja puudumisel on korrapäratu.

Elektrivälja olemasolul liiguvad elektronid peamiselt väljaga vastassuunas ja augud — välja suunas.

Aukude suunatud liikumist pooljuhi ruumvõres nimetatakse aukjuhtivuseks.

Praktikas on suure tähtsusega nn. lisandipooljuhid, mida saadakse isolaatoritest neile teatava aine lisamise teel.

Kui lisandi aatom täidab ühe põhiaatomi koha võres, siis võre elektrilised omadused muutuvad ja isolaatorist saab pooljuht.

Kui elektronide arv lisandi aatomi välisorbiidil on ühe võrra suurem, võrreldes põhiaatomi elektronide arvuga, siis tekib võres üleliigne elektron. See elektron võib soojusliikumise mõjul üle minna naabervõre põhiaatomi orbiidile jne.

Järelikult võib elektriväli panna vabanenud elektronid pooljuhis suunatult liikuma.

Seega *lisand, mille aatomi väliskestas on üks elektron rohkem kui aine aatomil, tekitab pooljuhis elektronjuhtivuse.*

Elektronjuhtivusega pooljuhte nimetatakse *n*-tüüpi pooljuhtideks (sõnast negatiivne).

Lisandeid, mis elektrone kergesti ära annavad, nimetatakse

doonoriteks. Näiteks lisades puhtale germaaniumile antimoni, saame elektronjuhtivusega pooljuhi. Nähtust saab seletada järgmiselt: elektronide arv germaaniumi aatomi välisorbiidil on 4, antimonil aga 5. Antimoni aatomi sidumiseks germaaniumi aatomiga on seega vaja ainult nelja valentselektroni, viies valentselektron on üleliigne. Soojusliikumise toimel lahkub see aatomist ja vabaneb. Germaanium muutub elektronjuhtivusega pooljuhiks.

Kui lisandi aatomi välisorbiidi elektronide arv on ühe võrra väiksem aine aatomi välisorbiidi elektronide arvust, siis sidemete moodustumisel tekib ühe elektroni suhtes puudujääk. Soojusliikumise mõjul võib elektron aine aatomist üle minna lisandi aatomi orbiidile ja tekib auk, mis täidetakse teise aatomi elektroniga jne. Elektrivälja toimel liiguvad augud välja suunas.

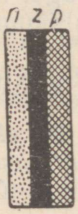
Seega *lisand, mille aatomi väliskestas on üks elektron vähem kui aine aatomil, tekitab pooljuhis aukjuhtivuse.*

Aukjuhtivusega pooljuhte nimetatakse *p*-tüüpi pooljuhtideks (sõnast positiivne).

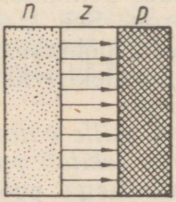
Lisandeid, mis kristallvõre aatomitelt elektrone haaravad, nimetatakse aktseptoriteks.

Näiteks lisades puhtale germaaniumile pisut alumiiniumi, saame aukjuhtivusega pooljuhi. Germaaniumi aatomi välisorbiidil on 4 elektroni, alumiiniumil — 3. Alumiiniumi aatom, täites ühe germaaniumi aatomi koha kristallvõres, vähendab selles elektronide arvu ühe võrra. Alumiiniumi aatomi sidumiseks germaaniumi aatomiga on vaja 4 valentselektroni, kuid alumiiniumi aatomil on neid vaid kolm. Puuduva elektroni võtab alumiiniumi aatom germaaniumi aatomilt, mille tulemusena tekib «auk». See täitub mõne teise germaaniumi aatomi elektroni arvel jne. Järelikult muutub germaanium aukjuhtivusega pooljuhiks.

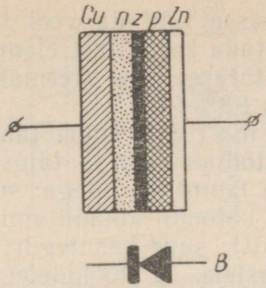
2. P o o l j u h t a l a l d i. Kui ühendada järjestikku kaks pooljuhti, üks elektronjuhtivusega (*n*-tüüpi) ja teine aukjuhtivusega (*p*-tüüpi), siis on saadud süsteemil ühepoolne juhtivus ning seda võib kasutada vahelduvvoolu alaldamiseks. Elektronjuhtivusega ja aukjuhtivusega pooljuhtide kontaktpinnal tekib õhuke üleminekukiht *z*, mille kaudu toimub elektronide ja aukude difusioon (joon. 133). Selles kihis ei ole ei elektrone ega auke, sest nad neutraliseeruvad vastastikku. Üleminekukihti nimetatakse tõkkekihiks, sest



Joon. 133.



Joon. 134.



Joon. 135.

tal on teatav takistus. Läbi tõkkekihi liiguvad elektronid elektronjuhtivusega pooljuhist aukjuhtivusega pooljuhti, mille tulemusena tõkkekihi piiril tekib kontaktpinge.

Elektriväli, mille see potentsiaalide vahe esile kutsub, on koondunud tõkkekihti ja jaotunud kogu tema ruumala ulatuses. Väli on suunatud elektronjuhtivusega pooljuhilt aukjuhtivusega pooljuhile (joon. 134) ja takistab elektronide liikumist läbi tõkkekihi. Kui pingestada süsteem nii, et vooluallika poolt tekitatud elektriväli nõrgendab elektrivälja tõkkekihis või neutraliseerib selle täielikult, siis on elektronidel võimalik liikuda läbi tõkkekihi ja süsteemis tekib vool. Sellist elektronide üleminekut nimetatakse *n*—*p*-siirdeks. Kui aga pingestada süsteem selliselt, et vooluallika poolt tekitatud elektriväli tugevdab elektrivälja tõkkekihis, siis elektronid seda läbida ei saa ja süsteemis voolu ei ole.

Kui pooljuhid lülitada vahelduvvooluahelasse, siis tekib ahelas vool tingimusel, et elektronjuhtivusega *n*-tüüpi pooljuhil on negatiivne ja aukjuhtivusega *p*-tüüpi pooljuhil positiivne potentsiaal. Potentsiaalide polaarsuse muutumisel ahelas voolu ei ole.

Vaatleme näitena kuproksalaldit (joon. 135; *B* — alaldi tingmärk skeemides). See koosneb punasest vasest plaadist (Cu), mis on kaetud elektronjuhtivusega (*n*-tüüpi) vask(I)oksiidi kihiga (oksiid on küllastatud vasega), millele omakorda termilise töötlemise teel ca 1000 °C juures on kantud teine, aukjuhtivusega (*p*-tüüpi) vask(I)oksiidi kiht (oksiid on küllastatud hapnikuga). Parema ühenduse tagamiseks pooljuhiga kaetakse see veel tsingiga Zn.

Vaskoksiidi kihtide vahel (*n*- ja *p*-kihi vahel) tekib üliõhuke ülemineku- ehk tõkkekiht *z*. Kui ühendada vaskkontakt vooluallika negatiivse ja tsink positiivse poolusega, siis tekib vooluringis vool. Kui muuta pinge polaarsust, siis tõkkekihi suure takistuse tõttu ringis voolu ei ole.

Ühest sellisest elemendist koosnev alaldi juhib voolu ainult ühe poolperioodi jooksul ja teda nimetatakse poolperioodalaldiks. Kasutades kahte elementi, võime saada täisperioodalaldi, mille töö-

tamiseks on vaja ahelasse lülitada veel transformaator. Täisperioodalaldi võib valmistada ka neljast elemendist (joon. 136).

Viimasel ajal kasutatakse just germaanium- ja ränialaldeid kasuteguriga ligikaudu 98%.

3. Pooljuhtvõimendi. Suurt tähelepanu pööratakse ka pooljuhttrioodide väljatöötamisele ja täiustamisele. Neil on mitmeid eeliseid, võrreldes lamptrioodidega: suurem võimendustegur; nad ei vaja energiat katoodi kuumutamiseks; tarbivad väikest võimsust (mõni millivatt); suur kasutegur; on hästi vastupidavad mehhaanilistele põrutustele ja löökidele; väikeste mõõtmetega (suurusjärgus 1 cm^3); pika ekspluatatsioonieaga (kuni 100 000 tundi).

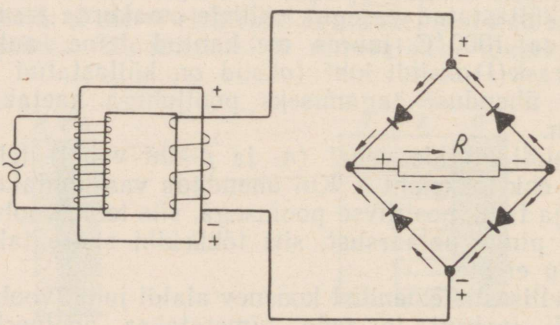
Pooljuhtvõimendi koosneb kolmest kristallist, mis moodustavad *p—n—p*- või *n—p—n*-siirde, s. t. äärtel asuvad aukjuhtivusega pooljuhid, keskel aga elektronjuhtivusega pooljuht (*p—n—p*-siire) või vastupidi — äärtel asuvad elektronjuhtivusega pooljuhid ja keskel aukjuhtivusega pooljuht (*n—p—n*-siire). Keskmist kristalli nimetatakse baasiks, äärmisi koos üleminekukihtidega emitteriks ja kollektoriks.

Me teame, et üleminekukihis tekib elektriväli, mis takistab elektronide liikumist. Juhul kui elektronid liiguvad elektronjuhtivusega pooljuhist aukjuhtivusega pooljuhti, siis üleminekukihi elektriväli pidurdab nende liikumist.

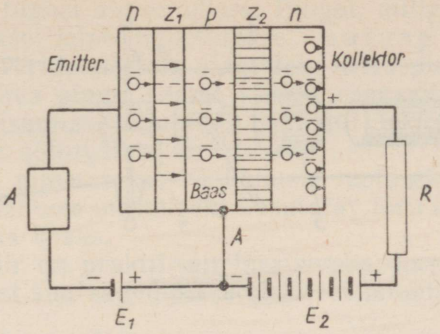
Kui aga elektronid tulevad üleminekukihti aukjuhtivusega pooljuhi poolt, siis elektriväli soodustab nende liikumist. See omadus ongi pooljuhtvõimendites ära kasutatud.

Pooljuhtvõimendi skeem on toodud joonisel 137.

Oletame, et välissignaalide vastuvõtja *A* klemmidel on alalispinge. Madalpingeline patarei E_1 vähendab elektrivälja pidurdavat toimet esimeses, emitteri ja baasi vahelises tõkkekihis (kihis z_1). Tulemusena liigub osa elektrone emitterist baasi. Kõrgepingeline patarei E_2 tugevdab elektrivälja baasi ja kollektori vahelises tõkkekihis (kihis z_2) ja elektronid ei saa liikuda kollektorist baasi,



Joon. 136.



Joon. 137.

kuid võivad suunduda baasist kollektorisse. Selle tagajärjel läbib koormustakistit *R* vool. Baasi elektronid ei saa liikuda juhti *A*, sest viimane on laetud negatiivselt. Koormustakistil saame alalispinge, sest ka signaalide vastuvõtja klemmidel on alalispinge.

Kui aga vastuvõtjale rakendatakse vahelduvpinge, siis tekib tõkkekihis z_1 vahelduv elektriväli ja hakkab perioodiliselt muutuma ka tõkkekihi pidurdav toime. See omakorda kutsub esile voolu ning pinge muutumise koormustakistil.

Katsed näitavad, et pingemuutused koormustakistil on sadu kordi suuremad kui signaalide vastuvõtjas.

§ 90. ELEKTRONKIIRETORU

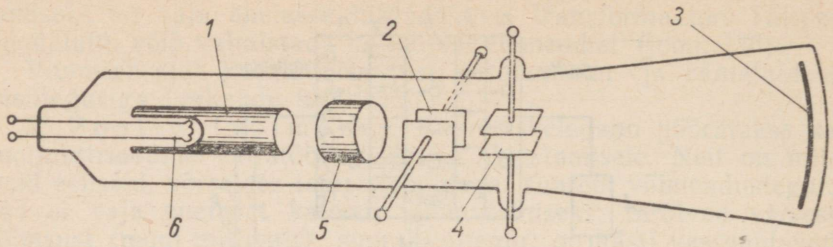
Katoodkiiri kasutatakse erilises elektronseadmes — elektronkiiretorus, mida rakendatakse laialt katoodostsillograafides, televiisorites ja raadiolokaatorites.

Lihtsaima elektronkiiretoru skeem on toodud joonisel 138. See kujutab endast õhutühja klaaskolbi (hõrendus kuni 10^{-7} mm Hg).

Kolvi kitsamasse ossa on paigutatud kütteniidikujuline metall — katood *6* fokuseeriva silindriga *1*. Kütteniiti läbib vool, mille tulemusena niit kuumeneb ja tekib elektronide emissioon. Katoodi vastas asub silindrikujuline anood *5*, mille sees paiknevad väga väikeste tsentraalsete avadega diafragmad. Katoodi ja anoodi vahel tekitatakse mitmesaja- või mitme tuhande voldine pinge.

Katoodist väljalennanud elektrone kiirendatakse elektriväljas. Elektronid läbivad anoodi diafragmad ja liiguvad edasi kitsa kiirtekimbuna. Jõudes toru teises otsas asuvale ekraanile *3*, tekitab elektronkiir sellel helendava täpi. Ekraan on kaetud erilise ainega (luminofooriga), mis katoodkiirte mõjul helendub. Elektronkiire katkemisel kaob valgustäpp momentaanselt.

Kiire suuna muutmiseks kasutatakse kahte kondensaatorit, nn. kallutusplaate. Vertikaalsed plaadid *2* võivad elektronkiirt horison-

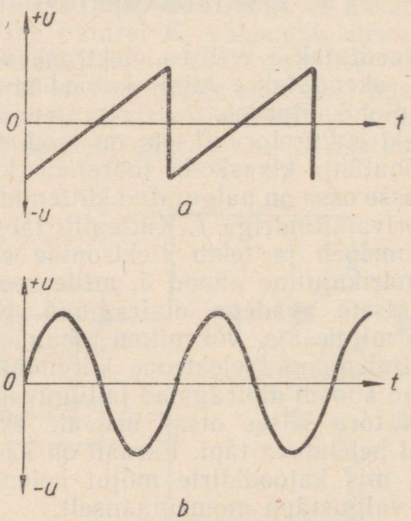


Joon. 138.

taaltasapinnas kallutada. Kui vasakpoolne plaat on laetud negatiivselt ja parempoolne positiivselt, siis kaldub kiir paremale; kui aga vasakpoolne plaat on laetud positiivselt ja parempoolne negatiivselt, siis kaldub kiir vasakule. Andes vertikaalsetele plaatidele vahelduvpinge, hakkab kiir liikuma vasakult paremale ja paremalt vasakule, s. o. hakkab võnkuma horisontaaltasapinnas.

Rakendades vahelduvpinge horisontaalsetele plaatidele *4*, hakkab elektronkiir võnkuma vertikaaltasapinnas.

Võnkumise iseloomu väljaselgitamiseks rakendatakse vertikaalsetele plaatidele hammaspinge (joon. 139, *a*), s. o. pinge, mis kasvab algul ühtlaselt, seejärel langeb aga väga kiiresti esialgse väärtuseni. Niisugune protsess kordub pidevalt. Selle tulemusena liigub elektronkiir ekraanil ühtlaselt horisontaalsuunas ja tuleb



Joon. 139.

seejärel kiiresti tagasi algasendisse. Pinget, mille juures kirjeldatud võnkumine aset leiab, nimetatakse laotuspingeks.

Rakendades vertikaalsetele plaatidele laotuspinge, horisontaalsetele aga uuritava pinge, saame kiirt üheaegselt nii horisontaalkui ka vertikaalsuunas nihutada. Ekraanil tekib uuritava pinge muutumise kõver sõltuvalt ajast.

Seda kõverat nimetatakse võnkumiste laotuseks (joon. 139, *b*).

Võnkumiste laotuse uurimiseks kasutatav toru on elektronostsillograafi oluliseks osaks.

Et elektronkiir on praktiliselt inertsivaba, kasutatakse katoodostsillograafi just suursageduslike elektrivõnkumiste puhul.

Kontrollküsimusi

1. Mis on termoemissioon?
2. Mida nimetatakse dioodiks, kuidas ta on ehitatud ja kuidas ta töötab vahelduvvoolu alaldina?
3. Mida nimetatakse trioodiks, kuidas ta on ehitatud ja kuidas ta töötab pinge ning voolu võnkumiste võimendina?
4. Milles seisab pooljuhtide elektronjuhtivus?
5. Milles seisab pooljuhtide aukjuhtivus?
6. Kuidas on ehitatud ja kuidas töötab pooljuhtalaldi?
7. Kuidas on ehitatud ja kuidas töötab pinge ning voolu võnkumiste pooljuhtvõimendi?
8. Millised eelised on pooljuhtdioodidel ja -trioodidel, võrreldes vastavate elektronseadmetega?
9. Selgitage elektronkiiretoru ehitust ning töötamise põhimõtet.

VII PEATÜKK

ELEKTROMAGNETILISED VÕNKUMISED JA LAINED

§ 91. ELEKTRIVÕNKUMISED. KONDENSAATORI TÜHJENEMINE. ELEKTROMAGNETILISED VÕNKUMISED

Võnkuva pendli perioodiliselt muutuvat hälvet võib graafiliselt kujutada sinusoidina. Perioodiliselt muutuvat indutseeritud emj. ja voolu, mis tekib raami ühtlasel pöörlemisel homogeenses magnetväljas, kujutatakse samuti sinusoidina. Selline erinevaid protsesse kujutavate graafikute sarnasus lubab võnkumiste mõistet laiendada ka elektrivõnkumistele.

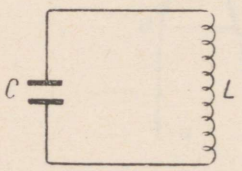
Valgustusvõrgus on kasutusel vahelduvvool sagedusega 50 Hz, s. t. madalsageduslikud elektrivõnkumised. Generaator tekitab tarbija, näiteks elektrilambi klemmidel perioodiliselt muutuva vahelduvpinge, s. o. sundvõnkumised.

Kuid võib esineda ka vooluringe, kus toimuvad elektrilised vabavõnkumised, s. o. võnkumised ilma perioodiliselt mõjuva emj.-ta.

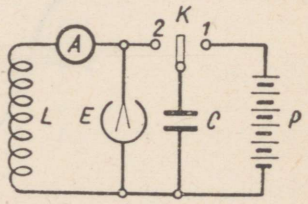
Lihtsaimaks selliseks ahelaks on võnkering. Võnkeringiks nimetatakse vooluringi, mis koosneb kondensaatorist C ja induktiivpoolist L (joon. 140).

Ühehertsise sagedusega elektrivõnkumiste saamiseks võtame suure mahtuvusega (500 μF) kondensaatori C ja ühendame selle suure induktiivsusega (500 H) pooliga.

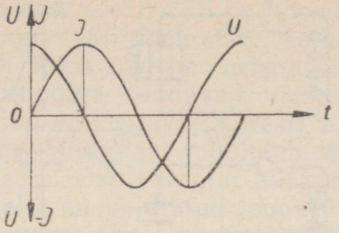
Vahelduvvoolu jälgimiseks ühendame järjestikku ampermeetri A, millel on nulljaotus skaala keskel. Pooli klemmidel toimuvate



Joon. 140.



Joon. 141.



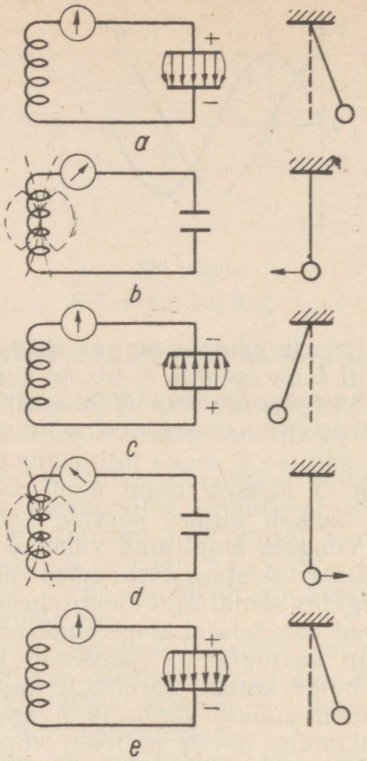
Joon. 142.

pingemuutuste jälgimiseks ühendame paralleelselt elektromeetri E (joon. 141). Kui lüliti L on asendis *1*, siis on kondensaator ühendatud pingeallikaga P (ligikaudu 100 V) ja tema plaatidele kogunevad laengud: ühele positiivne, teisele negatiivne.

Pöörame lüliti asendisse *2*, seega lülitasime patarei vooluringist välja. Kondensaator C hakkab nüüd pooli L kaudu tühjenema. Ampermeetri osuti hakkab nullist kõrvale kalduma, kord ühele, kord teisele poole. Võngete amplituud väheneb järjest, kuni osuti jääb seisma, sest ahela takistuse tõttu läheb palju energiat ahela soojendamiseks. Jälgides samal ajal elektromeetrit, näeme, et tema lehekesed eemalduvad teineteisest kõige enam siis, kui ampermeetri osuti läbib nulli, ja vastupidi — langevad kokku ampermeetri osuti maksimaalse hälbe korral. Järelikult kujutab kondensaatori tühjenemine läbi pooli endast voolu ja pinge võnkumisi poolis, kusjuures pingevõnkumine on $^1/_4$ perioodi võrra ees vooluvõnkumisest (joon. 142).

Vaatleme lähemalt võnkeringis toimuvaid protsesse. Laetud kondensaatori korral (kui tühjenemine pole veel alanud) on tema elektrivälja tugevus kõige suurem. Sel momendil on kondensaatoril järelikult maksimaalne potentsiaalne elektrienergia. Võnkeringi esialgne seisund vastab seega tasakaaluasendist väljaviidud pendlile (joon. 143, *a*).

Et võnkering ei ole tasakaalus, siis algab kondensaatori tühjenemine ja pooli läbib vool, millega kaasneb magnetvälja tekkimine pooli sees ja väljaspool pooli. Kui kondensaator on tühjenenud ja tema elektriväli $E=0$, saavutab magnetvälja tugevus maksimaalse väärtuse. Selline võnkeringi seisund on analoogiline tasakaaluasendit läbiva pendli olekuga (joon. 143, *b*); pendli kineetiline energia on kõige suurem. Seejärel muutub magnetvälja energia eneseinduktsioonivoolu energiaks. Eneseinduktsioonivoolu suund ühtib kondensaatori tühjenemisvoolu suunaga. Selle tulemusena laaduvad kondensaatori plaadid uuesti, kuid vastupidi esialgsega. Olukord on analoogiline tasakaaluasendist teisele poole välja viidud pendliga (joon. 143, *c*). Seejärel kondensaator tühjeneb jällegi, kuid vastupidises suunas (joon. 143, *d*). Magnetvälja energia arvel tekib eneseinduktsioonivool ja kondensaatori plaadid laaduvad



Joon. 143.

uuesti ümber (joon. 143, *e*). Kui vooluringil puuduks takistus, siis võnkumised ei sumbuks.

Näeme, et võnkeringis toimub perioodiliselt kondensaatori elektrivälja energia muundumine pooli magnetvälja energiaks ja vastupidi, s. o. toimuvad elektromagnetilised võnkumised.

Elektromagnetilisteks võnkumisteks nimetatakse elektrivälja ja magnetvälja tugevuse perioodilisi muutusi.

Vähendades mahtuvust C ja induktiivsust L, võime saada suure sagedusega võnkumisi. Raadiotehnikas kasutatakse elektromagnetilisi laineid sagedusega mõnest miljonist kuni mitme miljardi hertsini.

§ 92. KINNINE VÕNKERING. SUMBUVAD JA SUMBUMATUD VÕNKUMISED

Võnkeringi, mis kiirgab ümbritsevasse ruumi väga vähesel määral elektromagnetilise välja energiat, nimetatakse kinniseks (joon. 143). Niisuguses võnkeringis on elektri- ja magnetväli ruu-

mis teineteisest eraldatud: elektriväli on koondunud kondensaatori plaatide vahele ja magnetväli pooli sisse. Sellisel juhul on energia kiirgumine väga nõrk. Mida rohkem energiat antakse võnkeringile, seda suurema amplituudiga toimuvad võnkumised ringis. Kuid võnkeringi omavõnkumised kustuvad kiiresti, s. o. nende amplituud väheneb, sest suur osa energiast muundub iga võnke ajal ahela takistuse tõttu soojuseks. Osa energiat kiirgub ka ruumi. Sumbuvate võnkumiste graafik on kujutatud joonisel 144.

Inglise füüsik Thomson (Kelvin) tõestas 1853. a. teoreetiliselt, et elektromagnetiliste võnkumiste omavõnkeperioodi on võimalik leida valemi abil

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

kus T on periood sekundites, C — mahtuvus faradites ja L — induktiivsus henrides.

Sumbumatute elektromagnetiliste võnkumiste saamiseks tuleks võnkeringi energiat täiendada vähemalt üks kord perioodi jooksul.

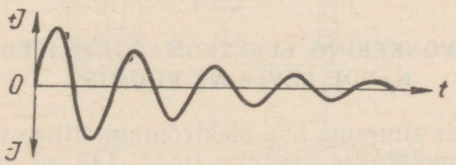
1913. a. avastati sumbumatute kõrgsagedusvõnkumiste saamise võimalus kolme elektroodiga lambi abil. See moodus on aluseks kaasaegsele raadiotehnikale.

Lampgeneraator muundab alalisvoolu energia jääva amplituudiga kõrgsagedusliku vahelduvvoolu energiaks. Generaator koosneb kolmest osast: 1) võnkeringist, milles tekitatakse elektromagnetilised võnkumised; 2) toiteallikast, mis on vajalik võnkumiste alalhoidmiseks võnkeringis; 3) elektronlambist, mis automaatselt reguleerib energia andmist võnkeringi (joon. 145).

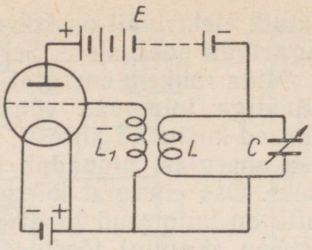
Pool L ja kondensaator C moodustavad võnkeringi, milles tekivad sumbumatud võnkumised. Patarei P on võnkeringi energiaallikaks. Tema osa võnkeringis on seesama mis vedrul kellamehhanismis. Elektronlambi ja pooli L_1 osa võnkeringis on analoogiline jaotusmehhanismi funktsiooniga kellas.

Võnkeringis CL toimuvad võnkumised tekitavad elektronlambi võrel vahelduva emj., sest pool L on induktiivselt sidestatud pooliga L_1. Võre positiivne potentsiaal suurendab anoodvoolu lambis ja kondensaatori C energia suureneb.

Võre negatiivse potentsiaali korral on lamp suletud ja kondensaator C laadub pooli L kaudu. Kondensaatori perioodiline laadimine on aluseks sumbumatute võnkumiste saamisele võnkeringis.



Joon. 144.



Joon. 145.

Pool L_1 peab olema lülitatud vooluringi nii, et võre laaduks positiivselt sel momendil, kui kondensaatori alumine plaat on laetud positiivselt. Kui aga pooli L_1 otsad ära vahetada, siis võre eelpinge võnkefaas muutub $^1/_2$ perioodi võrra ja võnkumisi ei teki. Viimasel juhul patarei ei lae kondensaatorit, vaid vastupidi — tühjendab seda. Esimese kolme elektroodiga elektronlambi tööstuse tarbeks konstrueeris 1914. a. vene teadlane N. D. Papaleksi.

Esimese generaatorlambi Nõukogudemaa vajadusteks konstrueeris väljapaistev raadioinsener ja teadlane M. A. Bontš-Brujevitš.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse võnkeringiks?
2. Millised protsessid toimuvad võnkeringis?
3. Millist võnkeringi nimetatakse kinniseks ja miks ta kiirgab vähe elektromagnetilist energiat?
4. Milliseid võnkumisi nimetatakse sumbuvateks ja kuidas neid graafiliselt kujutada?
5. Miks sumbuvad elektromagnetilised võnkumised?
6. Milliseid võnkumisi nimetatakse sumbumatuteks võnkumisteks ja kuidas neid graafiliselt kujutada?
7. Kuidas saada sumbumatuid võnkumisi elektronlambi abil?
8. Millise valemi abil võib arvutada võnkeringi omavõnkeperioodi?
9. Milline mahtuvus tuleks valida võnkeringi, et induktiivsuse 8 H korral saaksime omavõnkeperioodiks 0,02512 sekundit?

Vastus: 0,2 μF.

10. Milline induktiivsus tuleks valida võnkeringi, et selle mahtuvuse 1 μF korral saaksime omavõnkeperioodi 0,01256 sekundit?

Vastus: 0,4 H.

§ 93. AVATUD VÕNKERING. ELEKTROMAGNETILISED LAINED JA NENDE LEVIMINE RUUMIS

Võnkeringi, mis suurema osa elektromagnetilise välja energiast ruumi kiirgab, nimetatakse avatuks (joon. 146, *a*). Avatud võnkeringi puhul toimuvad elektrivälja ja magnetvälja muutused ruumis

ning seepärast kiirgab võnkering tugevasti energiat elektromagnetiliste lainete näol. Kiirgamine toimub siis, kui võnkesagedus on küllalt suur. Joonisel 146, *b* on toodud avatud võnkering antenni ja maandusega.

Elektromagnetilise välja teooria loojaks on inglane James Clerk Maxwell XIX sajandi teisel poolel. Tema teooria aluseks on kaks väidet.

1. Igasugune magnetvälja muutumine kutsub ümbritsevas ruumis esile kinniste jõujoontega muutuva pööriselektrivälja (erinevalt laetud keha elektriväljast, mille jõujoontel on algus ja lõpp).

2. Igasugune elektrivälja muutumine tekitab ümbritsevas ruumis muutuva magnetvälja.

Kui mingisse ruumipunkti ilmub kiiresti muutuv magnetväli, siis tekitab ta naaberpunktides kiiresti muutuva pööriselektrivälja, mis omakorda kutsub esile kiiresti muutuva magnetvälja jne.

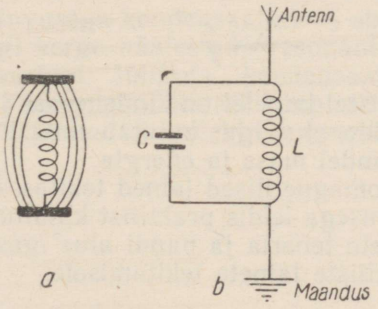
Perioodiliselt muutuva elektromagnetilise välja levimisprotsessi ruumis nimetatakse elektromagnetiliseks laineks.

Katsed näitavad, et vooluga juhti ümbritseb magnetväli, mille tugevus suureneb või väheneb, olenevalt voolu kasvamisest või kahanemisest juhis. Voolu nullväärtusele vastab ka magnetvälja tugevuse nullväärtus; voolu maksimaalväärtusele — magnetvälja maksimaalne väärtus, s. t. magnetvälja ja elektrivälja võnkefaasid ühtivad.

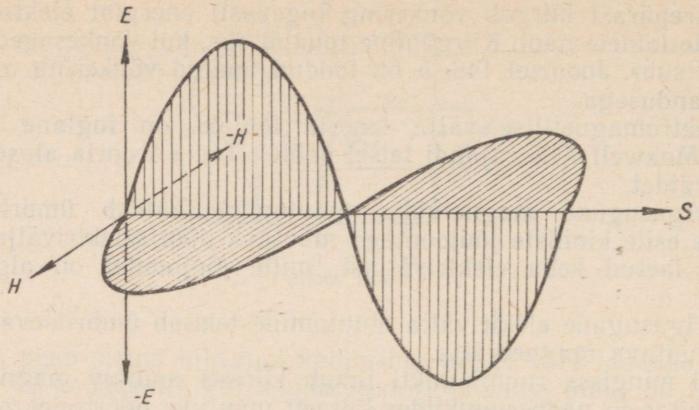
Vastavalt Maxwelli teooriale sarnaneb pööriselektrivälja nihkumine ruumis voolu liikumisega juhis, s. t. elektrivälja jõujoonte nii nagu vooluga juhtmegi ümber tekib magnetväli, mis muutub ühel ajal elektrivälja muutumisega.

Elektrivälja tugevuse nullväärtusele mingis punktis vastab ka magnetvälja tugevuse nullväärtus; elektrivälja tugevuse maksimaalväärtusele vastab magnetvälja tugevuse maksimaalväärtus. Elektrivälja tugevus ja magnetvälja tugevus muutuvad samas faasis.

Katsed näitavad, et magnetvälja tugevuse vektor asub voolu suunaga risti olevas tasandis.



Joon. 146.



Joon. 147.

Kui Maxwelli teooria järgi sarnaneb pööriselektriväli vooluga, siis tekkinud magnetvälja tugevuse vektor on risti elektrivälja tugevuse vektoriga. Elektri- ja magnetvälja muutuste levimist ruumis võib piltlikult kujutada kui väljatugevuste vektorite muutumist.

Kanname x-teljele teepikkused, z-teljele elektrivälja tugevuse E ja y-teljele magnetvälja tugevuse H, siis elektri- ja magnetvälja tugevuse vektorite võnkumiste graafik ruumi erinevates punktides kujutab endast elektromagnetilise laine graafikut (joon. 147).

Graafikult näeme, et elektromagnetilised lained on ristlained, sest väljatugevuste vektorid võnguvad risti laine levimissuunaga.

Teepikkust, mille elektromagnetiline laine läbib ühe võnkeperioodi jooksul, nimetatakse lainepikkuseks (λ).

Kui c on elektromagnetiliste lainete levimise kiirus, T — võnkeperiood, f — võnkesagedus, siis

$$\lambda = c\,T$$

või

$$\lambda = \frac{c}{f}\,.$$

Elektromagnetilistel lainetel on kindel mass ja energia. 1900. a. tõestas P. N. Lebedev, et valgus kujutab endast elektromagnetilisi laineid, millel on kindel mass ja energia.

Esimesed elektromagnetilised lained tekitas saksa füüsik Hertz 1888. a. Selle avastusega leidis praktilist kinnitust Maxwelli elektromagnetiliste lainete teooria ja pandi alus igasuguse lainepikkusega elektromagnetiliste lainete tekitamisele.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millist võnkeringi nimetatakse avatuks?
2. Mis on Maxwelli elektromagnetilise välja teooria aluseks?
3. Kuidas toimub elektromagnetilise välja energia kiirgamine ruumi?
4. Mida nimetatakse elektromagnetiliseks laineks?
5. Millised muutused esinevad ruumi igas punktis elektromagnetilise laine levimisel?
6. Mida nimetatakse elektromagnetilise laine lainepikkuseks?
7. Milline matemaatiline seos on elektromagnetilise laine levimiskiiruse, lainepikkuse ja võnkeperioodi vahel?
8. Millise aja jooksul toimub võnkeringis üks täisvõnge, kui võnkering kiirgab elektromagnetilisi laineid pikkusega 1500 m?

Vastus: 0,000 005 s.

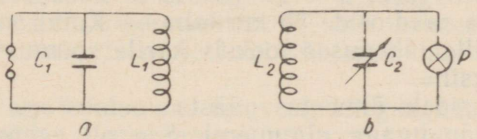
9. Määrata elektromagnetilise laine pikkus, kui võnkesagedus on 600 kHz.

Vastus: 500 m.

§ 94. ELEKTRILINE RESONANTS

Elektromagnetilised lained, jõudes mingi võnkeringini, tekitavad selles sunnitud elektromagnetilised võnkumised. Kui elektromagnetiliste lainete võnkeperiood ühtib võnkeringi omavõnkesagedusega, siis sundvõnkumiste amplituud kasvab küllaltki suureks. Seda nähtust nimetatakse elektriliseks resonantsiks.

Võnkeringi, mis kiirgab elektromagnetilisi laineid, nimetatakse vibraatoriks (joon. 148, *a*). Võnkeringi, mis võtab vastu vibraatori võnkumisi, nimetatakse resonaatoriks (joon. 148, *b*).



Joon. 148.

Muutuva mahtuvusega kondensaatori C_2 abil (pöördkondensaator) on võnkeringi kerge häälestada resonantsi vibraatoriga. Kui resonaatori võnkeringi lülitada kondensaatoriga paralleelselt neoonlamp P, siis resonantsi korral lamp süttib. Elektrilise resonantsi abil saab kindlaks teha elektromagnetiliste lainete olemasolu ruumis.

§ 95. RAADIOSAATJA JA -VASTUVÕTJA. A. S. POPOV — RAADIO LEIUTAJA

Maxwell tõestas teoreetiliselt elektromagnetiliste lainete olemasolu ja näitas ära vajalikud tingimused nende saamiseks: 1) elektromagnetiliste lainete suur võnkesagedus, 2) avatud võnkering, kus elektriväli ümbritseb kogu ahelat. Hertz tõestas katseliselt elektromagnetiliste lainete olemasolu ning uuris nende omadusi. Vene teadlane A. S. Popov rakendas elektromagnetilised lained praktikasse — ta ehitas traadita telegraafi. Hiljem hakati seda traadita telegraafi raadiotelegraafiks nimetama.

Iga aasta 7. mail tähistatakse meie maal raadiopäeva. Sel päeval 1895. a. demonstreeris kuulus vene teadlane A. S. Popov Vene Füüsika ja Keemia Seltsis atmosfääris toimuvate elektromagnetiliste võnkumiste registraatorit — äikesemärkijat. Oma ettekannet lõpetades sõnas teadlane: «Võin avaldada lootust, et minu seadme edasisel täiustamisel saab seda kasutada signaalide edasiandmiseks kiirete elektromagnetiliste võnkumiste abil suurte vahemaade taha. See osutub võimalikuks niipea, kui on leiutatud küllaldase energiavaruga võnkumiste allikas.»

12. märtsil 1896. a. Peterburis Vene Füüsika ja Keemia Seltsi istungil demonstreeris A. S. Popov raadiovastuvõtjat, mis oli varustatud telegraafiaparaadiga, ja võttis vastu esimese radiogrammi maailmas. See koosnes kahest sõnast: «Heinrich Hertz». Telegrammi andis edasi Popovi abiline P. N. Rõbkin 2 km kauguselt.

1897. a. võttis Popov edukalt vastu raadiosignaale Balti laevastiku laevadelt. 1899. a. organiseeris ta koos P. N. Rõbkini ja D. S. Troitskiga raadioside 50 km taha — Kotka sadama ja Gotlandi vahel, mille läheduses jooksis karile soomuslaev «Kindral-admiral Apraksin».

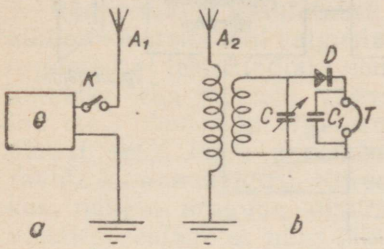
Tänu raadiosidele õnnestus päästa soomuslaev ja ka kalurid, kes triivisid jääpangaga ulgumerel. See oli esimene raadioside kasutamine praktikas.

A. S. Popov oli kodumaa tulihingeline patrioot. Kõikidele välismaa ettevõtjatele, kes tegid talle ettepaneku töötada välismaal, vastas ta: «Ma olen vene inimene ja mul on õigus anda oma teadmised, töö ja kõik saavutused ainult kodumaale... Ja kui mitte kaasaegsed, siis võib-olla nende järglased mõistavad, kui suur on minu ustavus kodumaale ja kui rõõmus ma olen, et mitte välismaal, vaid just Venemaal on avastatud uus meetod sidepidamiseks.»

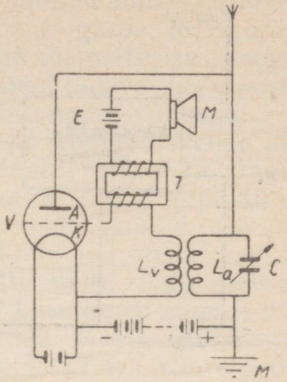
Pärast Nõukogude võimu kehtestamist on raadiotehnika teinud meie maal erakordseid edusamme. Tänapäeval leiavad elektromagnetilised lained kasutamist raadiotelegraafis, raadiotelefonis, televisioonis, raadionavigatsioonis, raadiolokatsioonis jm.

Lihtsaima raadioside võib teostada järgmiselt.

Raadiosaatja peab kiirgama kindla sagedusega elektromagnetilisi laineid. Ta koosneb sumbumatute kõrgsagedusvõnkumiste



Joon. 149.



Joon. 150.

