TARTU ÜLIKOOL · UNIVERSITAS TARTUENSIS · 1632

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

FÜÜSIKA LOENGUD ARSTITEADUSKONNA RAVI-, PEDIAATRIA- JA STOMATOLOOGIAOSAKONNA ÜLIÕPILASTELE

II

TARTU 1972

TARTU RIIKLIK ÜLIKOOL

Üldfüüsika kateeder

FÜÜSIKA LOENGUD ARSTITEADUSKONNA RAVI-, PEDIAATRIA- JA STOMATOLOOGIAOSAKONNA ÜLIÕPILASTELE

Teine osa

ELEKTER JA ELEKTROONIKA

Koostanud V. Kark

Tartu 1971

KUSTUTATUD Arh.
Tartu Ülikool
RAAMATUKOGU
11133

ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ-МЕДИКОВ
ЛЕЧЕБНОГО, ПЕДИАТРИЧЕСКОГО И СТОМАТОЛОГИЧЕСКОГО ОТДЕЛЕНИЙ

II

Составил Н.Карк

Тартуский государственный университет
ЭССР, г.Тарту, ул.Виликооли, 18

Vastutav toimetaja A. Mitt
Korrektor M. Raisma

TRÜ rotaprint 1971. Paljundamisele antud 15. XII 1971.
Trükipoognaid 6,5. Tingtrükipoognaid 6,0. Arvestus-
poognaid 4,73. Trükiarv 600. Paber 30 x 42. 1/4.
MB 07647. Tell. nr. 1067.

Hind 30 kop.

1. AINETE ELEKTRILISED OMADUSED

Ainete aatomite nn. väliselektronid, olles tuumaga nõrgalt seotud, võivad aatomist teatud tingimustel eralduda. Seejuures muutub aatom positiivseks iooniks. Eraldunud elektronid võivad jääda vaadeldavast ainest kehasse nn. vabade elektronidena või ühineda teiste aatomitega, tekitades negatiivseid ioone. Seega on ained elektrilaengud positiivsete ja negatiivsete ioonide ning elektronidena. Kui ioonid tekivad molekulidest, siis on nad mõnikord üsna keerulise ehitusega.

Elektriliste omaduste järgi võime aineid jagada juhtideks ja mittejuhtideks (dielektrikuteks, isolaatoriteks). Juhtide elektrilaengud on liikuvad. Juhid on kõik metallid (1. liigi juhid); soolade, hapete ja aluste lahused (2. liigi juhid); mõned tahked ained, nagu süsi, grafiit jt. Dielektrikutes ei ole vabu liikuvaid laenguid, nendes võivad laengud ümber paikneda vaid molekuli või aatomi piirides. Dielektrikud on klaas, portselan, mitmesugused õlid ja vaigud, eboniit, merivaik, kummi, siid, plastmassid, õhk, keemiliselt puhas vesi jne.

Paljude ainete elektrilised omadused sõltuvad temperatuurist, niiskusest ja mitmesugustest lisanditest. Näiteks klaas, mis toatemperatuuril on isolaator, muutub kuumutamisel juhtivaks. Kuiv puit on hea isolaator, kuid juba vähesel niisutamisel ta seda enam ei ole.

Viimasel ajal pööratakse suurt tähelepanu juhtide ja isolaatorite vahepealsete omadustega ainetele, nn. pooljuhtidele. Nendes tavalistes tingimustes peaaegu pole vabu laenguid, kuid laengud võivad seal vabaneda paljude välis-

mõjutuste tagajärjel. Mõningaid pooljuhte rakendatakse laialdaselt tehnikas. Edaspidi tutvume ka meie nende omaduste ja rakendustega praktikas.

2. ELEKTRIVÄLI

Teame, et elektrilaengute vahel on vastastikune toime, laengute vahel mõjuvad tõuke- või tõmbejõud (Coulomb'i seadus). Seletame seda nii, et laengute vahel asub eriline materia liik, mida nimetame elektriväljaks. Elektrivälj eksisteerib nii aines kui ka tühjuses ja tekitatakse laengute poolt.

Elektrivälja iseloomustatakse elektrivälja tugevusega. Elektrivälja tugevust E välja mingis punktis mõõdame sellesse punkti paigutatud ühikulisele laengule mõjuva jõuga.

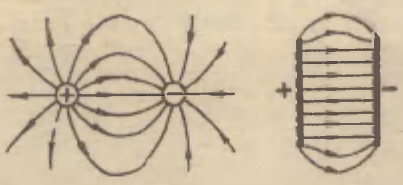
$$E = \frac{F}{q}$$

Elektrivälja tugevust iseloomustatakse vektoriga, mille suund ühtib mõjuva jõu suunaga, kui laeng on positiivne.

Mitmesuguste elektriväljade uurimisel kujutatakse nad nn. jõujoonte abil. Elektrivälja jõujoone all mõeldakse joont elektriväljas, mille puutujad kõigis punktides ühtivad elektrivälja tugevuse vektorite sihtidega. Jõujoon ühtib trajektooriga, mida mööda liiguks elektriväljas inertsita positiivne punktlaeng. Et jõujoonte abil peale välja suuna edasi anda ka elektrivälja tugevuse suurust, võetakse nende tihedus võrdseks elektrivälja tugevusega.