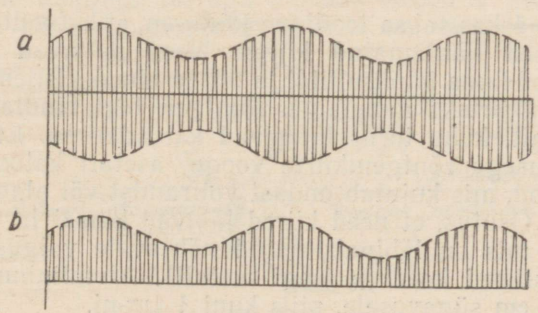
generaatorist G, mis ühendatakse antenniga A_1 ja maandusega (joon. 149, *a*). Võtme K abil võib saata pikemaid ja lühemaid signaale, mis vastavad morsetähestiku punktidele ja kriipsudele.

Saatjast mingil kaugusel asetseb elektromagnetiliste lainete vastuvõtja (joon. 149, *b*). Lained kutsuvad antennis A_2 esile vahelduva emj. ja võnkeringis tekivad elektromagnetilised võnkumised.

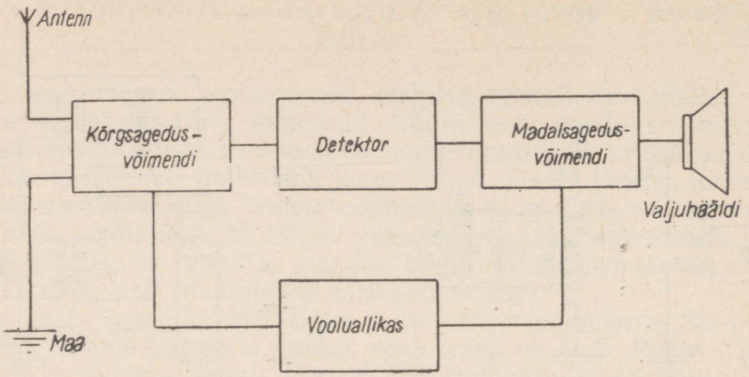
Pöördkondensaatori C abil häälestatakse vastuvõtja resonantsi saatjaga. Vastuvõtja võnkeringis tekkinud võnkumised antakse edasi detektorile D, mis alaldab vahelduvvoolu. Alaldatud vool suunatakse telegraafi elektromagnetisse, mis on varustatud üleskirjutava seadmega või telefoniga T. Telefoniga paralleelselt on ühendatud blokeeriv kondensaator C_1, mis esimese poolperioodi jooksul laadub, kuid teise jooksul tühjeneb läbi telegraafi või telefoni.

Ei telegraaf ega telefon saa osa võtta kõrgsagedusvõnkumistest, sest kirjutusseadme ja membraani inerts on selleks liiga suur.

Heli edasiandmiseks raadio teel on vaja kõrgsagedusvõnkumisi erilisel viisil *moduleerida*, s. o. sujuvalt ja perioodiliselt muuta



Joon. 151.



Joon. 152.

nende amplituudi vastavalt edasiantavale helisagedusele. Seda tehakse mikrofoni ja elektronlambi abil.

Joonisel 150 on selgitatud modulatsiooniprotsessi.

Elektronlambi võre *V* ja katoodi *K* vahele on lülitatud pinget tõstva transformaatori *T* sekundaarmähis, primaarahelas on mikrofon *M* ja patarei *E*. Häälelainete mõjul muutub mikrofoni takistus ja seega ka mikrofoni läbiva voolu tugevus ning voolutugevus primaarmähises. Tulemusena muutub sama sagedusega ka emj. elektronlambi võrega ühendatud transformaatori sekundaarmähises. See kutsub esile kõrgsagedusvõnkumiste amplituudi muutumise lambis vastavalt elektronlambi võrel toimuvatele madalsagedusvõnkumistele, mistõttu antenn kiirgab ruumi moduleeritud elektromagnetilisi laineid (joon. 151, *a*). Vastuvõtjas eraldatakse moduleeritud kõrgsageduslikest võnkumistest moduleerimissagedus ja seda protsessi nimetatakse *detekteerimiseks*. Joonisel 151, *b* on antud detekteeritud helisagedusvõnkumiste graafik. Kaasaegse raadiovastuvõtja üldskeem (blokkskeem) on antud joonisel 152.

§ 96. RÖNTGENIKIIRED JA NENDE KASUTAMINE

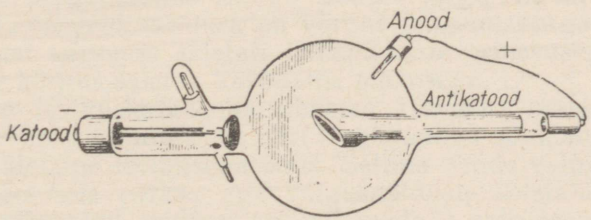
1895. a. märkas saksa teadlane Röntgen, et katoodtorust saavad alguse erilised nähtamatud kiired. Need mõjuvad fotoplaadile, panevad helendama tsinksulfiidi ja teised ained. Hiljem hakati neid kiiri röntgenikiirteks nimetama. Röntgen tegi kindlaks, et kiired lähtuvad sealt, kuhu torus langevad katoodkiired. Et saada suurema võimsusega röntgenikiirte voogu, asetati katoodkiirte teele nn. antikatood, mis kujutab endast volframist või plaatinast plaati (joon. 153). Osutus, et need kiired läbivad klaasi ja veel paljusid teisi aineid, mis on läbipaistmatud nähtavale valgusele (näiteks puit, orgaanilised koed ja isegi metall). Alumiiniumis tungivad nad kuni 10 cm sügavusele, pliis kuni 1 cm-ni.

Röntgenikiirte olulisemad omadused on järgmised: nad on näh-

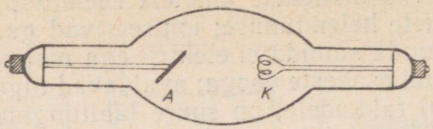
tamatud; avaldavad mõnedele ainetele keemilist toimet; kutsuvad esile paljude ainete helendumise; ioniseerivad gaase; levivad sirgjooneliselt; ei muuda suunda ei elektri- ega magnetväljas, seega ei ole tegemist laetud osakeste vooga; avaldavad tugevat füsioloogilist toimet organismi rakkudele; on suure läbitungimisvõimega.

Röntgenikiiri kasutatakse meditsiinis ja tehnikas. Nende kiirte abil on võimalik läbi valgustada kopsu, südant, selgroogu, magu jt. organeid, et teha kindlaks nende haigestumine; samal meetodil võib kindlaks teha murrete, väänete ja võõrkehade (kuulid, mürsukillud jne.) olemasolu organismis; võib jälgida luu kokkukasvamist pärast selle kipsi panemist. Peale selle võib röntgenikiirtega ravida ka nahahaigusi. Kiired on leidnud kasutamist samuti tehnikas, näiteks pragude, tühikute jt. defektide avastamisel metallivaludes, -sulamites ning tähtsates masinadetailides, suure pöörete arvuga gaasiturbiinide teraslabades, lennukipropellerites (tiivikutes, veovintsides), lõikeinstrumentides; aurukatelde keevisõmbluste kvaliteedi kontrollimisel; muusikariistade valmistamiseks vajaliku puidu kvaliteedi kontrollimisel; konservide kvaliteedi kindlaksmääramisel karpi avamata (riknenud konserv helendub röntgenikiirte mõjul) jm.

Seade röntgenikiirte tekitamiseks koosneb kõrgepingetransformaatorist, kenotronist, mis alaldab kõrgepingelise vahelduvvoolu alalisvooluks, ja röntgenitorust. Käesoleval ajal on kõige levinumaks Coolidge'i toru, s. o. hõõgkatoodiga toru (joon. 154). Coolidge'i toru on ehitatud järgmiselt. Õhutühjas klaasballoonis rõhul 10^{-7} mm Hg asub metallsilindrisse suletud tasapinnaline volframspiraal *K*, mis ongi katoodiks. Spiraali kuumutamiseks on ta ühendatud spetsiaalse transformaatoriga. Anoodiks ja antikatoodiks on volframist või plaatinast plaadike *A*, mis on joodetud tühja vasksilindri aluse külge. Mõnedes spetsiaalsetes torudes valmistatakse antikatood ka hõbedast, molübdeenist, vasest või rauast. Hõõgkatoodiga röntgenitorus toimub samal ajal vahelduvvoolu alaldamine, sest ta töötab üheaegselt ka kenotronina. Arstiteaduses diagnoosimiseks (haiguste avastamiseks) kasutatavad röntgenitorud on arvestatud pingele umbes 60 000 V, tehnikas kasutatavate torude tööpinge on aga piirides 80 000 V kuni 1 250 000 V. Uurimised näitasid, et röntgenikiired on väikese lainepikkusega



Joon. 153.



Joon. 154.

(0,01 kuni 0,000 01 μm) elektromagnetilised lained. Kui katoodkiired, s. o. liikuvad elektronid jõuavad anoodi pinnale, siis nad pidurduvad järsult. Ent iga liikuv elektron on ümbritsetud magnetväljaga nagu voolgi. Elektroni järsul pidurdumisel muutub momentaanselt magnetvälja tugevus. Sel momendil tekib ruumi naaberpunktides elektriväli, mille muutus omakorda põhjustab magnetvälja ilmumise jne.

Nii tekib ja levib lühike elektromagnetiline impulss, mis moodustabki röntgenikiirguse. Peale selle kiirgavad elektromagnetilisi laineid ka antikatoodi pinna aatomid. Niisiis, röntgenikiired ei kujuta endast mitte laetud osakeste voogu, vaid valgusega sarnanevat kiirgust, s. o. väga väikese lainepikkusega (10^{-9}—10^{-6} cm) elektromagnetilisi laineid.

Kontrollküsimusi

1. Mis on elektriline resonants ja milline tähtsus on tal elektromagnetiliste lainete avastamisel?
2. Kuidas saavutatakse kahe võnkeringi resonants?
3. Milles seisab Popovi teene?
4. Kuidas on ehitatud lihtsaim raadiotelegraafi-saatejaam?
5. Kuidas on ehitatud lihtsaim raadiotelefonijaam?
6. Mis on võnkumiste modulatsioon?
7. Kuidas on ehitatud lihtsaim detektorvastuvõtja?
8. Mida nimetatakse võnkumiste detekteerimiseks?
9. Millised on raadiosaatja ja -vastuvõtja põhimõtteskeemid?
10. Mis on röntgenikiired ja kuidas neid saadakse?
11. Millised on röntgenikiirte omadused?
12. Kus kasutatakse röntgenikiiri?

OPTIKA JA AATOMI EHITUS

VIII PEATÜKK

VALGUSE OLEMUS. VALGUSE LEVIMINE. FOTOMEETRIA

§ 97. VALGUSE OLEMUS

Küsimus valguse olemusest on huvitanud teadlasi mitme sajandi jooksul.

1675. a. esitas inglise füüsik Isaac Newton teooria, et valgus koosneb väga väikestest ja kiiresti liikuvatest osakestest — korpuskulitest (ladina keeles tähendab *corpusculum* «väike keha»). Neid paiskavad välja kiirgavad kehad ning silma sattudes kutsuvad seal esile nägemisaistingu. Valguse peegeldumist selgitas see teooria kui korpuskulite tagasipõrkamist peegeldavalt pinnalt, mis toimub samade seaduste alusel nagu elastsete kuulikeste põrkumine jäikadelt pindadelt. Valguse värvust seletati korpuskulite erineva suurusega: suuremad korpuskulid kutsuvat esile punase, väiksemad aga violetse värvi aistingu.

Teooria põhjendas rahuldavalt kõiki tol ajal tuntud valgusnähtusi ja Newtoni autoriteedi tõttu jäi ta pikaks ajaks üldtunnustatud teooriaks.

Peaaegu samaaegselt Newtoni teooriaga esitas hollandi õpetlane Huygens valguse laineteooria (1690), mis oli täiesti vastandlik korpuskulaarteooriale. Huygensi vaateid valguse olemusele jagasid mitmed teadlased, nende hulgas ka M. V. Lomonossov. Selle teooria järgi kujutab valgus endast lainetusprotsessi.

Valguse peegeldumine toimub seaduse järgi, mis on kehtiv lainete puhul: peegeldumisnurk on võrdne langemisnurgaga.

Erinevusi värvuses seletati lainepikkuste erinevusega, samuti nagu tooni kõrgus seletub häälelaine pikkusega.

Valguse levimiskeskkonda nimetas Huygens maailmaeetriks. Valguse levimist kujutati kui eetri mehhaanilist võnkumist analoogiliselt häälelaine levimisega õhus. Selline vaade valguse levimisele ja olemusele põrkas aga valgusnähtuste seletamisel kokku mitmete raskustega, mida ei saanud seletada eetri teooria põhjal.

Astronoom Rømer, jälgides Jupiteri kaaslaste varjutusi, arvu-

tas valguse kiiruse ja sai selle väärtuseks 300 000 $\frac{km}{s}$, mis on peaaegu miljon korda suurem hääle levimiskiirusest õhus. Kui lähtuda mehhanistlikest vaadetest ning kujutada valgust maailmaeetri elastse võnkumisena, siis sellise kiiruse korral peaks eetri elastsus olema mitu korda suurem kui parimatel terasesortidel.

Samal ajal oli teada, et taevakehad liiguvad väga suurte ja konstantsete kiirustega (ilma takistuseta), see aga on võimalik vaid siis, kui oletada, et maailmaeetri tihedus on kaduvväike.

Seda vastuolu maailmaeetri mehhaanilise pildi põhjal lahendada ei suudetud.

1873. a. tegi inglise füüsik Maxwell sammu edasi, tõestades teoreetiliselt, et looduses eksisteerivad elektromagnetilised lained, mis liiguvad vaakuumis kiirusega 300 000 $\frac{km}{s}$. Siit järeldus, et ka valgus kujutab endast elektromagnetilist lainetust. Neid laineid, nagu juba öeldud, sai katse teel saksa füüsik Hertz 1888. a.

Vene teadlase Lebedevi ja teiste hilisemad uurimused näitasid, et kõik elektromagnetiliste lainete omadused on olemas ka valguslainetel. Need avastused viisid valguse elektromagnetilise teooria tekkimisele XIX sajandi lõpul.

Kuid peagi avastati elektronide eraldumine metallist valguse toimel ja õpiti tundma selle nähtuse seaduspärasusi. Nähtust sai seletada vaid siis, kui oletati, et elektromagnetilised lained kiiratakse ruumi üksikute «portsjonite» või kvantide kaupa, neid kvante hakati nimetama footoniteks.

Nõukogude teadlane S. I. Vavilov ehitas 1945. a. riista, mille abil sai valguskvante vahetult jälgida. Sellega oli valguse kvantiseloom lõplikult tõestatud.

Kaasaja füüsika käsitleb valgust kui materiaalset nähtust, millel mõnedes tingimustes ilmnevad elektromagnetiliste lainete, teistes aga kvantomadused. Täielikuma ettekujutuse saamiseks valgusest tuleb valgust vaadelda samaaegselt elektromagnetilise lainetusena kui ka kvantide voona.

§ 98. VALGUSALLIKAD

Kehi, mis ise kiirgavad valgust ümbritsevasse ruumi, nimetatakse *valgusallikateks*.

Valgusallikad jagunevad looduslikeks ja kunstlikeks. Looduslikeks valgusallikateks on Päike, tähed, kiirgavad atmosfäärigaasid (välk, virmalised) ja mõned elusorganismid, nagu näiteks mõned kalaliigid, jaaniussid, mikroobid, mis kutsuvad esile puidu mädanemise jt.

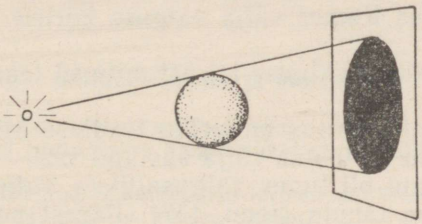
Kunstlikeks valgusallikateks on elektrikaarleek, petrooleumilamp, küünal jt.

Valgusallikas kiirgab teiste energialiikide arvel. Nii näiteks Päikese ja tähtede valgus saadakse aatomituumade lagunemisel vabanenud energiast, elektrilambi hõõgniidi valguskiirgus — elektrivoolu energiast.

Kõikidel juhtudel on valguse kiirgamine seotud kiirgavate kehade energia vähenemisega: niipalju kui kiirgav keha kaotab energiat, samapalju saab valgust neelav keha juurde.

§ 99. VALGUSKIIRED. VALGUSE SIRGJOONELINE LEVIMINE

Valguse levimiseks nimetatakse valguslaine energia edasikandumist. Kui valgustada ruumi läbi väikese ümmarguse ava, siis näeme tolmuses õhus kitsast kiirtekimpu. Vähendades ava mõõtmeid, võime valguskiirte kimbu küll kitsamaks muuta, kuid ainult teatud piirini. Tõmmates sirge, mis näitab kitsa kiirtekimbu asendit, saame valguskiire. Seega on valguskiir geomeetriline mõiste.



Joon. 155.

Geomeetrilisi jooni, mille suund igas ruumipunktis langeb ühte valgusenergia levimissuunaga, nimetatakse valguskiirteks.

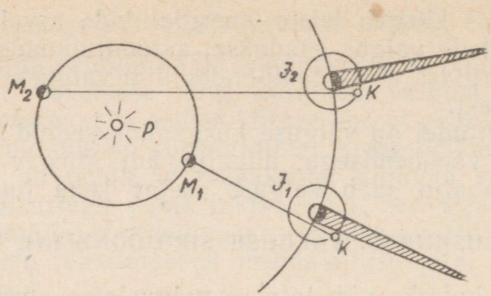
Vaatlused näitavad, et ühtlases läbipaistvas keskkonnas kujutavad valguskiired endast sirgjooni, s. t. *ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt.*

Seda kinnitab varjude tekkimine valguse suhtes läbipaistmatute kehade taha (joon. 155) või valgustatud tolmukübemete jälgimine, millest oli juttu juba eespool.

§ 100. VALGUSE KIIRUS

1675. a. määras taani õpetlane Rømer (1644—1710) valguse kiiruse planeedi Jupiter kaaslaste liikumise vaatluste põhjal (joon. 156).

Jälgides Jupiteri ühe kaaslase varjutusi, määras ta täpselt varjutuse alg- ja lõppmomendid, kui Maa M_1 oli Jupiterile kõige lähemal. Korrates vaatlusi pool aastat hiljem, mil Maa oli asendis M_2, s. o. kõige kaugemal Jupiterist, märkas Rømer, et kaaslase väljumine varju piirkonnast hilines peaaegu 1000 sekundit, võrreldes



Joon. 156.

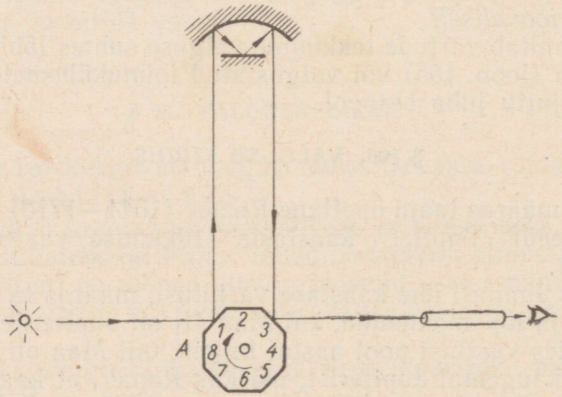
arvutatuga. Rømer põhjendas nähtust sellega, et teisel juhul pidi valgus läbima pikema tee, võrreldes esialgsega. Teepikkuste vahe oli 300 000 000 km. Määrates valguse hilinemise ja selle aja jooksul läbitud tee, arvutas Rømer välja valguse kiiruse ja sai ligikaudu 300 000 km/s.

Järgnevalt mõõtsid valguse kiirust mitmed teadlased ja mitmel viisil.

Üheks täpsemaks osutus ameerika teadlase Michelsoni meetod (1852—1931), mille ta töötas välja aastatel 1926—1929.

Wilsoni mäetipul oli tugev valgusallikas, mille valgus suunati peegli *A* esimesele tahule (joon. 157). Pärast peegeldumist suunati kiired teisele mäetipule. Sealt peegeldusid nad tagasi mitmetahulise peegli kolmandale tahule ja seejärel vaatleja silma. Vahemaa, mille valgus pidi läbima valgusallikast kuni vaatlejani, oli 70,8526 km.

Nüüd tuli määrata tee edasi-tagasi läbimiseks kulunud aeg, mis oli võrdlemisi tõsine probleem. Seda tehti kaheksatahulise peegli abil järgmiselt.



Joon. 157.

Valguskiir oli vaatlejale nähtav seisva peegli korral. Siis pandi peegel pöörlema ja teatud kiirusest alates vaatleja kiirt enam ei näinud. Peegli pöörlemiskiiruse edasisel suurendamisel muutus kiir teatud hetkel jällegi nähtavaks. See oli võimalik ainult juhul, kui valguse ühelt mäelt teisele ja tagasi liikumise aja jooksul pööras peegel end täpselt $^1/_8$ võrra. Peegli pöörlemiskiirus mõõdeti väga täpselt. Näiteks ühel katsel tegi peegel 528,76 pööret sekundis. Ühe pöörde aeg on siis $\frac{1}{528{,}76}$ s., $^1/_8$ pöörde aeg aga 8 korda väiksem, s. o. $\frac{1}{528{,}76 \cdot 8}$ s. Selle aja jooksul asendus üks tahk naabertahuga ja valgus jõudis läbida kaks korda teepikkuse 35,4263 km.

Katse andmeil oli valguse kiirus 299 711 $\frac{km}{s}$. Selle põhjal arvutati ka valguse kiirus vaakuumis ja saadi 299 796 $\frac{km}{s}$. Ümardatult loetakse valguse kiiruseks vaakuumis 300 000 $\frac{km}{s}$.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Kuidas arenesid vaated valguse olemusele?
2. Milliseid kehi nimetatakse valgusallikateks ja millised neist on rohkem levinud?
3. Mis on valguskiired ja kuidas nad levivad ühtlases keskkonnas?
4. Kuidas määras valguse kiiruse Rømer?
5. Kuidas määras valguse kiiruse Michelson?
6. Kui pika aja jooksul jõuab valgus Päikeselt Maale, kui nende vahemaa on 150 000 000 km?

Vastus: 8 min. 20 s.

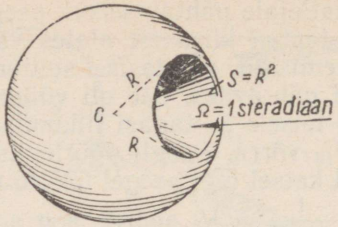
§ 101. VALGUSVOOG. VALGUSTUGEVUS

Valguslained kannavad valgusallikast energiat ümbritsevasse ruumi. Kui mingile pinnale aja t jooksul langeb valgusenergia W, siis selle kiirguse võimsus on $\frac{W}{t}$.

Valgusvooks Φ *nimetatakse suurust, mida mõõdetakse antud pinnale langeva kiirguse võimsusega.*

Enamik valgusallikaid kiirgab valgust kõikides suundades, seepärast on sisse toodud mõiste koguvalgusvoog. *Valgusallika koguvalgusvooks* Φ_0 *nimetatakse suurust, mida mõõdetakse kiirguse võimsusega kõikides suundades.*

Kui valgusallika kiirgus kõikides suundades on ühtlane ja valgusallika mõõtmed, võrreldes kaugusega, kus tema mõju määratakse, on väikesed, siis nimetatakse valgusallikat punktvalgusallikaks. Näiteks tähed on kolossaalsete mõõtmetega, kuid asuvad Maast niivõrd kaugel, et neid võib pidada punktvalgusallikateks.



Joon. 158.

Kasutatavad valgusallikad, näiteks elektrihõõglambid, küünlad jt., ei kiirga valgust kõikides suundades ühtlaselt. Küünlaleek annab suurema valgusvoo horisontaal- kui vertikaalsuunas. Elektrilamp kiirgab sokli suunas vähem valgust kui vastassuunas. Kasutades vastavat armatuuri, võime valgusvoo vajalikule poole suunata ja ta kitsasse koonusesse koondada.

Olgu meil punktvalgusallikas S (joon. 158). Joonestame tema ümber kerapinna raadiusega R. Lõikame kerast mõtteliselt välja sektori (koonuse, mille tipp asetseb kera geomeetrilises keskpunktis), mille alus eraldab kerapinnast pindala S. Ruumi, mida piirab selle koonuse pind, nimetatakse r u u m i n u r g a k s Ω ja selle suurus arvutatakse valemist

$$\Omega = \frac{S}{R^2}.$$

Kui $S = R^2$, siis on ruuminurk võrdne ühega ja teda nimetatakse s t e r a d i a a n i k s (sr). Et kera täispindala on $4\pi R^2$, siis pindala, mis on võrdne R^2-ga, mahub kerapinnale 4π korda. Järelikult on punkti ümbritsev ruuminurk võrdne 4π steradiaaniga.

Et hinnata valgusallika valgusvoogu mingis suunas, kasutatakse valgustugevuse mõistet.

Valgusallika valgustugevuseks (I) nimetatakse suurust, mida mõõdetakse valgusvoo (Φ) ja ruuminurga (Ω) suhtega, kus valgusvoog levib.

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}.$$

Valgustugevuse ühikuks rahvusvahelises ühikute süsteemis (SI) on kandela (cd) (varem nimetati seda rahvusvaheliseks küünlaks). See on valgustugevus, mida teatud tingimustes kiirgab spetsiaalse konstruktsiooniga etalonvalgusallikas.

Kandela etalon valmistati 1948. a. Nõukogude Liidus P. M. Tihhodejevi juhtimisel. See kujutab endast keerulist seadeldist, kus kiirgavaks osaks on $\frac{1}{60\pi}$ cm² sulatatud tooriumoksiidist valmistatud toru sisepinnast. Toru asub kõrgsagedusvoolu abil sulatatud plaa-

tinas. Plaatina tahkumistemperatuuril (2042,6° K) on toru pinna kiirgus antud suunas konstantne. Valemist

$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

saame

$$\Phi = I \cdot \Omega.$$

Kui $I = 1$ cd, $\Omega = 1$ sr, siis $\Phi = 1$ lm. Seega *nimetatakse luumeniks valgusvoogu, mida kiirgab punktvalgusallikas valgustugevusega 1 kandela ruuminurka üks steradiaan.*

Kui punktvalgusallikas kiirgab valgust kõikides suundades ühtlaselt, siis ruuminurk $\Omega = 4\pi$ steradiaani. Tema koguvalgusvoog $\Phi_0 = \Omega \cdot I = 4\pi I$, s. o.

$$\Phi_0 = 4\pi I.$$

Vaatleme näiteid.

1. Määrata punktvalgusallika poolt kiiratav koguvalgusvoog, kui valgusallika valgustugevus on 25 cd.

On antud $I = 25$ cd. Kasutades valemit $\Phi_0 = 4\pi I$, leiame:

$$\Phi_0 = 4 \cdot 3{,}14 \cdot 25 \text{ lm} = 314 \text{ lm}.$$

2. Koguvalgusvoog on 6280 lm. Määrata valgusallika valgustugevus.

On antud $\Phi_0 = 6280$ lm. Valemist $\Phi_0 = 4\pi I$ leiame

$$I = \frac{\Phi_0}{4\pi}.$$

Asendades vastavad väärtused, saame:

$$I = \frac{6280}{4 \cdot 3{,}14} \text{ cd} = 500 \text{ cd}.$$

§ 102. VALGUSTUSTUGEVUS

Kehadele langev valgus valgustab neid. Valgustuse objektiivseks hindamiseks on võetud kasutusele valgustustugevuse mõiste.

Valgustustugevuseks nimetatakse suurust, mida mõõdetakse pinnale langeva valgusvoo ja pindala suhtega.

Kui E on valgustustugevus, Φ — valgusvoog, S — valgustatava pinna pindala, siis

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Kui $S = 1$, siis $E = \Phi$. Siit järeldub, et valgustustugevus on arvuliselt võrdne valgusvooga, mis langeb pinnaühikule.

Kui $\Phi = 1$ lm, $S = 1$ m², siis valgustustugevus on võrdne ühikuga ja seda ühikut nimetatakse luksiks (lx):

$$E = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2} = 1 \text{ lx}.$$

Luksiks nimetatakse valgustustugevust, mis tekib 1 m² pinna ühtlasel valgustamisel valgusvooga 1 lm.

Vaatleme näiteid.

1. Valgusvoog 5 lm langeb joonisele, mille pindala on 500 cm². Määrata joonise valgustustugevus luksides.

On antud $\Phi = 5$ lm, $S = 500 \text{ cm}^2 = 0{,}05 \text{ m}^2$. Valgustustugevuse leiame valemist

$$E = \frac{\Phi}{S} = \frac{5 \text{ lm}}{0{,}05 \text{ m}^2} = 100 \text{ lx}.$$

2. Millisel pindalal võib valgusvoost 40 lm saada valgustustugevuse 50 lx?

On antud $E = 50$ lx, $\Phi = 40$ lm. Valemist $E = \frac{\Phi}{S}$ leiame:

$$S = \frac{\Phi}{E} = \frac{40}{50} \text{ m}^2 = 0{,}8 \text{ m}^2.$$

§ 103. VALGUSTUSTUGEVUSE SEADUSED

Esemete valgustustugevus muutub olenevalt valgusallika valgustugevusest ja allika kaugusest pinnast. Leiame selle sõltuvuse. Oletame, et valgustatavaks pinnaks on kera sisepind, mille raadius on R ning mille keskpunktis asub punktikujuline valgusallikas valgustugevusega I. Siis on valguskiired igas pinna punktis normaalisuunalised.

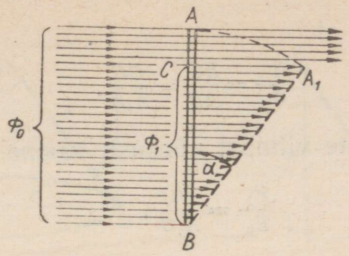
Koguvalgusvoog, mida kõikides suundades kiirgab valgusallikas valgustugevusega I, on $\Phi_0 = 4\pi I$. Kera sisepinna pindala on $S = 4\pi R^2$. Selle valgustustugevus on

$$E = \frac{\Phi_0}{S} = \frac{4\pi I}{4\pi R^2} = \frac{I}{R^2}$$

ehk

$$E = \frac{I}{R^2}.$$

Saadud seos väljendab ühte valgustustugevuse seadust: *punktvalgusallikast väljuvate valguskiirtega risti oleva pinna valgustustugevus on võrdeline selle valgusallika valgustugevusega ja pöördvõrdeline valgustatava pinna kauguse ruuduga valgusallikast.*



Joon. 159.

Toome näite. Millisel kaugusel annab lamp valgustugevusega 40 cd valgustustugevuse 0,1 lx?

On antud $I=40$ cd, $E=0{,}1$ lx.

Valemist $E=\frac{I}{R^2}$ leiame $R^2=\frac{I}{E}$, kust $R=\sqrt{\frac{I}{E}}$.

Asendades arvulised väärtused, saame

$$R=\sqrt{\frac{40\ \text{cd}}{0{,}1\ \text{lx}}}=\sqrt{400\ \text{m}^2}=20\ \text{m}.$$

Vaatlused näitavad, et valgustustugevus muutub kiirte langemisnurga muutumisel (*langemisnurk on nurk langeva kiire suuna ja valgustatava pinna normaali vahel*). Leiame selle sõltuvuse. Langegu valgusvoog Φ_0 risti ristkülikukujulisele pinnale, mille pindala on S ja pikkus AB (joon. 159). Siis pinna valgustustugevus

$$E_0=\frac{\Phi_0}{S}.$$

Kallutame seda pinda mingi nurga α võrra, nii et ta võtab asendi A_1B. Nüüd langeb pinnale väiksem valgusvoog Φ_1, sest osa valguskiiri läheb pinnast mööda.

Sellisel juhul valgustustugevus väheneb (valgustatav pindala jäi samaks) ja on võrdne

$$E_1=\frac{\Phi_1}{S}.$$

Jagades teise võrduse esimesega, saame:

$$E_1 : E_0=\frac{\Phi_1}{S} : \frac{\Phi_0}{S}$$

ehk

$$\frac{E_1}{E_0}=\frac{\Phi_1}{\Phi_0}.$$

Jooniselt on näha, et

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_0}=\frac{BC}{AB}=\frac{BC}{A_1B}.$$

Kõrvutades kahte viimast võrdust, saame

$$\frac{E_1}{E_0}=\frac{BC}{A_1B}.$$

Täisnurksest kolmnurgast CBA_1 võib kirjutada, et

$$\frac{BC}{A_1B}=\cos\alpha.$$

Asendades suhte $\frac{BC}{A_1B}$ valemisse $\frac{E_1}{E_0}=\frac{BC}{A_1B}$, saame $\frac{E_1}{E_0}=\cos\alpha$, kust

$$E_1=E_0\cdot\cos\alpha.$$

Saadud sõltuvus väljendab valgustustugevuse teist seadust: *pinna valgustustugevus kaldu langevate kiirte korral on võrdeline kiirte langemisnurga koosinusega.*

Toome näite. Pinna valgustustugevus on 100 lx ja kiirte langemisnurk 60°. Määrata sama pinna valgustustugevus risti langevate kiirte korral.

On antud $E_1=100$ lx, $\alpha=60°$. Valemist

$$E_1=E_0\cdot\cos\alpha,$$

$$E_0=\frac{E_1}{\cos\alpha}=\frac{100\text{ lx}}{\cos 60°}=\frac{100\text{ lx}}{0{,}5}=200\text{ lx}.$$

Ühendades mõlemad seadused, saame

$$E=\frac{I}{R^2}\cos\alpha.$$

Punktvalgusallika poolt tekitatud valgustustugevus on võrdeline valgusallika valgustugevusega ja kiirte langemisnurga koosinusega ning pöördvõrdeline valgustatava pinna kauguse ruuduga valgusallikast.

Ülesanne 41. Ümmarguse laua keskkohal 15 m kõrgusel ripub lamp valgustugevusega 200 cd. Määrata valgustugevus laua serval, kui laua diameeter on 1 m (joon. 160).

Antud (SI-süsteem)

$h=1{,}5$ m;

$r=0{,}5$ m;

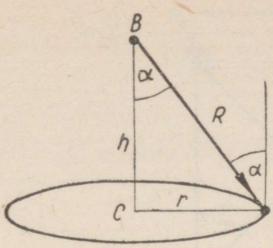
$I=200$ cd.

E — ?

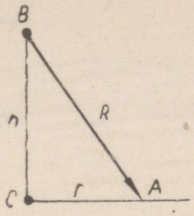
Lahendus

1. Pythagorase teoreemi põhjal:
$R^2=h^2+r^2$; $R=\sqrt{h^2+r^2}$.
2. Kiirte langemisnurga koosinus:
$\cos\alpha=\frac{h}{R}$.
3. Valgustustugevus laua serval:

$$E=\frac{I}{R^2}\cdot\cos\alpha=\frac{I\cdot h}{(h^2+r^2)\cdot\sqrt{h^2+r^2}}.$$



Joon. 160.



Joon. 161.

4. Arvutame:

$$E=\frac{200\ \text{cd}\cdot 1{,}5\ \text{m}}{[(1{,}5\ \text{m})^2+(0{,}5\ \text{m})^2]\sqrt{(1{,}5\ \text{m})^2+(0{,}5\ \text{m})^2}}=\frac{200\ \text{cd}}{2{,}5\ \text{m}^2\cdot 0{,}95}=76\ \text{lx}.$$

Ülesanne 42. Masti otsa, mille kõrgus on 15 m, on riputatud elektrilamp, mis tekitab 8 m kaugusel masti alusest valgustustugevuse 1,63 lx. Määrata lambi valgustugevus (joon. 161).

Antud (SI-süsteem)

$h=15$ m;
$r=8$ m;
$E_A=1{,}63$ lx.

I — ?

Lahendus

1. Pythagorase teoreemi põhjal:
$R^2=h^2+r^2$; $R=\sqrt{h^2+r^2}$.
2. Kiirte langemisnurga koosinus:
$\cos\alpha=\frac{h}{R}$.

3. Valgustustugevuse seadusest

$$E_A=\frac{I\cdot\cos\alpha}{R^2}$$

leiame lambi valgustugevuse

$$I=\frac{R^2\cdot E_A}{\cos\alpha}=\frac{(h^2+r^2)E_A}{h}\cdot\sqrt{h^2+r^2}.$$

4. Arvutame

$$I=\frac{[(15\ \text{m})^2+(8\ \text{m})^2]\cdot 1{,}63\ \text{lx}}{15\ \text{m}}\cdot\sqrt{(15\ \text{m})^2+(8\ \text{m})^2}=\frac{289\cdot 1{,}63\cdot 17}{15}\ \text{cd}\approx 530\ \text{cd}.$$

Ülesanne 43. Õue kohal 4 m kõrgusel ripuvad kaks lampi valgustugevustega 200 cd ja 500 cd. Arvutada pinnavalgustus kummagi lambi all, kui nende omavaheline kaugus on 3 m (joon. 162).

Antud (SI-süsteem)

$h=4$ m;
$l=3$ m;
$I_1=200$ cd;
$I_2=500$ cd.

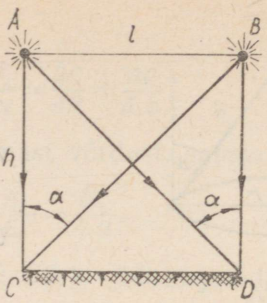
E_C — ?
E_D — ?

Lahendus

1. Pythagorase teoreemi põhjal:
$R^2=h^2+l^2$; $R=\sqrt{h^2+l^2}$,
kus $R=AD=BC$.
2. Kiirte langemisnurga koosinus:
$\cos\alpha=\frac{h}{R}$.

3. Valgustustugevus, mille tekitab punktis C esimene lamp:

$$E_{1C}=\frac{I_1}{h^2},$$



Joon. 162.

ja valgustustugevus, mille tekitab punktis C teine lamp:

$$E_{2C} = \frac{I_2}{R^2} \cdot \cos\alpha = \frac{I_2 \cdot h}{h^2+l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2+l^2}}.$$

4. Valgustustugevus, mille tekitavad punktis C mõlemad lambid, on

$$E_C = E_{1C} + E_{2C} = \frac{I_1}{h^2} + \frac{I_2 \cdot h}{h^2+l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2+l^2}}.$$

5. Valgustustugevus, mille tekitab punktis D teine lamp:

$$E_{2D} = \frac{I_2}{h^2},$$

ja valgustustugevus, mille tekitab punktis D esimene lamp:

$$E_{1D} = \frac{I_1}{R^2} \cos\alpha = \frac{I_1 \cdot h}{h^2+l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2+l^2}}.$$

6. Valgustustugevus, mille tekitavad punktis D mõlemad lambid, on

$$E_D = E_{2D} + E_{1D} = \frac{I_2}{h^2} + \frac{I_1 \cdot h}{h^2+l^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{h^2+l^2}}.$$

7. Arvutame:

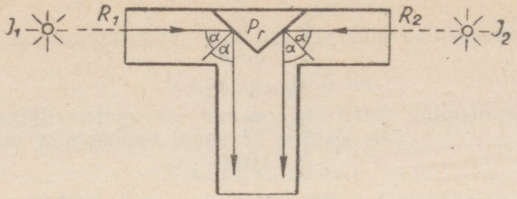
$$E_C = \frac{200\ \text{cd}}{16\ \text{m}^2} + \frac{500\ \text{cd} \cdot 4\ \text{m}}{(4\ \text{m})^2+(3\ \text{m})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(4\ \text{m})^2+(3\ \text{m})^2}} = 12{,}5\ \text{lx} + 16\ \text{lx} = 28{,}5\ \text{lx};$$

$$E_D = \frac{500\ \text{cd}}{16\ \text{m}^2} + \frac{200\ \text{cd} \cdot 4\ \text{m}}{(4\ \text{m})^2+(3\ \text{m})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{(4\ \text{m})^2+(3\ \text{m})^2}} = 31{,}25\ \text{lx} + 6{,}4\ \text{lx} = 37{,}65\ \text{lx}.$$

§ 104. FOTOMEETER. VALGUSTUGEVUSE MÕÕTMINE

Riista, mille abil on võimalik võrrelda valgusallikate valgustugevusi, nimetatakse fotomeetriks. Üks lihtsamaid fotomeetreid (joon. 163) koosneb kolmetahulisest prismast P, mille tahud on kaetud valge värviga. Et vaatlust ei segaks kõrvaline valgus, on prisma paigutatud kolme avaga karpi.

Fotomeeter paigutatakse jaotustega joonlauale ja kummalegi



Joon. 163.

poole fotomeetrit asetatakse valgusallikad, mille valgustugevust on vaja võrrelda. Sel juhul valgustab kumbagi prisma tahku ainult üks valgusallikas. Fotomeetrit nihutades leitakse selline olukord, kus mõlemad prisma tahud on ühetugevuselt valgustatud. Seejärel arutleme järgmiselt. Valgusallikas valgustugevusega I_1 tekitab kauguselt R_1 valgustustugevuse

$$E_1 = \frac{I_1}{R_1^2} \cos \alpha,$$

aga valgusallikas tugevusega I_2 tekitab kauguselt R_2 valgustustugevuse

$$E_2 = \frac{I_2}{R_2^2} \cos \alpha.$$

Asetades fotomeetri nii, et $E_1 = E_2$, saame

$$\frac{I_1}{R_1^2} \cos \alpha = \frac{I_2}{R_2^2} \cos \alpha$$

ehk

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_1^2}{R_2^2}.$$

Kahe valgusallika valgustugevused suhtuvad nii nagu nende kauguste ruudud ühetugevuselt valgustatud pinnast (valgustugevuse seadus).

Ülesanne 44. Kaks elektrilampi valgustugevustega 100 cd ja 400 cd asuvad 3 m kaugusel teineteisest. Kuhu tuleks paigutada nende vahele läbipaistmatu ekraan, et see oleks mõlemalt poolt ühetugevuselt valgustatud?

Antud (SI-süsteem)

$I_1 = 100$ cd;

$I_2 = 400$ cd;

$l = 3$ m.

R — ?

Lahendus

1. Valgustugevuse seadusest

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R^2}{(l-R)^2}$$

ehk

$$\frac{100}{400} = \frac{R^2}{(3-R)^2};$$

$$\frac{1}{2}=\frac{R}{3-R};$$

$$2R=3-R;$$

$$3R=3;$$

$$R=1\,(\text{m}).$$

Vastus: Ekraan peab asuma 1 m kaugusel lambist valgustugevusega 100 cd.

§ 105. LUKSMEETER

Vabrikute, tehaste, haiglate, koolimajade, teatrite jt. ruumide projekteerimisel on vaja arvestada pinnavalgustuse nõudeid. Normaalse nägemisvõime säilitamiseks ja tööviljakuse tõstmiseks on tarvilik, et töökoht oleks normaalselt valgustatud. Nii näiteks peaks pinnavalgustus joonestustöödeks olema 75 lx kuni 100 lx, lugemisel aga 50 lx kuni 60 lx.

Valgustustugevuse mõõtmiseks kasutatakse kaasaskantavat valgustustugevuse mõõtjat — luksmeetrit. Luksmeetri abil võime määrata valgustustugevuse hoone igas punktis, seepärast on ta leidnud laialdast kasutamist inseneride, arhitektide, arstide, õpetajate jt. praktikas. Luksmeeter koosneb pikast kitsast kastist, mille ühes otsas põleb kindla pinge juures (püsiva heledusega kiirguse saamiseks) elektrilamp. Pealt on kast suletud kartongiga, milles on rida üksteisest võrdsel kaugusel olevaid avasid. Avad on suletud läbipaistva paberiga. Kui luksmeetri pinnale langeb valgus, siis valgusallikale lähedasemad avad tunduvad heledamatena, võrreldes väljastpoolt valgustatud kartongi pinnaga, ja kaugemal asetsevad tumedamatena, võrreldes uuritava valgusega valgustatud kartongi pinnaga. Kuskil vahepeal leidub kahtlemata selline ava, mis sulab ühte kartongfooniga, s. t. valgustustugevus antud ruumiosas on võrdne valgustustugevusega, mille tekitab fotomeetri sees olev lamp. Iga ava on varustatud vastava valgustustugevuse väärtusega luksides.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse valgusvooks?
2. Mida nimetatakse koguvalgusvooks?
3. Mis on luumen?
4. Mida nimetatakse valgusallika valgustugevuseks?
5. Mida nimetatakse kandelaks?
6. Mida nimetatakse valgustustugevuseks ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
7. Sõnastage ja tõestage valgustustugevuse esimene seadus.
8. Tuletada ja sõnastada valgustustugevuse teine seadus.
9. Mis on fotomeeter?
10. Milles seisab valgustugevuse seadus ja kuidas seda tuletada?

11. Määrata koguvalgusvoog, mida kiirgab valgusallikas valgustugevusega 100 cd.

Vastus: 1256 lm.

12. Millise valgustustugevuse annab elektrilamp valgustugevusega 200 cd 2 m kauguselt, kui valguskiired langevad pinnale risti?

Vastus: 50 lx.

13. Maapinnale risti langev päikesekiir tekitab valgustustugevuse 100 000 lx. Millisel kaugusel lambist valgustugevusega 1000 cd võib saavutada sama valgustustugevuse?

Vastus: 0,1 m.

14. Kaks lampi valgustugevustega 25 cd ja 100 cd asuvad teineteisest 1 m kaugusel. Kuhu nende vahele tuleks paigutada fotomeeter, et ta oleks mõlemalt poolt ühtlaselt valgustatud?

Vastus: $\frac{1}{8}$ m kaugusele väiksemast lambist.

IX PEATÜKK

VALGUSE PEEGELDUMINE

§ 106. VALGUSE PEEGELDUMINE. VALGUSE PEEGELDUMISSEADUSED

Meil on teada, et ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt. Kui aga valgus satub kahe keskkonna lahutuspinnale, siis osa valguskiiri suundub tagasi samasse keskkonda, teine osa liigub teise keskkonda, muutes seejuures levimissuunda.

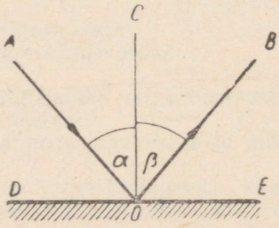
Valguskiire suuna muutumist kahe keskkonna piiril, mille tulemusena kiir suundub tagasi samasse keskkonda, nimetatakse peegeldumiseks.

Langeva kiire *AO* ja kiire langemispunktist tõmmatud pinnanormaali *OC* vahelist nurka nimetatakse langemisnurgaks α. Peegeldunud kiire *OB* ja kiire langemispunktist tõmmatud pinnanormaali *OC* vahelist nurka nimetatakse peegeldumisnurgaks β (joon. 164).

Peegeldunud valguse hulk oleneb nurgast, mille all valgus langeb keskkondade lahutuspinnale.

Langemisnurga suurenemisega peegeldunud valguse hulk suureneb, langemisnurga vähenedes aga väheneb.

Seda nähtust võib jälgida looduses enne päikese loojumist, kui kiired langevad vaikse mere pinnale. Peegeldunud valgus muutub väga heledaks, ehkki päike ise ei ole sel ajal enam nii hele kui tavaliselt, sest kiired neelduvad suurelt osalt atmosfääris. Peegeldumisseadused olid tuntud juba väga ammu (neid tundis juba Eukleides 305. a e. m. a.) ning tõestatud ka katseliselt.



Joon. 164.

Esimene seadus: *peegeldunud kiir asub samas tasapinnas langeva kiirega ja kiire langemispunkti läbiva pinnanormaaliga.*

Teine seadus: *peegeldumisnurk on võrdne langemisnurgaga.* Valguse peegeldumisseadustest järeldub valguskiire pööratavus: kui langev kiir lasta piirpinnale peegeldunud kiire suunas, siis pärast peegeldumist liiguks ta endise langeva kiire teed mööda.

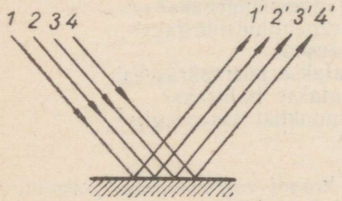
§ 107. TASAPEEGEL. PEEGELDUMINE PEEGELPINNALT JA HAJUSPEEGELDUMINE. PUNKTI JA ESEME KUJUTISTE KONSTRUEERIMINE TASAPEEGLIS

Tasapeegel kujutab endast siledat tasast pinda, milleks võib olla näiteks veepind tuulevaikse ilmaga, aknaklaas, metalli pind jms.

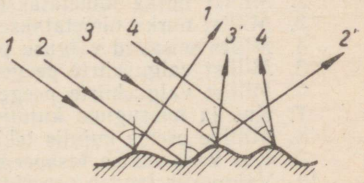
Kimp paralleelseid kiiri osutub pärast tasapeeglilt peegeldumist jälle paralleelseks kiirtekimbuks (joon. 165). Sellist peegeldumist nimetatakse korrapäraseks ehk peegeldumiseks peegelpinnalt.

Paralleelne kiirtekimp, mis langeb krobelisele pinnale, ei koosne pärast peegeldumist enam paralleelsetest kiirtest. Sellist peegeldumist nimetatakse hajus- ehk difuusseks peegeldumiseks (joon. 166).

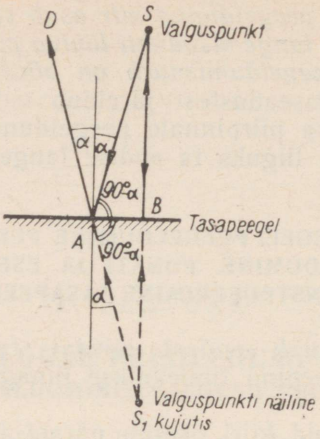
Langegu punktikujulisest valgusallikast S tasapeeglile ainult kaks valguskiirt: kiir SB, mis langeb risti peegli pinnaga, ja kiir SA, mis langeb mingi nurga all peegliga (joon. 167). Esimene kiir peegeldub tagasi sama sirget SB mööda, teine kiir aga mööda sirget AD. Vaatlejale näib, nagu väljuksid mõlemad kiired punktist S_1, mis asub kiirte pikenduste lõikepunktis. Punkti S_1 nimetatakse sel juhul punktvalgusallika S ebakujutiseks, sest punktis S_1 tegelikult valguskiired ei lõiku. Punkti, milles lõikuvad peegeldunud kiired, nimetatakse valguspunkti tõeliseks kujutiseks. Punkti, milles lõikuvad peegeldunud kiirte pikendused, nimetatakse valguspunkti ebakujutiseks. Jooniselt on näha, et $\triangle SBA = \triangle S_1BA$ (mõlemad on täisnurksed ühise kaatetiga AB ja neil on võrdsed teravnurgad). Kolmnurkade võrdsusest järgneb, et



Joon. 165.



Joon. 166.



Joon. 167.

$SB = BS_1$. Seega on valguspunkt S ja tema ebakujutis S_1 sümmeetrilised tasapeegli suhtes.

Kasutades seda omadust, võime ehitada eseme kujutise tasapeeglis. Selleks on vaja leida eseme igale punktile peegli suhtes sümmeetriline punkt. Niisiis, *ese ja tema ebakujutis on peegli suhtes sümmeetrilised.*

Tasapeegleid kasutatakse trammides, trollibussides, autobussides ja teistes transpordivahendites, sest nad võimaldavad juhil jälgida reisijate sisenemist ja väljumist ning taga liikuvaid sõidukeid.

Tasapeeglit kasutatakse veel projektsiooniaparaatides, näiteks epidiaskoobis, mille abil võime saada jooniste, skeemide ja maalide suurendatud kujutisi ekraanil.

Tasapeegel leiab peegelskaaladena kasutamist ka periskoopides ja galvanomeetrites, baromeetrites ning teistes mõõteriistades.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse valguse peegeldumiseks?
2. Millist nurka nimetatakse valguskiire langemisnurgaks?
3. Millist nurka nimetatakse valguskiire peegeldumisnurgaks?
4. Milles seisavad valguse peegeldumisseadused?
5. Millist valguskiirte peegeldumist nimetatakse korrapäraseks?
6. Millist valguskiirte peegeldumist nimetatakse hajusaks?
7. Kus ja missugune kujutis tekib valguspunktist tasapeeglis?
8. Milline eseme kujutis tekib tasapeeglis?
9. Kus kasutatakse tasapeegleid?
10. Valguskiir langeb peegliga risti. Mitme kraadi võrra kalduks peegelduv kiir kõrvale langeva kiire suunast, kui peegel pööratuks 20°?

Vastus: 40°.

11. Kuidas tuleks asetada peegel, et vertikaalne valguskiir oleks pärast peegeldumist horisontaalne?

Vastus: Kiirte suhtes 45° nurga all.

12. Päikesekiired langevad maapinnale 40° nurga all. Kuidas tuleks asetada peegel, et peegeldunud kiired osutuksid vertikaalseks?

Vastus: Horisondi suhtes 20° nurga all.

X PEATÜKK

VALGUSE MURDUMINE

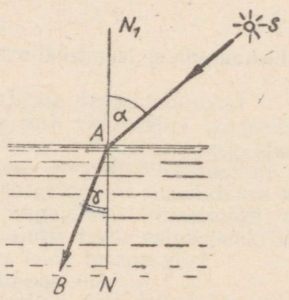
§ 108. VALGUSE MURDUMINE

Kui valgus langeb läbipaistvale kehale, siis üks osa temast peegeldub, teine osa liigub aga kehas edasi. Kui valguskiired ei lange pinnaga risti, siis nende levimissuund kehasse sisenemisel muutub.

Seda nähtust nimetatakse valguse murdumiseks.

Nähtust, kus valguskiir üleminekul ühest keskkonnast teise muudab keskkondade lahutuspinnal suunda, nimetatakse valguse murdumiseks.

Nurka langeva kiire ja langemispunktist keskkondade lahutuspinnale tõmmatud normaali vahel nimetatakse langemisnurgaks; nurka murdunud kiire ja langemispunktist keskkondade lahutuspinnale tõmmatud normaali vahel nimetatakse murdumisnurgaks. Üleminekul optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse murdub valguskiir nii, et murdumisnurk on väiksem langemisnurgast, ja vastupidi: üleminekul optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse murdub kiir selliselt, et murdumisnurk on suurem langemisnurgast (joon. 168). Optiliselt tihedam on see keskkond, milles valguse kiirus on väiksem. Kesk-



Joon. 168.

konna optiline tihedus ei ole samaväärne aine tihedusega. Näiteks kvartsil ja kivisoolal on ühesugune optiline tihedus, aga nende ainete tihedused on erinevad.

Valguse murdumisel kehtib kiire pööratavuse printsiip: kui langev kiir kulgeb murdunud kiire sihis, siis ta murdub nii, et levib pärast murdumist esialgse langenud kiire sihis. Tuleb arvestada, et valguslaine üleminekul ühest keskkonnast teise muutub valguslaine frondi liikumissuund.

§ 109. VALGUSE MURDUMISSEADUSED. MURDUMISNÄITAJA

Valguse murdumisseadused avastas Snellius (1620) ja formuleeris lõplikult Descartes (1637). Esimene seadus: *langev ja murdunud kiir ning langemispunktist keskkondade lahutuspinnale tõmmatud normaal asetsevad ühes tasapinnas* (joon. 168).

Teine seadus: *langemisnurga siinuse suhe murdumisnurga siinusesse on kahe keskkonna puhul jääv suurus; suhet nimetatakse teise keskkonna suhteliseks murdumisnäitajaks esimese suhtes (n):*

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$

Kui mõõta valguse kiirus esimeses keskkonnas ja saadud tulemus jagada valguse kiirusega teises keskkonnas, siis saame teise keskkonna murdumisnäitaja esimese suhtes. Järelikult näitab suhteline murdumisnäitaja füüsikaliselt valguse kiiruste suhet antud keskkondades, s. o.

$$\frac{v_1}{v_2} = n.$$

See järeldus tuleneb valguse laineteooriast.

Niisiis, *suhteline murdumisnäitaja on suurus, mida mõõdetakse valguse kiiruste suhtega vastavates keskkondades.* Me teame, et kahest keskkonnast on suurema optilise tihedusega see, milles valguse kiirus on väiksem ja murdumisnäitaja seega suurem. Erinevatel keskkondadel on erinev murdumisnäitaja. Ka sama keskkonna murdumisnäitaja on eri värvusega kiirte jaoks mõnevõrra erinev: väiksema lainepikkusega valguskiirte murdumisnäitaja on suurem, suurema lainepikkusega valguskiirte murdumisnäitaja — väiksem.

Kui valgus levib vaakuumist mingisse keskkonda, nagu näiteks päikesekiired Maa atmosfääri või raadiolambi hõõgniidist lähtuv kiirgus lambi klaaskesta, siis nimetatakse murdumisnäitajat absoluutseks (n_0).

Tähistades valguse kiiruse vaakuumis c-ga ja antud keskkonnas v-ga, saame

$$n_0 = \frac{c}{v}.$$

Niisiis, *absoluutne murdumisnäitaja on suurus, mida mõõdetakse valguse kiiruste suhtega vaakuumis ja antud keskkonnas.*

Ümbritsev õhk koosneb mitmesuguse tihedusega kihtidest, mistõttu päikesekiired või mõnelt teiselt taevakehalt tulevad kiired ei jõua maapinnale mitte sirgjoont, vaid murdjoont mööda. Kiirte üleminekul ühest atmosfäärikihist teise toimubki murdumine.

Et õhu tihedus pidevalt muutub, siis muutub pidevalt ka murdjoon, mida mööda valguskiired liiguvad. Sellist nähtust nimetatakse refraktsiooniks.

Valguse refraktsiooni tulemusena näeme taevakehi mõnevõrra horisondi kohale tõstetult. Nii näiteks on Päike ja Kuu nähtavad veel siis, kui nad tegelikult juba horisondi alla on vajunud. Tänu sellele nähtusele pikeneb päev keskmistel laiustel 10—15 minuti võrra.

Valguse refraktsiooniga seletub ka taevatähtede vilkumine. Heledad tähed nagu süttivad ja kustuvad vahetpidamata, sest õhuvoolud ja -keerised segavad erineva tihedusega õhukihte, mis kutsub esile taevakehadelt tuleva valguse mitmekordse murdumise. Tulemusena satub vaatleja silma kord rohkem, kord vähem valgust.

Vaadeldes kuumadel suvepäevadel kaugeid esemeid, võime näha, kuidas nende kontuurid lainetavad. Siin avaldab samuti mõju valguse refraktsioon, mis tekib erineval määral soojenenud õhukihtide ümberpaiknemise tulemusena.

Ülesanne 45. Õhust langeb klaasplaadile valguskiir. Klaasplaadi murdumisnäitaja on 1,6. Määrata kiire langemisnurk, teades, et peegeldunud ja murdunud kiire vaheline nurk on 90° (joon. 169).

Antud

$n=1{,}6$;

$\angle AOB=90°$.

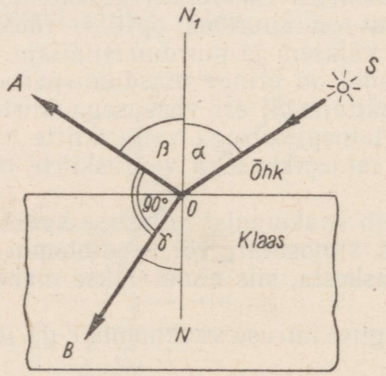
α — ?

Lahendus

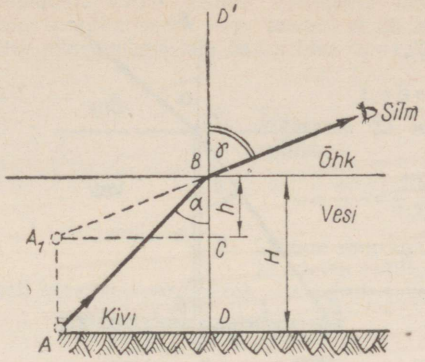
1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Geomeetrilisest konstruktsioonist järeldub, et

$\alpha+\gamma=90°$, millest $\gamma=90°-\alpha$.



Joon. 169.



Joon. 170.

b) Et valguskiir levib optiliselt hõredamast keskkonnast tihedamasse, siis teine murdumisseadus omandab kuju:

$$n=\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} \text{ ehk } n=\frac{\sin\alpha}{\sin(90°-\alpha)}, \text{ kuid } \sin(90°-\alpha)=\cos\alpha, \text{ järelikult}$$

$$n=\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}=\tan\alpha.$$

2. Arvutame:

$$1{,}6=\tan\alpha.$$

Nurga väärtuse leiame trigonomeetriliste funktsioonide tabelist:

$$\alpha=58°.$$

Ülesanne 46. Kui palju näib järve sügavus vähenevat, kui põhjas lebavat kivi vaadates jääb langeva kiire ning pinnanormaali vahele nurk 70°? Vee murdumisnäitaja $n=1{,}33$ (joon. 170).

Antud

$\gamma=70°$;
$n=1{,}33$;
$BD=H$;
$BC=h$;
$AD=A_1C=1$.

$\frac{H}{h}$ — ?

Lahendus

1. Määrame valguskiire langemisnurga. Et kiir liigub optiliselt tihedamast keskkonnast hõredamasse, siis saame teise murdumisseaduse kujul:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}=\frac{1}{n},$$

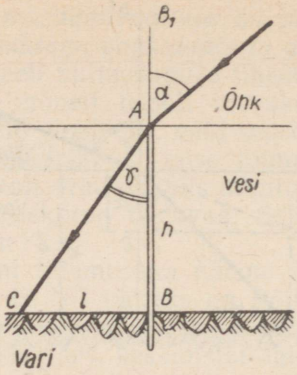
millest

$$\sin\alpha=\frac{\sin\gamma}{n}=\frac{\sin 70°}{1{,}33}=\frac{0{,}9397}{1{,}33}\approx 0{,}707.$$

Trigonomeetriliste funktsioonide tabelist leiame nurga väärtuse:

$$\alpha=45°.$$

2. Arvutame, mitu korda on järve tegelik sügavus suurem näilisest. Täisnurksest kolmnurgast ABD saame:



Joon. 171.

$$\frac{BD}{AD} = \cot\alpha \quad \text{ehk} \quad \frac{H}{l} = \cot\alpha, \quad \text{millest}$$

$$H = l\cot\alpha.$$

Täisnurksest kolmnurgast A_1CB saame

$$\frac{BC}{A_1C} = \cot\gamma \quad \text{ehk} \quad \frac{h}{l} = \cot\gamma, \quad \text{millest}$$

$$h = l\cot\gamma.$$

Koostame suhte ja arvutame:

$$\frac{H}{h} = \frac{l\cdot\cot\alpha}{l\cdot\cot\gamma} = \frac{\cot 45°}{\cot 70°} \approx 2{,}75.$$

Ülesanne 47. Tiigi põhja on löödud vertikaalne vai, nii et ta asetseb tervenisti vees (joon. 171). Määrata vaia varju pikkus tiigi põhjas, kui tiigi sügavus on 2 m ja kiirte langemisnurk 45°.

Antud

$n = 1{,}33$;
$\alpha = 45°$;
$h = 2$ m.

l — ?

Lahendus

1. Määrame murdumisnurga. Et valgus läheb õhust vette, siis

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n, \quad \text{millest}$$

$$\sin\gamma = \frac{\sin\alpha}{n} = \frac{\sin 45°}{1{,}33} = \frac{0{,}707}{1{,}33} \approx 0{,}531; \quad \gamma = 32°.$$

2. Arvutame varju pikkuse. Täisnurksest kolmnurgast ABC saame

$$\frac{CB}{AB} = \tan\gamma \quad \text{ehk} \quad \frac{l}{h} = \tan\gamma, \quad \text{millest}$$

$$l = h\tan\gamma = 2\text{ m}\cdot\tan 32° = 2\text{ m}\cdot 0{,}625 = 1{,}25\text{ m}.$$

Ülesanne 48. Veepinnale valati õlikiht. Valguskiir langeb õlist vette 40° nurga all. Määrata kiire murdumisnurk vees, teades, et õli murdumisnäitaja õhu suhtes on $n_1 = 1{,}6$ ja vee murdumisnäitaja õhu suhtes $n_2 = 1{,}33$.

Antud

$n_1 = 1{,}6$;
$n_2 = 1{,}33$;
$\alpha = 40°$.

Leida γ.

Lahendus

1. Määrame õli murdumisnäitaja vee suhtes

$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1{,}6}{1{,}33} \approx 1{,}2.$$

2. Leiame murdumisnurga. Et valguskiir levib optiliselt tihedamast keskkonnast (õlist) optiliselt hõredamasse (vette), siis kehtib suhe

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n},$$

millest

$$\sin \gamma = 1{,}2 \cdot \sin 40° = 1{,}2 \cdot 0{,}6428 = 0{,}77136;$$

$$\gamma = 50°30'.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse valguse murdumiseks?
2. Nimetada valguse murdumisseadused.
3. Mida näitab suhteline murdumisnäitaja?
4. Milline on absoluutse murdumisnäitaja füüsikaline sisu?
5. Selgitada, miks vees olev kepp näib murtuna. Millises suunas esineb murdumine?
6. Kas valguskiir murdub, kui ta langeb risti kahe keskkonna lahutuspinnale?
7. Kus on valguse kiirus suurem, kas vees või õhus?
8. Kas on võimalik kokku liimida kahte plaati nii, et liimimiskoht ei oleks nähtav? Milline peab olema liimi murdumisnäitaja?
9. Määrata valguse kiirus teemandis, teades, et teemandi absoluutne murdumisnäitaja on 2,4.

Vastus: 125 000 $\frac{\text{km}}{\text{s}}$.

10. Klaasplaadile langeb valguskiir 58° nurga all. Määrata klaasi murdumisnäitaja, kui peegeldunud ja murdunud kiire vaheline nurk on 90°.

Vastus: 1,6.

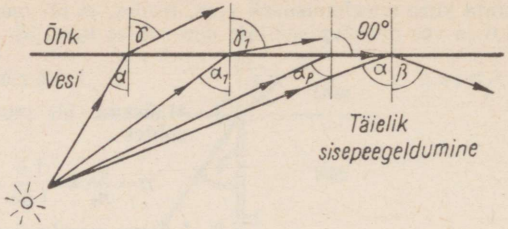
11. Kui palju näib vähenevat tiigi sügavus, kui langeva kiire ja piirpinna normaali vaheline nurk on 45°?

Vastus: Tiigi sügavus näib vähenevat 1,6 korda.

§ 110. TÄIELIK SISEPEEGELDUMINE

Suuname kitsa kiirtekimbu veest õhku. Sel juhul on valguskiirte murdumisnurk suurem langemisnurgast (joon. 172).

Kui suurendada langemisnurka, suureneb ka murdumisnurk ja mingi langemisnurga α_0 puhul (piirjuhus) omandab murdumis-



Joon. 172.

nurk väärtuse 90°. Sel juhul liigub murdunud kiir mööda kahe keskkonna lahutuspinda (mööda veepinda).

Sellist langemisnurka, mille puhul murdunud kiir liigub mööda keskkondade lahutuspinda, nimetatakse piirnurgaks (α_p).

Valguskiired, mis langevad veepinnale piirnurgast suurema nurga all, ei saa veest väljuda ja peegelduvad tagasi samasse keskkonda. Sellist nähtust nimetatakse täielikuks sisepeegeldumiseks.

Niisiis, *valguse täielik sisepeegeldumine toimub sel juhul, kui kiired langevad optiliselt hõredama keskkonna pinnale suurema nurga all, kui on piirnurk.* Arvutame piirnurga väärtuse. Valguskiire levimisel optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse kehtib seos:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = n,$$

kus n on teise keskkonna murdumisnäitaja esimese suhtes; α — langemisnurk ja γ — murdumisnurk.

Valguskiir levimisel optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse murdub, nii et

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{1}{n},$$

kus α — langemisnurk ja γ — murdumisnurk.

Kui langemisnurk α on võrdne piirnurgaga α_p, siis libiseb murdunud kiir mööda kahe keskkonna piirpinda ja murdumisnurk on 90°, järelikult

$$\frac{\sin\alpha_p}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n},$$

millest

$$\sin\alpha_p = \frac{1}{n}.$$

Sellest seosest leiame piirnurga väärtuse. Näiteks teemandi $n = 2{,}42$, siis

$$\sin\alpha_p = \frac{1}{2{,}42} = 0{,}413.$$

Trigonomeetriliste funktsioonide tabelist leiame, et $\alpha_p = 24°$.

Täielik sisepeegeldumine esineb ka looduses. Õhumullikesed vees või klaasis, teemant, kastepiisad, briljandid näivad läikivat. Kui vaadata veepinda klaasi põhja poolt, siis näib see hõbedasena. Kõik niisugused nähtused on tingitud täielikust sisepeegeldumisest.

Miraažide tekkimine on samuti seotud täieliku sisepeegeldumisega. Nähtust võib seletada järgmiselt. Päeval soojenevad atmosfääri alumised kihid tugevasti (näiteks kõrbes) ja seepärast on nad hõredamad ülemistest kihtidest. Mingilt esemelt lähtuvad kiired lähevad üle alumistesse, nõrgalt valgust murdvatesse kihtidesse, ja kalduvad seetõttu üha enam kõrvale lahutuspinna normaalist, kuni lõpuks tekib täielik sisepeegeldumine ning kiired suunduvad ülespoole.

Vaatleja silma sattudes annavad nad seal kujutise samamoodi, nagu saime varem veepinnalt. Antud juhul kõverduvad kiired selliselt, et maapinnal saame esemest päripidise kujutise.

Niisuguseid miraaže võib kuumadel suvepäevadel näha niihästi kõrbetes kui ka päikesekiirte mõjul tublisti kuumenenud asfaltteedel.

Tasane matt teepind näib kauguses nagu veega üle valatud olevat ja peegeldab kaugeid esemeid.

Sellised miraažid paistavad siis, kui vaatleja asub vaadeldavast esemest küllalt kaugel ja mitte eriti kõrgel maapinnast (näiteks auto kabiinis).

Esineb ka kõrgmiraaže. Need tekivad siis, kui alumised õhukihid on külmemad ja seega ka tihedamad ülemistest, näiteks hommikul, mil alumised õhukihid on kokkupuutest maapinnaga tublisti jahenenud.

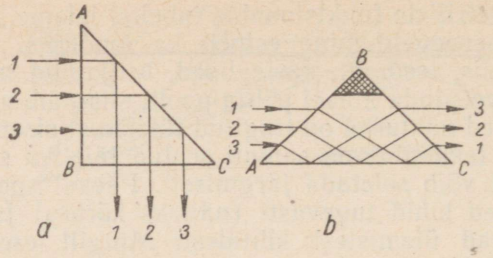
Kõrgmiraažid esinevad sageli polaaraladel, kui lõunatuuled toovad endaga kaasa sooja õhku atmosfääri ülemistesse kihtidesse, ja samuti mere kohal, kus alumised õhukihid on peaaegu alati külmemad ülemistest, ning kallas, lumised mäed jne. paistavad siis väga kõrgel asuvat.

Neil juhtudel kalduvad tihedamatest õhukihtidest väljuvad kiired samuti tublisti kaugemale piirpinna normaalist ja suures kõrguses, soojemates õhukihtides, tekib täielik sisepeegeldumine.

Seejärel suunduvad valguskiired alla vaatlejani, olles vahepeal murdunud, nii et maapinnal saame esemeist ümberpööratud kujutise.

Täieliku sisepeegeldumisega seletub ka nende kehade halb läbipaistvus, mis on kas teralise ehitusega või koosnevad läbipaistvatest ainekihtidest. Lumi näib valge ja mitteläbipaistev, vaatamata sellele, et ta koosneb hulgast jääkristallidest.

Mida väiksemad on läbipaistva aine terakesed ja mida suuremad on nende murdumisnäitajad ümbritseva keskkonna suhtes, seda väiksemale sügavusele tungib nendesse valgus ja seda rohkem tekib murdumisi ning täielikke sisepeegedumisi. Tulemusena



Joon. 173.

leiab aset hajuspeegeldumine. Samal põhjusel väheneb õhu läbipaistvus ka uduse ja vihmase ilma korral.

Tehnikas rakendatakse täielikku sisepeegeldumist näiteks keldriruumide valgustamiseks päevavalgusega, seejuures kasutatakse valguskiire suuna muutmiseks prismat; horisontaalkujutise projekteerimiseks vertikaalekraanile; samuti reas optilistes riistades, näiteks allveelaeva periskoobis jm. Siin sobib igal pool täisnurkne võrdhaarne kolmnurkne prisma. Et klaasi jaoks on piirnurk 42°, siis kiired, jõudes prismani AC piirnurgast suurema nurga all (45°: joon. 173, *a*), alluvad täielikule sisepeegeldumisele ja pöörduvad tagasi klaasi. Niisuguse prisma abil võib valguskiirt pöörata 90° võrra. Sel juhul nimetatakse prismat p ö ö r a v a k s.

Kasutatakse ka ü m b e r p ö ö r a v a i d prismasid, mille abil ülemised kiired muudetakse alumisteks ja alumised ülemisteks (joon. 173, *b*). Need leiavad kasutamist binoklites ja projektsiooniaparaatides saadud kujutiste ümberpööramiseks.

Ülesanne 49. Tuuker asub veekogu põhjas sügavusel 20 m (joon. 174). Millisel kaugusel asuvaid merepõhja punkte võib tuuker näha peegeldumas tasaselt veepinnalt?

A n t u d

$n = 1{,}33$;

$CD = H = 20$ m.

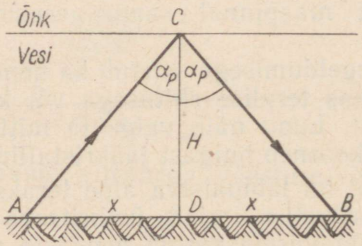
AB — ?

L a h e n d u s

1. Avaldame täieliku sisepeegeldumise piirnurga keskkondade vesi—õhk korral:

$$\sin \alpha_p = \frac{1}{n} = \frac{1}{1{,}33} = 0{,}752;$$

$$\alpha_p = 48°.$$



Joon. 174.

2. Arvutame lühima vahemaa tuukri ja põhja selle punkti vahel, mida ta võib näha peegeldumas veepinnalt. Täisnurksest kolmnurgast ACD saame:

$$x = H \tan \alpha, \quad \text{kus } \alpha > \alpha_p; \quad \text{näit. } \alpha = 49°;$$

$$AB = 2x = 2H \tan 49° = 2 \cdot 20 \text{ m} \cdot 1{,}15 = 46 \text{ m}.$$

Vastus: Tuuker võib näha seda osa põhjast, mis asetseb temast 46 m kaugusel või kaugemal.

§ 111. MURDUMINE TASAPARALLEELSES PLAADIS

Läbipaistvat plaati, mis on piiratud paralleelsete tasapindadega, nimetatakse optikas tasaparalleelseks plaadiks. Niisuguse plaadi näiteks võiks olla hea kvaliteediga peegliklaas või paksem aknaklaas.

Valguskiir, sisenedes plaati, läheneb pinnanormaalile, sest ta liigub optiliselt hõredamast keskkonnast (õhk) optiliselt tihedamasse (klaas).

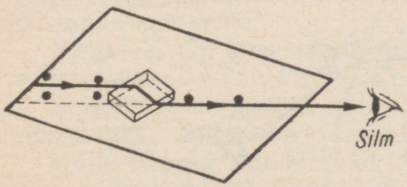
Väljumisel plaadist kaldub valguskiir pinnanormaalist kõrvale sama nurga võrra, mille võrra ta sisenemisel ligines normaalile, sest ta läheb nüüd üle tihedamast keskkonnast (klaas) hõredamasse (õhk).

Seega valguskiir, läbides tasaparalleelse plaadi, ei muuda oma levimissuunda, vaid nihkub ainult esialgsest suunast kõrvale.

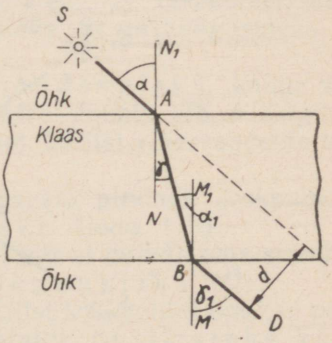
Selles on kerge veenduda katse abil, mida illustreerib joonis 175. Kui nööpnõelad kinnitada kartongile nii, et vaadates läbi tasaparalleelse plaadi, näivad nad ühel sirgel asetsevat, siis pärast plaadi eemaldamist näeme, et nööpnõelad asetsevad tegelikult kahel paralleelsel sirgel. Sama tulemuse saame ka matemaatilisel teel.

Langegu valguskiir tasaparalleelsele plaadile ja läbigu seda (joon. 176). Kiirte üleminekul õhust plaati on langemisnurk α suurem murdumisnurgast γ; nende nurkade vahel kehtib seos:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n.$$



Joon. 175.



Joon. 176.

Kiire väljumisel plaadist õhku on langemisnurk α_1 väiksem murdumisnurgast γ_1. Siin kehtib seos:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = \frac{1}{n}.$$

Korrutame need võrdused, saame:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} \cdot \frac{\sin \alpha_1}{\sin \gamma_1} = 1.$$

Et $\gamma = \alpha_1$ kui põiknurgad, siis $\sin \gamma = \sin \alpha_1$ ja viimane võrdus muutub lihtsamaks, omandades kuju

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_1} = 1.$$

Järelikult $\sin \alpha = \sin \gamma_1$ ehk $\alpha = \gamma_1$.

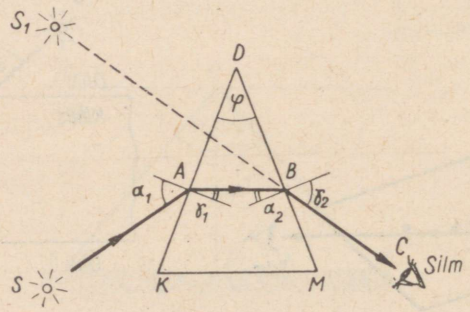
Et plaadi küljed on paralleelsed, siis ka puutepunktidest tõmmatud pinnanormaalid on omavahel paralleelsed. Kui $\alpha = \gamma_1$, siis on kiired omavahel paralleelsed, s. t. $SA \parallel BD$.

Järelikult *tasaparalleelset plaati läbiv valguskiir nihkub teatud ulatuses ja väljub plaadist paralleelselt langeva kiirega. Eseme vaatlemisel läbi tasaparalleelse plaadi näib see meile nihkununa, võrreldes oma tõelise asendiga.* Keskkonna murdumisnäitaja, plaadi paksuse ja kiire langemisnurga suurenemisega suureneb ka nihe *d*.

§ 112. MURDUMINE KOLMETAHULISES PRISMAS

Valguskiir esemelt *S*, langenud kolmetahulisele prismale punktis *A*, murdub ja läbib prismat mööda sirget *AB*. Prismast väljumisel murdub ta punktis *B* veelkordselt, kaldudes prisma aluse poole, ja liigub siis edasi suunas *BC* (joon. 177). Vaatlejale näib, et valguskiir lähtub punktist S_1, mis asetseb kiire *BC* pikendusel, s. o. ese näib nihutatuna prisma murdva nurga φ serva poole.

Niisiis, *kolmetahulist prismat läbiv kiir murdub tema aluse*



Joon. 177.

poole. Esemest tekib prismas ebakujutis ja ese paistab olevat kõrvale kaldunud murdva nurga serva poole.

Asetame kolmetahulise prisma ja nööpnõelad kartongile nii, et kõik nõelad paistaksid läbi prisma vaadates ühel sirgel. Prisma eemaldamisel näeme, et tegelikult paigutasime nõelad mööda murdjoont.

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Millist nurka nimetatakse piirnurgaks?
2. Mis on täielik sisepeegeldumine?
3. Kas täielik sisepeegeldumine võib aset leida valguskiire üleminekul veest klaasi?
4. Millise valemi abil saab arvutada piirnurga suurust?
5. M. V. Lomonossovi märkmetes tuuakse ära selline seisukoht: «Kriimuline klaas ei paista läbi.» Põhjendage seda ütlust!
6. Arvutada piirnurk valguse täielikul sisepeegeldumisel klaasis, kui seda piirab õhk. Murdumisnäitaja $n = 1{,}5$.

Vastus: 42°.

7. Arvutada piirnurk täielikul sisepeegeldumisel teemandis, kui seda ümbritseb vesi. Teemandi absoluutne murdumisnäitaja on 2,417, vee absoluutne murdumisnäitaja 1,333.

Vastus: 33°28′.

8. Valguskiir langeb vee ja õhu lahutuspinnale 60° nurga all. Kas ta väljub õhku? Andke seletus.
9. Joonestage kiirte käik läbi tasaparalleelse plaadi.
10. Valguskiir langeb risti klaasprisma väiksema tahuga. Prisma ristlõige kujutab endast võrdhaarset täisnurkset kolmnurka. Joonestage kiire käik prismas.
11. Valguskiir langeb risti klaasprisma suurema tahuga. Prisma ristlõige on võrdhaarne täisnurkne kolmnurk. Joonestage kiire käik prismas.

§ 113. LÄÄTSED. LÄÄTSE OPTILINE TUGEVUS

Tehnikas on laialdast kasutamist leidnud lihvitud klaasid, mida *piiravad* sfäärilised pinnad. Neid klaase nimetatakse *läätsedeks*. Läätsi kasutatakse optilistes riistades, näiteks binoklites, fotoaparaatides, projektorites, mikroskoopides, teleskoopides jne.