Elektrivälja kujutamisel jõujoonte abil tuleb silmas pidada: 1) jõujooned algavad positiivselt laengult ja lõpevad negatiivsel laengul; 2) jõujooned ei lõiku, s.t. iga välja punkti võib läbida vaid üks jõujoon; 3) jõujooned on risti laetud kehade pindadega. Joonisel 1 on toodud mõned

jõujoonte abil kujutatud elektriväljad.



Joonis 1

3. ELEKTRIVÄLJA POTENTSIAAL. PINGE

Laengud võivad elektrivälja mõjul liikuda, tehes selle juures tööd. Laengute ümberpaigutamiseks elektriväljas tuleb teha tööd. See tähendab, et elektriväljas asuval laengul on potentsiaalne energia. Selle potentsiaalse energia kaudu võime iseloomustada elektrivälja ja seda tehaksegi potentsiaali mõiste abil.

Elektrivälja mingisuguse punkti potentsiaali mõõdetakse tööga, mis tehakse ühe positiivse laenguühiku viimisel sellest punktist väljapoole elektrivälja mõjupiirkonda (s.o. teoreetiliselt lõpmatusse).

Potentsiaal

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

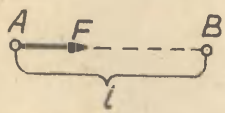
kus A - tehtud töö ja

q - laengu suurus.

Praktikas esinevatel juhtudel, kus laengud paiknevad tihti ümber vaid ühest välja punktist teise, huvitab meid nende punktide potentsiaalide vahe ehk pinge.

Potentsiaalide vahet ehk pinget kahe punkti vahel mõõdetakse tööga, mis kulub laenguühiku viimiseks ühest punktist teise. Kui näiteks joonisel 2 laengu q viimisel punktist A punkti B tehtav töö on A_{AB}, siis pinge

$$U_{AB} = \frac{A_{AB}}{q} .$$



Joonis 2

Potentsiaali- ja pingeühikuks on SI süsteemis volt (V), see on niisugune potentsiaal (pinge), mille juures 1 kuloni (C) ümberpaigutamisel tehakse tööd 1 džaul (J).

Paljudel juhtumitel mõõdetakse punktide potentsiaalid (pinged) maa suhtes, lugedes maapinna potentsiaali võrdseks nulliga.

Kuna potentsiaal ja elektriväljа tugevus mõlemad iseloomustavad elektriväljа, siis peab nende vahel olema seos. Olgu joonisel 2 punktide A ja B vaheline potentsiaalide vahe (pinge) U. Laengu q ümberpaigutamisel punktist A punkti B elektriväljа poolt tehtav töö (potentsiaali definitsioonist) on

$$A = qU. \qquad (1)$$

Teiselt poolt (oletusel, et väli on ühtlane, seega nihke kestel laengule mõjuv jõud F on konstantne) on sama töö üleskirjutatav, kui nihe on mõjuva jõu sihiline

$$A = F \cdot l ,$$

s.o. laengule mõjuv jõud korrutatud teepikkusega. Elektriväljа tugevuse definitsioonist teame, et

$$F = Eq.$$

Kasutades seda eelmises valemis, saame

$$A = Eql. \qquad (2)$$

Kuna võrdused (1) ja (2) kujutavad sama tööd, siis

$$qU = Eql ,$$

millest

$$E = \frac{U}{l} .$$

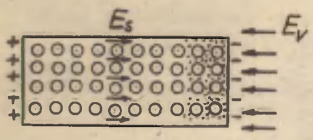
Näeme, et ühtlase välja puhul võib elektrivälja tugevust mõõta potentsiaalide vahega pikkusühikule, s.o. kui potentsiaali gradienti. Siit tuleneb ka SI süsteemi väljatugevuse ühik

$$1 \frac{V}{m} .$$

4. ELEKTRIVÄLJA MÕJU AINELE

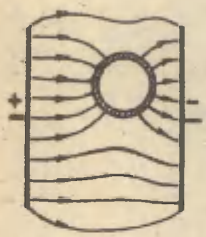
Tõdesime, et elektrilistelt omadustelt jagunevad ained juhtideks ja isolaatoriteks.

Vaatame, mis toimub juhis, näiteks metallis, kui viimane asetada elektrivälja (joonis 3). Elektrivälja E_v mõjul hakkavad metalli vabad elektronid liikuma välja jõujoontele vastassuunas, mille tulemusena ühes juhtme otsas tekib negatiivne laeng, teises positiivne. Need laengud



Joonis 3

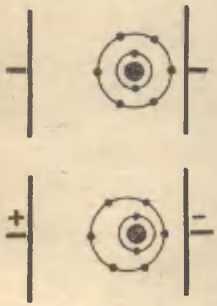
tekitavad juhi seea sisemise elektrivälja E_s, mille suund on vastupidine välise elektriväljaga ja mis seetõttu nõrgendab viimast. Laengute liikumine toimub seni, kuni sisemine väli saab võrdseks välisväljaga, kompenseerides selle. See aga tähendab, et juhi sisemuses elektriväli puudub. Sellel põhineb nn. elektrostaatiliste ekraanide konstruktsioon. Välis-elektriväljade eest kaitstav ruum ümbritsetakse heast juhist kestaga (ekraaniga) (joonis 4). Tavaliselt ühendatakse ekraan maaga (maandatakse), et ekraanil oleks Maa potentsiaal.



Joonis 4

Dielektriku paigutamisel elektrivälja on pilt teine. Teatavasti ei ole dielektrikutes vabu laenguid, laengud võivad neis ümber paikneda vaid aatomi või molekuli piires.

Kui neutraalsetest aatomitest ja molekulidest koosnev aine asetada elektrivälja, siis selle aatomite või molekulide elektronkatted nihkuvad (eriti välimised, mis on tuumaga nõrgemini seotud) (joonis 5). Positiivse ja negatiivse laengu jaotuse sümmeetria rikutakse: aatomi või molekuli ühel küljel saame positiivse, teisel negatiivse laengu ülekaalu. Seda nähtust nimetatakse aatomite või molekulide polarisatsiooniks.

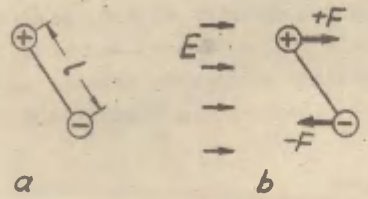


Joonis 5

Neutraalsetel molekulidel võivad erineva laenguga osad (ioonid, ioonide grupeeringud) elektrivälja mõjul nihkuda, põhjustades molekulide polarisatsiooni.

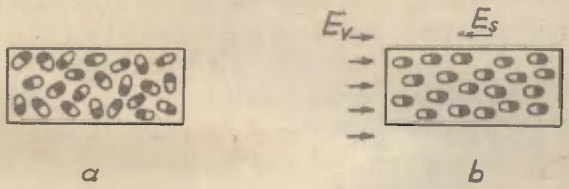
Mõnikord ei ole loomulik laengute asetus molekulis sümmeetriline, s.o. molekuli ühes osas on ülekaalus positiivne laeng, teises negatiivne. Sellised on polaarsed molekulid ehk dipoolid (näiteks vee, etüülpiirituse, atsetooni ja paljude orgaaniliste ainete moleku-

lid). Dipoole võib vaadelda kui teineteisest teatud kaugusel asetsevaid vastasnimelisi laenguid (joonis 6a). Ühtlane elektriväli püüab niisugust dipooli pöörata (tekitab jõumomendi) (joonis 6b). Mitteühtlases väljas mõjub suurema väljatugevusega piirkonnas asetsevale dipooli laengule suurem jõud. Selle tagajärjel mõjub dipoolile peale jõumomendi veel resultantjõud.



Joonis 6

Dipoolidest koosnevas dielektrikus asetsevad dipoolid kaootiliselt (joonis 7a) ja molekulaarliikumise tagajärjel nende orientatsioon kogu aeg muutub. Elektrivälja asetamisel, elektrivälja mõjul orienteeruvad molekulid jõujoonte sihis - toimub dielektriku polarisatsioon (joonis 7b). Polarisatsiooni tagajärjel tekib dielektrikus sisemine, välisväljale vastassuunaline elektriväli E_s. Viimane nõrgendab välisvälja E_v, mistõttu see on dielektrikus nõrgem kui tühjuses



Joonis 7

($E = E_v - E_s$). Välja nõrgenemine sõltub dielektriku ainest, tema polarisatsioonivõimest ja seda võetakse arvesse nn. suhtelise elektrilise läbitavuse ε_s abil. Selle saame, kui võrdleme samade laengute poolt tekitatud elektrivälja tugevust tühjuses E_0 ja vaadeldavas aines E

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

s.t. suhteline elektriline läbitavus näitab, mitu korda on samades tingimustes elektrivälja tugevus vaakuumis suurem kui vaadeldavas dielektrikus. Järgnevas tabelis on toodud mõnede ainete suhtelised elektrilised läbitavused.

Aine	ε_s
Parafiin	2,1
Vilgukivi	4...9
Klaas	6...10
Vesi (keemiliselt puhas)	81
Õhk (normaaltingimustes)	1,00058

On rida aineid, üldnimega segnetoelektrikud (Seignette'i sool, baariumtitanaat jt.), mille suhteline elektriline läbitavus ulatub mitme tuhandeni.

Orgaanilised ained, nagu valgud, rasvad ja süsivesikud, millest koosnevad organismi koed, on puhtal kujul ja kuivas olekus dielektrikud. Suurim elektriline läbitavus on valkudel, vähim rasvadel. Mõnede orgaanililiste ainete suhtelised elektrilised läbitavused on toodud tabelis lk. 11 .

Keskkonna elektriline läbitavus SI süsteemis

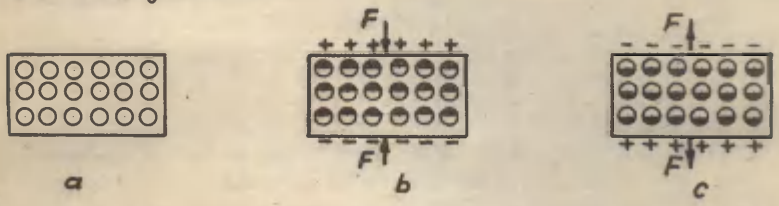
$$\varepsilon^* = \varepsilon_0^* \cdot \varepsilon_s ,$$

kus ε_0^* on elektriline konstant ($\varepsilon_0^* = \frac{10^7}{4\pi c^2} \frac{F}{m}$, siin c valguse kiirus vaakuumis) ja ε_s suhteline elektriline läbitavus.