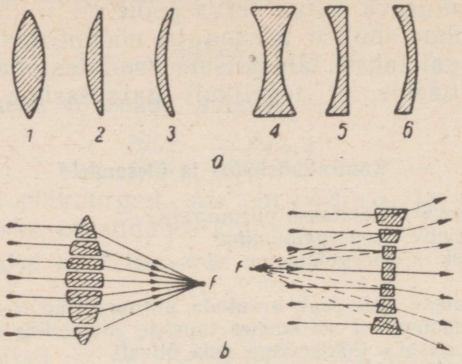
Läätsed jagunevad: 1) kaksikkumerateks, 2) tasakumerateks, 3) nõguskumerateks, 4) kaksiknõgusateks, 5) tasanõgusateks ja 6) kumernõgusateks (joonis 178, *a*).

Kolme esimest liiki nimetatakse *koondavateks*, kolme viimast — *hajutavateks läätsedeks*. Joonis 178, *b* selgitab koondavate ja hajutavate läätsede toimet. Läätsi võib vaadelda kui prismade süsteeme.

Sirget C_1C_2, mis läbib läätse piiravate pindade keskpunkte, nimetatakse *optiliseks peateljeks* (joon. 179).

Sellist läätse punkti, mille läbimisel kiir ei muuda oma suunda, nimetatakse läätse *optiliseks keskpunktiks* (O).

Kõiki sirgeid, mis läbivad läätse optilist keskpunkti optilise peatelje suhtes mingi nurga all, nimetatakse *optilisteks kõrvaltelgedeks*.



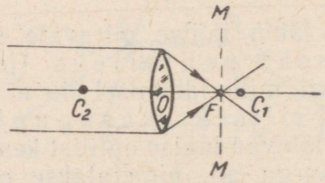
Joon. 178.

Valguskiirte kimp, mis langeb koondavale läätsele paralleelselt optilise peateljega, koondatakse läätse taha samale teljele ja seejuures ühte punkti. Sellist punkti nimetatakse läätse fookuseks. Tasapinda *MM*, mis läbib fookust ja on risti optilise peateljega, nimetatakse fokaalpinnaks.

Kui kiir langeb hajutavale läätsele paralleelselt optilise peateljega, siis pärast murdumist moodustub sellistest kiirtest hajuv kiirtekimp. Kiired näivad väljuvat punktist *F*, mis asetseb optilisel peateljel ja mida nimetatakse kaksiknõgusa läätse ebafookuseks (joon. 178, *b*). Järelikult on igal läätsel kaks fookust, mis asetsevad kummalgi pool läätse optilist keskpunkti. Kaugust läätse optilisest keskpunktist fookuseni nimetatakse fookuskauguseks ja tähistatakse tähega *F*.

Erinevate läätsede fookuskaugused on erinevad. See on tingitud piirpindade erinevast kumerusest ja läätsede aine erinevast keemilisest koostisest. Mida väiksem on läätse pindade kumerusraadius, seda tugevamini murduvad kiired ja seda väiksem on läätse fookuskaugus. Matemaatiliselt avaldub see sõltuvus järgmiselt:

$$\frac{1}{F} = (n-1)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right),$$



Joon. 179.

kus n on murdumisnäitaja, R_1, R_2 — kerapindade raadiused, F — fookuskaugus.

Läätse fookuskauguse pöördväärtust nimetatakse läätse optiliseks tugevuseks ja seda mõõdetakse dioptriates (d).

Kui D on läätse optiline tugevus ja F — läätse fookuskaugus, siis

$$D = \frac{1}{F}.$$

Valemist on näha, et mida lühem on fookuskaugus, seda suurem on optiline tugevus.

Optiline tugevus 1 dioptria on niisugusel läätsel, mille fookuskaugus on 1 meeter. Kui $F = 0{,}5$ m, siis optiline tugevus

$$D = \frac{1}{0{,}5 \text{ m}} = 2 \text{ d}.$$

Kui $F = 0{,}1$ m, siis

$$D = \frac{1}{0{,}1 \text{ m}} = 10 \text{ d}.$$

Kui asetada läätsed tihedalt üksteise vastu, siis nende optilised tugevused liituvad. Seejuures on kokku lepitud koondavate läätsede optilised tugevused lugeda positiivseteks, hajutavatel läätsedel — negatiivseteks. Näiteks kui liita kaks koondavat läätse optiliste tugevustega 3 d ja 4 d, siis saame süsteemi, mis on samaväärne ühe koondava läätsega optilise tugevusega 7 d. Kui koondava läätsega 10 d liita hajutav lääts optilise tugevusega 4 d, siis saame süsteemi, mis on samaväärne ühe koondava läätsega optilise tugevusega 6 d.

Katseliselt on kindlaks tehtud kolm kujutise konstrueerimise seisukohalt olulist kiire murdumist läätses.

1. Kiir, mis langeb koondavale läätsele paralleelselt optilise peateljega, läbib pärast murdumist fookuse.

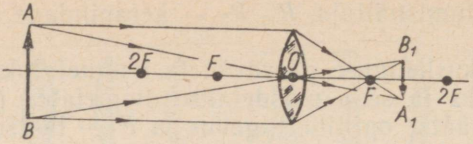
2. Kiir, mis langeb läätsele läbi fookuse, on pärast murdumist paralleelne koondava läätse optilise peateljega.

3. Kiir, mis läbib läätse optilise keskpunkti (liigub piki optilist kõrvaltelge), ei muuda oma levimissuunda.

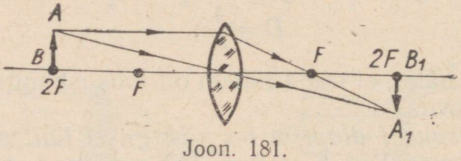
Võttes neist kolmest kiirest kaks, saame konstrueerida läätse poolt tekitatud eseme kujutise.

§ 114. KUJUTISE KONSTRUEERIMINE LÄÄTSES

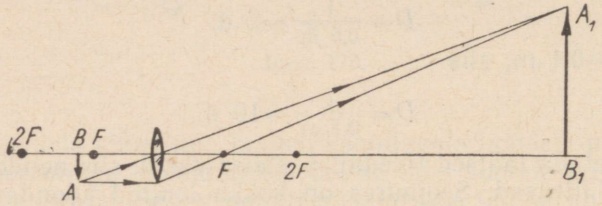
1. Ese AB asetseb läätsest kaugemal kui kahekordne fookuskaugus. Tõmbame punktist A kiire läbi läätse optilise tsentri ja samast punktist veel teise kiire, paralleelse optilise peateljega. See kiir läbib optilise peafookuse F ja lõikub punktis A_1 esimese kiirega, mis ei muutnud levimissuunda. Täpselt samuti konstrueerime punkti B kujutise, mis tekib punktis B_1 (joon. 180). Sel viisil võib konstrueerida kujutise ükskõik millisest eseme AB punktist.



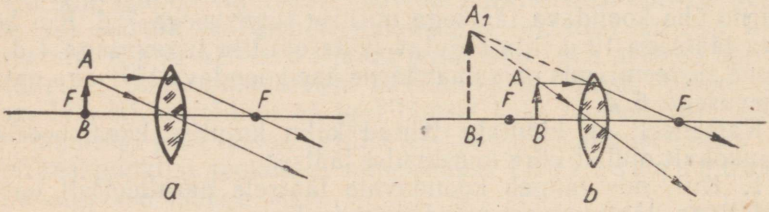
Joon. 180.



Joon. 181.



Joon. 182.



Joon. 183.

Geomeetriliste konstruktsioonide põhjal jõuame järeldusele: 1) *kui ese asetseb kaugemal kahekordsest fookuskaugusest, siis tema kujutis tekib teisel pool läätse F ja 2F vahel ning on tõeline, ümberpööratud ja vähendatud.*

Niisugune juhus leiab praktiliselt aset suurte esemete fotografeerimisel.

2. Ese asetseb kahekordsel fookuskaugusel. Kujutise konstrueerimine on näidatud joonisel 181.

Kui ese asetseb kahekordsel fookuskaugusel, siis tekib kujutis teisel pool läätse kahekordsel fookuskaugusel, on tõeline, ümberpööratud ja niisama suur kui ese.

Nii tekib praktiliselt kujutis näiteks jooniste fotografeerimisel loomulikus suuruses jm.

3. Ese asetseb fookuse ja kahekordse fookuskauguse vahel. Kujutise konstrueerimine on antud joonisel 182.

Sel juhul tekib tema kujutis teisele poole läätse kaugemal kui kahekordne fookuskaugus, on ümberpööratud, tõeline ja suurendatud.

Praktikas saadakse niiviisi kujutisi projektsiooniaparaadi abil, fotode suurendamisel jm.

4. Ese asetseb läätse fookuses (183, *a*). *Kui ese asetseb fookuses, siis tekib tema kujutis lõpmatuses, sest kiired levivad pärast läätse läbimist paralleelselt.* Teiste sõnadega, kujutist konstrueerida pole võimalik.

5. Ese asetseb läätse ja fookuse vahel (183, *b*).

Kui ese asetseb fookuse ja läätse vahel, siis tekib tema kujutis samal pool läätse kus esegi, see on ebakujutis, päripidine ja suurendatud.

Praktikas tekitatakse niisuguseid kujutisi luubi, samuti ka mitmete optiliste riistade okulaaride abil, näiteks mikroskoobis, teleskoobis jm.

§ 115. LÄÄTSE JOONSUURENDUS. LÄÄTSE VALEM

Kujutise ja eseme joonmõõtmete suhet nimetatakse läätse joonsuurenduseks.

Vaatleme joonist 184. Tähistame kauguse läätse optilisest keskpunktist esemeni d-ga, aga kauguse samast keskpunktist kujutiseni f-ga. Eseme joonmõõt $h=AB$ ja kujutise joonmõõt $H=A_1B_1$. Sarnastest kolmnurkadest A_1B_1O ja ABO järeldub suhe:

$$\frac{A_1B_1}{AB}=\frac{f}{d}$$

ehk

$$\frac{H}{h}=\frac{f}{d}=Y,$$

s. t. *läätse joonsuurendus on võrdne läätse optilise keskpunkti ja kujutise ning sama punkti ja eseme vaheliste kauguste suhtega.*

Tuletame läätse valemi. Selleks konstrueerime eseme kujutise. Joonisel 185 on AB ja A_1B_1 vastavalt ese ning tema kujutis.

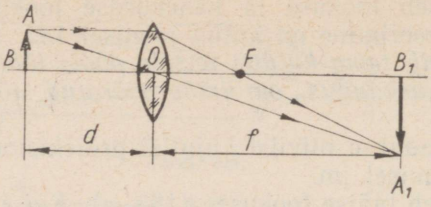
Sarnastest kolmnurkadest AOB ja A_1OB_1, samuti ka kolmnurkadest COF ja FB_1A_1 järeldub:

$$\frac{A_1B_1}{AB}=\frac{f}{d};$$

$$\frac{A_1B_1}{OC}=\frac{B_1F}{OF}$$

ehk

$$\frac{A_1B_1}{OC}=\frac{f-F}{F}.$$



Joon. 184.

Et kiir AC on paralleelne optilise peateljega (konstruktsiooni põhjal), siis $AB = OC$, seepärast võib viimase võrduse kirjutada ka kujul:

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f-F}{F}.$$

Selle võrduse ja esimese võrduse vasakud pooled on võrdsed, seega on võrdsed ka paremad pooled, s. o.

$$\frac{f}{d} = \frac{f-F}{F}.$$

Siit $fF = df - dF$; $fF + dF = df$.

Jagame selle võrduse kõiki liikmeid korrutisega fdF ja saame läätse valemi:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F},$$

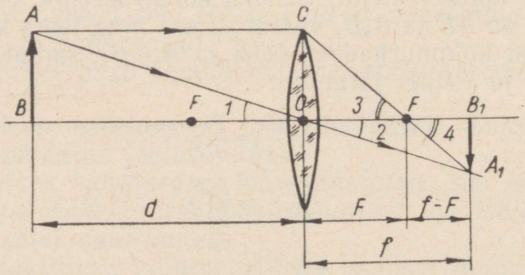
kus d on eseme kaugus, f — kujutise kaugus ja F — fookuskaugus.

Kasutades läätse valemit, võib arvutada ühe antud suurustest, kui on teada kaks ülejäänut.

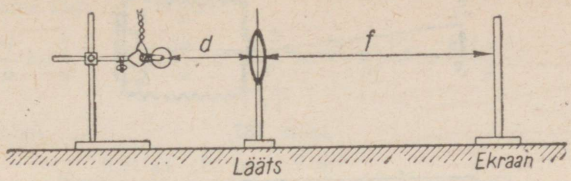
Vaatleme näidet. Kus tekib eseme kujutis, kui ese asetseb läätsest 5 m kaugusel ja läätse peafookuse kaugus on 1 m?

On teada, et

$$d = 5 \text{ m}; \quad F = 1 \text{ m}.$$



Joon. 185.



Joon. 186.

Läätse valemist saame:

$$\frac{1}{f}=\frac{1}{F}-\frac{1}{d};\quad \frac{1}{f}=\frac{1}{1\text{ m}}-\frac{1}{5\text{ m}};\quad \frac{1}{f}=\frac{4}{5\text{ m}};$$

$$f=\frac{5}{4}\text{ m}=1{,}25\text{ m}.$$

Algtingimuste järgi $F=1$ m, seega $2F=2$ m, järelikult asetseb ese kaugemal kui kahekordne fookuskaugus ja kujutis tekib F ja $2F$ vahel.

Laboratoorne töö nr. 4. Koondava läätse fookuskauguse määramine.

Töövahendid: kaksikkumer lääts alusel, elektrilamp alusel, väike liikuv ekraan, meeterjoonlaud, vooluallikas.

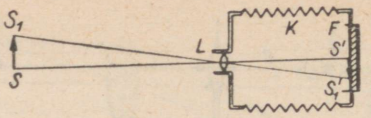
Töö käik

1. Asetada lamp, lääts ja ekraan nii, nagu näidatud joonisel 186.
2. Liigutades sujuvalt ekraani, leida lambi tõeline kujutis ekraanil.
3. Mõõta kaugused: a) lambi niidist läätseni (d) ja b) läätsest ekraanini (f).
4. Arvutada läätse valemist fookuskaugus.
5. Korrata katset, nihutades lampi läätsele kord lähemale, kord kaugemale.
6. Tulemused kanda tabelisse.

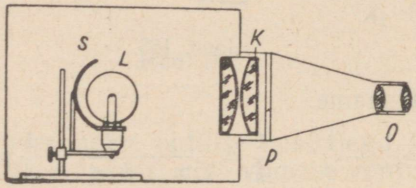
Katse nr.	d	f	F	F_k
1.				
2.				
3.				

§ 116. FOTOAPARAAT. PROJEKTSIOONIAPARAAT

Fotoaparaadi ehituse skeem on antud joonisel 187. Fotoaparaat koosneb valgust mitteläbilaskvate seintega kambrist K, mida nimetatakse kaameraks, ja objektiivist L. Objektiiv asetseb kaamera esiseinas, tagaseina on asetatud aga valgustundlik fotoplaat F.



Joon. 187.



Joon. 188.

Fotografeerimisel asetseb ese SS_1 kaugemal objektiivi fookuskaugusest. Plaadile saadakse ümberpööratud, vähendatud kujutis $S'S'_1$.

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt fotografeerimist liikuvale filmilindile, mis hiljem võimaldab jäädvustatud liikumist ekraanil taastada.

Projektsiooniaparaati, mille ehitus on antud joonisel 188, kasutatakse eseme tõelise ja suurendatud kujutise saamiseks ekraanil. Aparaat koosneb objektiivist *O* ja valgust mitteläbilaskvast kambrist, kus asub võimsa nõguspeegli *S* fookusesse asetatud valgusallikas *L*. Valguskiired langevad kondensorile *K*. Kondensor koosneb kahest tasakumerast läätsest. Läätsede abil koondatakse kiirtekimp kitsaks valgusribaks ja suunatakse diapositiivile (joonis klaasil või tselluloidil). Diapositiiv asetseb objektiivi (koondavate läätsede süsteemi) suhtes *F* ja *2F* vahel, nii et ekraanil saadakse suurendatud, tõeline ja ümberpööratud kujutis. Seepärast tuleb päripidise kujutise saamiseks asetada diapositiivid oma kohale ümberpööratult. Kõige vajalikumaks projektsiooniaparaadi osaks on objektiiv, mis tekitabki ekraanile kujutise.

Ülesanne 50. Projektsiooniaparaadi objektiivi fookuskaugus on 20 cm, ekraani kaugus objektiivist 20 m. Leida kujutise kõrgus ekraanil, kui joonise kõrgus diapositiivil on 4 cm.

Antud

$F=20$ cm$=0{,}2$ m;
$f=20$ m;
$h=4$ cm$=0{,}04$ m.

H — ?

Lahendus

1. Tuletame valemi ülesande lahendamiseks.

a) Leiame diapositiivi kauguse läätse optilisest keskpunktist:

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=\frac{1}{F};\quad \frac{1}{d}=\frac{1}{F}-\frac{1}{f}=\frac{f-F}{fF};$$

$$d=\frac{fF}{f-F}.$$

b) Avaldame kujutise kõrguse:

$$\frac{H}{h}=\frac{f}{d};\quad H=\frac{fh}{d}=\frac{fh}{\frac{fF}{f-F}}=\frac{fh(f-F)}{Ff}=\frac{h(f-F)}{F}.$$

2. Arvutame:

$$H=\frac{0{,}04\text{ m}\cdot(20\text{ m}-0{,}2\text{ m})}{0{,}2\text{ m}}=3{,}96\text{ m}\approx 4\text{ m}.$$

Ülesanne 51. 12 km kõrgusel lendavast lennukist fotografeeriti maa-ala mastaabis 1 : 16 000. Milline oli objektiivi fookuskaugus?

Antud

$\frac{H}{h}=\frac{1}{16\,000}$;

$d=12\,000$ m.

F — ?

Lahendus

1. Tuletame ülesande lahendamiseks valemi.

a) Valemist

$$\frac{H}{h}=\frac{f}{d}\text{ saame }f=d\cdot\frac{H}{h}.$$

b) Et kaugus, millelt tehti võte, on väga suur, siis võib läätse valemis võtta ligikaudu $f=F$ ja järelikult

$$F=\frac{dH}{h}.$$

2. Arvutame:

$$F=\frac{12\,000\text{ m}\cdot 1}{16\,000}=0{,}75\text{ m}.$$

Kontrollküsimusi ja ülesandeid

1. Mida nimetatakse läätseks?
2. Mida nimetatakse läätse optiliseks keskpunktiks, optiliseks peateljeks ja fookuseks?
3. Näidake skemaatiliselt valguskiire käik, kui kiir langeb kaksikkumerale läätsele paralleelselt optilise peateljega.
4. Näidake skemaatiliselt valguskiire käik, kui kiir langeb kaksikkumerale läätsele läbi selle fookuse.
5. Näidake skemaatiliselt valguskiire käik, kui kiir langeb kaksikkumerale läätsele ja läbib tema optilise keskpunkti.
6. Kus ja milline tekib kujutis esemest, mis asetseb kaugemal koondava läätse kahekordsest fookuskaugusest?
7. Kus ja milline tekib kujutis esemest, mis asetseb koondava läätse F ja $2F$ vahel?
8. Konstrueerige kujutis, kui ese asetseb koondava läätse ja tema fookuse vahel.
9. Mida nimetatakse läätse optiliseks tugevuseks ja millistes ühikutes seda mõõdetakse?
10. Läätse optiline tugevus on 4 dioptriat. Mida see tähendab?
11. Kas klaasläätse optiline tugevus suureneb või väheneb, kui ta ümbritseda mitte õhuga, vaid veega? Kuidas seda seletada?

Vastus: Väheneb.

12. Kuidas muutub läätse optiline tugevus, kui ta ümbritseda keskkonnaga, millel on samasugune murdumisnäitaja kui läätse ainel? Kuidas seda seletada?

Vastus: Muutub nulliks.

13. Leida prilliklaasi fookuskaugus, kui ta optiline tugevus on 4d.

Vastus: 25 cm.

14. Fotoaparaadi objektiivi fookuskaugus on 12 cm. Milliselt kauguselt pildistati hoonet, kui hoone pikkus pildil on 6 cm, aga tegelikult 80 m?

Vastus: 160 m.

15. Lennukilt, mis lendab 4800 m kõrgusel, fotografeeriti maastikku. Milline mastaap saadakse pildil, kui fotoaparaadi objektiivi fookuskaugus on 60 cm?

Vastus: 1 : 8000.

16. Millise joonsuurenduse võib saada projektsiooniaparaadi abil, kui objektiivi kaugus ekraanist on 12 m ja objektiivi fookuskaugus 8 cm?

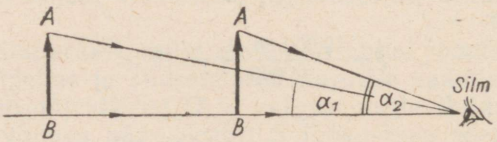
Vastus: 149 korda.

§ 117. VAATENURK

Nurka, mille all paistab ese, nimetatakse *vaatenurgaks* (joon. 189). Kui vaatenurk on väiksem ühest minutist, siis ei ole ühe eseme kahte punkti võimalik eraldada ja me näeme eset ühe punktina.

Et täpsemalt eristada üksikasju, tuleb ese paigutada silmale lähemale, sest siis vaatenurk suureneb. Kuid alati pole see võimalik.

Esiteks ei saa väga lähedasi esemeid vaadelda silma kahjustamata (lähemalt kui 25 cm kaugusel), teiseks, alati pole võimalik



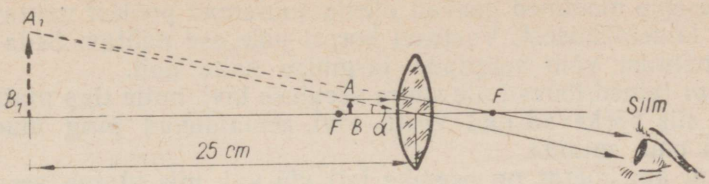
Joon. 189.

tuua esemeid küllalt lähedale või läheneda neile, näiteks taevakehad, tehiskaaslased jne. Niisugusel juhul *kasutatakse optilisi riistu, mis suurendavad vaatenurka.*

§ 118. LUUP

Et väikeste mõõtmetega esemed nähtavaks muutuksid, tuleb neid vaadelda suurema vaatenurga all. Lihtsamatel juhtudel kasutatakse selleks *luupi*. Luubiks nimetatakse kaksikkumerat läätse, mida kasutatakse suurendatud ebakujutiste saamiseks väikestest esemetest. Ese asetatakse läätse ja tema fookuse vahele (joon. 190). Terava kujutise saamiseks viiakse ese läätsest sellisele kaugusele, et tema kujutis tekiks silmast parimal nägemiskaugusel. Normaalne silm näeb kõige paremini eset 25 cm kauguselt, mida nimetatakse *parimaks nägemiskauguseks.*

Et eseme vaatlemisel luubi abil asetatakse silm luubi lähedale, aga ese — fookuse lähedusse, siis võib luubi suurenduseks lugeda



Joon 190.

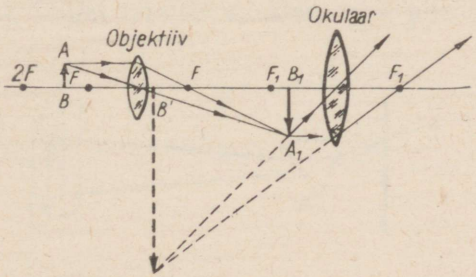
parima nägemiskauguse suhet fookuskaugusse. Kui F on väljendatud sentimeetrites, siis on suurendus $25/F$; kui aga F on mõõdetud meetrites, siis on suurendus $\frac{1}{4F}$.

Kui väike ese oleks parimal nägemiskaugusel ilma luubita, siis oleks vaatenurk liiga väike. Luubi kasutamine suurendab vaatenurka (α), mistõttu eseme kujutis muutub selgemaks. Luup suurendab kuni 30 korda. Veel parema suurenduse saamiseks tuleb kasutada mikroskoopi.

§ 119. MIKROSKOOP

Lihtsaimaks mikroskoobiks on kahest koondavast läätsest koosnev süsteem. Objektiiviks on väikese fookuskaugusega, okulaariks — suure fookuskaugusega lääts. Ese asetatakse pisut kaugemale kui objektiivi fookuskaugus (F ja $2F$ vahele). Seega saadakse esemest tõeline, suurendatud ja ümberpööratud kujutis. Seda vaadeldakse läbi okulaari, mis esineb luubina. Objektiivi nihutatakse nii, et eseme tõeline kujutis jääks okulaari ja selle peafookuse vahele. Nii saame suurendatud ebakujutise (päripidise esimese kujutise, kuid ümberpööratud eseme suhtes). Kujutis on vaja tekitada parimal nägemiskaugusel, s. o. 25 cm kaugusel silmast. Kiirte käik mikroskoobis on toodud joonisel 191.

Kaasaegsed mikroskoobid koosnevad keerulise ehitusega okulaarist ja objektiivist ning annavad kuni 3000-kordse suurenduse. Veelgi rohkem suurendada pole läätsmikroskoopide abil võimalik,



Joon. 191.

sest eseme mõõtmed peavad olema suuremad poolest nähtava valguse lainepikkusest. Vastasel korral pole ese nähtav. Seda keerukat nähtust võib selgitada järgmise näite abil.

Kui lained löövad üle suure veealuse kivi, mille tipp ulatub pinnale, siis põrkavad nad vastu kivi, eemalduvad ning muudavad seega oma suunda.

Kui aga meres on peenike latt või vai, mis ulatub veepinnast kõrgemale, siis lähevad lained vabalt sellest mööda, nagu ei olekski kohanud oma teel mingit takistust.

Analoogiline olukord esineb ka valguslainetega, kui nad kohtavad teel esemeid, mille mõõtmed on väiksemad poolest valguse lainepikkusest. Nähtava valguse abil saab uurida ainult esemeid, mille läbimõõt ei ole alla 0,2 μm.

Kontrollküsimusi

1. Mida nimetatakse vaatenurgaks?
2. Miks püütakse suurendada vaatenurka lähedal asetsevate väikeste esemete või kaugete ja suurte esemete vaatlemisel?
3. Kuidas leida luubi suurendust?
4. Konstrueerida kujutis luubis.
5. Konstrueerida kujutis mikroskoobis.

XI PEATÜKK

VALGUSE KOOSTIS. KIIRGAMINE

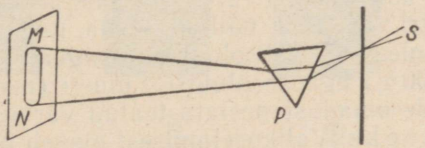
§ 120. VALGE VALGUSE JAGUNEMINE PRISMAS VÄRVILISTEKS KIIRTEKS. SPEKTER. MONOKROMAATILINE VALGUS

Vihma ajal võime näha vikerkaart. Selle suurepärase loodusnähtuse olemust ei osatud kaua aega seletada. Alles Newton tegi seda aastail 1666—1667. Kui teadlane valge valguse läbi kolmetahulise kristallprisma suunas (joon. 192), siis märkas ta, et valgus murdus aluse poole ja lahutus lisaks veel värvilisteks kiirteks. Ekraanil tekkis värviline riba *MN*, mis koosnes reast värvustest üleminekutega ühest teise. Seda värvilist riba hakati nimetama spektriks. Spekter koosneb seitsmest põhivärvist, mis paiknevad kindlas järjekorras: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, sinine ja violetne.

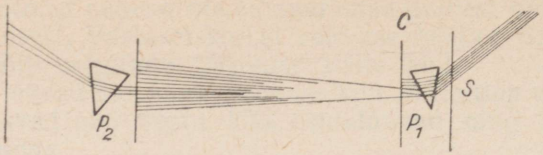
Katse näitas, et valge valgus on liitvalgus, mis koosneb mitmesuguse lainepikkusega valgustest. *Valge valguse jaotumist värvilisteks valgusteks nimetatakse valguse dispersiooniks.*

Valge valguse koostisse kuuluvad värvilised kiired ei murdu prismas ühtemoodi. Kõige vähem kaldub esialgsest suunast kõrvale spektri punane, kõige rohkem — violetne osa. Tulemusena lagunebki valge valgus komponentvalgusteks. Murdumise suurust iseloomustab murdumisnäitaja, järelikult on igal värvusel erinev murdumisnäitaja. Kõige väiksem murdumisnäitaja on punastel kiirtel ja kõige suurem — violetsetel.

Kui ekraani, millel tekitati spekter, teha pilu ja suunata läbi



Joon. 192.



Joon. 193.

selle mingi ühe värvusega kiir teisele prismale, siis see murdub küll prisma aluse poole, kuid ei lagune enam teisteks valgusteks (joon. 193). Seetõttu nimetatakse iga värvilist kiirt lihtvalguseks. Lihtvalgust nimetatakse veel homogeenseks ehk monokromaatiliseks. Laineoptika seisukohalt kujutab monokromaatiline kiir endast kindla lainepikkusega elektromagnetilist lainet.

§ 121. VALGE VALGUSE SAAMINE VÄRVILISTEST VALGUSKIIRTEST. KEHADE VÄRVUS

Kui valge valgus koosneb värvilistest kiirtest, siis tekib küsimus, kas värvilisest valgusest ei oleks võimalik saada jälle valget valgust. Katse näitab, et see on võimalik. Koondades prismast väljuvad värvilised kiired suure läätse abil kokku, saame läätse fookuses valge laigu.

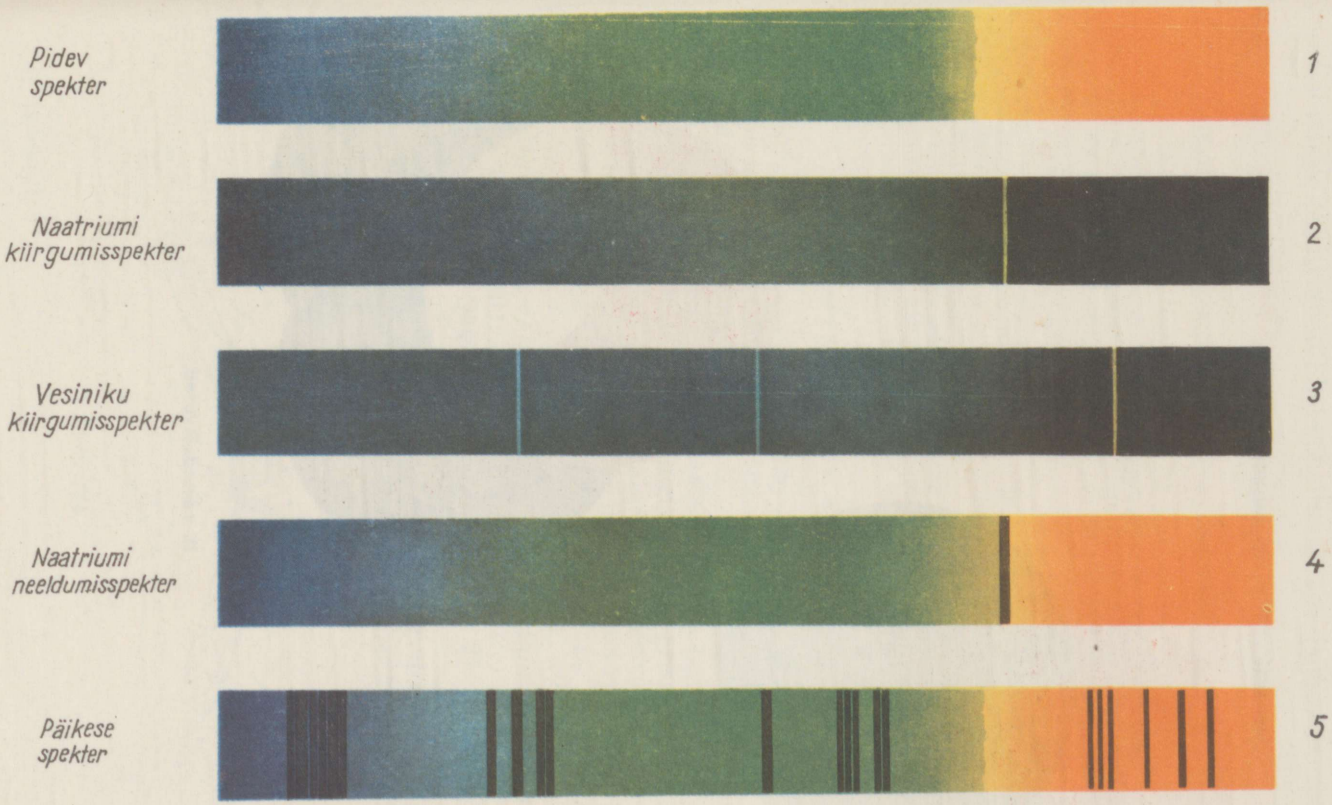
Valge valguse saamist spektrivärvuste liitumise teel nimetatakse valge valguse sünteesiks.

Katsed on näidanud, et valget valgust võib saada ka kahe värvilise kiire liitumisel, näiteks punase ja rohekassinise, kollase ja sinise liitumisel jne.

Kahte värvilist valgust, mis liitudes annavad valge valguse, nimetatakse täiendvärvusteks (vt. värvitahvlit).

Vaatleme erineva värvusega kehi. Ühed neist tunduvad meile täiesti punastena, teised kollastena, kolmandad rohelistena jne. Nähtust saab seletada järgmiselt. Oletame, et keha näib meile punasena valges valguses, s. t. keha peegeldab tagasi ainult punaseid kiiri, kõiki teisi spektrivärve, millest valge valgus koosneb, ta neelab. Suuname valge valguse läbi rohelise klaasi — näeme ainult rohelist valgust. See tähendab, et antud klaas laseb läbi ainult spektri rohelise osa, aga kõik teised värvused neelab. Keha, mis peegeldab tagasi kõik spektri värvused, paistab valgena. Keha, mis neelab kõik spektri värvused, näib mustana, nagu tahm, samet jne. Looduses ei ole olemas ei absoluutselt valgeid (langevast valgusest peegeldub 100%) ega absoluutselt musti (neelab 100% valgusest) kehi. Kehade omadust neelata teatud värvi kiiri nimetatakse valikneelamiseks. Valikneelamisest oleneb kehade värvus.

Monokromaatilist valgust kiirgavad kehad näivad ainult siis värvilistena, kui kiirguse värvus ühtib keha värvusega. Näiteks joo-


Pidev spekter
1
Naatriumi kiirgumisspekter
2
Vesiniku kiirgumisspekter
3
Naatriumi neeldumisspekter
4
Päikese spekter
5

I. Spektreid.



II. Täiendvärvused.

nistades lõuendile kaks kujundit — ühe punase, teise rohelise värviga — ja valgustades lõuendit punaste kiirtega, näeme esimest kujundit helepunasena, teist mustana; rohelise valgusega valgustamisel näeme teist kujundit helerohelisena, aga esimest mustana.

Kontrollküsimusi

1. Mida nimetatakse valge valguse dispersiooniks?
2. Mis on spekter?
3. Kuidas seletada valguse erinevaid värvusi laineteooria seisukohalt?
4. Millises järjekorras asetsevad värvilised valgused spektris?
5. Milliste kiirte kiirus klaasis on väiksem, kas punastel või violetsetel?
6. Kuidas muutub valguskiirte murdumisnäitaja liikumisel spektri punase otsa poolt violetse poole?
7. Miks aine täpse murdumisnäitaja määramisel ei kasutata mitte valget, vaid monokromaatilist valgust?
8. Mida nimetatakse valge valguse sünteesiks?
9. Milliseid värvusi nimetatakse täiendvärvusteks? Tooge näiteid.
10. Millist keha nimetatakse valgeks?
11. Millist keha nimetatakse mustaks?
12. Miks roheline paber näib valges valguses rohelisena?
13. Miks valge paber näib rohelises valguses rohelisena?

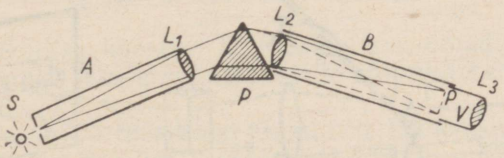
§ 122. SPEKTROSKOOP. KIIRGUSSPEKTRID

Spektrite vaatlemiseks ja nende uurimiseks kasutatakse spektroskoopi. Lihtsaim spektroskoop (joon. 194) koosneb kahest läätsedega torust A ja B ning kolmetahulisest prismast P. Esimeses torus asetseb koondav lääts L_1, mille peafookuses on pilu S. Läätse läbinud valguskiired suunduvad kolmetahulisele prismale paralleelse kimbuna. Prisma lahutab valge valguse värvilisteks. Seejärel läbivad värvilised kiired läätse L_2 teises torus ja annavad spektri läätse peafookuses. Spektrit vaadeldakse läbi läätse L_3, mis töötab luubina.

Iga kiirgav keha annab spektri, mida nimetatakse kiirgusspektriks (vt. värvitahvel).

Kiirgusspektrid jagunevad: 1) pidevad, 2) joonspektrid ja 3) ribaspektrid.

1. Pidev spekter kujutab endast värvilist riba värvuste pidevate üleminekutega ühest teiseks. Selline spekter on hõõguva-



Joon. 194.

tel tahketel kehadel ja vedelikel. Pidev spekter on alati ühesugune, vaatamata ainete keemilistele omadustele. Niisuguse spektri võime saada näiteks elektrilambi volframniidi hõõgumisel, sulamalmist jne.

2. Joonspekter koosneb üksikutest värvilistest joontest, mis on üksteisest eraldatud mustade vahemikega. Niisuguse spektri annavad hõõguvad gaasid ja aurud, kui nende rõhk on lähedane normaalrõhule, või atomaarsed gaasid. Kui tükk asbesti keedusoola lahuses niisutada, seejärel aga piiritusleeki asetada, siis saame spektroskoobis naatriumi joonspektri, mis koosneb kahest eraldi asetsevast kollasest joonest. Kui leeki tükk kloorliitiumi asetada, siis ilmub spektrisse punane joon, kui aga viia sinna veel talliumisoola, siis ilmub ka roheline joon. Elektrilahenduse toimel hakkavad hõrendatud gaasid kiirgama ja siis on lihtne jälgida nende kiirgusspektreid. Erinevate elementide joonspektrid erinevad üksteisest joonte värvuse, heleduse, joonte arvu ja nende asukoha poolest spektris. On kindlaks tehtud, et *iga keemiline element annab hõõguva gaasina, s. t. kui ta koosneb kiirgavatest aatomitest, üksnes temale iseloomuliku joonspektri kindlate värviliste joontega, mis asetsevad alati kindlas spektri osas.*

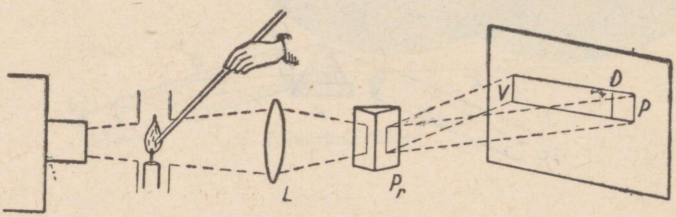
3. Ribaspekter koosneb värvilistest ribadest. Ribaspektri annavad gaasid, mille molekulid ei lagune aatomiteks. Näiteks väikese hõrendusega gaasid annavad elektrilahenduse toimel ribaspektrid.

Molekulide spektrid on alati ribaspektrid. Kõik ained, mille molekulid lagunevad aatomiteks, annavad joonspektrid.

§ 123. NEELDUMISSPEKTRID. KIRCHHOFFI SEADUSED

Kui elektrilambi volframniidi kiirgus spektroskoopi suunata, siis saame pideva spektri. Asetame spektroskoobi pilu ette rohelise klaasi, ja spektrist jääb järele ainult peenike roheline triip, kõik muu puudub — selle asemel on tume vööt.

Samuti nagu värviline klaas neelavad ka gaasid ja aurud teatud osa spektri kiirtest. Kui vaadelda elektrilambi volframniidi kiirgusest saadud pidevat spektrit ja asetada seejärel spektroskoobi



Joon. 195.

pilu ette põleti hõõguvate naatriumiaurudega, mille temperatuur on madalam volframniidi temperatuurist, siis tekivad pidevasse spektrisse lähestikku asetsevad tumedad jooned. Need jooned tekivad sinna, kus naatriumi kiirgusspektris saaksime kollased jooned. Joonisel 195 on näidatud naatriumi neeldumisspektri saamise viis. Kui asetada spektroskoobi pilu ette põleti talliumiaurudega, siis ilmub pidevasse spektrisse tume joon seal kohas, kus kiirgusspektris tekib roheline joon. Kui spektroskoobi pilu ette asetada põleti liitiumiaurudega, siis saadakse tume joon selles pideva spektri osas, kus liitiumi kiirgusspektris tekib punane joon.

Tumedate joonte või ribadega läbilõigatud pidevat spektrit, mis tekib seetõttu, et valge valgus on läbinud hõõguva gaasi või auru, nimetatakse neeldumisspektriks.