Kude	ε_s
Rasv (loomne)	5...6
Letsitiin	13
Munavalge	72
Vereplasma	70
Aju valgeollus	90

5. PIESOELEKTRILINE EFEKT

Mõned ained polariseeruvad mehaaniliste jõudude mõjul. Seejuures tekivad niisugusest ainest keha pindadel elektrilaengud ja potentsiaalide vahe. Joonis 8 selgitab sellise polarisatsiooni tekkimist keha kokkusurumisel ja venitusel. Joonisel 8a puuduvad mõjuvad jõud ja puudub ka potentsiaalide vahe. Joonisel 8b ja 8c on kehale rakendatud kord surve-, kord venitavad jõud, vastavalt sellele tekivad keha pindadel kord ühe-, kord teisemärgilised laengud. See nähtus seletub sellega, et keha deformeerumisel ioonid molekulides või molekulide grupeeringutes nihkuvad, põhjustades polarisatsiooni. Seda nähtust nimetatakse piesoelektriliseks efektiks. Nimetamisväärse suurusega efekt esineb näiteks kvartsis, turmaliinis, Seignette'i soolas, baariumtitanaadis jt.



Joonis 8

Piesoelektriline efekt on pööratav, s.t. tekitades piesoelektriliste omadustega keha pindade vahel potentsiaalide vahe (tekitades temas elektrivälja), tekib vastavalt elektrivälja märgile vastav keha mehaaniline deformatsioon (kokkutõmbumine või paisumine). Seda põhjustab molekulides laetud osakeste ümberpaiknemine rakendatud elektrivälja mõjul. See on nn. piesoelektriline pöördefekt.

Piesoelektrilist efekti kasutatakse mehaaniliste võnkumiste ja rõhkude registreerimise riistades. Näiteks võib selle abil registreerida pulssi. Selleks paigutatakse piesoelektriliste omadustega plaat arteri kohale paika, kus pulseerimine on hästi tunda. Plaadil tekkiv pinge võimendatakse ja juhitakse registreerivasse riista, mille abil saame pulsikõvera.

Pöördefekti kasutatakse ultraheli saamisel.

6. MAHTUVUS. KONDENSAATOR

Kui anda isoleeritud juhile laeng, siis omandab juht mingisuguse potentsiaali. Potentsiaal osutub võrdeliseks antud laengu suurusega

$$q = CU$$

ehk

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

Juhi laengu ja potentsiaali suhet nimetatakse juhi elektriliseks mahtuvuseks. Viimasest valemist selgub, et mida suurem on laeng sama potentsiaali puhul, seda suurem on juhi mahtuvus.

Et üksikute juhtide mahtuvus on suhteliselt väike, siis kasutatakse praktikas suurte mahtuvuste saamiseks kondensaatoreid, s.o. süsteeme kahest dielektrikuga eraldatud juhist. Levinumaks on plaatkondensaator, mis koosneb kahest

dielektrikukihiga eraldatud juhtivast plaadist. Ka kondensaatori kohta kehtib eespool toodud valem

$$q = CU ,$$

kus q - kummagi plaadi laeng,

U - plaatidevaheline potentsiaalide vahe ehk pinge ja

C - kondensaatori mahtuvus.

Nagu näeme, mõõdetakse ka kondensaatori mahtuvust laengu ja selle potentsiaalide vahe ehk pinge suhtega, mida see laeng tekitab kondensaatori plaatide vahel. SI süsteemis mõõdetakse mahtuvust faradites (F). 1 F on niisuguse kondensaatori mahtuvus, kus laeng 1 C (kulon) tekitab plaatidevahelise pinge 1 V. Kuna farad on väga suur mahtuvus, siis kasutatakse praktikas temast tuletatud väiksemaid ühikuid

$$1\ \mu F = 10^{-6}\ F$$
$$1\ nF = 10^{-9}\ F$$
$$1\ pF = 10^{-12}\ F.$$

Kondensaatori mahtuvus sõltub plaatide suurusest, nendevahelisest kaugusest ja kasutatava dielektriku elektrilisest läbitavusest. Plaatkondensaatori mahtuvus avaldub

$$C = \frac{\varepsilon^* S}{d} ,$$

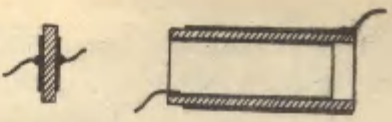
kus ε^* - kasutatava dielektriku elektriline läbitavus,

S - plaadi pindala,

d - plaatidevaheline kaugus.

Praktikas kasutatakse kondensaatorite dielektrikuna parafineeritud paberit, vilgukivi, keraamilisi aineid jne. Paberkondensaatorid koosnevad rullikeeratud metalliribadest (alumiinium) ja nende vahel asuvatest parafineeritud paberiribadest. Kogu see konstruktsioon on paigutatud hermeetilisse kesta. Vilgukivikondensaator koosneb metall- ja vilgukiviplaadikestest, metallplaadid ühendatakse omavahel joonisel 9 näidatud viisil. Keraamilised kondensaatorid on tavaliselt ketta- või torukujulised (joonis 10).

Joonis 9



Joonis 10

On kasutusel veel nn. elektrolüütkondensaatorid. Elektroodideks on neis alumiiniumiribad, millede vahel asub elektrolüüdiga immutatud paber. Ühe elektroodi (anoodi) pind on kaetud üliõhukese alumiiniumoksiidi kihiga, mis on dielektrikuks. Elektrolüütkondensaatoril on väikeste mõõtmete juures väga suur mahtuvus. Nende kondensaatorite kasutamisel tuleb rangelt kinni pidada poolsusest. Kasutatakse neid peamiselt silumisfiltrite kondensaatoritena.

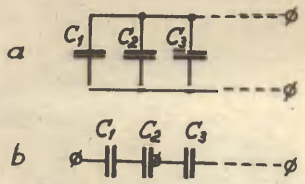
Mõnikord vajatakse muutuva mahtuvusega kondensaatoreid, näiteks võnkeringi võnkesageduse muutmiseks (häälestamiseks). Tuntumad muutuva mahtuvusega kondensaatoritest on nn. pöördkondensaatorid. Enamik neist on õhkdielektrikuga ja nende konstruktsioon võimaldab muuta plaatide töötava pinna suurust, seega ka mahtuvust.

Kondensaatorite (mahtuvusega C_1, C_2, C_3 jne.) paralleelsel ühendamisel (joonis 11a) avaldub kogumahtuvus

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

Järjestikühenduse puhul (joonis 11b) aga kehtib

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$



Joonis 11

7. ELEKTRIVOOL JUHTIDES. ELEKTROMOTOORJÕUD. TAKISTUS

Elektrivooluks nimetatakse mistahes elektrilaengute suunatud liikumist. Tavaliselt tekitab laengute suunatud liikumise elektriväli. Ka juhis voolu tekitamiseks peame tekitama elektrivälja, s.t. peame tekitama juhis potentsiaalide vahet (pinget).

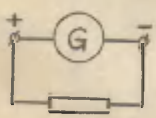
Seda potentsiaalide vahet tekitatakse erilises seadeldises, mis eraldab laenguid, tekitades vooluringi teatud punktides ühe- või teisemärgiliste laengute ülekülluse või puudujäägi. Niisuguseid seadeldisi nimetatakse vooluallikateks ehk generaatoriteks.

Vooluallikateks (generaatoriteks) on mitmesugused elektrimasinad, keemilised vooluallikad jne. Ka organismis tekivad elutegevusprotsessis potentsiaalide vahed ja neist tingitud voolud.

Vooluallika maksimaalset pinget nimetatakse elektromotoorjõuks (emj.).

Elektromotoorjõud võrdub vooluallika klemmidevahelise pingega, kui välisahel on välja lülitatud. Emj. mõõdetakse voltides.

Vaatleme generaatorit G (joonis 12), mis tekitab ühel klemmil elektronide puudujäägi (plusspoolus), teisel ülejäägi (miinuspoolus). Kui ühendame need poolused juhiga, siis omandavad juhi laengud klemmidevahelise elektrivälja mõjul kindlasuunalise liikumise, s.t. välisringis tekib vool. Laengud hakkavad liikuma kogu ringis koraga. Kuid nende liikumiskiirus ei ole suur. Näiteks metallides, kus liiguvad ainult vabad elektronid, on nende keskmine liikumiskiirus mõjuva elektrivälja tugevuse puhul 1 V/cm, suurusjärgult murdosa mm sekundis. Elektronide liikumist



Joonis 12

pidurdavad alalised pôrked ruumvôre ioonidega. Pôrgete tôttu elektronide suunatud liikumise keskmine kiirus langeb, osa nende kineetilisest energiast kulub ioonide soojusliikumise intensiivistamisele, s.o. juhi soojendamiseks. Seda vôetakse arvesse juhi elektrilise takistuse kaudu. Takistust môôdetakse oomides. Takistus 1 oom (Ω) on juhil, milles pinge 1 V tekitab voolu 1 A.

Juhi takistus sôltub selle ainest ja môôtmetest. Sôltuvust ainest vôetakse arvesse nn. eritakistuse abil. Metalliliste juhtide eritakistus antakse praktikas oomides 1 m pikkuse ja 1 mm^2 ristlôikega juhi kohta, SI süsteemis 1 m pikkuse ja 1 m^2 ristlôikega juhi kohta. Juhi takistus on arvutatav

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

kus R - takistus,
ρ - eritakistus,
l - pikkus,
S - ristlôike pindala.

Alljärgnevas tabelis on toodud mônede metallide eritakistused temperatuuril 20° C.

Aine	Eritakistus	
	Ω m	$\Omega\ mm^2/m$
Hôbe	$1{,}61 \cdot 10^{-8}$	0,0161
Vask	$1{,}75 \cdot 10^{-8}$	0,0175
Alumiinium	$2{,}78 \cdot 10^{-8}$	0,0278
Konstantaan	$(44...52) \cdot 10^{-8}$	0,44...0,52
Kroomnikkel	$108 \cdot 10^{-8}$	1,08

Suure eritakistusega sulamitest (konstantaan jt.) juhtmeid kasutatakse takistite valmistamisel. Väiksevôimsuselisi suure takistusega takisteid (kasutatakse peamiselt raa-

diotehnilistes skeemides) valmistatakse ka nn. masstakistitena, suure eritakistusega ainest (näit. söest jne.).

Juhtmes tekkivat voolu mõõdetakse elektrihulgaga, mis läbib juhtme ristlõike ühes ajaühikus. SI süsteemis on voolutugevuse ühikuks amper (A). Voolutugevus on 1 amper, kui juhtme ristlõike läbib 1 sekundis laeng 1 kulon.* Voolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt positiivsete laengute liikumise suunda.

Voolutugevust, emj. ja takistust seob Ohmi seadus kogu vooluringi kohta

$$I = \frac{E}{R + r},$$

siin I - voolutugevus,
E - vooluallika emj.,
R - välisringi takistus,
r - vooluallika sisetakistus.