Uurides neeldumisspektrite tekkimist, avastas Kirchhoff seaduspärasuse, mis kannab nüüd tema nime. See seadus on järgmine: *hõõguv gaas või aur neelab valgest valgusest selle osa, mida ta ise kiirgab.*

Seega iga elemendi kiirgusspekter ja tema neeldumisspekter on pööratavad, s. t. tumedad neeldumisjooned vastavad täpselt värvilistele kiirgusjoontele.

§ 124. PÄIKESE SPEKTER

Vaadeldes Päikese kiirgusspektrit difraktsioonivõrega varustatud spektroskoobi abil, avastas saksa teadlane Fraunhofer 1817. a. hulgaliselt tumedaid jooni. Need lõikasid spektrit mitmes kohas ja neid nimetatakse Fraunhoferi joonteks. Nende neeldumisjoonte teket põhjendas teadlane Kirchhoff.

Päikese pideva spektri tekitab tema pinna ehk fotosfääri kiirgus. Päikest ümbritseb madalama temperatuuri ja väiksema tihedusega gaasipilv. Seda Päikese atmosfääri osa nimetatakse kromosfääriks. Enne maapinnale jõudmist läbivad päikesekiired kromosfääri ja Maa atmosfääri. Seejuures neelab iga keemiline element kromosfääris ja Maa atmosfääris selle osa spektrist, millist ta ise kiirgaks. Tulemusena tekib neeldumisspekter, mis koosneb paljudest neeldumisjoontest.

§ 125. SPEKTRAALANALÜÜS

Kehade keemilise koostise ja füüsikaliste omaduste uurimise meetodit kiirgamis- ja neeldumisspektrite abil nimetatakse spektraalanalüüsiks.

Selleks viiakse uuritav aine plaatinast konksukese abil põleti leeki ja võrreldakse saadud joonspektrit kõikide tuntud elementide spektritega. Leidnud ühe elemendi jooned, eraldatakse teise elemendi omad jne., kuni on selgunud kogu aine koosseis. Kui spekt-

ris leidub joon, mis on täiesti uus, võrreldes tuntud elementide spektritega, siis võib kinnitada, et tegemist on tundmatu elemendiga. Sellisel meetodil avastati rubiidium ja tseesium (1860), tallium (1862) ning heelium (astronoom Lockyer, 1868. a. Päikese neeldumisspektris). Alles 27 aastat hiljem (1895) avastas heeliumi Maal keemik Ramsay.

Spektraalanalüüs võimaldab kindlaks määrata kaugete taevakehade, näiteks Päikese, tähtede, udukogude koosseisu. Spektraalanalüüsi meetod on väga tundlik, sest juba milligrammi miljondik annab spektris selgelt nähtavad jooned. Tänu sellele on spektraalanalüüs leidnud laia kasutamist tehnikas näiteks metalli puhtuse kindlakstegemisel, väga väikeste ainekoguste olemasolu määramisel merevees või ravivedelikes jne.

Eriti tähtsaks muutus spektraalanalüüs haruldaste metallide avastamisel, mis on leidnud laialdast rakendamist väärtuslike sulamite valmistamisel. Sellised sulamid on hädavajalikud lennuki- ja laevaehituses, tööpinkide tootmisel ja masinaehituses üldse. Kaua aega ei saadud suurt osa haruldastest muldmetallidest kasutada, sest keemilised meetodid ei võimaldanud määrata nende olemasolu maagis, samuti ei olnud võimalik kontrollida eraldatavate elementide puhtust. Tulemusena läksid need hinnalised elemendid metallurgiale kaduma, selle asemel et neid efektiivselt meie rahvamajanduse otstarbeks kasutada.

Spektraalanalüüs avas suured võimalused ka ainete kvantitatiivseks analüüsiks, eriti kui neid aineid leidus väga väikestes kogustes mitmesugustes segudes. Osati avastada küll isegi keemiliste elementide jälgi, kuid nende hulka keemikutel kindlaks teha ei õnnestunud. Aga metallurgidel on näiteks tingimata vaja teada eelkõige seda, kui palju mingit ainet teras sisaldab.

Kuni selle sajandi 20-ndate aastateni arvasid suurimad füüsikud ja keemikud, et spektri abil ei saa kindlaks määrata ainete kvantitatiivset koostist. Peapõhjuseks oli niisugusel arvamusel asjaolu, et spektraaljoonte heledus, mille järgi otsustatakse ühe või teise keemilise elemendi hulga üle, sõltub kiirgava auru temperatuurist. Juba väike temperatuuritõus võib muuta mõnede elementide spektraaljoonte heleduse väga suureks. Seejuures võib juhtuda, et sel elemendil, mida leidub vaid väga väikeses koguses, on palju heledam joon kui elemendil, mida on palju rohkem.

Kuid nõukogude teadlane G. S. Landsberg tõestas rea katsete varal, et kvantitatiivne spektraalanalüüs on võimalik — tuleb vaid säilitada konstantne kiirgamistemperatuur.

Selleks otstarbeks konstrueeriti vahend, mida nimetatakse stiloskoobiks.

Kvantitatiivne spektraalanalüüs leidis laia kasutamist meie maa tööstuses, sest ta suurendab töö tootlikkust ja analüüsi täpsust. Analüüsi tehakse nii. Standardelektroodi ja analüüsitava aine vahel tekitatakse elektrikaar. Elektrood on valmistatud sulami alu-

seks olevast metallist, näiteks terase analüüsil — rauast, messingi analüüsil — vasest. Nii talitatakse sellepärast, et elektrood ei tohi uuritava aine spektrisse tuua ühtegi uut joont. Protsentuaalne koostis tehakse kindlaks spektrijoonte heleduse järgi.

Füüsikud uurivad väga tähelepanelikult niihästi spektreid kui ka nende muutumise seaduspärasusi, sest optilised spektrid sõltuvad tublisti füüsikalistest tingimustest, milles on aatomid. Nii näiteks lõhustavad tugevad magnet- või elektriväljad spektraaljooni. Eriti tunduvalt muutub spektri iseloom aatomite ioniseerimisel, s. o. elektronide eraldamisel välisest elektronkihist. Aatomite spekter ei sarnane sugugi sama aine ioonide spektriga. Seda küsimust uurisid nõukogude füüsikud akadeemik D. S. Roždestvenski juhtimisel. Spektri muutuste põhjal õppisid teadlased tundma tingimusi, mille puhul aatomid kiirgavad. Selle järgi, kuidas muutuvad tuntud elementide spektraaljooned tähtede spektrites, saavad astronoomid teada, milline on tähe temperatuur, rõhk nendes, kuidas on ioniseeritud aatomid tähtedes või udukogudes.

Tööstuses, kus ei saa kasutada tavalist termomeetrit, näiteks elektrikaare temperatuuri mõõtmisel jm., määratakse temperatuur kiirgusspektrite muutumise järgi.

Tänu spektraalanalüüsile tekkis möödunud sajandi 70-ndatel aastatel teadus tähtede koostisest — astrofüüsika.

§ 126. VALGUSE KOMBINEERITUD HAJUMINE

Suur tähtsus on liitainete molekulaarspektritel. Miks on taevas helesinine? Sellepärast, vastavad füüsikud, et lämmastiku ja hapniku molekulid, millest koosneb õhk, hajutavad päikesevalguses sisalduvaid siniseid kiiri. Nõukogude teadlased L. I. Mandelštam ja G. S. Landsberg uurisid tahke keha molekulidelt — kvartsikristallidelt — hajunud valgust. Samal ajal uuris india füüsik Raman neist sõltumatult valguse hajumist vedelatelt ainetelt. Katsetati monokromaatilise valgusega, näiteks kvartslambi sinise kiirgusega.

Sinine valguskiir läbis kvartsikristallid ja sattus spektroskoopi. Spektri fotografeerimisel selgus, et teravа sinise joone kõrval esinesid selles spektris veel teiste värvuste nõrgad jooned, mida lambi valguse koostises ei leidunud. Tundus, nagu oleks külm kvartsikristall ise muutunud valgusallikaks.

Uute valguskiirte voog oli väga nõrk. Selleks et spektris neid uusi jooni märgata, tuli kasutada ülitundlikke fotoplaate ja pikki ekspositsiooniaegu.

Nii avastati 1928. a. uus kiirgus, mida nimetati valguse kombineeritud hajumiseks. See avastus näitas, et osale keskkonda läbivatest valguskiirtest avaldavad mõju molekulide koosseisu kuuluvad võnkuvad aatomid. Sinise valguskiirte kimbu hajumise tulemusena tekivad uued valguskiired ja hajunud valgus osutub liitvalguseks. Selles liituvad kiirgava keha osakeste võnkesagedus ja valguse levimiskeskkonna osakeste võnkesagedus. Taolist nähtust nimetatakse liithajumiseks. Edasised katsed näitavad, et valguse kombineeritud hajumine võib olla mitmesugune ja oleneb molekulide koostisest ning aatomite paigutusest molekulides.

Kombineeritult hajunud valguse spektrite uurimine võimaldab kindlaks teha niihästi seda, millistest keemilistest elementidest koosneb antud aine, kui ka seda, kuidas nende elementide aatomid on molekulideks ühinenud.

Mandelštami, Landsbergi ja Ramani avastus sai aluseks ainete molekulaarstruktuuri kindlaksmääramiseks spektraalanalüüsi abil.

See meetod leiab laialdast kasutamist tööstuses, näiteks aviobensiini kvaliteedi, keemiliste lahustite kontrollimisel jne.

Molekulaarsel spektraalanalüüsil, mis põhineb kombineeritud hajumise ja infrapunaste spektrite uurimisel, on suur tähtsus molekulide ehituse tundmaõppimisel ja segude analüüsil.

Kontrollküsimusi

1. Milliseid kiirgusspektreid esineb?
2. Millal tekib pidev spekter?
3. Millal tekib joonspekter?
4. Millistel juhtudel saadakse ribaspekter?
5. Mida kujutab endast neeldumisspekter ja kuidas see tekib? Tooge näiteid neeldumisspektritest.
6. Millist värvi oleks roheline rohi, kui vaadelda teda läbi punase klaasi?
7. Elektrilambist lähtuvate valgete kiirte teele asetati teineteise taha kaks klaasi — kollane ja sinine. Mida me näeme, kui vaatame ainult läbi kollase klaasi ja seejärel läbi mõlema klaasi? Selgitada nähtust!
8. Kuidas kõlab Kirchhoffi seadus kiirgamise ja neeldumise kohta?
9. Kuidas seletada Kirchhoffi seaduse alusel neeldumisspektri tekkimist?
10. Mida kujutab endast Päikese spekter?
11. Milliseid jooni nimetatakse Fraunhoferi joonteks ja kuidas seletada nende tekkimist?
12. Mis on spektraalanalüüs ja kuidas seda tehakse?
13. Millised on spektraalanalüüsi eelised, võrreldes tavalise keemilise analüüsiga?
14. Mida nimetatakse kvantitatiivseks spektraalanalüüsiks ja millise seadme abil seda tehakse?

§ 127. INFRAPUNASED JA ULTRAVIOLETSED KIIRED

Mõõtes pideva spektri erinevate osade temperatuuri, võib tähele panna, et näidud on erinevad.

Asetades termomeetri väljapoole nähtava spektri punast osa, avastas teadlane Herschel 1800. a., et termomeeter näitab mitu korda kõrgemat temperatuuri kui üheski nähtava spektri osas. Sellest ta järeldas, et punaste kiirte taga asetsevad nähtamatud — *infrapunased* kiired. Need kiired nagu nähtavadki võivad peegelduda, murduda ja neelduda keskkondades, näiteks õhus, klaasis, vees.

Infrapunased kiired kujutavad endast elektromagnetilisi laineid lainepikkusega 0,8 kuni 100 μm.

Kui kuumutada tellise- või rauatükki ja asetada see siis nõguspeegli fookusse ning seejärel teise nõguspeegli abil koondada esimese peegli poolt saadetud infrapunased kiired kokku, siis teise peegli fookusse asetatud termomeeter näitab temperatuuri tõusu.

Töölistel, kes töötavad suure koguse sulametalli või teiste hõõguvate kehade läheduses, tuleb kindlasti kasutada erilisi kaitseprille. Nendel prillidel on tavaline klaas kaetud õhukese, nähtavatele valguskiirtele peaaegu läbipaistva metallikihiga, kuid infra-

punastele kiirtele on selline prilliklaas täiesti läbipaistmatu. Infrapunaseid kiiri pidurdatakse sageli energia kogumise eesmärgil (kasvuhoonetes). Nähtavad kiired läbivad vabalt kasvuhoone klaaskatuse ja soojendavad kasvuhoones olevaid kehi. Kuumenenud kehad kiirgavad nähtamatuid infrapunaseid kiiri, mis klaaskatuse kaudu väljuda ei saa (klaas ei lase neid läbi), seepärast nad peegelduvad ja jäävad kasvuhoonesse. Aegamööda kogutakse kasvuhoonesse sel teel tunduv hulk soojusenergiat. Kui keskkonnast isoleeritud (ümbritsetud vildi või muu taolise materjaliga) anum täita veega ja katta pealt klaasiga, siis võib vee selles päikesekiirte abil isegi keema ajada. Kehad, mis lasevad läbi valge valguse, võivad osutuda läbipaistmatuteks infrapunaste kiirte suhtes. Näitena võiks tuua klaasi ja vee, mis väga tugevasti neelavad infrapunaseid kiiri. Just seepärast kasutatakse vesifiltreid (klaasvannid veega) projektsiooniaparaatides, näiteks epidiaskoopides. Vesi neelab võimsatest valgusallikatest tulevad infrapunased kiired ja kaitseb samal ajal projekteeritavaid esemeid kahjuliku kuumenemise eest.

Paljud kehad, mis ei lase läbi nähtavat valgust, võivad osutuda läbipaistvateks infrapunastele kiirtele, näiteks eboniit, paber, tahmatud kehad, mitmed mineraalid jne.

Seda kiirte omadust kasutatakse tehnikas ja teaduses. Nii näiteks paljusid mineraale, mis on läbipaistmatud valgetele kiirtele ja läbipaistvad infrapunastele, uuritakse viimaste abil. Tänu aine erinevale neelamisvõimele nähtavas ja nähtamatus valguses õnnestus dešifreerida iidseid dokumente ja tekste.

Infrapunased kiired on leidnud kasutamist ka tööstuses. Nende abil kuivatatakse puitu, keraamilisi esemeid, paberit, nahka, kangaid, emaili ja transformaatori mähiseid, konserveeritavat ning suitsutatavat liha ja kala jne. Kasutades infrapunaseid kiiri värvitud autobusside kuivatamiseks, vähendatakse kuivamise aega ööpäevalt mõne minutini.

Infrapunaste kiirte allikana kasutatakse enamikul juhtudel hõõglampe, mis kiirgavad kuni 90% infrapunaseid kiiri ja ainult 10—12% nähtavat valgust, mis kehadele langemisel on samuti võimeline muutuma infrapunaseks kiirguseks.

Infrapunased kiired leiavad üha laiemat kasutamist ka põllumajanduses vilja, juur- ja puuvilja, tee, tubaka jms. kuivatamisel. On teada, et häguses keskkonnas hajub pikemalaineline valgus vähem. Seepärast on autobussi või trammi punased tuled udus paremini nähtavad kui sinised. Päike näib tõusul ja loojangul, aga samuti udus ning tolmus punasena seepärast, et punased kiired hajuvad vähem kui teised.

Et infrapunaste kiirte lainepikkus on tunduvalt suurem, võrreldes nähtavate kiirtega, siis on nende hajumine ka udus ja pilvedes tunduvalt väiksem. See võimaldab infrapunaseid kiiri kasutada maakohtade fotografeerimiseks lennukilt, mis lendab pealpool pilvi, ja maapinna fotografeerimiseks kuni 20 km kauguselt (infra-

punaste kiirte abil fotografeerimisel piirab kaugust vaid Maa kerakujulisus).

1801. a. avastas Ritter nähtamatud ultraviolettkiired, mis asetsevad väljaspool spektri nähtavat, violetset osa. Need kiired mõjuvad fotoplaadile: kutsuvad esile selle tumenemise. Ultravioletsed kiired kujutavad endast elektromagnetilisi laineid lainepikkusega 0,4 μm kuni 0,0005 μm.

Ultraviolettkiired läbivad küllaltki hästi kvartsklaasi, samal ajal aga tavaline klaas on neile tõsiseks takistuseks. Ultraviolettkiirtel on väga tugev bioloogiline toime, seetõttu on neil looduses suur tähtsus.

Ultraviolettkiirte mõjul valmivad juurviljas ja puuviljas vitamiinid, mis on inimorganismile väga vajalikud. Kiirte toimel toimuvad ka keerukad keemilised reaktsioonid, mille tulemusena tekivad peale vitamiinide veel eeterlikud õlid (tänu neile õlidele võime eraldada õuna, aprikoosi või meloni lõhnu, samuti ka lillede, näiteks kannikese, roosi jt. aroome).

Et ultraviolettkiired hävitavad baktereid, siis võib neid edukalt kasutada vee ja piima steriliseerimisel.

Noorloomade kiiritamisel suureneb loomade kasvutempo.

Võimsaks ultraviolettkiirte allikaks on elektrikaar. Seetõttu tuleb metallkonstruktsioonide elektrikeevitusel tingimata kasutada kaitseprille. Sageli kasutatakse ultraviolettkiiri meditsiinis, tekitades neid kvartslambi abil.

Kvartslampe (ultraviolettkiirte allikaid) paigutatakse koos valgustuslampidega operatsioonisaalidesse, sest nad tagavad steriilsuse operatsiooni ajal.

Ultraviolettkiired mõjuvad hästi inimorganismile, juhul kui kiiritusdoos on väike. Kui inimene pikemat aega ei ole olnud ultraviolettkiirguse mõju all, siis tema töövõime langeb, tekivad avitaminoos ja närvisüsteemi häired. Suuremad ultraviolettkiirguse doosid kutsuvad esile põletushaavu, silma limaskesta põletikku või isegi häireid närvisüsteemis.

Ultraviolettkiired suudavad peaaegu kõiki aineid helendama panna. Seda nähtust nimetatakse *fotoluminestsentsiks* ja sellel rajaneb üks kaasaegseid uurimismeetodeid — luminestsentsanalüüs, mille töötas välja akadeemik S. I. Vavilov.

Põllumajanduses, toiduainetetööstuses ja kaubanduses tehakse luminestsentsanalüüsi abil kindlaks produktide riknemine veel enne, kui see protsess tavalises keskkonnas ilmsiks saab.

§ 128. ELEKTROMAGNETILISTE LAINETE SKAALA

Õppides tundma elektromagnetilisi laineid, nägime, et neil on väga erinevad omadused. Nii näiteks raadiolainete, infrapunaste kiirte, ultraviolettkiirte, röntgenikiirte jt. omadused on erinevad ning see erinevus on tingitud just nende lainepikkusest. Siit järel-

dub, et lainepikkuse muutused (kvantitatiivsed muutused) viivad laine omaduste muutumiseni (kvalitatiivsete muutusteni).

Paljud teadlased on uurinud elektromagnetilisi laineid erinevates lainepikkuste intervallides. Suure tähtsusega olid seejuures Lebedevi ja Glagoljeva-Arkadjeva tööd. Nendega tõestati, et elektromagnetilised lained võib paigutada kindlasse, kahaneva lainepikkuse järjekorda. Saadud järjestust nimetatakse elektromagnetiliste lainete skaalaks ja seda võib väljendada järgmise tabeli kujul.

Laine nimetus	Lainepikkus
Ülipikad lained	1 000 000 km ÷ 15 km
Raadiolained	15 km ÷ 10 cm
Ultraraadiolained	10 cm ÷ 0,1 mm
Infrapunased kiired	100 μm ÷ 0,8 μm
Nähtav valgus	0,8 μm ÷ 0,4 μm
Ultraviolettkiired	0,4 μm ÷ 5 m μm
Röntgenikiired	5 mμm ÷ 0,004 mμm
Gammakiired	0,004 mμm ÷ 0,0001 mμm

Kontrollküsimusi

1. Milliseid kiiri nimetatakse infrapunasteks ja missugused on nende omadused?
2. Kuidas on võimalik avastada infrapunaseid kiiri?
3. Kus kasutatakse infrapunaseid kiiri?
4. Milliseid kiiri nimetatakse ultravioletseteks ja missugused on nende omadused?
5. Kuidas on võimalik avastada ultraviolettkiiri?
6. Kus kasutatakse ultraviolettkiiri?
7. Millest sõltuvad elektromagnetiliste lainete omadused?
8. Mida nimetatakse elektromagnetiliste lainete skaalaks?

XII PEATÜKK

VALGUSE LAINE- JA KORPUSKULAAROLEMUS. VALGUSE TOIME

§ 129. VALGUSE INTERFERENTS

Uurides lainelist liikumist, tutvusime mehhaaniliste lainete interferentsiga, mis seisis ühesuguse sagedusega lainete liitumises. Võnkumised lähtusid erinevatest allikatest, mida nimetasime koherentseteks.

Lainete interferentsi tulemusena saavutatakse reas piirkondades võnkumise tugevnemine (maksimumid). Need tsoonid on üksteisest eraldatud nõrgenenud võnkumise piirkondadega (miinimumidega).

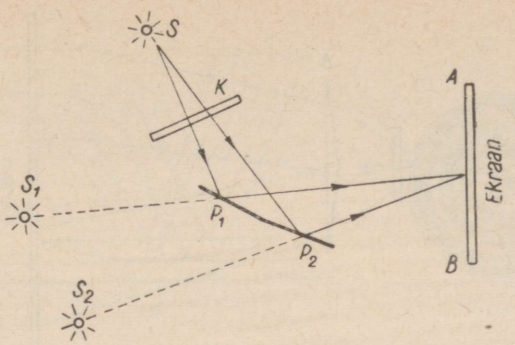
Interferentsipildi maksimumid saadakse nendes lainevälja punktides, kus kahe laine käiguvahe on võrdne paarisarv poollainepikkusi, aga miinimumid seal, kus lainete käiguvahe on paaritu arv poollainepikkusi.

Lainete interferentsiga kaasneb ka energia ümberpaiknemine: ühtedes lainevälja piirkondades energia kasvab, teistes aga vastavalt kahaneb.

Püsiv interferentsipilt võib tekkida vaid sel juhul, kui liituvad lained on ühesuguse sagedusega ja neil ei ole faasinihet üheski punktis. Niisuguseid laineid nimetatakse koherentseteks.

Rohkearvulised katsed näitasid, et valguslainetest, mis lähtuvad kahest erinevast valgusallikast, näiteks kahest elektrilambist, interferentsipilti ei teki. Põhjus on selles, et erinevad valgusallikad kiirgavad mittekoherentseid kiiri. Et koherentseid valgusallikaid ei olnud võimalik tegelikkuses saada, siis kasutasid teadlased kunstlikke võtteid: ühe ning sama valguslaine osad läbisid erinevad teed ning seejärel nad liideti kui kaks koherentset valguslainet. Vaatleme mõnda sellist katset.

1. Katse Fresneli peeglitega. Laseme võimsast punktvalgusallikast S lähtuva valge valguse läbi punase klaasi K, millest ta väljub monokromaatilisena. Monokromaatilise valguse suuname kahele tasapeeglile P_1 ja P_2, mis asetsevad teineteise suhtes pea-

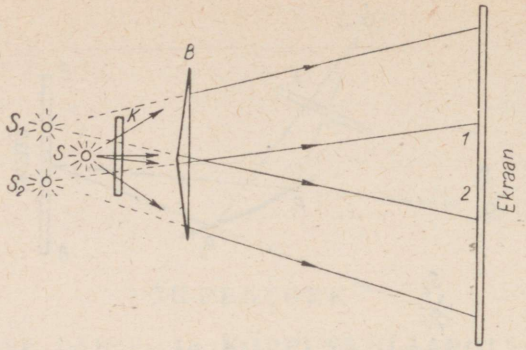


Joon. 196.

aegu 180-kraadise nurga all (joon. 196). Valgusallikalt S tulevad lained peegelduvad peeglitelt P_1 ja P_2, jagunevad kaheks osaks ja moodustavad seega kaks koherentsete lainete süsteemi. Mõlemad süsteemid suunduvad ekraanile AB, kuid kahte erinevat teed mööda. Ekraanil tekib interferentsipilt — punastest ja mustadest ribadest koosnev ala. Samasugune interferentsipilt tekib siis, kui valgus ei lähtu mitte ühest allikast S, vaid kahest koherentsest allikast S_1 ja S_2. Valgusallikad S_1 ja S_2 on tegelikult allika S kujutised peeglites.

Valgustades peeglit järjest kollase, rohelise, sinise jt. värvustega, saame ekraanile esmalt kollased ja tumedad triibud, seejärel rohelised ja tumedad triibud, siis sinised ning tumedad triibud jne., kuid need ei teki täpselt samades ekraani piirkondades. Punase valguse korral on triibud kõige laiemad, violetse korral aga kõige kitsamad. Järelikult lainete liitumisel muutuvad maksimumi ja miinimumi kohad sõltuvalt valguse värvusest. See näitab, et *erineva värvusega valguslainete pikkus on erinev.* Värviliste kiirte lainepikkuse mõõtmine näitas, et punase valguse lainepikkus on suurem kui violetsel. Kui valgustada peegleid valge valgusega, siis tekivad ekraanile värvilised ja tumedad ribad. Niisugune pilt tekib seetõttu, et valge valgus on liitvalgus, mille koostisse kuuluvad mitmesuguse pikkusega valguslained, mis tekitavad interferentsipildi maksimumid ja miinimumid erinevatesse kohtadesse. Tuleks mainida, et tumedate joonte ilmumine interferentsipilti ei ole vastuolus energia jäävuse seadusega, sest valgusenergia ei kao, vaid ainult jaotub ekraani ulatuses ümber. Kui tumedates kohtades on valgustustugevus väiksem, võrreldes kahe koherentse valgusallika valgustustugevuste resultandiga, siis heledates triipudes on see suurem kui pinnavalgustus, mille tekitavad selles punktis kaks ekraanile langevat valguskiirt. Järelikult kogu ekraanile langev valgusenergia hulk jääb muutumatuks.

2. Katse Fresneli biprismaga. Suuname tugevast val-

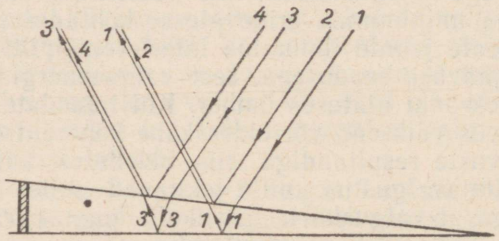


Joon. 197.

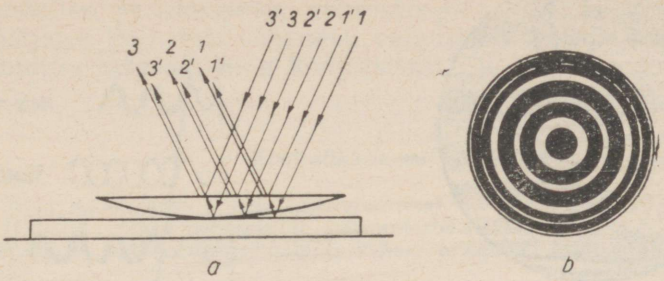
gusallikast S lähtuva valge valguse läbi punase klaasi K ja saadud monokromaatilise valguse (punase) biprismale B. Biprisma koosneb kahest väga väikeste murdvate nurkadega prismast, mille alused on vastamisi asetatud (joon. 197). Et kumbki biprisma pool murrab valguskiire aluse poole, siis jaguneb allikast S tulev valgus kaheks osaks, millest kumbki jõuab ekraanile erinevat teed mööda. Ekraanil tekib valguslainete interferentsipilt, mis koosneb vahelduvatest punastest ja tumedatest joontest. Samasugune interferentsipilt tekib siis, kui ekraanile oleks langenud valgus kahest koherentsest valgusallikast S_1 ja S_2. Valgustades biprismat valge valgusega, saame värvilise interferentsipildi.

3. K a t s e k a h e t a s a p a r a l l e e l s e p l a a d i g a. Asetame ühe klaasplaadi teise peale ja nende vahele ühest otsast kiilutaolise liistu. Seega moodustub plaatide vahel õhukiht, mille paksus ühest äärest teise väheneb järk-järgult (joon. 198). Valgustame plaate monokromaatilise valgusega. Peegeldunud valguses näeme heledaid ja tumedaid jooni, mis on paralleelsed kiilu murdva servaga. Pilt tekib seepärast, et valguskiired peegelduvad nii pealmiselt kui ka alumiselt plaadilt, läbivad igaüks erineva paksusega õhukihi, jagunevad kaheks ja hiljem liitudes annavad interferentsipildi.

Plaatide valgustamisel valge valgusega tekib värviline interferentsipilt.



Joon. 198.



Joon. 199.

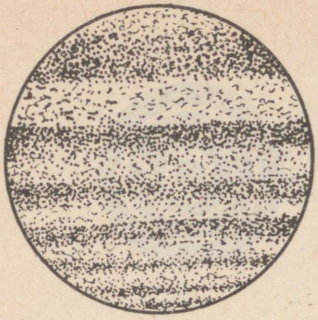
4. Katse klaasplaadile asetatud läätsega. Asetame tasaparalleelsele klaasplaadile, näiteks peegliklaasile või fotoplaadile, väikese kumerusega tasakumera läätse, kumerus allapoole. Plaadi alla paigutame musta paberi (joon. 199, *a*). Valgustame seda süsteemi punase või rohelise valgusega. Peegeldunud valguses võime näha tumedaid ja punaseid või rohelisi rõngaid (joon. 199, *b*). Valge valgusega valgustamisel saame värvilised rõngad, mida nimetatakse Newtoni rõngasteks, sest esimesena vaatles neid Newton aastal 1675 tasakumera läätse abil. Läätse kõverusraadius oli 10 m ja ta oli asetatud peeglile.

Interferentsinähtust kasutatakse tööstuses klaaspinna tasasuse kontrollimiseks. Sel eesmärgil asetatakse kontrollitav pind teisele, juba kontrollitud pinnale ja vaadeldakse siis peegeldunud valguses tekkivat interferentsipilti. Interferentsipildi tekitamiseks kasutatakse valget valgust. Kui pinnad ei ole küllalt tasased, siis õhukiht plaatide vahel ei ole igal pool ühesugune ja neis kohtades ilmneb kohe värviline interferentsipilt.

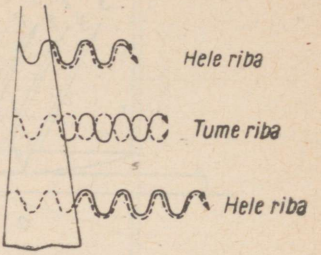
Interferentsimeetodiga võib suure täpsusega kindlaks määrata kehade joonmõõtmeid, näiteks meeteretaloni pikkust.

§ 130. ÕHUKESTE KELMETE VÄRVUS

Kui traatraam asetada seebilahusesse ja seejärel sealt aeglaselt välja võtta, näeme raami sees seebikelmet. Asetame kelme vertikaalselt ja valgustame teda tugevast valgusallikast lähtuva monokromaatilise valgusega. Peegeldunud valguses moodustuvad heledad ja tumedad interferentsijooned (joon. 200). Raskusjõu toimel muutub seebikile kiilutaoliseks, alt servast laiemaks. Valgusallikalt kilele langevad värvilised kiired jagunevad osadeks, sest nad peegelduvad kile eesmiselt ja tagumiselt pinnalt. Tulemusena tekib lainetel optiline käiguvahe ja liitumisel ilmnevad maksimumid ning



Joon. 200.



Joon. 201.

miinimumid. Nendes kohtades, kus faasid ühtivad, lained tugevdavad üksteist; seal, kus faasid on vastupidised — nõrgendavad (joon. 201). Mida paksemaks kile muutub, seda kitsamad interferentsijooned tekivad. Kui kile valgesse valgusse asetada, siis saame interferentsipildis värvilised ribad, kuid nad ei sisalda kõiki spektrivärvusi. See seletub asjaoluga, et valguslainete liitumine toimub erinevate lainepikkuste korral eri faasides. Sellest tingituna mõned värvused tugevnevad, teised nõrgenevad, osa aga hävib hoopis. Värvused, mida näeme kilel, on täiendvärvused neile, mis hävisid interferentsi tõttu.

Värvilise interferentsipildi tekkimist õhukestel kelmetel võib jälgida seebimullikestel, õli- või naftakelmetel, näiteks märgadel tänavatel või veepinnal laeva läheduses, pärlmutris, kuumutatud metalltoodetel jne.

Interferents õhukestes kelmetes leiab praktilist kasutamist terasinstrumentide karastamisel. Kui toode muutub õlgkollaseks, siis järelikult tekkis poleeritud pinnale hapendikiht ja valguse interferentsi tulemusena (see tekkis valguse peegeldumisel kihi alumiselt ja ülemiselt pinnalt) violetsed kiired hävivad. Kihi värvus oleneb tema paksusest, aga paksus omakorda temperatuurist, milleni metalltoode on kuumutatud. Sellist kihi omadust kasutavad töölised, kes määravad toote temperatuuri «silma järgi».

Kui läätsed ja prismad optika- ja mõõteriistades katta niivõrd õhukese kilega, et valguslainete käiguvahe on väiksem violetse valguse poollainepikkusest, siis valge valguse peegeldumisel mõlemalt kile pinnalt on kõikide värvustega lained vastupidistes faasides ja interferentsi tulemusena valgus peaaegu kustub. Sel juhul ei esine mingeid kõrvalhäireid valguse peegeldumisel klaasidelt, ei teki silmipimestavaid valguslaike ja suureneb optilist riista läbivate kiirte hulk.

Nõukogude õpetlane I. V. Grebenštšikov töötas välja meetodi klaasi katmiseks õhukeste fluormagneesiumist või krüoliidist kelmetega paksusega ligi 0,14 μm. Selline kile kõrvaldab mitme-

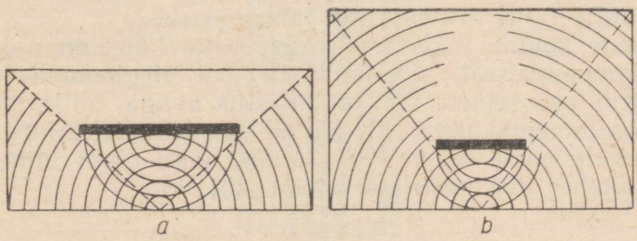
kordse peegeldumise keerulistes optilistes riistades (fotoaparaatides, binoklites, periskoopides, mikroskoopides, teleskoopides, kaugusemõõtjates jm.), mis vähendab valguskadu ja suurendab saadava kujutise heledust ning kontrastsust.

Kontrollküsimusi

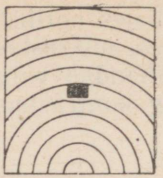
1. Mida nimetatakse lainete interferentsiks?
2. Milliseid laineid nimetatakse koherentseteks?
3. Miks ei tekita interferentsipilti kahest erinevast valgusallikast lähtunud kiired?
4. Kuidas on võimalik tekitada interferentsi Fresnelʼ peegli abil?
5. Milline on interferentsipilt, mis tekib Fresneli peeglist valges valguses?
6. Kuidas muutub Fresneli peegli abil tekitatud interferentsipilt, kui kasutada punaseid kiiri? siniseid kiiri?
7. Kuidas on võimalik tekitada värviliste kiirte interferentsipilti Fresneli biprisma abil?
8. Milline interferentsipilt saadakse kahe tasaparalleelse plaadi valgustamisel monokromaatilise valgusega, kui plaatide vahele jääb õhuke õhukiil?
9. Mis on Newtoni rõngad ja kuidas neid tekitada?
10. Millega seletada värviliste joonte tekkimist veepinnal laialivalgunud tumedal petrooleumikihil?
11. Kus kasutatakse valguse interferentsinähtust?

§ 131. LAINETE DIFRAKTSIOON

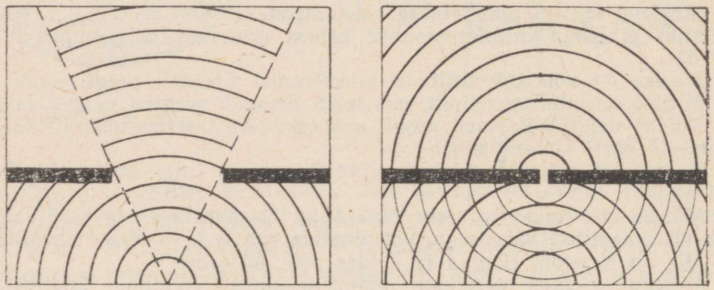
Lained, mis tekivad veepinnal ja levivad mingi takistuseni, näiteks veest väljaulatuvate kaljudeni, jäämäeni või betoonseinani, peegelduvad sageli, kuid osaliselt liiguvad endises suunas edasi, möödudes takistuse servadest. Kui takistuse mõõtmed on väga palju kordi suuremad lainepikkusest, siis levib laine edasi sirgjooneliselt ja takistuse taha moodustub piirkond, kus lained puuduvad (vaikuse ehk varju piirkond). Alles tublisti kaugemal takistusest lõpeb varju piirkond, s. o. lained painduvad seal tõkke taha (joon. 202, *a*).



Joon. 202.



Joon. 203.



Joon. 204.

Kui aga takistuse mõõtmed on vaid paar korda suuremad lainepikkusest, siis lained painduvad tõkke taha ja varju piirkond väheneb tublisti (joon. 202, *b*).

On aga takistuse mõõtmed väiksemad lainepikkusest, siis painduvad lained täielikult tõkke taha ja levivad edasi nii, nagu teel ei olekski olnud mingit takistust (joon. 203). *Lainete paindumist tõkete taha nimetatakse lainete difraktsiooniks.* Difraktsiooninähtust võib tähele panna ka häälelainete juures. Puud pargis ei sega linnulaulu kuulamist, samal ajal aga suure hoone tagant see välja ei kosta. Et puude diameeter on väiksem häälelaine pikkusest, siis painduvad lained kergesti puude taha. Hoonete mõõtmed on aga suured, võrreldes häälelaine pikkusega, seepärast siin sellist paindumist ei esine.

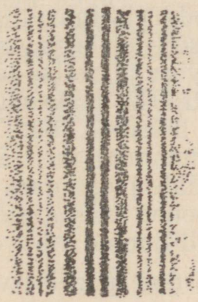
Lainete difraktsiooni võib täheldada ka lainete läbiminekul avadest, mille laius erineb vähe lainepikkusest.

Kui laine kohtab takistust avaga, mille laius on palju kordi suurem lainepikkusest, siis läbib ta ava sirgjooneliselt (joon. 204, *a*). Kui aga lainete teel on takistus avaga, mille laius jääb väiksemaks lainepikkusest, siis pärast ava läbimist lained painduvad mõlemale poole tõkete taha. Näib, nagu oleks laine tsenter asetunud ümber ava tsentrisse (joon. 204, *b*).

Niipea kui Fresnel oli esitanud valguse laineteooria, arvutasid teadlased Poisson ja Arago selle teooria alusel välja ja tõestasid ka matemaatiliselt, et läbipaistmatu kera varju tsentris peab tekkima hele valgustäpp. Sellist väidet loeti absurdseks ja kasutati laineteooria ümberlükkamiseks.

Fresnel leidis sobivad tingimused niisuguse katse sooritamiseks ning saigi tumeda varju keskel heleda täpi. Kuidas võis see tekkida? Nähtus on seletatav punktvalgusallikast väljuvate kiirte difraktsiooniga. Valguslained, mis paindusid kera taha, sisenesid varju piirkonda ja pidid varju tsentrisse jõudmiseks läbima võrdse teepikkuse, olenemata sellest, millisest kera servast nad lähtusid. Sel juhul jõuavad kiired varju tsentrisse *samas faasis* ja liitumisel tugevdavad teineteist. Tekib hele täpp. Teistes piirkondades lained liituvad kord vastupidises, kord samas faasis ja ekraanile ilmuvad kontsentrilised tumedad ning heledad rõngad. Et valguslaine pikkus on väiksem kui 1 μm, tuleb valguse difraktsiooni täpsemaks jälgimiseks kasutada tõket, mille mõõtmed erinevad vähe valguslaine pikkusest, või asetada ekraan tõkkest väga kaugele ja kasutada väga tugevat punktvalgusallikat.

Valguse difraktsiooni vaatlemiseks võib teha järgmise katse: võtame peenikese traadi ja valgustame seda võimsast punktvalgusallikast tuleva monokromaatilise, näiteks rohelise valgusega. Sel juhul saame terava valgusriba just selles kohas, kus tekiks vari, kui kiired leviksid sirgjooneliselt (joon. 205). Mõlemale poole keskjoont tekivad tumedad ja heledad triibud järjest väheneva heledusega. Valguskiirte difraktsiooni tõttu saadakse interferentsipilt, sest valguslained painduvad traadi taha ja jõuavad varju tsentrisse samas faasis. Varju tsentris kohtuvad kiired annavadki keskmise heleda triibu. Keskmise triibu kõrval liituvad järjest valguslained kord samades faasides, siis jälle vastupidistes jne., ning annavad seega keskmise triibuga paralleelsed tumedad ja heledad jooned.