Siit saame ka vooluallika klemmipinge U = IR suuruse

$$U = E - Ir,$$

s.t. klemmipinge on elektromotoorjõust väiksem pingelanguse võrra vooluallika sisetakistusel.

Vooluringi osa kohta kehtib Ohmi seadus kujul

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

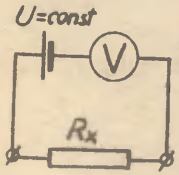
kus I on vooluringi osa takistus,
U - pinge vooluringi osa otstel,
R - vooluringi osa takistus.

---

* SI süsteemis defineeritakse amprit kui kahte sirgjoonelist, teineteisest 1 m kaugusel tühjuses asetsevat kaduvvaikese ringikujulise ristlõikega lõpmata pikka paralleelset juhet läbivat muutmatut elektrivoolu tugevust, kui see põhjustab nende juhtmete vahel pikkuse iga meetri kohta jõu $2 \cdot 10^{-7}$ N.

8. TAKISTUSE MÕÕTMINE. POTENTSIOMEETER

Kõige sagedamini kasutatakse takistuse mõõtmisel oommeetrid ja Wheatstone'i silda. Lihtsaim oommeeter koosneb voltmeetrist, mille skaala on gradueeritud oomides, ja kindla pingega vooluallikast (joonis 13). Vaetavalt Ohmi seadusele on konstantse toitepinge puhul vooluringis tekkiv voolutugevus pöördvõrdeline takistusega, mistõttu maksimaalsele takistuse väärtusele vastab minimaalne mõõteriista näit, ja vastupidi.



Joonis 13

Wheatstone'i silla lülitusskeem on toodud joonisel 14. Sild on "tasakaalus", kui galvanomeetrit ei läbi vool. See on siis, kui punktide A ja B potentsiaalid on võrdsed. Tingimus selleks on

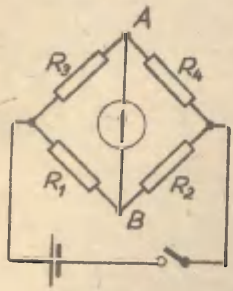
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} .$$

Kui üks neist takistustest, näiteks R_4, on mõõdetav takistus R_x, siis ülejäänud peavad olema tuntud. Mõõdetava takistuse saame:

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

Mõnikord asendatakse takistid R_1 ja R_2 ühtlase takistustraadiga (reohordiga), mida mööda võib nihkuda liugkontakt B (joonis 15. Vt. lk. 19.). Et ühtlase traadi puhul takistus on võrdeline pikkusega, siis

$$R_x = R_4 = R_3 \frac{l_2}{l_1} .$$

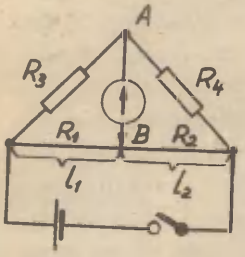


Joonis 14

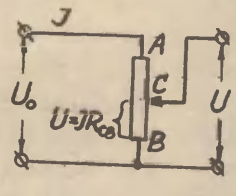
Potentsiomeeter (pingejagaja) on reostaadi lülitus, mis võimaldab

reguleerida pinget. Joonisel 16 näidatud potentsiomeetri lülitus võimaldab reguleerida pinget 0-st kuni vooluallika maksimaalse pingeni. Reostaadi otsad A ja B on ühendatud vooluallika klemmidega. Vooluallika pinge U_0 jaotub ühtlaselt piki reostaati. Punktide C ja B vahel mõjub osa sellest vooluallika poolt tekitatavast pingelangusest

$$U = IR_{CB} .$$



Joonis 15



Joonis 16

Muutes liugkontakti C asukohta, seega ka takistust R_{CB}, saame muuta ka pinget U. Kui liugkontakt C asub potentsiomeetri otsas B, siis $R_{CB} = 0$ ja ka $U = 0$. Kui liugkontakt C on otsas A, siis R_{CB} omab maksimaalset väärtust, maksimaalne on ka pinge

$$U = U_0 .$$

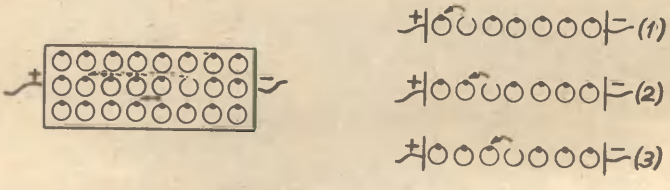
9. ELEKTRIVOOL POOLJUHTIDES

Nagu nägime, võib pooljuhtide liikuvate laengukandjate arv mitmesuguste välismõjutuste tõttu oluliselt muutuda. Näiteks soojendamisel, valguse või radioaktiivse kiirguse neelamisel jne. võib see kasvada tuhandeid kordi. Tuntumad pooljuhid on räni, germaanium, seleen, vaskoksiid (Cu_2O) jt. Need pooljuhid on leidnud laialdast rakendamist teaduses ja tehnikas.

Voolu juhtimise mehhanism pooljuhtidee võib olla kahesugune. Pooljuhi voolukandjateks võivad olla vabad elektronid või nn. augud. Vastavalt sellele eristatakse elektroonse ja aukjuhtivusega pooljuhte.