Joon. 205.

Kui kasutada valget valgust, siis tekivad heledate triipude asemel värvilised jooned.

Valguse difraktsiooninähtusega kohtume igapäevases elus sageli. Näiteks kui vaadata läbi uduse akna tänavalaternat, siis näeme selle ümber vikerkaarevärvilisi rõngaid. Värviliste rõngaste tekkimist võib seletada erineva lainepikkusega valguskiirte interferentsiga. Interferentsipilt tekib sel juhul valguslainete difraktsioonist aknaklaasil leiduvatel väikestel veetilkadel. Samasugune nähtus esineb ka valge valgusega, kui ta levib udušes, suitsuses või tolmuses õhus. Pakasega võib Päikese või Kuu ümber näha vikerkaarevärvilisi ringe, mis tekivad valguskiirte difraktsiooni tõttu. Difraktsiooni kutsuvad siin esile õhus olevad tillukesed jääkristallid.

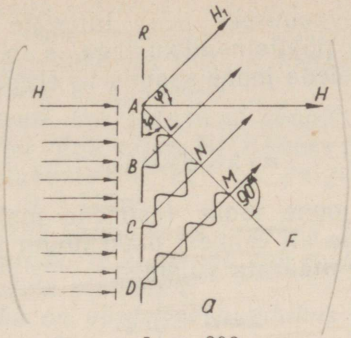
Kui pilukil silmadega elektrilambi hõõgniiti vaadata, siis näeme radiaalselt ümber valgusallika värvilisi jooni. Need tekivad seetõttu, et valguslained painduvad ripsmete taha. Kui vaadata seda niiti läbi tiheda kammi, linnusule või õhukese valge riide, siis võib sama nähtust jälgida.

§ 133. DIFRAKTSIOONIVÕRE JA VALGUSE LAINEPIKKUSE MÄÄRAMINE

Suur hulk peenikesi paralleelseid pilusid, mis asuvad lähestikku üksteisest võrdsetel kaugustel, moodustavad *difraktsioonivõre*.

Tihe kamm, linnusulg või ripsmed kujutavad endast samuti difraktsioonivõret. Fraunhofer kasutas väga peenikestest paralleelsetest traatidest valmistatud difraktsioonivõret. Traadid pingutati sirgeks kahe keermestatud poldi abil. Sageli kasutatakse difraktsioonivõrena klaasplaati, millele teemantteraga varustatud erilise seadme abil on kantud tihedad kitsad jooned. Piludeks on sellises võres kitsad joontevahemikud. Difraktsioonivõre abil on lihtne tekitada valguslainete difraktsioonipilti, millega kaasneb ka interferentsipilt. Langegu monokromaatiline valgus risti difraktsioonivõrega (joon. 206). Tänu difraktsioonile pilude servadel levivad need lained kõikides suundades. Iga pilu difraktsioonipilt on ühesugune. Difraktsiooni ja sellele järgneva interferentsi tulemusena saadakse ekraanil pärast võre ja läätse läbimist hele monokromaatiline tsentraaljoon — nulljärku maksimum — ning mõlemas suunas tsentraaljoonest rida heledaid jooni järjest kahaneva heledusega — esimest, teist, kolmandat jne. järku maksimumid, mis on üksteisest eraldatud tumedate joontega.

On teada, et heledad jooned tekivad sel juhul, kui lained liituvad samas faasis. Niisugune liitumine võib aset leida ainult siis, kui lainete käiguvahe on võrdne paarisarv poollainepikkusi: $2 \cdot \frac{\lambda}{2}$; $4 \cdot \frac{\lambda}{2}$; $6 \cdot \frac{\lambda}{2}$ jne.



Joon. 206.

Tumedad jooned saadakse siis, kui lained liituvad vastasfaasides, s. o. juhul, kui lainete käiguvahe liitumisel on paaritu arv poollainepikkusi: $\frac{\lambda}{2}$; $3 \cdot \frac{\lambda}{2}$; $5 \cdot \frac{\lambda}{2}$ jne.

Joonisel 206 on kujutatud skemaatiliselt ainult üks laine võimalikest levimissuundadest H_1, mis moodustab laine esialgse levimissuunaga H nurga φ. Kõikide võimalike levimissuundade kujutamine joonisel oleks liiga keeruline.

Elementaarlaine pilust B jääb pilust A lähtuvast elementaarlainest maha teepikkuse BL võrra. Laine pilust C jääb maha lainest pilust A teepikkuse CN võrra jne. Et kõik pilud asuvad üksteisest võrdsetel kaugustel, siis on CN kaks korda suurem BL-st. Kui BL on võrdne monokromaatilise valguse lainepikkusega (λ), siis CN on võrdne kahe lainepikkusega (2λ) jne. Sel juhul on kõik elementaarlained piki sirget AF ühes faasis ja sirge AF, mis on risti suunaga H_1, saab seega uueks lainefrondiks. Kui kõik need lained ekraanile fokuseerida, saame heleda riba.

Et pilu läbinud valguse levimissuundi on väga palju, siis, koondades ja suunates kõik lained ekraanile, saame seal täieliku difraktsioonipildi koos interferentsiga, mis annab ekraanil vahelduvad heledad ja tumedad jooned.

Kirjeldame antud nähtust matemaatiliselt.

Tähistame d-ga pilu laiuse koos läbipaistmatu naaberalaga. Suurust d nimetatakse *võrekonstandiks* ehk *perioodiks* (tavaliselt on võrekonstant igale võrele peale märgitud). Sel juhul $d = AB = BC = \ldots$

Jooniselt näeme, et $\frac{BL}{AB} = \sin \varphi$

ehk

$$\frac{BL}{d} = \sin \varphi,$$

kust

$$BL = d \cdot \sin \varphi.$$

Valguslaine tugevnemiseks peab liituvate lainete käiguvahe võrduma paarisarvu poollainepikkustega, s. o. λ, 2λ, 3λ, $4\lambda \ldots$, $n\lambda$. Järelikult peab heleda joone saamiseks ekraanil olema täidetud tingimus $BL = n\lambda$.

Siit saame:

$$n \cdot \lambda = d \cdot \sin \varphi.$$

Esimese heleda joone jaoks (esimene maksimum) on $n = 1$. Mõõtes nurga φ, mille all esimest maksimumi vaadeldakse, võime valguse lainepikkuse määrata valemist

$$\lambda = d \cdot \sin \varphi.$$

Selline lainepikkuse määramise meetod on lihtne ja annab suurepäraseid tulemusi.

Kontrollküsimusi

1. Milles seisab valguse difraktsioon ja milliste tingimuste juures ta tekib?
2. Milliste katsete abil võib avastada valguse difraktsiooni?
3. Mida me näeme, kui vaatame hõõglambi valgust läbi karukollaeostega kaetud õlise klaasplaadi?
4. Mida me näeme, kui liimime kaks žiletitera klaasplaadile nii, et nende vahele jääb väga väike pilu, ja vaatleme siis läbi selle lambi hõõgniiti. Vaatlemisel hoida plaati silmale võimalikult lähedal. Sooritage see katse ja seletage tulemust.
5. Mida me näeme, kui jälgime hõõgniiti läbi linnusule? Mida võib märgata, kui vaatluse ajal pead pöörame? Sooritage katse ja andke seletus.
6. Mida nimetatakse difraktsioonivõreks ja kuidas on selle abil võimalik määrata monokromaatilise valguse lainepikkust?

§ 134. VALGUSE RÕHK

Paljude vaatluste tulemusena tegid astronoomid kindlaks, et komeedi lähenemisel Päikesele ilmub tal saba. Viimane on alati suunatud Päikesest eemale ja seda rohkem, mida lähemale komeet Päikesele jõuab. 1619. a. tegi astronoom Kepler oletuse, et komeedi saba pöördub Päikesest eemale valguse rõhu tõttu.

Valguse rõhu olemasolu tõestas teoreetiliselt XIX sajandi 70-ndatel aastatel Maxwell. Valguse rõhk järeldus otseselt tema loodud valguse elektromagnetilisest teooriast. Oli teada, et nii lained veepinnal kui ka häälelained, jõudes takistuseni, avaldavad sellele rõhku. Selline omadus on kõikidel laineprotsessidel. Et valgus kujutab endast Maxwelli teooria järgi elektromagnetilisi laineid, siis peab ka valgusel olema rõhk.

Erakordselt tähtis oli katseliselt tõestada valguse rõhu olemasolu, sest oletused osutuvad ainult siis õigeteks, kui nad leiavad kinnitust praktikas.

Kolmekümne aasta jooksul töötasid mitmete maade teadlased selle keeruka probleemi lahendamisel. Näiteks Fresnel ja Crookes

püüdsid pikemat aega katseliselt näidata valguse rõhu olemasolu, kuid tagajärjetult. Oma panuse selle küsimuse lahendusse andis vene füüsik P. N. Lebedev, kes 1899. a. tõestas valguse rõhu tahketele kehadele ja 1909. a. gaasidele.

Niisuguste katsete korraldamine nõudis suurt meisterlikkust, sest valguse rõhk on väga väike. Nii näiteks musta pinna valgustamisel normaalisuunaliste kiirtega on valguse rõhk 0,26 mG/m² ehk ligikaudu $26 \cdot 10^{-7}$ N/m².

Katsete tulemused formuleeris Lebedev järgmiselt.

1. *Langev valguskiirte kimp avaldab rõhku nii kiiri neelavatele kui ka peegeldavatele pindadele.*

2. *Valguse rõhk on võrdeline ajaühikus pinnaühikule langeva valgusenergia hulgaga.*

Lebedevi katsetel oli suur teaduslik tähtsus.

Esiteks olid nad tõsiseks kontrolliks Maxwelli elektromagnetilisele teooriale, mis käsitles valgust lainenähtusena ning eeldas seega ka valguse rõhu olemasolu.

Teiseks andsid need võimaluse õigesti hinnata valguse rõhu suurt mõju üliväikeste osakeste liikumisele maailmaruumis.

Kolmandaks panid nad aluse uuele õpetusele massist, sest Lebedevi katsetest järeldus, et valgusel on mass ja seepärast peab kiirgumisel olema täidetud massi ja energia pidevuse ning ühtsuse printsiip.

Tõepoolest, Maxwelli teooriast järeldub, et valguse rõhk on võrdne pinnaühiku poolt sekundis neelatud energia ja valguskiiruse jagatisega, s. o.

$$p = \frac{E}{c},$$

kus p on rõhk, E — sekundis neelatud valgusenergia, c — valguskiirus.

P. N. Lebedev tõestas, et valguse rõhk absoluutselt mustale pinnale on võrdne valgusosakeste massi ja kiiruse korrutisega (impulsiga), s. o.

$$p = m \cdot c.$$

Siit saame võrduse:

$$\frac{E}{c} = m \cdot c$$

ehk

$$E = m \cdot c^2.$$

Järelikult ei esine energiat massita ega massi energiata, s. t. mateeria on energiakandjaks. Sellisel järeldusel on erakordselt suur tähtsus kaasaegses füüsikas üldse ja aatomifüüsikas eriti, seda just tuumaenergia arvutamisel.

P. N. Lebedev tõestas ümberlükkamatult valguse materiaalsuse,

mateeria ja liikumise lahutamatuse ning elektromagnetilise välja materiaalsuse.

P. N. Lebedevi katsed näitasid, et *valgus (ja kiirgus üldse) ei ole puhas energia, ei ole ainult liikumine, vaid nagu ainegi mateeria kvalitatiivselt erinev vorm.*

Akadeemik S. I. Vavilov kirjutas artiklis «Valgusnähtuste dialektika», pidades silmas P. N. Lebedevi katseid: «Sellest momendist... muutus valgus täiesti põhjendatult füüsika jaoks üheks liikuva mateeria vormiks ja selles sünteesis kadus igaveseks valguse vastandamine mateeriale.»

Valguse rõhu olemasolu tõestamine P. N. Lebedevi poolt on vene teaduse triumfiks.

§ 135. FOTOEFEKT. VALGUSKVANDI MÕISTE

Laeme elektromeetriga ühendatud tsinkplaadi kõrge negatiivse potentsiaalini (joon. 207). Valgustame plaati tugeva valgusallikaga, mis saadab välja ultravioletseid kiiri, näiteks elektrikaare valgusega. Näeme, et metallplaat kaotab kiiresti laengu. Kordame katset, asetades valguskiire teele paksu klaasplaadi, mis ei lase läbi ultraviolettkiirgust. Näeme, et plaat ei kaota laengut. Teistest metallidest, näiteks kaaliumist, naatriumist, rubiidiumist, tseesiumist plaadid kaotavad negatiivse laengu ka nähtava valguse toimel.

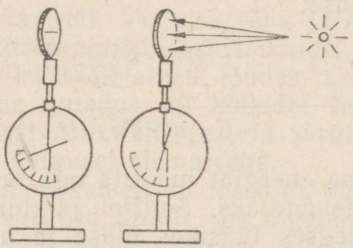
Laeme tsinkplaadi kõrge positiivse potentsiaalini, valgustame teda elektrikaarega ning veendume, et ta ei kaota laengut.

Negatiivse laengu kadumist metallkehadelt nende valgustamisel nimetatakse väliseks fotoelektriliseks efektiks ehk lihtsalt väliseks fotoefektiks.

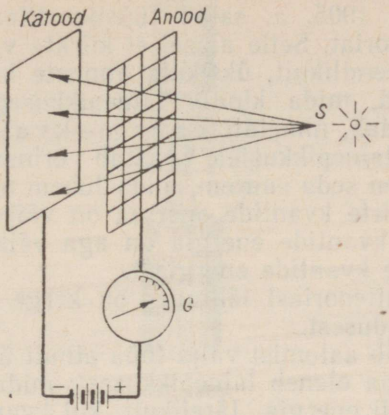
Fotoefekti avastas 1887. a. saksa füüsik Hertz. Uurides sädelahendust, leidis ta, et kui negatiivset elektroodi valgustada elektrikaarega (elektrikaar kiirgab ultravioletseid kiiri), siis algab lahendus elektroodide vahel madalama pinge juures.

1888. a. hakkas fotoefekti uurima kuulus vene teadlane A. G. Stoletov.

Stoletovi katsed olid järgmised.



Joon. 207.



Joon. 208.

Kaks metallelektroodi — üks plaadi- ja teine võrgukujuline — paigutati vertikaalasendisse teineteise vastu (joon. 208). Plaadikujuline elektrood ühendati patarei negatiivse poolusega (oli katoodiks) ja teine positiivse poolusega (oli anoodiks). Ahelasse lülitati järjestikku galvanomeeter. Pimedas puudus ahelas vool. Kuid tarvitses vaid katoodi heledasti valgustada (elektrikaarega), kui ahelasse ilmus kohe vool. Tähendab, valguse toimel eralduvad katoodi pinnalt elektronid, mis suunduvad anoodile.

Välise fotoefekti elektroonse päritolu tõestas 1899. a. saksa füüsik Ph. Lenard, kes tegi ühtlasi kindlaks, et valguse poolt väljalöödud elektronide kiirus ei olene valguse intensiivsusest.

Fotoefekti igakülgne uurimine võimaldas teha kaks olulist järeldust.

1. *Kui metallile langeb kindla lainepikkusega valgus, siis on fotovoolu tugevus võrdeline neelatud valgusenergia hulgaga* (Stoletovi seadus).

2. *Metallist väljunud elektronide kiirus on võrdeline valguslaine sagedusega ega olene pinna valgustustugevusest* (Einsteini seadus).

Einsteini poolt teoreetiliselt tuletatud seadust kontrollisid 1928. a. katseliselt nõukogude füüsikud P. I. Lukirski ja S. S. Priležajev. Mida väiksem on valguse lainepikkus, seda suurem on tema võnkesagedus ja seda suurema kiiruse omandavad väljuvad elektronid. Nii näiteks ultravioletsete kiirte poolt väljalöödud elektronidel on kiirus suurem kui violetsete kiirte poolt väljalöödud elektronidel.

Nähtus oli vastuolus valguse laineteooriaga. Tõepoolest, laineteooria seisukohalt peab väljunud elektronide kiirus olema seda suurem, mida suurem on valgusallika poolt kiiratav energia. Katsed aga ei kinnitanud sellist järeldust. Fotoefekti selgitamiseks

kasutas Einstein 1905. a. saksa füüsiku Plancki poolt esitatud valguse kvantteooriat. Selle alusel ei kiirata valgust mitte pideva voona, vaid katkendlikult, üksikute annuste kaupa. Neid valgusenergia annuseid, mida kindla lainepikkusega valgust kiirgav aatom välja saadab, nimetati *energiakvantideks*.

Erinevatele lainepikkustele vastab erinev kvandi energia. Kvandi energia on seda suurem, mida lühem on lainepikkus. Järelikult punaste kiirte kvantide energia on väiksem kui violetsetel. Violetsete kiirte kvantide energia on aga väiksem ultravioletsete või röntgenikiirte kvantide energiast.

Valguse kvantteooriast lähtudes on kerge aru saada ka fotoefekti teisest seadusest.

Üks kvant võib aatomist välja lüüa ainult ühe elektroni.

Kvandi energia oleneb lainepikkusest: mida lühem laine, seda suurem on kvandi energia. Järelikult, kui kvandi energia muutub elektroni kineetiliseks energiaks, siis oleneb ka elektroni kiirus valguse lainepikkusest. Elektroni kiirus peab olema seda suurem, mida väiksem on valguse lainepikkus (või mida suurem tema sagedus). Ühe kiirguskvandi energia on seotud võnkesagedusega järgmise seaduspärasuse põhjal:

$$\varepsilon = h \cdot \nu,$$

kus h on Plancki konstant, ν — sagedus. Katseliselt on leitud ka h väärtus, s. o. $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg · s $= 6{,}62 \cdot 10^{-34}$ J · s.

Kui valguskvandi energiast ei piisa selleks, et ületada elektroni väljumistööd, siis fotoefekti ei teki. Valguse lainepikkuse vähenemisega suureneb võnkesagedus ja järelikult ka iga valguskvandi energia. Mingil kindlal võnkesagedusel muutub kvandi energia küllalt suureks, et välja lüüa elektrone — tekib fotoefekt. Seejuures kulutatakse footoni energia elektroni väljumistöö A ületamiseks ja elektronile kineetilise energia $\frac{mv^2}{2}$ andmiseks:

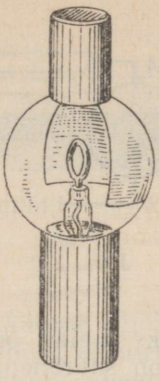
$$h \cdot \nu = A + \frac{mv^2}{2}.$$

Kui $h\nu \leqslant A$, siis $v = 0$ ja fotoefekti ei toimu. Igale ainele vastab kindel võnkesagedus, millest madalamal sageduse väärtusel fotoefekti ei teki. Valguskvantide olemasolu on katseliselt tõestatud.

§ 136. FOTOELEMENDID JA NENDE RAKENDAMINE

Riistu, mille ehituse aluseks on fotoefekt, nimetatakse *fotoelementideks*.

Fotoelemente on kolme liiki: 1) välise fotoefektiga; 2) seesmise fotoefektiga ja 3) ventiilfotoelemendid ehk tõkkekihiga fotoelemendid, mis tegelikult kujutavad endast elektrivoolu generaatoreid.



Joon. 209.

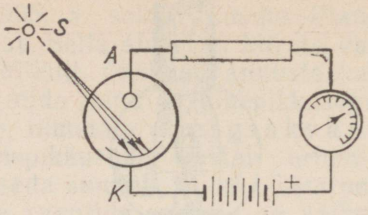
Välise fotoefektiga fotoelemendi eelkäijaks on A. G. Stoletovi katseseade. Seda tüüpi kaasaegsed fotoelemendid koosnevad klaasballoonist, mille sisepinnale on kantud valgustundlik kiht (joon. 209). Kui kasutatakse ultraviolettkiiri, siis tehakse fotoelement kvartsklaasist. Valgustundliku kihiga on ühendatud üks elemendi klemmidest ning kihti ennast kasutatakse katoodina. Anoodiks on ballooni sisse joodetud traatrõngas. Tavaliselt on balloonis vaakuum, kuid vahetevahel täidetakse ta mõne inertgaasiga, näiteks neooni või argooniga.

Kui vaakuumfotoelemendid annavad ühe luumeni kohta voolu 5 μA kuni 30 μA, siis gaasiga täidetud fotoelementide puhul on voolu suurus vastavalt 30 μA kuni 700 μA. Fotovoolu suurenemine saavutatakse gaasi (argooni või neooni) ionisatsiooni arvel, mille kutsub esile katoodist väljunud elektronide voog. Suurenemine on seda tunduvam, mida kõrgem on patarei pinge. Väga suurtel pingetel võib gaas muutuda juhiks ka siis, kui katoodi ei valgustata, seepärast töötavad sellised fotoelemendid tavaliselt pingel 250—300 V.

Mitte kõik metallid ei sobi fotoelementide valmistamiseks. Sellised metallid, nagu tsink, vask, raud, plaatina, nikkel ja volfram, on tundlikud ainult ultraviolettkiirte suhtes ega kiirga üldse elektrone nähtava valguse toimel.

Metallides, nagu naatrium, kaalium, rubiidium, tseesium jne., tekib fotoefekt juba nähtava valguse korral, seepärast kasutatakse gi fotokatoodide valmistamiseks sageli just viimaseid.

Kaasaja fotoelementide katoodid on keerulise ehitusega. Näiteks kantakse klaasballooni pinnale esmalt hõbedakiht, see kaetakse pealt veel õhukese tseesiumoksiidi kilega, mida omakorda katab üliõhuke tseesiumikiht. Selline katood on eriti tundlik ainult teatud lainepikkuste intervallis. Nii näiteks hapnik-tseesiumfotoelement on eriti tundlik punastele ja infrapunastele kiirtele, mida leidub küllaldases koguses ka tavalise valgusallika kiirguses. Seda keerulise ehitusega katoodi omadust nimetatakse valikfotoefektiks



Joon. 210.

ehk selektiivseks fotoefektiks. Laialt on levinud ka antimon-tseesiumfotoelemendid, millel on suurenenud tundlikkus sinakasroheliste kiirte suhtes. Välise fotoefektiga fotoelemendi ühendamine ahelasse toimub joonisel 210 näidatud viisil.

Laialt on levinud pooljuhtfotoelemendid ehk nn. seesmise fotoefektiga ja tõkkekihiga fotoelemendid. Kui võtta seleenplaat ja ühendada see skeemi nii, nagu näidatud joonisel (joon. 211), siis pimedas voolu ahelas peaaegu ei ole. Seleen on pimedas halb voolujuht — ta juhtivus on ligikaudu 70 miljardit korda väiksem vase juhtivusest. Kui aga seleenplaati valgustada, siis kasvab vool ahelas järsult. Selliseid fotoelemente nimetatakse fototakistiteks. Fototakistite töö aluseks on seesmine fotoefekt. Valguse toimel lüüakse pooljuhi aatomitest välja elektrone, mis jäävad ainesse, suurendades selle elektrijuhtivust.

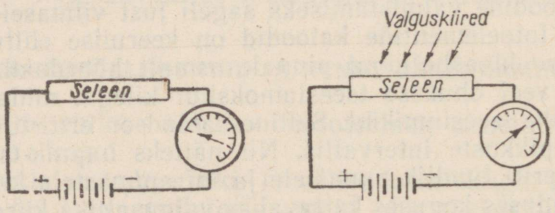
Erilise ehitusega on tõkkekihiga ehk ventiilpooljuhtfotoelemendid. Siia kuuluvad vaskoksiid- (kuproks-), talliumsulfiid- jt. fotoelemendid.

Ventiilfotoefekti avastas 1888. a. vene teadlane V. A. Uljanin.

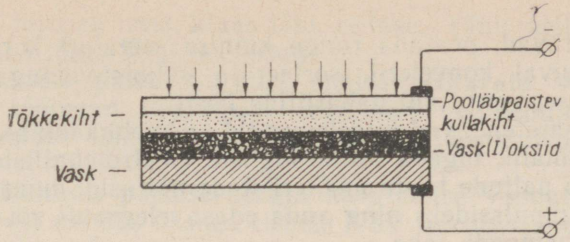
Ventiilfotoelemendid töötavad välispingeta ning on ise fotoelektromotoorse jõu allikateks.

Vaatleme näitena kuproksfotoelementi. Vaskplaadile kantakse kiht vaskoksiidi, mis kaetakse õhukese poolläbipaistva kullakihiga (joon. 212).

Kui valgus langeb kullakihile, siis tekib kulla ja vaskoksiidi piirkihis potentsiaalide vahe. Seejuures laadub kullakiht negatiivselt. Kui ühendada kullakiht juhtme abil vasega, siis tekib juhtmes elektronide vool kullast vasele.



Joon. 211.



Joon. 212.

Potentsiaalide vahe tekkimine üliõhukeses piirkihis (kulla ja vaskoksiidi vahel) viitab sellele, et piirkihi elektritakistus on suur, mistõttu seda hakati tõkkekihiks nimetama.

Kuproksfotoelemendis toimub fotoefekt järgmiselt: poolläbipaistva metallikihi läbinud valguskvandid löövad vaskoksiidi pinnakihist välja elektrone, andes neile samal ajal ka küllaldase kineetilise energia. Seetõttu läbivad elektronid tõkkekihi ning laevad kullakihi negatiivselt. Vaskoksiidi pealmise kihi aatomites vabanenud kohad täidetakse kohe järgmise aatomitekihi elektronidega; teises kihis tekkinud vakantsid jällegi kolmanda kihi elektronidega jne. Sellist juhtivusmehhanismi nimetatakse aukjuhtivuseks.

Laialdaselt kasutatakse talliumsulfiid-fotoelemente, mis on väga tundlikud nähtavas valguses ja infrapunastes kiirtes. Nende ehitus on printsiibis sama mis kuprokselementidelgi. Talliumsulfiid-fotoelementide kasutegur on ligikaudu 1%. Fotoefekt toimub siin järgmiselt: valguskvandid läbivad poolläbipaistva kullakihi ja löövad talliumsulfiidi ülemise kihi aatomitest välja elektrone, mis muutuvad seega vabadeks. Vabanenud kohtadele tulevad läbi tõkkekihi elektronid, mis eraldusid metallist valguse toimel. Seejuures laadub valgustatav metall elektronide loovutamise tõttu positiivselt ja pooljuhil öeldakse olevat elektronjuhtivus. Talliumsulfiid-elemendis on voolu suund ahela välisosas vastupidine, võrreldes voolu suunaga kuproksfotoelemendi välisosas.

Fotoelemente kasutatakse tehnikas laialdaselt. Paljusid helikino, fototelegraafi, televisiooni, automaatikat ja telemehhaanikat puudutavaid probleeme oleks fotoelementideta võimatu lahendada. Kui ühendada galvanomeeter fotoelemendiga ja gradueerida see luksides, siis saame väga tundliku luksmeetri, mida võib edukalt kasutada fotomeetrias. Fotoelementide abil kontrollitakse kanga ja paberi pleegitamist, pindade töötlemise puhtust, gaaside ja vedelike läbipaistvuse astet, ahjude temperatuuri metallurgias jne. Võimendi ja lülitusmehhanismiga ühendatud fotorelee võib automaatselt lülitada sisse ning välja tänavavalgustuse. Samuti võib fotorelee süüdata tuletornid ja boid, lülitada sisse ventilatsiooni, kui õhku koguneb tolmu, lülitada ümber valtsimispinkide elektrimootoreid, kui toode väljub valtside vahelt, avada auto lähenemisel

garaaži väravad, peatada ronge kinnise semafori korral, lugeda tooteid liikuval konveieril, sorteerida valmistoodangut värvuse, toote puhtuse, vormi või gabariitide järgi.

Suurt osa etendavad fotoelemendid telemehhaanikas, kus nende abil on võimalik lugeda mitmesuguste elektrotehniliste, meteoroloogiliste ja paljude teiste mõõteriistade näitusid, muuta need näidud elektriimpulssideks ning anda edasi telegraafi või raadio teel kaugete vahemaade taha.

Kontrollküsimusi

1. Kes põhjendas ja millal teoreetiliselt valguse rõhu olemasolu?
2. Kes ja kuidas tõestas katseliselt valguse rõhu gaasidele ja tahketele kehadele?
3. Kui suur on valguse rõhk?
4. Kuidas sõnastas P. N. Lebedev valguse rõhu alal tehtud katsete tulemused?
5. Milles seisab P. N. Lebedevi katsete teaduslik tähtsus?
6. Mida nimetatakse väliseks fotoefektiks ja kes selle avastas?
7. Millal ja kes alustas fotoefekti uurimist?
8. Kuidas kõlavad fotoefekti seadused?
9. Miks ei saa fotoefekti teist seadust põhjendada valguse laineteooria abil?
10. Mida nimetatakse valguskvandiks ja kuidas on tema energia seotud võnkesagedusega?
11. Kuidas põhjendada fotoefekti teist seadust valguse kvantteooria seisukohalt?
12. Kuidas on ehitatud välise fotoefektiga fotoelement ja kuidas seda ahelasse ühendada?
13. Kuidas on ehitatud kuprokselement?
14. Tooge näiteid fotoelementide kasutamise kohta.

§ 137. VALGUSE SOOJUSLIK JA KEEMILINE TOIME

1. Kehadele langev valgus osaliselt peegeldub, osaliselt tungib kehasse ja neeldub, muutudes teisteks energialiikideks. Kõige sagedamini muutub valgusenergia keha siseenergiaks, mille tulemusena keha soojeneb. Teab ju igaüks, et keha soojeneb päikesekiirte mõjul.

Ühe minuti jooksul 1 cm^2 suuruse pinnaga risti langev päikeseenergia hulk on ligikaudu võrdne kahe kaloriga.

Võib tähele panna, et valged kehad soojenevad vähem kui mustad, sest valge pind peegeldab rohkem kiiri tagasi kui must. Sellised kehad nagu tahm või must samet neelavad 98% neile langevast valgusest. Üldiselt neelavad tumedad ja karedad pinnad valgust paremini kui heledad ja siledad.

Päikeseenergia muundumist soojuseks kasutatakse tehnikas.

Vaatame näiteks veesoojendeid. Selle tööprintsiip on üsna lihtne. Päikese kätte asetatakse hästi isoleeritud ja klaasiga kaetud kast, mis muudab seadme kasvuhoone sarnaseks. Klaas laseb läbi nähtava valguse kiired, mis soojendavadki vett. Infrapunaseid kiiri

aga, mida kiirgab vesi, klaas läbi ei lase. Tänu sellele võib vee temperatuuri tõsta kuni keemiseni.

Paralleelselt päikesekiirguse mõjul töötavate veesoojendite loomisega töötavad nõukogude teadlased heliotehnika loomisel, mis radikaalselt lahendaks päikeseenergia tööstusliku kasutamise probleemi.

Ammendamatu päikeseenergia kasutamise võimalus on väga meelitav, sest näiteks üksnes Usbeki NSV territooriumile langevad kiired võiksid anda energiat, mis on võrdne mitme tuhande Dneprogessi energiaga.

F. F. Molero juhtimisel on Nõukogude Liidus tehtud hulk katseid päikesekiirte kasutamiseks sfääriliste ja paraboolsete peeglite abil. Paraboloidpeegli aluseks on õhuke raudbetoonkest, mis kaetakse hõbetatud aknaklaasiga. Niisugune peegel pindalaga 500 m^2 annab võimsuse 500 kW. Paraboloidi fookuse lähedale paigutatakse aurukatel. Süsteem pöördub automaatselt vastavalt päikesekiirte suuna muutumisele.

2. Paljudel juhtudel avaldab valgus ka keemilist toimet. Nii näiteks pleegivad päikesekiirte mõjul mitmesugused kangad, sest ultravioletsete kiirte mõjul värvained hapenduvad. Päikese toimel laguneb vesinikperoksiid veeks ja hapnikuks, ühinevad plahvatusega kloor ja vesinik.

Laialt on tuntud valguse keemiline mõju fotoplaadile või filmilindile.

Väga tähtsad fotokeemilised protsessid toimuvad klorofüllis, mida sisaldub kõigi taimede rohelistes osades. Punaste kiirte mõjul, mida klorofüll kõige enam neelab, laguneb süsihappegaas hapnikuks ja süsinikuks. Edaspidised keemilised muutused taimedes toimuvad ultraviolettkiirguse mõjul. Lõpptulemusena saadakse anorgaanilistest ühenditest keerulised orgaanilised ühendid, nagu valgud, rasvad, süsivesikud ja vitamiinid. Sellist nähtust nimetatakse fotosünteesiks. Fotosünteesi energeetilise külje väljaselgitamisel on suured teened vene teadlasel K. A. Timirjazevil.

§ 138. LUMINESTSENTS

Paljud ained hakkavad helenduma, kui neid kiiritada röntgeni-, ultravioletse, nähtava kiirguse või katoodkiirtega. Mõnikord kestab helendumine veel pikka aega pärast kiiritamise lõppu. Nii helenduvad näiteks pimedas lennuki aparaatide numbrid ja osutid.

Taolise helenduse puhul ei tõuse temperatuur ja seepärast nimetatakse seda nähtust külmhelenduseks ehk luminestsentsiks.

Lühiajalist helendust, mis lakkab peaaegu hetkeliselt pärast keha kiiritamise lõppu, nimetatakse fluorestsentsiks (mineraali fluoriit nimest, mille puhul seda esmakordselt jälgiti).

Kiiritusjärgset helendumist nimetatakse fosforestsentsiks (meenutab fosfori helendumist).

Kui kiiritada päikesevalgusega petrooleumi, masinaõli või odekolonni, siis tekib nende ainete nõrk helesinine helendus. Põhjuseks on päikesekiirte koosseisu kuuluvad ultravioletsed kiired.

Paljudel tahketel ainetel on samasugused omadused, nad on võimelised nähtamatuid kiiri nähtavateks muutma, seepärast nimetatakse neid luminofoorideks.

Inglise füüsik Stokes tegi kindlaks järgmist: *luminestsentsvalguse lainepikkus on alati suurem ainele langeva valguse lainepikkusest.*

Nii näiteks eriline värv rodamiin helendub siniste kiirte toimel punasena, teine värv — fluorestseiin — helendub samade siniste kiirte toimel aga rohelisena.

Klorofülli piirituslahus helendub ultravioletsete kiirte toimel punasena.

Nähtus seletub valguse kvantteooria abil.

Ainele langev valguskvant kulutab osa energiast luminestseeriva aatomi mõjutamiseks. Seepärast peab luminestsentsvalguse kvandi energia olema väiksem kui ainele langeval kvandil.

On teada, et suurem energia on neil kvantidel, mille võnkesagedus on suurem (lainepikkus on väiksem).

Selle põhjal võib järeldada, et luminestsentsvalguse lainepikkus peab olema suurem ainele langeva valguse lainepikkusest. Niisugune järeldus on igati kooskõlas katsetega.

Anorgaaniliste ainete luminestsentsi uuris põhjalikult nõukogude akadeemik S. I. Vavilov. Tema juhtimisel konstrueeriti luminestsentslamp (päevavalguslamp), mis leidis kõige laialdasemat kasutamist igapäevases elus ja tehnikas.

On teada, et tavalistel hõõglampidel on kaks suurt puudust: 1) nad ei tarbi elektrienergiat ökonoomselt ja 2) nende poolt kiiratav valgus erineb tunduvalt päikesevalgusest. Nii näiteks Lodõgini elektrilambi kasutegur oli 0,5%. Kaasaegsete hõõglampide kasutegur (volframniidiga, gaasitäidisega) ulatub kuni 10%.

Teadus on tõestanud, et kuumvalgusallikate kasutegur ei saa ületada 14%, samal ajal kui külmvalgusallikatel on see üle 80%. Selles seisabki nende esimene eelis.

Teine paremus on kiiratava valguse kvaliteedis.

Elektrilambi punakaskollane valgus tundub päeval väga ebameeldivana, õhtul aga moonutab see tunduvalt ümbritsevate kehade värvust. Sinised kehad tunduvad mustadena, rohelised muutuvad tuhmiks ja määrdunuks, oranžid ning punased toonid tunduvad aga väga eredatena.

Luminofoore saab helendama panna elavhõbe-kvartslambi abil, sest ultraviolettkiired läbivad vabalt kvartsi, kuid ei tungi läbi tavalisest klaasist.

Kvartsklaasi asemel võib kasutada ka tavalist klaasi.

Kui paigutada luminofoor kvartslambisse, siis luminofoorile

langevad ultraviolettkiired muutuvad nähtava valguse kiirteks ja läbivad vabalt tavalist klaasi.

Sellise lambi kasutegur on umbes 40%. Valgusenergiat saame üle 60 lm 1 vati kohta, samal ajal kui parimad hõõglambid annavad ainult 14 lm vati kohta.

Luminestsentslampe kasutatakse kaasajal laialdaselt näiteks Moskva metroo, suurte kaubamajade jms. valgustamiseks.

Kontrollküsimusi

1. Tooge näiteid kiirgusenergia muundumisest soojuseks.
2. Tooge näiteid päikesekiirguse kasutamisest tehnikas.
3. Tooge näiteid valguse keemilise toime kohta.
4. Milles seisab luminestsentsinähtus?
5. Kuidas kõlab Stokesi reegel?
6. Tooge näiteid luminestsentsi kasutamisest tehnikas.

XIII PEATÜKK

AATOMI EHITUS

§ 139. AATOMI EHITUSEST

Sõna «aatom» tähendab «jagamatu».

Kas aatom on ka tegelikult jagamatu? Kaugeltki mitte. XX sajandil tõestati, et aatom on jagatav. Juba XIX sajandil tulid teadlased mõttele, et aatom ei ole jagamatu, vaid koosneb samuti osakestest, kuid seda ei olnud neil võimalik katseliselt kontrollida.

Samasugusele järeldusele tuli ka D. I. Mendelejev pärast elementide perioodilisuse seaduse avastamist. Ta kirjutas: «Kogu näivale lihtsusele vaatamata ei ole tänapäeval tõestatav ükski hüpotees, mis ammendavalt põhjendaks perioodilisuse seadust...»

On kerge oletada, kuid mitte tõestada, et lihtainete aatomid on keerulise ehitusega, mis on tekkinud veel väiksemate osakeste liitumise teel. See, mida meie nimetame jagamatuks (aatomiks), on jagamatu ainult tavaliste keemiliste jõudude abil.

XIX sajandi lõpul juhtis aatomi liitkoosseisule tähelepanu vene keemik A. M. Butlerov ning näitas, milliste meetoditega on tulevikus võimalik aatomit lagundada.

Kehade elektriseerumine hõõrumisel, elektrolüüs, gaaside ionisatsioon, katoodkiired, fotoefekt ja radioaktiivsus tõestasid veenvalt väikeste osakeste olemasolu aatomis. Neil osakestel olid negatiivse laengu omadused ja neid hakati nimetama elektronideks. Seega tõestati, et aatom koosneb osakestest.

Katoodkiirte kõrvalekaldumine elektri- ja magnetväljades võimaldas arvutada elektronide kiiruse nendes väljades liikumisel ja osakeste laengu suhte massisse $\left(\frac{e}{m}\right)$. Elektroni laeng arvutati elektrolüüsi seaduste põhjal, seejärel mõõdeti aga vahetult. Tema laeng osutus võrdseks $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ lü ehk $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ C. Teades elektroni laengut ja laengu suhet massisse, võib kergesti arvutada elektroni massi. Elektroni mass on ligikaudu $9 \cdot 10^{-31}$ kg, seega peaaegu 1840 korda väiksem vesiniku aatomi massist.

§ 140. AATOMI ELEKTRONKATE JA TUUM

Me juba teame, et üheks aatomite koostisosaks on elektron — negatiivse elementaarlaengu kandja.

Kuid paljud füüsika- ja keemiaalased uurimised näitasid, et kõikide ainete molekulid ja aatomid on elektriliselt neutraalsed. Järelikult leidub aatomis ka positiivse laenguga osakesi, kusjuures positiivsete laengute summa peab võrduma negatiivsete laengute summaga. Ainult sel juhul on aatom elektriliselt neutraalne.

Tekib veel teine küsimus: kuidas need osakesed paiknevad üksteise suhtes?

XX sajandi esimesel aastakümnel tehti mitmeid hüpoteese aatomi ehituse kohta, kuid selle saladustesse tungimiseks tuli füüsikutel teha veel palju keerukaid ja väga täpseid katseid.

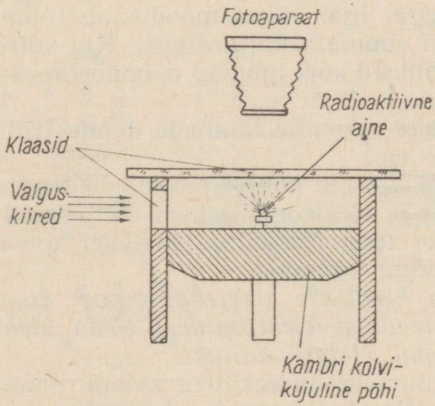
Aastatel 1912—1919 tegi Rutherford esimesed katsed, mis avasid osaliselt aatomi ehituse saladused. Ta pommitas mitmesuguseid aineid heeliumi ioonidega (need ioonid lendavad välja radioaktiivsetest ainetest ja neid nimetatakse α-osakesteks).

Katseid korraldati erilise riista abil, mida nimetatakse Wilsoni ionisatsioonikambriks (joon. 213).

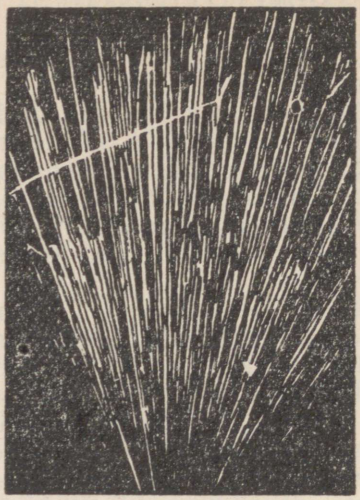
Wilsoni kamber koosneb metallsilindrist, mille pealmise osa moodustab läbipaistev tavalisest klaasist ketas. Kambris on ülekküllastatud veeaur. Kui kambris liigub α-osake, siis tekib tema teel suurel hulgal ioone. Ioonide ümber tekivad udupiisad, sest nagu vaatlused näitavad, võivad ioonid nagu tolmukübemedki olla veeauru kondensatsioonitsentriteks. Seega jätab liikuv osake oma teele udupiiskadest jälje (treki).

Seda jälge võib vahetult vaadelda ja kaamerat valgustades ka fotografeerida.

Paljude teadlaste katsed näitasid, et need trekid on suuremalt



Joon. 213.



Joon. 214.

jaolt sirgjoonelised (joon. 214). Sellest võis järeldada, et oma teel sadu ja tuhandeid aatomeid kohtav α-osake läheb neist läbi nagu vaakuumist, järelikult ei jaotu aatomi mass kogu tema ruumala ulatuses ühtlaselt.

Kõverjooneliste trekkide uurimine näitas, et α-osakestele mõjusid tõukejõud. Et need osakesed on laetud positiivselt, siis võis järeldada, et peamine osa aatomi massist on ka positiivse laenguga. Seda aatomi osa hakati nimetama t u u m a k s.

Arvutused näitasid, et tuuma ruumala on väga väike, võrreldes aatomi mõõtmetega. Igas aines moodustab tuum ligikaudu sajatuhandiku aatomi ruumala miljardikust. Kui võtta üks kilogramm plaatina, siis mahuksid kõik tuumad nööpnõelapeasuurusesse ruumalasse.

Erinevate ainete aatomite tuumade diameetrid on suurusjärgus 10^{-12} kuni 10^{-13} cm.

Rohkearvuliste katsete põhjal järeldasid teadlased, et tuum on laetud positiivselt ja elektronid asuvad väljaspool tuuma. Elektronid peavad ümber tuuma liikuma, vastasel korral langeksid nad elektrijõudude mõjul tuumale.

Järelikult *iga keemilise elemendi aatom koosneb tuumast ja tema ümber tiirlevatest elektronidest. Seda elektronide kogumit nimetatakse aatomi elektronkatteks.*

Lihtsaimaks tuumaks on vesiniku aatomi tuum ja seda nimetatakse prootoniks. Prooton kannab elektroniga suuruselt võrdset positiivset laengut, tema mass on 1840 korda (täpsemalt, 1836 korda) suurem elektroni massist.

Et iga keemilise elemendi aatom on elektriliselt neutraalne, siis peab tuuma ümber tiirlevate elektronide arv võrduma tuuma positiivsete laengute arvuga. Järelikult koosneb vesiniku aatom ühest prootonist ja ühest elektronist.

Erinevate keemiliste elementide pommitamisel α-osakestega tekkinud trekkide uurimine võimaldas arvutada tuumalaenguid. Selgus, et *tuumalaengud on prootoni elementaarlaengu täisarvkordsed.*

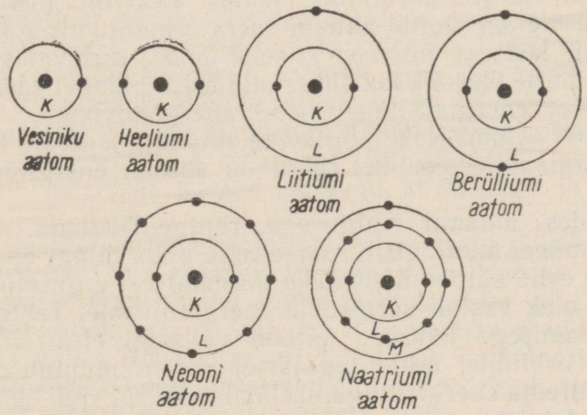
Peale selle osutus, et *tuuma elementaarlaeng Z, järelikult ka elektronide arv aatomi elektronkattes ühtib elemendi järjekorranumbriga Mendelejevi elementide perioodilisuse süsteemis.*

Niisugune kokkusattumine ei ole juhuslik. Keemilistes reaktsioonides mõjutavad üksteist just väliskihi elektronid, nii et kõik keemilised reaktsioonid on seotud ainult nende elektronidega.

Mendelejevi tabeli abil on võimalik kindlaks määrata iga keemilise elemendi aatomi elektronide ja prootonide arvu. Nii näiteks on heelium Mendelejevi perioodilisuse süsteemis teisel kohal, järelikult on tema tuumas kaks positiivset laengut ning elektronkattes kaks elektroni.

Vastavalt kaasaegsetele seisukohtadele võib iga elektron antud momendil olla aatomis ainult kindlal orbiidil ja sellel orbiidil võib olla ainult üks elektron. Kõik elektronid aatomis asetsevad kihtidena, mille orbiitide raadiused suurenevad võrdeliselt täisarvude ruutudega (1^2, 2^2, 3^2, 4^2...). Erinevatel elementidel on samade elektronkihtide keskmised raadiused erinevad; raadiused on seda väiksemad, mida suurem on elemendi järjekorranumber Mendelejevi perioodilisuse süsteemis. Üldse võib elektrone tuuma ümber olla kuues kihis, mida tähistatakse tähtedega *K*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P*.

Tuumale kõige lähemat kihti nimetatakse *K*-kihiks (aatomite ehituse lihtsustatud skeemid on toodud joonisel 215). Igal aatomil,



Joon. 215.

välja arvatud vesiniku aatom, võib selles kihis olla ainult kaks elektroni. Heeliumi aatomil on üldse kaks elektroni ning nad mõlemad asetsevad *K*-kihis.

Järgmisel elemendil — liitiumil (järjekorranumbriga 3) — on elektronkattes kolm elektroni. Kaks elektroni asetsevad *K*-kihis ja üks *L*-kihis.

Berülliumil (järjekorranumbriga 4) on kaks elektroni *K*-kihis ja kaks *L*-kihis jne. kuni neoonini, millel on kümme elektroni. Nendest kaks on *K*-kihis ja 8 *L*-kihis. Kui väliskihis on 8 elektroni, siis on see kiht püsiv ning niisugused keemilised elemendid osutuvad inertseteks.

Suure järjekorranumbriga keemiliste elementide aatomites on elektronide jaotus kihtides palju keerulisem. Nii näiteks radoonil (järjekorranumbriga 86) on kaks elektroni *K*-kihis, 8 *L*-kihis, 18 *M*-kihis, 32 *N*-kihis, 18 *O*-kihis ja 8 *P*-kihis. Väliskihi elektrone, mida aatom võib loovutada või juurde võtta, nimetatakse valentselektronideks.

Valentselektronide arv ühtib elementide rühma numbriga Mendelejevi tabelis.

§ 141. AATOMI ENERGIANIVOOD. ENERGIA NEELAMINE JA KIIRGAMINE AATOMI POOLT

On teada, et elementide keemilised omadused korduvad perioodiliselt. See on seotud elektronide kihilise asetusega tuuma ümber.

Antud kihi elektronil on kindel energiavaru. Mida väiksem on orbiidi raadius, seda väiksem on elektroni energia, mida suurem on raadius, seda suuremat energiat omab elektron.

Igal aatomil on statsionaarsed ainult teatud orbiidid. Elektroni loovutamine või juurdevõtmine, samuti elektroni üleminek ühelt orbiidilt teisele on seotud aatomi energia muutumisega. Seepärast aatomil, mis koosneb tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest, ei ole mitte ükskõik kui suur, vaid teatud kindel energia. Orbiidile vastavat energiat nimetatakse energianivooks.

Niisugust aatomi olekut, milles ta võib olla lõpmata kaua, nimetatakse normaalolekuks. Sel juhul on aatomi energianivoo kõige madalam.

Mõjutades aatomit valgusega, röntgenikiirtega, elektronide vooga või mõnel muul viisil, saame talle anda mingi energiahulga, mis kutsub esile aatomi ülemineku normaalsest ergutatud olekusse. Ergutatud olek vastab kõrgemale energianivoole. Teatud energiahulga neelamisega kaasneb aatomi väliskihi elektroni üleminek kõrgemale orbiidile, mille tagajärjel aatom muutub ergutatuks.

Veel suurema energiahulga neelamise korral võib elektron üldse lahkuda aatomist.

Et igas aatomis on võimalikud ainult täiesti kindlad elektronide

orbiidid, millele vastavad kindlad energianivood, siis elektroni üleminekuga ühelt orbiidilt teisele peab kaasnema kindla energiahulga (annuse) neelamine. See energiahulk peab olema võrdne kahe energianivoo vahega. Kui normaalolekus aatomi energianivoo on E_1, ergutatud olekus aga E_2, siis aatomi poolt neelatud energia

$$\Delta E = E_2 - E_1.$$

Ergutatud aatomil, võrreldes normaalolekus aatomiga, on potentsiaalse energia ülejääk ΔE. Aatom püüab üle minna sellisesse olekusse, et tema potentsiaalne energia oleks minimaalne. Mõne miljardiku sekundi jooksul pöördub aatom tagasi normaalolekusse, kiirates energia ülejäägi elektromagnetiliste lainetena ruumi.

§ 142. BOHRI POSTULAADID

Elektromagnetiliste lainete kiirgamist ja neelamist nii nähtamatus kui ka nähtavas spektriosas ei olnud võimalik selgitada Rutherfordi teooriaga, sest sellest tulenesid järgmised seisukohad:

1) tuuma ümber tiirlev elektron peab pidevalt kiirgama energiat elektromagnetiliste lainete näol;

2) aatomi kiirgusspektris peavad esinema kõikvõimalikud lainepikkused, sest elektron võib tiirelda ümber tuuma mistahes sagedusega.

Katsed aga näitasid, et 1) helenduvate hõrendatud gaaside spektrid ei ole pidevad, vaid koosnevad üksikutest värvilistest joontest; need jooned vastavad elektromagnetiliste lainete kindlatele võnkesagedustele ja järelikult ka kindlatele lainepikkustele; 2) spektri värvilistele joontele vastavate elektromagnetiliste lainete võnkesagedused ei ole üldse kooskõlas elektronide kõikvõimalike tiirlemissagedustega; 3) kui elektronid kiirgaksid tiireldes pidevalt elektromagnetilisi laineid, siis peaks aatomi energia pidevalt vähenema ja elektronid liiguksid mööda spiraale. Kuid sellisel juhul läheneksid elektronid pidevalt tuumale ning lõpuks ühineksid sellega elektriliste tõmbejõudude mõjul. Seega lakkaks aatomi elektronkate olemast. Koos elektronkatte kadumisega kaotaks aatom ka oma füüsikalis-keemilised omadused. Siit järelduks, et aatomid ei ole püsivad süsteemid. Katsed näitavad, et aatomid on siiski püsivad.

Nende vastuolude lahendamiseks esitas taani füüsik Niels Bohr 1913. a. teooria, mis rajanes Plancki kvantteoorial.

Bohri seisukohad aitasid Rutherfordi teooriat edasi arendada. Elektromagnetiliste lainete kiirgamist ja neelamist käsitleva teooria aluseks võttis Bohr kaks printsiipi ehk postulaati.

1. Elektronid võivad ümber tuuma tiirelda ainult kindlatel statsionaarsetel orbiitidel (trajektooridel), mille raadiused on võrdelised positiivsete täisarvude ruutudega (1^2, 2^2, 3^2, 4^2, ...) ja mis

rahuldavad teisi rangelt kindlaksmääratud tingimusi. Seejuures aatom ei kiirga energiat.

2. Kui aatom neelab temale langevast valgusenergiast ühe kindla sagedusega kvandi, siis läheb elektron järgmisele, tuumast kaugemal olevale orbiidile ning aatom muutub ergutatuks; kui elektron läheb kaugemalt orbiidilt üle tuumalähedasemale orbiidile, siis kiirgab aatom ühe kindla sagedusega kvandi.

Kui ν (kreeka täht «nüü») on kvandi sagedus, h — Plancki konstant ($h=6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg · s), E_1 — aatomi energia mingis statsionaarses olekus, E_2 — aatomi teisele statsionaarsele olekule vastav energia, siis

$$h\nu = E_1 - E_2.$$

Bohri postulaatide alusel arvutati välja: 1) elektroni statsionaarsed orbiidid vesiniku aatomis; 2) elektronide statsionaarsetele orbiitidele vastavad energianivood; 3) kõik elektronide üleminekud ühelt orbiidilt teisele ja üleminekutele vastavad kiirguskvantide sagedused.

Nende arvutuste alusel peaks vesiniku aatomi kiirgusspekter sisaldama järgmisi jooni: mõned infrapunased jooned, punane, helesinine, sinine, violett ja üksikud ultravioletsed jooned. Vesiniku kiirgusspektri foto kinnitas täielikult neid ennustusi. Seega leidis Bohri teooria praktikas kinnitust.

Teadlaste edasise uurimistöö tulemusena tehti kindlaks, et joonspektrite järgi on võimalik otsustada keemiliste elementide aatomite elektronkatetes toimuvate muutuste üle. See omakorda võimaldas spektraalanalüüsi kaudu tundma õppida aatomi struktuuri.

Kontrollküsimusi

1. Millised füüsikalised nähtused viitavad aatomi koosnemisele osakestest?
2. Kuidas on ehitatud aatom?
3. Kuidas saab määrata elektronide arvu aatomi elektronkattes?
4. Kuidas asetsevad elektronid aatomituuma ümber? Tooge näiteid.
5. Milliseid elektrone nimetatakse valentselektronideks?
6. Mis on aatomi energianivood?
7. Millistel tingimustel satub aatom ergutatud olekusse?
8. Kui kaua võib aatom olla ergutatud olekus?
9. Millised vastuolud tekkisid aatomaarsete kiirgusnähtuste selgitamisel Rutherfordi teooria seisukohalt?
10. Millised postulaadid on võetud Bohri teooria aluseks?
11. Millised katsed kinnitasid Bohri teooriat?

XIV PEATÜKK

AATOMITUUMA ENERGIA

§ 143. RADIOAKTIIVSUS

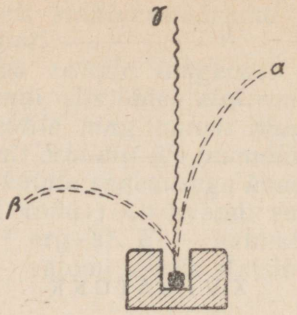
Elektronkatte ehitust tunti küllalt hästi juba XIX sajandi lõpul, kuid aatomituuma ehitusest teati veel üsna vähe ja needki teadmised olid vasturääkivad. Tuuma õpiti tundma põhiliselt XX sajandil. Sellele aitas kaasa radioaktiivsuse avastamine ja uurimine.

Röntgenikiirte avastamine 1895. a. kutsus esile teadusemaailma elava huvi. Paljud teadlased hakkasid uurima fluorestsentsinähtust, sest arvati, et röntgenikiired põhjustavad toru klaasseinte fluorestseerimist. Prantsuse füüsik Henri Becquerel kasutas katseteks uraanisoola uraniiti. Selleks et kontrollida, kas uraanisoola fluorestseerimisel tekib ka röntgenikiiri, tegi teadlane järgmise katse. Ta keeras fotoplaadi musta paberisse ja paigutas sellele uraanisoola tüki. Seejärel pidi ta soola valgustama päikesekiirtega, et kutsuda esile selle fluorestsentsi. Kui röntgenikiirte tekitajaks oleks tõepoolest fluorestsents, siis jääksid fotoplaadile vastavad jäljed. Röntgenikiirtel on tugev läbitungimisvõime ja nad kutsuvad fotoplaadil esile keemilise reaktsiooni. Becquerel pani plaadi ja mineraali kappi. Mõne aja pärast, kontrollides fotoplaadi kõlblikkust, avastas ta, et plaat oli valgustatud. Asetades musta paberisse pakitud uue plaadi ja uraanisoola tüki vahele võtme, sai ta fotoplaadil võtme varju. Oli selge, et ka mittefluorestseerivast uraanisoolast lähtuvad mingid kiired, mis vabalt läbivad küll musta paberi, kuid neid takistab raud. Need kiired mõjuvad ka fotoplaadile.

Nii avastati 1896. a. uus nähtus, mida hiljem hakati nimetama radioaktiivsuseks (ladina keeles tähendab «radius» kiirt). See avastus etendas tähtsat osa aatomituuma uurimisel.

Marie Skłodowska-Curie ja Pierre Curie tundsid suurt huvi selle avastuse vastu, tegid ulatuslikke uurimusi ning avastasid, et peale uraani on samad omadused veel tooriumil, polooniumil ja uraani keemilistel ühenditel tooriumiga.

Marie Skłodowska-Curie ja Pierre Curie eraldasid 1898. a. uraanimaagist aine, mis oli uraanist mitu miljonit korda aktiivsem. Nad nimetasid selle raadiumiks.



Joon. 216.

Aineid, mis kiirgasid nagu raadium või uraan, hakati nimetama radioaktiivseteks ja nähtust ennast looduslikuks radioaktiivsuseks. Tänapäeval on teada üle 40 looduslikult radioaktiivse elemendi ja üle 270 radioaktiivse ühendi.

Raadium on haruldane element — ühe grammi raadiumi saamiseks on vaja ümber töötada kümneid tonne uraanimaaki.

a) Radioaktiivse kiirguse koostis. Radioaktiivse kiirguse üksikasjaline uurimine magnet- ja elektriväljades näitas, et ta koosneb kolmest komponendist: α-kiirgus, β-kiirgus ja γ-kiirgus (joon. 216). α-kiirgus kujutab endast väga suure kiirusega (kuni 20 000 km/s) liikuvaid heeliumi aatomi tuumi, s. t. osakesi, millel on kahekordne positiivne elementaarlaeng.

Erinevate elementide α-osakeste kiirused on erinevad, kuid antud elemendi puhul peaaegu ühesugused. Neil on 4 ühiku suurune mass ja nad lõhuvad enamiku teele sattuvatest molekulidest. Seepärast ioniseerivad α-kiired tugevasti õhku.

α-kiirte läbitungimisvõime on väike. Neid võib pidurdada õhukese alumiiniumilehe või isegi paberilehe abil. Väike läbitungimisvõime on tingitud nende suhteliselt suurtest mõõtmetest. Isegi tugevates magnet- ja elektriväljades kalduvad nad üsna vähe kõrvale, sest α-osakese kineetiline energia on suur — suurusjärgus 10^{-5} ergi. Vastavalt kaasaegsetele vaadetele kiirgab iga radioaktiivse elemendi aatom ainult ühe α-osakese. Tsinksulfiidiga kaetud ekraanile sattudes tekitab see seal sähvatuse. Radioaktiivse aine poolt kiiratud α-osakeste sähvatusi ehk stsintillatsioone võib jälgida erilise riista abil, mida nimetatakse spintariskoobiks (joon. 217).

β-osakesed kujutavad endast elektronide voogu, mis liigub kiirusega ligikaudu 270 000 km/s. Ühe ja sama aine poolt kiiratud β-osakeste kiirused võivad olla erinevad.

β-osakeste läbitungimisvõime on sada korda suurem kui α-osakestel. Need osakesed kalduvad magnet- ja elektriväljades kergesti kõrvale. Õhku ioniseerivad nad nõrgalt.

γ-kiirtel on väga suur läbitungimisvõime. Nad läbivad ilma märkimisväärse energiakaota 100 meetri paksuse õhukihi, 10-sentimeetrise alumiiniumikihi ja pliikihi paksusega üle 1 cm.

Nad ioniseerivad tugevasti õhku, kutsuvad esile paljude ainete fluorestsentsi, avaldavad mõju fotoplaadile (seepärast avastaski Becquerel radioaktiivse kiirguse), ei kaldu kõrvale ei magnet- ega elektriväljades ja nad on väga sarnased kalkide röntgenikiirtega. γ-kiired kujutavad endast väga lühikesi elektromagnetilisi laineid lainepikkusega 0,000 000 5 μm (see on võrdne ühe miljondikuga rohelise valguse lainepikkusest).

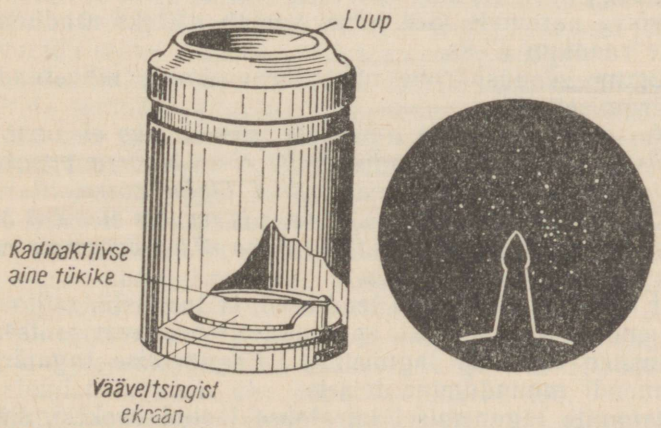
γ-kiirgus ei esine kunagi iseseisvalt, ta kaasneb kas α-osakestega või β-osakestega või mõlemaga samaaegselt.

On tõestatud, et radioaktiivne kiirgus avaldab kahjulikku mõju elusrakkudele. See võimaldas radioaktiivseid kiiri kasutada meditsiinis näiteks vähktõve ravil.

Raadiumipreparaate hoitakse paksuseinalistes pliianumates, et vältida γ-kiirte kahjustavat toimet nendega töötavatele inimestele.

b) Radioaktiivsete elementide muundumine. Kui asetada katseklaasi veidi kloorraadiumi, pumbata seejärel sealt õhk välja ja joota katseklaas kinni, siis mõne aja pärast võime spektraalanalüüsi abil kindlaks teha heeliumi ja radooni olemasolu katseklaasis. Need kaks gaasi tekkisid raadiumi tuuma lagunemisel. Eraldanud radooni, tegid teadlased kindlaks, et ta on radioaktiivne. α-osakesi kiirates muutub radoon uueks aineks — raadium *A*-ks. Raadium *A* muutub jälle teiseks radioaktiivseks elemendiks — raadium *B*-ks. Raadium *B* muutub omakorda radioaktiivseks elemendiks — raadium *C'*-ks jne. Lagunemine toimub seni, kuni tekib raadium *G* ehk plii. Plii aatomi tuum on püsiv ja edasist lagunemist ei toimu. Lagunevad ainult mittepüsivad tuumad.

On kindlaks tehtud, et looduslikud radioaktiivsed elemendid



Joon. 217.

moodustavad kolm rida, mille lähteelementideks on uraan, aktiinium ja toorium.

Allpool toodud tabelis on antud uraani rea lagunemiskäik.

Need eksperimentaalandmed on teooriaga täielikus kooskõlas. Tõepoolest, α-osakese kiiranud elemendi aatommass on nüüd 4 ja laeng 2 ühiku võrra väiksem kui lähteelemendil. Järelikult on uue keemilise elemendi järjekorranumber Mendelejevi perioodilisuse tabelis kahe rühma võrra vasakule nihkunud, võrreldes lähteelemendiga. Nii võib näiteks ennustada, et radoon muutub raadium *A*-ks, raadium *A* aga raadium *B*-ks.

Aine	Kiirgus	Massiarv
Uraan I	α	238
Uraan X_1 X_2	β, γ	234
Uraan II	α	234
Ioonium	α γ	230
Raadium	α, β, γ	226
Radoon	α	222
Raadium *A*	α	218
Raadium *B*	β, γ	214
Raadium *C'*	α, β, γ	214
Raadium *C*	α	214
Raadium *D*	β, γ	210
Raadium *E*	β, γ	210
Raadium *F* (poloonium)	α γ	210
Raadium *G* (plii)	—	206

Kui aine kiirgab β-osakese, siis tema laeng suureneb ühe võrra ja uus aine saab ühe võrra suurema järjekorranumbri, s. o. ta peab Mendelejevi perioodilisuse süsteemis nihkuma lähteelemendist ühe rühma võrra paremale. See juhus vastab näiteks raadium *B* üleminekule raadium *C'*-ks.

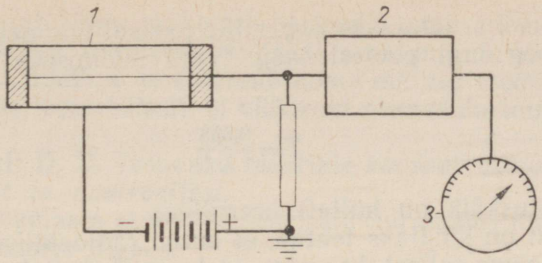
Niisugune seaduspärane nähtus sai nimeks nihkeseadus. See kõlab järgmiselt.

1. Kui element kiirgab α-osakese, siis on uus element Mendelejevi süsteemis lähteelemendist kahe rühma võrra vasakule nihkunud ja tema aatommass väheneb 4 ühiku võrra.

2. Kui element kiirgab β-osakese, siis on uus element Mendelejevi süsteemis lähteelemendist ühe rühma võrra paremale nihkunud ja tema aatommass ei muutu.

Neist faktidest järeldasid teadlased, et looduslik radioaktiivsus kujutab endast aatomisisest, spontaanselt toimuvat protsessi, millega kaasneb tuumade lagunemine. Lagunemise tagajärjeks on üne elemendi muundumine teiseks.

Et aatomite lagunemisel kiiratakse laetud osakesi, samuti ka elektromagnetilisi laineid (γ-kiired), siis järelikult on aatomi ehi-



Joon. 218.

tus väga keeruline ja tuumade lagunemisega kaasnevad komplitseeritud muutused.

c) Radioaktiivsete elementide poolestusaeg. Radioaktiivse aine lagunemisel väheneb aegamööda tema aatomite hulk. Looduslikku radioaktiivsust uurides tuldi järeldusele, et *igas elemendis laguneb mis tahes võrdsete ajavahemike jooksul võrdne hulk aatomeid.*

Aega, mille jooksul laguneb pool antud aine aatomitest, nimetatakse poolestusajaks. Erinevatel radioaktiivsetel elementidel on see aeg väga erinev. Näiteks uraani poolestusaeg on 4,5 miljardit aastat, raadiumil 1590 aastat, raadium *A*-l 3 minutit.

Poolestusaeg ei olene aine massist. Selleks et laguneks pool 1 grammis sisalduvatest aatomitest, kulub sama aeg nagu 1 kilogrammi, 1 tonni või mis tahes muu massiühiku puhul.

Poolestusaeg leitakse järgmisel viisil. Iga keemilise elemendi aatommassi ühik on $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g. Teades antud radioaktiivse elemendi aatommassi, võib arvutada aatomi massi grammides. Näiteks raadiumi (aatommass 226) aatomi mass on $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g $\cdot$ $\cdot 226 = 375{,}16 \cdot 10^{-24}$ g, polooniumil (aatommass 210) $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g $\cdot$ $\cdot 210 = 348{,}6 \cdot 10^{-24}$ g. Antud radioaktiivse elemendi massi järgi võib välja arvutada selles aines sisalduva aatomite hulga.

Paigutades mingi aine Wilsoni ionisatsioonikambrisse, võib registreerida teatud aja jooksul lagunenud aatomite arvu (samasuguse loenduse võib teha ka Geigeri loenduri abil; joon. 218).

Loenduri tööpõhimõte on järgmine: kõrge alalispinge korral tekib metalltorus *1* tugev elektriväli. Torus on hõrendatud gaas. Seni, kui gaas ei ole ioniseeritud, ahelas voolu ei ole. Kui torru satub ioniseerimisvõimeline osake, tekivad elektriväljas ioonid ja ahelasse ilmub lühiajaline vool. Viimast võimendatakse lampvõimendi *2* abil ning suunatakse registreerivasse seadmesse *3* (elektromagnetiline numeraator). Niimoodi võib täpselt loendada torru sattunud ioniseerimisvõimelisi osakesi. Selgus, et 100 000 polooniumi aatomist laguneb ühe ööpäeva jooksul 495.

Ajaühikus lagunenud aatomite arvu suhe aine aatomite koguarvusse on antud radioaktiivse elemendi jaoks iseloomulik suurus

(λ). Selle alusel arvutatakse aeg, mille jooksul laguneb pool antud ainest. See aeg ongi poolestusaeg. Tema leidmiseks kasutatakse valemit

$$T = \frac{0{,}693}{\lambda}$$

(valemi tuletuskäik on küllalt keeruline).

Katseliselt on kindlaks tehtud, et antud radioaktiivse aine poolestusaeg ei olene sellest, kas aine on keemiliselt puhas või esineb ühendis teiste elementidega.

Teades, et uraani lagunemise lõpp-produktiks on plii, võib välja arvutada uraani sisaldavate mineraalide ea. Selleks on vaja määrata keemilisel teel uraani ja plii vahekord antud maagis ning arvutada uraani lagunemise kiirus.

Kontrollküsimusi

1. Mis on radioaktiivsus? Kelle poolt ja millal see avastati? Kes olid selle nähtuse esimesed peamised uurijad?
2. Milline on radioaktiivse kiirguse koostis ja mida kujutavad endast need koostisosad?
3. Mida kujutavad endast α-kiirgus, β-kiirgus ja γ-kiirgus?
4. Mida nimetatakse radioaktiivse elemendi poolestusajaks ja kas see sõltub massist?

§ 144. AATOMITUUMA EHITUS

1932. a. kiiritasid Frédéric Joliot-Curie ja Irène Curie berülliumplaati α-kiirtega ja avastasid seejuures elektriliselt neutraalsete osakeste voo. Neid osakesi nimetati neutroniteks.

Wilsoni kambri abil sai jälgida nende osakeste põrkamist vastu vesiniku ja heeliumi aatomite tuumi ning selle abil õnnestus määrata neutroni mass. See osutus peaaegu võrdseks prootoni massiga, nii et neutroni massi võib lugeda võrdseks ühikuga.

Neutroni avastamisel oli suur tähtsus aatomituuma saladuste mõistatamisel.

Kuni 1932. aastani arvasid teadlased, et tuumad koosnevad prootonitest (vesinikuaatomi tuumadest) ja elektronidest. Selline ettekujutus aatomituuma ehitusest oli aga väär.

Niisuguse ettekujutuse korral jäi elektroni olemasolu tuumas täiesti seletamatuks. Elektriliste jõudude toimel tõmbuksid prootonid ja elektronid üksteise poole ning muutuksid lõpuks elektriliselt neutraalseteks. Kui aga lugu on nii, kuidas püsivad siis elektronid ümber tuuma oma orbiitidel?

Võiks arvata, et elektrone hoiab orbiidil gravitatsioonijõud, kuid arvutused näitasid, et selleks on need jõud liiga väikesed. Tuumajõud ületavad neid tõmbejõudusid 10^{40} korda. Füüsikud ei leidnud olukorrast väljapääsu.

Ja just sel kõige raskemal perioodil esitas nõukogude füüsik D. D. Ivanenko, tuginedes neutroni avastamisele Frédéric Joliot-Curie' poolt, 1932. a. uue aatomituuma ehituse teooria. D. D. Ivanenko näitas teoreetiliselt, et elektroni olemasolu tuumas pole võimalik.

Vastavalt D. D. Ivanenko teooriale *koosneb aatomituum ainult prootonitest ja neutronitest.*

Teiste teadlaste eksperimentaalsete uurimiste tulemusena tõestati selle teooria õigsus.

Tuuma prooton-neutronteooria on nüüd üldtunnustatud.

D. D. Ivanenko tõestas teoreetiliselt neutroni ja prootoni teineteiseks muundumise võimalikkuse. Selle protsessi tulemusena tekivad osakesed, mida seni tuumas ei leidunud.

Nii näiteks on neutron võimeline muunduma prootoniks, kusjuures tekib elektron.

Neutroni muundumine prootoniks ja elektroniks, mis tuumade lagunemisel aset leiab, on igasuguse radioaktiivse lagunemise aluseks.

On teada, et aatomite radioaktiivsel lagunemisel tekib β-kiirgus, s. t. elektronide voog. Uurimised näitasid, et elektrone väljub rohkem, kui neid on laguneva aatomi elektronkattes.

Võib toimuda ka vastupidine protsess, kus *K*-kihi elektron haaratakse tuuma poolt ja ühineb seal prootoniga. Seejuures muutub prooton pärast elektroniga ühinemist neutroniks ning kiirgab välja positroni, s. o. osakese, mille mass on võrdne elektroni massiga, kuid mis on laetud positiivselt. Positroni olemasolu tõestasid katseliselt Anderson Ameerikas ning Blackett Inglismaal (1932. a.).

Vastavalt Ivanenko teooriale on aatomituumades ainult prootoneid ja neutroneid.

Prootonite arv tuumas on võrdne tuumalaenguga (Z).

Tuuma prootonite ja neutronite arvu summa määrab massiarvu (M), mis on aatomkaalule (A) kõige lähedasem täisarv. Järelikult on neutronite arv tuumas võrdne massiarvu ja laengu vahega ($M-Z$). Näiteks heeliumi aatomi tuum koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist. Seda on võimalik kindlaks teha järgmiselt: heeliumi järjekorranumber on võrdne kahega, järelikult on tuumalaeng kaks ($Z=2$) ja prootoneid on tuumas samuti kaks; massiarv on võrdne neljaga ($M=4$), järelikult neutroneid on:

$$N=M-Z=4-2=2.$$

Mendelejevi elementide perioodilisuse tabeli järgi on võimalik kindlaks määrata iga keemilise elemendi aatomi ehitus.

Kuid on olemas elemente, mille järjekorranumber Mendelejevi tabelis on sama, aatommass aga erinev. Neid nimetatakse isotoopideks. Nii näiteks esineb õhus kaks lämmastiku isotoopi: üks aatommassiga 14, teine aatommassiga 15. Teise isotoobi kogus moodustab vaid 0,3% esimese isotoobi hulgast. Tuntakse veel

vesiniku isotoopi aatommassiga 2. Seda nimetatakse *deuteeriumiks*. Vett, mille koosseisu kuulub deuteerium, nimetatakse raskeks veeks. Tavalises kraanivees sisaldub rasket vett 0,02%, s. o. 5000 osa kerge vee kohta tuleb 1 osa rasket vett.

Uraan, mille omaduste uurimine on palju kaasa aidanud teaduse arengule, kujutab endast kolme isotoobi segu aatommassidega vastavalt 238, 235 ja 234.

Hapnikul on kolm isotoopi aatommassidega 16, 17 ja 18. Peaaegu kõigil elementidel on avastatud isotoope.

Et isotoobid on Mendelejevi tabelis samal kohal, siis järelikult erinevad nende tuumad üksteisest ainult neutronite arvu poolest. Nii näiteks lämmastiku isotoobil aatommassiga 14 on tuumas 7 prootonit ja 7 neutronit, isotoobil aatommassiga 15 aga 7 prootonit ja 8 neutronit. Füüsikud näitasid, et isotoope on võimalik saada ka kunstlikul teel.

§ 145. AATOMITUUMADE MÕJUTAMISE MEETODID. TUUMADE MUUNDUMINE

Aatomituumade mõjutamiseks on vaja neid pommitada suurt energiat omavate osakestega. Selleks kasutatakse α-osakesi (heeliumi aatomi tuumi), prootoneid (kerge vesiniku tuumi), deutroneid (raske vesiniku tuumi massiarvuga 2) ja neutroneid. Suure energiaga laetud osakeste saamiseks kasutatakse erilisi seadmeid, mis kiirendavad elementaarosakesi, näiteks tsüklotrone.

Ühendatud Tuumauurimiste Instituudis (Dubnas) on ehitatud võimas elementaarosakeste kiirendi — sünkrofasotron, mille abil saab anda osakestele energiat kuni 10 miljardit eV (10^{10} eV).

1919. a. pommitas Rutherford lämmastiku aatomeid raadiumist väljunud α-osakestega ja avastas, et väike osa lämmastiku aatomituumadest laguneb selliselt, et eralduvad kiired vesiniku tuumad (prootonid) ja moodustub hapnik.

Protsess toimub nii: α-osakese kokkupõrkel lämmastiku aatomi tuumaga (α-osakese laeng on 2), mille laeng on 7, toimub tuumamuundumine, mille tulemusena tekib vesiniku aatomi tuum (laenguga 1) ja hapniku aatomi tuum (laenguga 8). Tuumareaktsiooni võib lühidalt üles kirjutada nii:

$$\underset{\text{lämmastik}}{N_7^{14}} + \underset{\text{heelium}}{He_2^4} \longrightarrow \underset{\text{hapnik}}{O_8^{17}} + \underset{\text{vesinik}}{H_1^1}.$$

Alumised indeksid näitavad laengut, ülemised aatommassi. Seejärel õnnestus Rutherfordi abilistel purustada ka teiste keemiliste elementide aatomituumi, näiteks naatriumil ja alumiiniumil, mis muundati vastavalt magneesiumi ja räni aatomituumadeks.

See kõik andis tubli hoobi XIX sajandi tõekspidamistele keemias, kus aatomit käsitleti absoluutselt muutumatu osakesena ja keemilist elementi püsiva süsteemina.

1932. a. kiiritasid mitmed teadlased nii Nõukogude Liidus kui ka Inglismaal kergeid elemente prootonitega.

Kiiritades liitiumi aatomi tuuma prootonitega, õnnestus teadlastel liitiumi heeliumiks muuta.

Tuumareaktsiooni võiksime üles kirjutada järgmiselt:

$$\underset{\text{liitium}}{Li_3^7} + \underset{\text{vesinik}}{H_1^1} \longrightarrow \underset{\text{heelium}}{2He_2^4}.$$

1932. a. näitasid Irène ja Frédéric Joliot-Curie, et berülliumi pommitamisel α-osakestega on võimalik saada neutroneid ja samaaegselt muutub berüllium süsinikuks.

Tuumareaktsioon kulgeks nii:

$$\underset{\text{berüllium}}{Be_4^9} + \underset{\text{heelium}}{He_2^4} \longrightarrow \underset{\text{neutron}}{n_0^1} + \underset{\text{süsinik}}{C_6^{12}}.$$

§ 146. KUNSTLIK RADIOAKTIIVSUS

1934. a. tegid Irène ja Frédéric Joliot-Curie ülitähtsa avastuse: nad leidsid, et mõnede tuumade pommitamise tulemusena tekivad ebastabiilsed radioaktiivsed isotoobid, kusjuures elemendid ise on üsnagi püsivad.

Avastus tehti järgmiselt. Nad märkasid, et alumiiniumi pommitamisel α-osakestega tekib neutronite ja positronide laviin. Katsel ilmnes, et kui lõpetada kiiritamine, siis positronide eraldumine ei lakka silmapilkselt, vaid jätkub, kahanedes niisama aeglaselt, nagu väheneb ükskõik millise radioaktiivse elemendi kiirgus.

Sellist nähtust hakati nimetama kunstlikuks radioaktiivsuseks.

Uurides alumiiniumi kiiritamisel toimuvat tuumareaktsiooni, tulid samad teadlased järeldusele, et reaktsioon toimub kahes teineteisele järgnevas etapis. Esmalt α-osake neeldub ja kiirgub neutron; tulemusena moodustub ebapüsiv fosfori aatomi tuum aatommassiga 30. Püsivate tuumade aatommass on aga 31. Reaktsioon toimub nii:

$$\underset{\text{alumiinium}}{Al_{13}^{27}} + \underset{\text{heelium}}{He_2^4} \longrightarrow \underset{\text{neutron}}{n_0^1} + \underset{\text{fosfor}}{P_{15}^{30}}.$$

Seejärel fosfori aatomi tuum laguneb, kiirates välja positroni (β^+), ja muutub räni aatomi tuumaks:

$$\underset{\text{fosfor}}{P_{15}^{30}} \longrightarrow \underset{\text{positron}}{\beta^+} + \underset{\text{räni}}{Si_{14}^{30}}.$$

Edaspidi avastasid Irène ja Frédéric Joliot-Curie, et mõned ele-

mendid, mis α-osakeste toimel ei lagune, võivad neutronitega kiiritamisel moodustada ebapüsivaid isotoope.