Elektroonsetes pooljuhtidee (n-pooljuhtides) on laengukandjateks vabanenud elektronid nagu metalliski, kuid selle vahega, et pooljuhis on neid tunduvalt vähem. Pooljuhi soojendamisel vabanenud elektronide arv kasvab, s.t. pooljuhi juhtivus kasvab (see omadus on üks pooljuhtide omapära). Elektrivälja rakendamisel hakkavad vabanenud elektronid suunatult liikuma - tekib elektrivool (joonis 17a).

Aukjuhtivuse mehhanism on järgmine. Teatavasti on aine ruumvõre ioonide (aatomite) välised elektronid omavahelistes valentssidemetes. Ühe valentssideme elektroni lahkumisel (näit. soojendamisel) järelejäänud täitmata valentssidet nimetatakse auguks. Auku (elementaarse negatiivse laengu puudumist) võib vaadelda kui osakest elementaarse positiivse laenguga. Auku (elektroni vaba kohta) võib täita mistahes teine elektron, näiteks naaberaatomi valentssideme elektron. Sellega aga tekib auk naaberaatomi juurde, kuhu võib üle minna omakorda elektron kolmandalt aatomilt jne., auk muudab oma asukohta pooljuhi kristallis. Elektrivälja rakendamisel omandavad augud suunatud liikumise, pooljuhis tekib vool. Aukjuhtivuse (p-juhtivuse) mehhanismi selgitab joonis 17b.



Joonis 17. ○ - aatom; • - elektron;
○ - auk (aatom puuduva valentselektroniga).

Üldiselt esineb pooljuhis korraga mõlemat tüüpi juhtivust. Praktikas kasutatavatel pooljuhtidel on tavaliselt üks juhtimismehhanismidest ülekaalus. Selle põhjuseks on lisandite olemasolu pooljuhis.

Lisandi aatomid asendavad pooljuhi ruumvõre sõlmpunktides põhiaine aatomeid. Nad astuvad valentsesse seosesse pooljuhi aatomitega. Kui lisandi aatomil on rohkem valentseid elektrone kui põhiainel, siis valentssidemete moodustamisest ülejäänud elektronid, olles väga nõrgalt seotud lisandi aatomiga, võivad väga kergesti muutuda vabadeks elektronideks, suurendades niiviisi pooljuhi elektroonset juhtivust. Kui lisandi aatomil on vähem valentseid elektrone kui põhiainel, siis jäävad lisandi aatomite juurde elektronidega täitmata valentssidemed, kuhu kergesti võivad üle minna naaberaatomite valentselektronid, tekitades seal auke. Pooljuhi aukjuhtivus kasvab. Seega võib vastavate lisandite sisseviimisega pooljuhis tekitada soovitud juhtivuse tüübi (n või p).

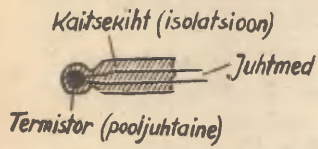
10. TERMO- JA FOTOTAKISTID

Teame, et pooljuhi tavalistes tingimustes üsna väike juhtivus suureneb soojendamisel. Soojendamisel tekib juurde laengukandjaid - vabu elektrone ja auke. Pooljuhtide takistuse termiline koefitsient (näitab, kui suure osa võrra oma väärtusest temperatuuril 0°C muutub takistus temperatuuri tõusul 1 kraadi võrra) on negatiivne ja enamikul pooljuhtidel ülletab suurusjärgu võrra metallide omad.

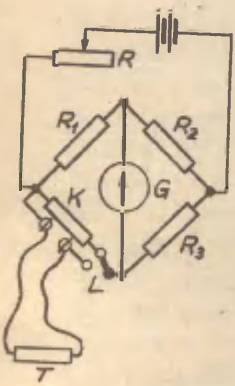
Pooljuhtainest valmistatud takistit, mille takistus sõltub temperatuurist, nimetatakse termotakistiks e. termistoriks. Termistore kasutatakse väga mitmesugustes aparaatides, sealhulgas ka üsna tundlikes elektritermomeetrites (takistustermomeetrites). Varem kasutati neis metalltraadist takisteid, mille valmistamine oli seotud raskus-

tega, sest metalli väikese eritakistuse tõttu tuli nende jaoks valmistada väga peen traat. Metalli suhteliselt väikese temperatuurikoefitsiendi tõttu ei olnud nende tundlikkus eriti suur.

Termistori võib teha väga väikese, millimeetri murdosa suuruse (joonis 18), mistõttu tema soojuslik inerts on väike ja temaga võib kiiresti mõõta uuritava eseme erinevate punktide temperatuuri (näiteks temperatuuri inimese naha pinna erinevates punktides või isegi siseorganites). Levinumates takistustermomeetrites kasutatakse takistuse muutumise ja selle kaudu temperatuuri mõõtmiseks Wheatstone'i silla skeemi (joonis 19). Termistor T paigutatakse mõõdetavasse keskkonda. Vastavalt selle temperatuurile omandab termistor teatud takistuse. Termistori takistuse muutus muudab suuremal või vähemal määral silla tasakaalu, mistõttu galvanomeeter G näitab voolu, mille tugevus sõltub termistori temperatuurist. Galvanomeeter on tavaliselt gradueeritud kraadides, mis võimaldab lugeda ta skaalalt mõõdetavat temperatuuri.