Vaatame üht näidet neutronite mõjul toimuvast tuumareaktsioonist. Võtame väävli. Tema järjekorranumber Mendelejevi tabelis on 16 ja aatomkaal 32.

Väävli aatomi tuum koosneb 16 prootonist ja 16 neutronist, elektronkestas on aga 16 elektroni. Neutronitega kiiritamisel leiab aset järgmine reaktsioon.

Neutron, mis satub väävli aatomi tuuma, lööb sellest välja ühe prootoni. Aatommass seejuures ei muutu, kuid tuumalaeng väheneb ühe ühiku võrra ja saab võrdseks 15. See kutsub esile elektronkatte muutumise — sinna jääb nüüd 15 elektroni.

Kuid 15 elektroni on iseloomulik just elemendile fosfor, mis asub Mendelejevi tabelis 15. kohal. Järelikult toimub väävli muundumine fosforiks. Kuid tavalise fosfori aatommass on 31, tuumareaktsioonil tekkinud fosforil aga 32.

Saadud tuumad ei ole küllalt püsivad. Nad lagunevad spontaanselt, kiirates välja elektroni. Tulemusena muutub neutron prootoniks ja saadakse uuesti püsiv väävli aatomi tuum.

Need tuumareaktsioonid võib lühidalt üles kirjutada järgmiselt:

I etapp

$$\underset{\text{väävel}}{S_{16}^{32}} + \underset{\text{neutron}}{n_0^1} \longrightarrow \underset{\text{fosfor}}{P_{15}^{32}} + \underset{\text{prooton}}{H_1^1};$$

II etapp

$$\underset{\text{fosfor}}{P_{15}^{32}} \longrightarrow \underset{\text{väävel}}{S_{16}^{32}} + \underset{\text{elektron}}{\beta^-}.$$

Fosfori poolestusaeg on 14,3 päeva. Teistel radioaktiivsetel elementidel loetakse seda minutite ja isegi sekunditega.

Käesoleval ajal on kunstlike radioaktiivsete elementide saamine, uurimine ja kasutamine omandanud eriti laia ulatuse. Laboratoorsel teel õnnestus saada looduses seni tundmatuid radioaktiivseid isotoope kõikidest mitteradioaktiivsetest elementidest.

Tuumareaktsioonide tulemusena tekkinud radioaktiivsetel elementidel ei ole selliseid pikki lagunemise ridu nagu looduslikel radioaktiivsetel ainetel (uraani, tooriumi, aktiiniumi read).

Kunstliku radioaktiivsuse avastamisel oli suur tähtsus füüsikas, keemias, bioloogias ja meditsiinis.

Kontrollküsimusi

1. Mida nimetatakse neutroniks? Kelle poolt, millal ja milliste katsete abil see avastati?
2. Milles on D. D. Ivanenko poolt väljatöötatud aatomituuma teooria olemus?

3. Millised osakesed tekivad neutronist tuuma lagunemisel?
4. Kuidas toimub prootoni ja elektroni muundumine neutroniks?
5. Millistest osadest koosneb tuum? Tooge näiteid, kasutades Mendelejevi tabelit.
6. Mida nimetatakse keemilise elemendi isotoobiks? Tooge näiteid.
7. Mida nimetatakse massiarvuks?
8. Milliste meetoditega on võimalik mõjutada aatomituuma?
9. Kuidas toimub tuumareaktsioon, kui kiiritada lämmastikku α-osakestega?
10. Kuidas toimub tuumareaktsioon, kui kiiritada liitiumi aatomi tuuma prootonitega?
11. Milles seisab kunstlik radioaktiivsus?
12. Kirjutage tuumareaktsioon, mille tulemusena alumiiniumi aatomi tuum muutub räni aatomi tuumaks.

§ 147. SEOSEENERGIA JA MASSIDEFEKT

Aatomituuma moodustavad prootonid ja neutronid võtavad enda alla tähtsusetult väikese ruumala. Nii näiteks uraan 235 tuum, mis koosneb 98 prootonist ja 143 neutronist, hõlmab ruumala $34 \cdot 10^{-37}$ cm^3. Vaatamata prootonite vahel mõjuvatele väga suurtele elektrilistele tõukejõududele, asetsevad nad tuumas väga väikestel kaugustel ja ometi on tuum püsiv. Sellest järeldub, et kõikide tuumaosakeste vahel eksisteerib veel tõmbejõud, mis ületab tõukejõu. Neid tõmbejõude nimetatakse *tuumajõududeks*; nad ei ole elektrilise ega ka gravitatsioonilise iseloomuga. Tuumajõudude olemus ei ole veel välja selgitatud.

Et tuuma prootoniteks ja neutroniteks lagundada, on vaja kulutada energiat. Seda energiat nimetatakse *osakeste seoseenergiaks*. Mida suurem on tuumaosakeste seoseenergia, seda püsivam on tuum. Osakeste ühinemisel tuumaks seoseenergia vabaneb.

Vastavalt energia jäävuse seadusele on tuumast eraldunud energia võrdne selle energiahulgaga, mis tuleks kulutada prootonite ja neutronite eraldamiseks.

Tuumaosakeste seoseenergia on hiiglasuur.

Et igasuguse energia kandjaks on mass, olgu siis osakeste või väljade kujul, siis peaks osakeste ühinemisel tuumaks ja energia kiirgumisel esinema ka massi vähenemine. Seda kinnitasid katsed.

Osakeste kogumassi vähenemist tuumaks ühinemisel nimetatakse *massidefektiks*. Massidefekt ongi seoseenergia kandja.

Aatomituuma seoseenergiat on võimalik arvutada, lähtudes massi ja energia vahelisest seosest.

Selle seaduse avastas elektromagnetilise välja korral P. N. Lebedev, kui ta 1900. a. mõõtis valguse rõhku.

Et valguse kiirus on hiiglasuur ($c = 3 \cdot 10^{10}$ cm/s), siis massi ja energia sõltuvuse seadusest $E = mc^2$ järeldub, et isegi väike mass, olgu siis aine või välja kujul, kannab suhteliselt suurt energiahulka.

Kui aatom kiirgab kindla sagedusega energiakvandi, siis ei vähene mitte üksnes aatomi energia, vaid ka aatomi mass, sest kvandil on samuti kindel mass vastavalt tema energiale. Vastupidi, kui aatom neelab kindla sagedusega kvandi, siis ei suurene mitte üksnes aatomi energia, vaid ka ta mass, sest kvandil on kindel mass.

Massi ja energia vahelise seose kõikide massi- ja energiavormide korral avastas Einstein 1905. a.

See kõlab järgmiselt.

1. Iga keha ja iga osake, millel on energiavaru E, omab ka massi m, mis on määratud valemiga

$$m = \frac{E}{c^2},$$

kus c on valguse kiirus.

2. Iga kiirguskvant, mille energia $E = h\nu$, omab massi m, mis määratakse valemiga

$$m = \frac{h\nu}{c^2}.$$

3. Igale massile m on omane energia E, mis määratakse valemiga

$$E = mc^2.$$

Kui raadiumi aatom kiirgab α-osakese, β-osakese ja γ-kvandi, muutudes raadium A-ks, siis raadium A aatomi tuuma mass on väiksem raadiumi aatomi tuuma massist α-osakese, β-osakese ja γ-kvandi summaarse massi võrra.

Energiat, mille omandab elektron elektriväljas, kui ta läbib potentsiaalide vahe 1 V, nimetatakse elektronvoldiks (1 eV). Miljon elektronvolti on võrdne 1 megaelektronvoldiga (1 MeV).

Arvutused näitasid, et keskmiste aatommassidega (30—200) keemiliste elementide tuumade seoseenergia ühe osakese kohta on 8,5 MeV, raskemates elementides tuumade seoseenergia aga väheneb kuni 7 MeV-ni.

See näitab, et raskete elementide aatomite tuumad on vähem püsivad.

§ 148. TUUMAENERGIA VABANEMINE. URAANI TUUMADE LÕHUSTUMINE. AHELREAKTSIOON

Aatomituumade pommitamine neutronitega, mida hakati tegema alates 1934. a. Prantsusmaal, Nõukogude Liidus jt. maades, andis teadusele palju väärtuslikke andmeid.

Eriti tähtsa tuumareaktsiooni tekitasid 1939. a. abikaasad Joliot-Curie. Neil õnnestus neutronitega pommitamisel purustada

raske elemendi — uraani aatomi tuum. Seejuures täheldasid nad kolossaalset energia eraldumist, sest massidefekt oli suur. Niisugust kunstlikku uraani tuumade purustamist jälgiti esmakordselt ning sel oli otsustav tähtsus aatomienergia saamismeetodi väljatöötamisel. Asi on selles, et kui looduslikku radioaktiivsusega elementide muundumine toimuks kiiresti, siis võiks aatomienergiat saada ka ilma raskete elementide aatomituumade kunstliku lagundamiseta. Jääks ära energiakulu kunstlikuks lagundamiseks.

Kuid uurimised näitasid, et looduslik radioaktiivsus kulgeb väga-väga aeglaselt, nii et ühes sekundis eraldunud energiahulk on üliväike. Nii näiteks üks gramm raadiumi eraldab 1 tunnis 137 cal või 1 sekundis 0,038 cal energiat. Selleks et tuhandekilovatiseid võimsusi saada, on vaja suuri raadiumikoguseid.

Juba 1898. a. uurisid Marie ja Pierre Curie looduslikku radioaktiivsust üsna üksikasjaliselt ja märkasid, et ei füüsikaliste ega keemiliste vahenditega ole võimalik radioaktiivse elemendi muundumise protsessi kiirendada ega aeglustada.

Irène ja Frédéric Joliot-Curie' teene oli selles, et nad avastasid efektiivse meetodi raskete elementide tuumade kunstlikuks muundamiseks. Selle protsessiga kaasneb alati hiiglasuure energiakoguse eraldumine. Neil õnnestus avastada protsess, mis hoidis iseennast alal, toimus isearenemise teel või, nagu öeldakse, laviiniliselt.

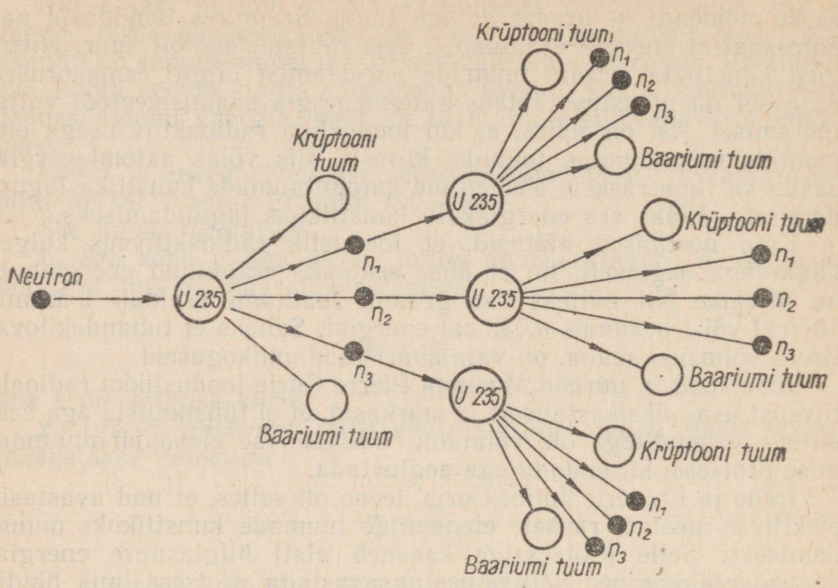
Sellise protsessi näitena võiks keemias tuua puude, petrooleumi jt. põlemise. Kuid on olemas ka niisuguseid protsesse, mis toimuvad väga kiiresti (näiteks lõhkeainete põlemine). Samasugune kiirestiarenev protsess leidis aset ka raskete elementide aatomituumades, kui neid pommitati neutronitega. Seejuures lagunesid uraani tuumad kildudeks.

1940. a. avastasid noored nõukogude teadlased G. N. Fljorov ja K. A. Petržak uraani tuumade iseseisva jagunemise, nn. spontaanse lõhustumise. Sellise jagunemise kiirus on aga väga väike. Uraani isotoobi 235 tuumade poolestusaeg on 10^{15} aastat (seega 1 grammi uraan 235 kohta tuleb ühes tunnis 20 lagunemist), uraani isotoobi 238 poolestusaeg aga 10^{17} aastat.

Uraan 235 lagunemine toimub ligikaudu selliselt. Uraani tuuma sattuv neutron jääb sinna paigale või, nagu öeldakse, tuum neelab ta. Seejuures tekib uraan 236 tuum, mis ei ole püsiv ja laguneb kaheks enam-vähem võrdseks osaks — krüptooni ja baariumi aatomi tuumadeks. Samal ajal kiirgub tuumast 2 kuni 3 kiiret neutronit (joon. 219).

Igaüks kolmest neutronist võib tabada uut tuuma, mille tulemusena viimane jaguneb ning eraldub jälle 2—3 neutronit. Eraldunud neutronid kutsuvad omakorda esile uute tuumade jagunemise jne.

On ilmne, et aktiivsete neutronite ja reageerivate tuumade arv kasvab geomeetrilises progressioonis, mistõttu kogu aine on peagi



Joon. 219.

haaratud tormiliselt arenevast reaktsioonist. Sellist tuumareaktsiooni nimetatakse *ahelreaktsiooniks* (sest lõhustub üha rohkem ja rohkem tuumi). Ahelreaktsiooni tekkimiseks on vajalik aga kindel hulk uraan 235 — uraani mass ei tohi olla väiksem teatud *kriitilisest massist*.

Reaktsioonil eralduv energia võib olla väga suur. Energiakandjateks on: 1) uraan 235 lõhustumisel tekkinud tuumakillud (baariumi ja krüptooni tuumad), mis lendavad laiali tohutu kiirusega, järelikult nende kineetiline energia on väga suur; 2) tuuma lõhustumisel vabanevad kiired neutronid; 3) uraani tuuma lõhustumisel tekkinud γ-kiired (see kiirgus on üks mateeria esinemisvorme, tal on mass ja energia); 4) α-osakesed; 5) β-osakesed, mis tekivad uraani tuuma radioaktiivsete osade edasisel lagunemisel.

Mille arvel tekib siis see hiiglasuur energia, mida kannavad uraani tuuma lõhustumissaadused?

Energia tekib kõikide tuumas olevate osakeste potentsiaalse energia vähenemise arvel.

Uraani tuuma jagunemisel saadakse vähemassiivsed tuumad (baariumi ja krüptooni tuumad), mille osakeste üldine potentsiaalne seoseenergia on tunduvalt väiksem kui uraani tuumal. Vabanenud seoseenergia mõjub ka väljaspool tuuma. Energiahulga võib välja arvutada massidefekti suuruse kaudu.

Selle energia kandjateks on tuuma poolitumisel tekkinud laguproduktid. Uraani tuuma lõhustumisel kaheks killuks eraldub ener-

gia 200 MeV, s. o. 20 miljonit korda rohkem kui trotüüli molekuli purunemisel.

1 kg uraani lagunemisel eraldub energia, mis on võrdne 20 000 tonni nitrotoluooli lõhkemise energiaga.

Looduslik uraan koosneb kolmest isotoobist: uraan 235, uraan 238 ja uraan 234. Isotoop uraan 235 moodustab 0,7% kaevandatava uraani aatomite üldarvust. Isotoopi 234 on maagis tühiselt vähe, peamine osa massist kuulub isotoobile 238.

Et detailselt välja selgitada uraani iga isotoobi lõhustumisvõimet, eraldati isotoop 235 isotoobist 238. Isotoobi 235 eraldamine osutus väga keerukaks, sest mõlema isotoobi keemilised ja füüsikalised omadused osutusid peaaegu ühesugusteks.

Ühe uraani isotoobi eraldamiseks teisest kasutati mitmekordse difusiooni meetodit. On teada, et kerged gaasid (vesinik, valgustusgaas, heelium jt.) läbivad kergesti poorseid vaheseinu, sel ajal kui rasked gaasid (süsihappegaas, kloor jt.), mis segus esinevad, niisuguseid takistusi ei läbi.

Gaaside sellise omaduse tõttu õnnestuski eraldada uraani isotoope teineteisest.

Nõukogude füüsikud G. N. Fljorov ja K. A. Petržak tõestasid katsetega, et uraan 238 tuumade lagunemise võivad esile kutsuda ainult kiired neutronid, mille energia ületab miljon elektronvolti.

Kui uraan 238 tuuma tunginud neutroni energia on väiksem, siis tekib uus uraani radioaktiivne isotoop (uraan 239), mis laguneb, kiirates välja β-osakese. See lagunemine viib transuraani — elemendi neptuuniumi tekkimisele. Neptuunium on samuti radioaktiivne ning muutub β-osakese eraldumisel plutooniumiks. Plutoonium on omakorda radioaktiivne, ning kiirates välja α-osakese, muutub isotoobiks 235.

Alguses püüdsid teadlased ahelreaktsiooniks kasutada puhast uraani isotoopi 235, kuid hiljem selgus, et reaktsiooni võib tekitada ka ilma isotoope eraldamata.

Aeglaste neutronite toime isotoobile 235 on sedavõrd tugev, et ületab tunduvalt kiirete neutronite mõju isotoobile 238, vaatamata sellele et isotoobi 235 aatomituumi on 140 korda vähem kui isotoobi 238 tuumi. Kui aga aeglaste neutronite osa ahelreaktsioonis on nii suur, siis oleks otstarbekohane kiired neutronid aeglustite abil aeglaseks muuta.

Kui kiire neutron läbib aeglusti, siis tema kiirus väheneb ja ta võib esile kutsuda tuuma lõhustumise. Selle tagajärjel tekivad jälle uued neutronid, mis läbivad aeglusti ja lõhustavad uusi tuumi jne.

Kiirete neutronite aeglustiks võiks olla raske vesi või grafiit.

Imperialistlikes maades, esmajoones just Ameerika Ühendriikides, kasutatakse aatomienergiat eelkõige sõjalisteks eesmärkideks, aatomipommide ji. relvade tootmisel.

Nõukogude Liidus kasutatakse aatomienergiat laialdaselt rahulikel eesmärkidel, rahva heaolu tõstmiseks.

Iga päevaga laieneb tuumaenergia kasutamise valdkond. Praktilise rakendamise peamised suunad on:

a) tuumaenergeetika arendamine tööstuse, transpordi ja põllumajanduse vajaduste rahuldamiseks;

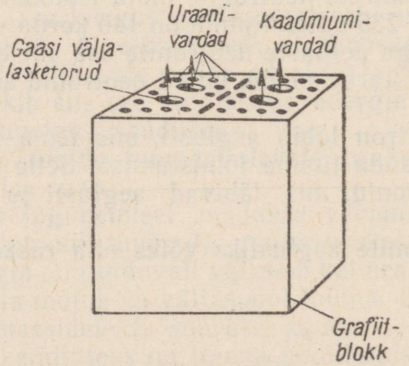
b) radioaktiivsete isotoopide kasutamine kõikvõimalike tootmisprotsesside kontrollimiseks, reguleerimiseks ja automatiseerimiseks;

c) radioaktiivsete isotoopide kasutamine teaduslikus uurimistöös meditsiinis, bioloogias, agronoomias, keemias jt. teadustes ning metallide tehnoloogias (märgitud aatomite meetod).

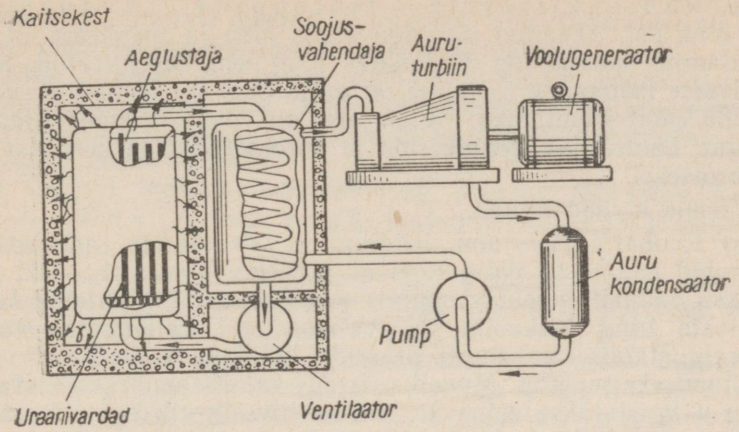
1. Tuumaenergeetika. Tuumaenergeetika aluseks on tuumareaktorites toimuvad reaktsioonid. 1954. a. ehitati Nõukogude Liidus maailma esimene aatomielektrijaam võimsusega 5000 kW. Praegu ehitatakse tööstuse ja põllumajanduse tarbeks aatomielektrijaamu võimsusega üle 400 000 kW. 1960. a. lõpuks ulatus aatomielektrijaamade koguvõimsus 2,5 miljoni kW. Ehitati ja sooritas esimesed reisid aatomijäälõhkuja «Lenin». Praegu tehakse ohtrasti katseid aatomienergia kasutamiseks kõikides transpordiliikides, sest aatomikütus võtab vähe ruumi ja kaalub samuti vähe.

Vaatame tuumareaktori tööpõhimõtet. Joonisel 220 on kujutatud reaktori siseehitus.

Reaktor kujutab endast suurt anumat mahuga 200 m³. Anum täidetakse neutronite aeglustiga. Aeglustit ümbritseb aine, mis peegeldab neutrone. Aeglustina ja peegeldajana kasutatakse tavalist grafiiti.



Joon. 220.



Joon. 221.

Aeglustis asetsevad metalsest uraanist vardad, kus toimubki aatomituumade lagunemine. Et ahelreaktsioon võib kulgeda plahvatusega, kasutatakse reaktsiooni reguleerimiseks aineid, mis efektiivselt neelavad aeglasi neutroneid. Sellisteks on kaadmium ja teras, mis sisaldab boori, sest boor neelab tugevasti aeglasi neutroneid.

Nende ainete küllaldane kogus reaktsioonis võib pidurdada ahelreaktsiooni ja selle isegi täielikult katkestada. Reaktorites laguneb isotoop 235 aeglaste neutronite toimel. Osa neutroneid satub isotoobi 238 tuumadesse ning muundab need plutooniumiks. Tugev neutronite neelaja võimaldab reguleerida ahelreaktsiooni intensiivsust.

Aeg-ajalt eemaldatakse uraanivardad reaktorist ning töödeldakse neid keemiliselt, mille tulemusena plutoonium eraldub uraanist. Uraani tuumade jagunemisel eraldub tohutult energiat soojuse ja radioaktiivse kiirguse näol. Soojust võib kasutada soojuselektrijaamades. Sel eesmärgil juhitakse reaktorisse pidevalt gaasi, mis kuumeneb kõrge temperatuurini ja liigub edasi aurukatlasse. Gaasi energiat kasutatakse vee aurustamiseks ja kõrge rõhuga ülekuumendatud auru saamiseks, mis juhitakse auruturbiini. Turbiin ühendatakse elektrigeneraatoriga. Joonisel 221 on toodud aatomielektrijaama ehituse põhimõtteline skeem.

Aatomienergial töötava soojuselektrijaama eelis, võrreldes tavalise soojuselektrijaamaga, on selles, et ta tarbib väga vähe kütust. Nii näiteks annab 1 kg uraani 22 miljonit kWh energiat, mille tootmiseks tuleks põletada 2500 tonni kivisütt.

Reaktorid on võimsateks kahjuliku radioaktiivse kiirguse allikateks, nii et nad nõuavad erilisi kaitsevahendeid (betoon jt.). Kõik operatsioonid, nii reaktori täitmine kui ka tühjendamine, toimuvad automaatselt kauge vahemaa tagant.

2. Radioaktiivsete isotoopide kasutamine tehnikas. Raadium on väga kallis aine ja seepärast on tema kasutamine meditsiinis, bioloogias ning tehnikas piiratud. Radioaktiivsete isotoopide tootmine on palju odavam ja nad leiavad ka laialdasemat kasutamist. Nende abil on võimalik kontrollida toodangut, kontrollida, reguleerida ja automatiseerida keerukat tootmisprotsessi.

Toome mõned näited.

a) Koobalti, tseesiumi, iriidiumi jt. elementide radioaktiivsed isotoobid saadavad välja tugevat γ-kiirgust, mistõttu neid kasutatakse edukalt defektoskoopias — võimsate aurukatelde keevisõmbluste ning kõikvõimalike valumeetodil valmistatud toodete läbivalgustamiseks, samuti pragude, tühikute ja teiste defektide avastamiseks sepistes. Muusikariistade valmistamiseks kasutatavat puitu valgustatakse eelnevalt radioaktiivsete kiirtega, et määrata puidu sisemiste kiudude ebaühtlust. Radioaktiivset kiirgust rakendatakse veel paljudel juhtudel, kus on võimalik asendada kallihinnalist ja suurte mõõtmetega röntgeniaparatuuri.

b) Radioaktiivsete isotoopide abil on võimalik tootmisprotsessi peatamata kontrollida toote paksust. Kriteeriumiks on toodet läbiva kiirguse suurenemine või vähenemine.

c) Radioaktiivsete isotoopide abil saab kontrollida sulatus- või martäänahju kulumist. Sel eesmärgil monteeritakse ahju alusesse mõnede elementide radioaktiivsed isotoobid. Kui sulametallis avastatakse radioaktiivseid isotoope, siis tähendab see, et ahju alus on kulunud piirini, kuhu monteeriti radioaktiivne aine.

d) Sisepõlemismootorite kolvirõngaste kulumist võib samuti kontrollida rõngaste koostisse lisatud radioaktiivse koobalti abil. Et kolvirõngaste kulumisel satuvad metalliosakesed õlisse, siis saab õli radioaktiivsuse astme järgi hinnata rõngaste kulumist. Radioaktiivsust mõõdetakse Geigeri loenduri abil. See meetod võimaldab välja selgitada kütuse kvaliteedi mõju kolvirõngaste kulumisele.

3. Radioaktiivsete isotoopide kasutamine teaduses. Kunstlik radioaktiivsus võimaldas teadlastel teha mitmesuguseid uurimisi bioloogias, meditsiinis, keemias jt. teadusharudes nn. märgitud aatomite meetodil.

Meetod seisab selles, et mitteradioaktiivsele elemendile lisatakse tühine hulk mõnda radioaktiivset isotoopi, mida saab jälgida tänu tema kiirgusele.

Radioaktiivse isotoobi olemasolu avastamiseks kasutatakse kaht meetodit — radioautograafiat ja loendureid. Esimene meetod põhineb radioaktiivsete kiirte mõjul fotoplaadile. Teise aluseks on gaasi ioniseerumine radioaktiivse kiirguse toimel. Loenduri abil saab määrata nii radioaktiivse kiirguse olemasolu kui ka teha kindlaks tema tugevuse, lugedes ära impulsside arvu minutis.

Märgitud aatomite meetod on ainukene viis elusorganismi uurimiseks tema normaalse funktsioneerimise käigus.

Radioaktiivsuse mõõtmine võimaldab saada andmeid radioaktiivse isotoobi liikumise kohta organismis, selle kogunemisest mingisse organisse või organismist lahkumise kiiruse kohta.

Toome mõned näited.

a) Geigeri loenduri abil mõõdeti soolade imbumise kiirust verre. Loendur oli inimese peos ja registreeris vere radioaktiivsuse muutumist.

b) Viies verre radioaktiivset joodi, õnnestus kindlaks teha selle kogunemine kilpnäärmesse, mis omakorda võimaldas joodi kasutada kilpnäärme haigestumise korral.

c) Viies organismi radioaktiivset fosforit, õnnestus jälgida fosforivahetuse kiirust. Fosforivahetus toimub kõige intensiivsemalt maksas, lihastes ja ajus. Avastati ka, et tunduv hulk fosforit koguneb luukoesse. Nii imelik kui see ka ei ole, sisaldas isegi selline kude nagu hambaemail toiduga söödud fosforit.

d) Uurimised radioaktiivse rauaga võimaldasid kindlaks määrata raua imendumise kiiruse punaste vereliblede hemoglobiini. Kehvveresust põdevatel inimestel toimub imendumine tunduvalt kiiremini.

e) Lämmastiku radioaktiivsete isotoopide kasutamine võimaldas jälgida valkude uuenemise kiirust organismis. Selgus, et 6—7 päeva jooksul pooled maksa valkudest lagunevad ja asenduvad uutega. 180 päeva möödumisel on uuenenud pool kogu meie organismi valkudest.

f) Viies organismi radioaktiivset süsinikku sisaldavat suhkrut, võis jälgida selle omastamist, muundumist ja eraldumist organismist.

g) Mikroobide tungimist loomsetesse organismidesse ja nende levikut seal uuriti radioaktiivseid isotoope sisaldavas toitekeskkonnas kasvatatud mikroobide abil. Koos radioaktiivse ainega olid need mikroobid kergesti avastatavad iga looma organismis.

Märgitud aatomite meetod võimaldab keemias lahendada küsimusi, mis on seotud korrosiooniga või väga väikese soolahulga avastamisega (tavaliste analüütiliste meetoditega seda teha ei saa). Märgitud aatomite abil kontrollisid keemikud mitmeid keemilise analüüsi ja ainete tööstusliku eraldamise meetodeid.

Märgitud aatomite kasutamine metallide tehnoloogias lubab lahendada keerulisi küsimusi: elementide difusioon sulamites, elementide difusioon noolutamisel jne.

Märgitud aatomid võimaldavad jälgida mitmesuguste väetisena pinnasesse viidud keemiliste elementide omastamist taimedes ja lahendada teisi tähtsaid küsimusi.

Kõik need näited ei ammenda kaugeltki radioaktiivsete isotoopide kasutamise mitmekülgsust teaduse ja tehnika mitmetes valdkondades. Nende rakendamise võimalused laienevad iga päevaga.

Kontrollküsimusi

1. Mida nimetatakse osakeste seoseenergiaks?
2. Mis on massidefekt?
3. Missugune on massi ja energia vaheline seos?
4. Millise kiirguse toimel avastati uraani tuuma lõhustumine?
5. Mis on ahelreaktsioon ja kuidas see toimub uraani isotoobi 235 puhul?
6. Mis on kriitiline mass?
7. Kuidas on ehitatud ja töötab tuumareaktor?
8. Kuidas kasutatakse tuumaenergiat tööstuses, transpordis, põllumajanduses, meditsiinis, bioloogias jm.?

SISUKORD

Eessõna 3

III osa

ELEKTER

I peatükk. **Elektriväli**

§ 1. Sissejuhatus 5
§ 2. Kehade elektriseerumine hõõrumisel ja laetud kehaga puudutamisel 6
§ 3. Elektrilaengute kaks liiki. Laengute vastastikune mõju . . . 7
§ 4. Elektroskoop 8
§ 5. Elektronteooria põhialused 9
§ 6. Juhid ja dielektrikud 10
§ 7. Coulomb'i seadus 11
§ 8. Elektrilaengu ühikud 12
§ 9. Keskkonna dielektriline läbitavus 13
§ 10. Elektriväli 18
§ 11. Elektrivälja tugevus 19
§ 12. Elektrivälja jõujooned 22
§ 13. Homogeenne elektriväli 25
§ 14. Potentsiaal 26
§ 15. Potentsiaalide vahe, selle ühikud 27
§ 16. Laengute ümberpaiknemise tingimused elektriväljas 29
§ 17. Elektromeeter 29
§ 18. Elektrivälja töö laengu ümberpaigutamisel 30
§ 19. Juhid elektriväljas 32
§ 20. Laengute jaotumine isoleeritud juhil 34
§ 21. Dielektrikud elektriväljas 35
§ 22. Juhi elektrimahtuvus 36
§ 23. Elektrimahtuvuse ühikud 37
§ 24. Kondensaator. Plaatkondensaatori mahtuvuse valem 39

II peatükk. **Alalisvool**

§ 25. Elektrivoolu mõiste 45
§ 26. Kinnine vooluring. Voolu suund 45
§ 27. Vooluallika elektromotoorne jõud 46
§ 28. Vooluringi välis- ja siseosa. Pingelangus vooluringi välisosas . . 48
§ 29. Voolutugevus, selle ühikud 49
§ 30. Ampermeeter, voltmeeter ja galvanomeeter ning nende lülitamine ahelasse 49
§ 31. Juhi takistus. Takistusühik. Elektrijuhtivus 50
§ 32. Ohmi seadus vooluringi osa kohta 51
§ 33. Juhi takistuse sõltuvus ainest, juhi pikkusest ja ristlõike pindalast 52

§ 34. Juhi takistuse sõltuvus temperatuurist 55
§ 35. Ülijuhtivuse mõiste 61
§ 36. Reostaadid 61
§ 37. Takistite järjestiklülitus 65
§ 38. Takistite paralleellülitus 68
§ 39. Ohmi seadus kogu vooluringi kohta 74
§ 40. Ohmi seadus ahelaosa kohta, mis sisaldab emj. 76
§ 41. Elektrivoolu töö 77
§ 42. Elektrivoolu võimsus 79
§ 43. Voolu soojuslik toime. Joule'i-Lenzi seadus 84
§ 44 Voolu soojusliku toime rakendusi 88
§ 45. Termoelemendid ja nende kasutamine 90
§ 46. Kontaktpinge 92

III peatükk. **Elektromagnetism**

§ 47. Voolude vastastikune mõju 94
§ 48. Magnetväli 95
§ 49. Püsivmagnetid. Magnetipooluste vastastikune mõju 96
§ 50. Magnetvälja tekkimine 97
§ 51. Magnetvälja jõujooned 98
§ 52. Sirgvoolu magnetväli 99
§ 53. Ringvoolu magnetväli 99
§ 54. Vooluga pooli magnetväli 100
§ 55. Elektromagnet ja selle kasutamine 101
§ 56. Magnetvälja mõju vooluga juhile. Vasaku käe reegel 103
§ 57. Magnetvälja tihedus 106
§ 58. Magnetvoog 107
§ 59. Magnetiline läbitavus 108
§ 60. Magnetvälja tugevus 111
§ 61. Paramagnetilised, ferromagnetilised ja diamagnetilised ained . . 114
§ 62. Püsiv ja muutuv magnetväli 116
§ 63. Ferromagnetiliste kehade magneetimine ja ümbermagneetimine . 118

IV peatükk. **Elektromagnetiline induktsioon**

§ 64. Elektromagnetilise induktsiooni nähtus 120
§ 65. Induktsioonivoolu saamise põhitingimused 120
§ 66. Induktsioonivoolu suund. Lenzi reegel 122
§ 67. Parema käe reegel. Indutseeritud emj. suurus 124
§ 68 Pöörisvoolud 127
§ 69. Eneseinduktsioon 129
§ 70. Juhtmekontuuri pöörlemine homogeenses magnetväljas. Sinusoidaalne vahelduvvool 131
§ 71. Vahelduvvoolu transformeerimine. Trafo 136
§ 72. Sädeinduktor 140
§ 73. Elektrienergia ülekanne suurtele kaugustele 141
§ 74. Nõukogude Liidu elektrifitseerimine 143

V peatükk. **Elektrivool elektrolüütides**

§ 75. Elektrolüüsi mõiste 145
§ 76. Elektrolüütiline dissotsiatsioon 145
§ 77. Faraday I seadus 146
§ 78. Elektrolüüsi rakendusi tehnikas 149
§ 79. Galvaanielemendid. Volta element 153
§ 80. Volta elemendi polarisatsioon. Leclanché element 154
§ 81. Akumulaatorid. Akumulaatori mahtuvus. Akumulaatorite kasutamine 155

VI peatükk. **Elektrivool gaasides**

§ 82. Gaaside ionisatsioon 159
§ 83. Lahendused gaasides normaalrõhul 161
§ 84. Lahendus hõrendatud gaasides 166
§ 85. Katoodkiired, nende olemus ja omadused 169
§ 86. Termoemissioon 171
§ 87. Kahe elektroodiga elektronlamp (diood) 173
§ 88. Kolme elektroodiga elektronlamp (triood) 176
§ 89. Pooljuhtalaldi ja -võimendi 177
§ 90. Elektronkiiretoru 181

VII peatükk. **Elektromagnetilised võnkumised ja lained**

§ 91. Elektrivõnkumised. Kondensaatori tühjenemine. Elektromagnetilised võnkumised 184
§ 92. Kinnine võnkering. Sumbuvad ja sumbumatud võnkumised . . . 186
§ 93. Avatud võnkering. Elektromagnetilised lained ja nende levimine ruumis 188
§ 94. Elektriline resonants 191
§ 95. Raadiosaatja ja -vastuvõtja. A. S. Popov — raadio leiutaja . . 192
§ 96. Röntgenikiired ja nende kasutamine 194

IV osa

OPTIKA JA AATOMI EHITUS

VIII peatükk. **Valguse olemus. Valguse levimine. Fotomeetria**

§ 97. Valguse olemus 197
§ 98. Valgusallikad 198
§ 99. Valguskiired. Valguse sirgjooneline levimine 199
§ 100. Valguse kiirus 199
§ 101. Valgusvoog, valgustugevus 201
§ 102. Valgustustugevus 203
§ 103. Valgustustugevuse seadused 204
§ 104. Fotomeeter. Valgustugevuse mõõtmine 208
§ 105. Luksmeeter 210

IX peatükk. **Valguse peegeldumine**

§ 106. Valguse peegeldumine. Valguse peegeldumisseadused . . . 212
§ 107. Tasapeegel. Peegeldumine peegelpinnalt ja hajuspeegeldumine. Punkti ja eseme kujutiste konstrueerimine tasapeeglis 213

X peatükk. **Valguse murdumine**

§ 108. Valguse murdumine 216
§ 109. Valguse murdumisseadused. Murdumisnäitaja 217
§ 110. Täielik sisepeegeldumine 221
§ 111. Murdumine tasaparalleelses plaadis 225
§ 112. Murdumine kolmetahulises prismas 226
§ 113. Läätsed. Läätse optiline tugevus 227
§ 114. Kujutise konstrueerimine läätses 229
§ 115 Läätse joonsuurendus. Läätse valem 231
§ 116. Fotoaparaat. Projektsiooniaparaat 233
§ 117. Vaatenurk 236
§ 118. Luup 236
§ 119. Mikroskoop 237

XI peatükk. **Valguse koostis. Kiirgamine**

§ 120. Valge valguse jagunemine prismas värvilisteks kiirteks. Spekter. Monokromaatiline valgus 239
§ 121. Valge valguse saamine värvilistest valguskiirtest. Kehade värvus 240
§ 122. Spektroskoop. Kiirgusspektrid 241
§ 123. Neeldumisspektrid. Kirchhoffi seadused 242
§ 124. Päikese spekter 243
§ 125. Spektraalanalüüs 243
§ 126. Valguse kombineeritud hajumine 245
§ 127. Infrapunased ja ultravioletsed kiired 246
§ 128. Elektromagnetiliste lainete skaala 248

XII peatükk. **Valguse laine- ja korpuskulaarolemus. Valguse toime**

§ 129. Valguse interferents 250
§ 130. Õhukeste kelmete värvus 253
§ 131. Lainete difraktsioon 255
§ 132. Valguse difraktsioon 257
§ 133. Difraktsioonivõre ja valguse lainepikkuse määramine 258
§ 134. Valguse rõhk 260
§ 135. Fotoefekt. Valguskvandi mõiste 262
§ 136. Fotoelemendid ja nende kasutamine 264
§ 137. Valguse soojuslik ja keemiline toime 268
§ 138. Luminestsents 269

XIII peatükk. **Aatomi ehitus**

§ 139. Aatomi ehitusest 272
§ 140. Aatomi elektronkate ja tuum 273
§ 141. Aatomi energianivood. Energia neelamine ja kiirgamine aatomi poolt 276
§ 142. Bohri postulaadid 277

XIV peatükk. **Aatomituuma energia**

§ 143. Radioaktiivsus 279
§ 144. Aatomituuma ehitus 284
§ 145. Aatomituumade mõjutamise meetodid. Tuumade muundumine . . 286
§ 146. Kunstlik radioaktiivsus 287
§ 147. Seoseenergia ja massidefekt 289
§ 148. Tuumaenergia vabanemine. Uraani tuumade lõhustumine. Ahelreaktsioon 290
§ 149. Aatomienergia rahuotstarbeline kasutamine 294

Николай Дмитриевич Бытько. ФИЗИКА II. На эстонском языке. Перевел с русского Л. Тюрнпуу. Оформление Ю. Аррак. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

Toimetaja H. Heinoja. Kunstiline toimetaja H. Keigo. Tehniline toimetaja E. Ainla. Korrektorid E. Bitter ja S. Tūrn. Laduda antud 20. VIII 1968. Trükkida antud 21. VII 1969. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 19. Arvestuspoognaid 18,13. Trükiarv 8000. Tellimuse nr. 4862. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Ülikooli 17/19. III.

Hind 59 kop.

59 kop.

A-29355

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00428153 3