Joonis 18



Joonis 19

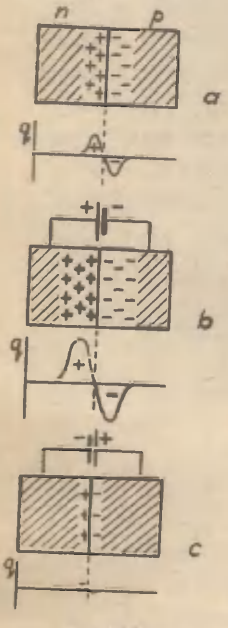
Kasutatavas lülituses sõltub galvanomeetri hälve ka vooluallika pingest. Selle konstantsuse kontrollimiseks lülitatakse silla skeemi lüliti L abil termistori asemele kontrolltakisti K, seejuures peab galvanomeetri osuti peatuma vastaval märgil skaalal. Kui seda ei ole, siis tuleb seda saavutada takisti R muutmisega.

Ka valgus vabastab pooljuhtides elektrone ja auke, s.t. ka valgus suurendab nende juhtivust. Seda kasutatakse <u>fototakistite</u> puhul.

Fototakisti koosneb isoleerainele pealekantud ja metallelektroodidega varustatud õhukesest pooljuhi kihist. Fototakisteid kasutatakse seadmetes, mis peavad reageerima valgustuse muutumisele.

11. p-n-SIIRE

Tutvume p-n-siirdes (elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhtide kontaktis) toimuvate nähtustega. Siin osa soojusliikumises olevaid elektrone difundeerub n-alast, kus neid on palju, p-ala piirkihti. Selle tulemusena omandab p-ala piirkiht negatiivse laengu, n-ala piirkiht aga laetakse positiivselt. Augud p-alast difundeeruvad omakorda n-alasse, suurendades selle piirkihi positiivset laengut ja p-ala negatiivset laengut (joonis 20a). Kirjeldatud protsesside tagajärjel tekkinud potentsiaalide vahe, nn. potentsiaalibarjäär, takistab edasist laengukandjate ülemineku ühest alast teise. Ainult väga suure energiaga (suure soojusliku kiirusega liikuvad) laengukandjad suudavad veel seda ületada. Saabub liikuv tasakaal, kus difusiooni tõttu liikuvate laengute hulk saab võrdseks potentsiaalibarjääri elektrivälja mõjul vastassuunas liikuvate laengute hulgaga.



q – ruumilaeng
Joonis 20

Kirjeldatud protsesside tõttu muutub p-n-siirde piirkond laengukandjatest vaeseks. Seda vähendatud juhtivusega piirkihti nimetatakse tõkkekihiks.

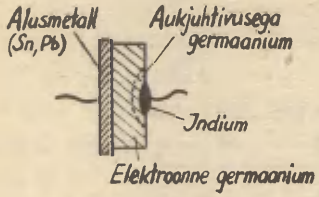
Kui nüüd rakendada p-n-siirdele välispinge (joonis 20b), nii et sel-

le märk ühtib potentsiaalibarjääri märgiga, siis suureneb potentsiaalibarjääri kõrgus ja laieneb tõkkekiht. Nüüd ei pääse ka suure energiaga laengukandjad sellest läbi ja vool on väga väike (praktiliselt puudub).

Teise polaarsusega välispinge rakendamisel (joonis 20c) potentsiaalibarjääri kõrgus ja tõkkekihi laius vähenevad. Elektronid saavad nüüd vabamalt kui ilma pingeta liikuda n-alast p-alasse, augud aga vastassuunas ja p-n-siiret läbib vool.

Näeme, et p-n-siirdel on ühesuunaline juhtivus, voolu läbilaskesuunaga aukjuhtivusega pooljuhilt elektroonsele. Seda p-n-siirde omadust kasutatakse vahelduvvoolu alaldamisel nn. pooljuhtdioodides.

Tutvume tänapäeval laialt levinud germaaniumdioodi ehitusega (joonis 21). Siin sulatatakse elektroonse juhtivusega germaaniumi kristalli pinnale kiht indiumi. Kõrgel temperatuuril indium difundeerub teatud sügavusele germaaniumi kristalli sisse, muutes seal juhtivuse aukjuhtivuseks ja tekitades seega p-n-siirde.



Joonis 21

Laialt kasutatakse ka ränidioode. Pooljuhtdioodid on peaaegu täielikult välja tõrjunud varem kasutusel olnud lampdioodid.

12. KONTAKTPINGE. TERMOELEKTER

Kui kaks erinevat metalli viia kokkupuutesse, siis vabad elektronid hakkavad üle minema metallist, kus nende tihedus on suurem, metalli, kus nende tihedus on väiksem. Ühes metallis, millest elektrone lahkus, tekib nende puu-

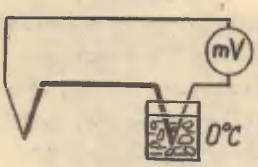
dujäak - metall omandab positiivse laengu. Teine metall, kus elektrone on nüüd rohkem kui normaalselt, laadub negatiivselt. Metallide vahel tekib potentsiaalide vahe, nn. kontaktpinge. Kontaktpinget ei saa kasutada voolu saamiseks, sest kui ühendame suletud vooluringi saamiseks metallide teised otsad omavahel, siis saame seal niisama suure, kuid vastupidise kontaktpinge. Ka ühendamisel vahepealee, kolmanda metalli abil kompenseeruvad kõikide ühenduskohtade kontaktpinged.

Katsed näitavad, et kontaktpinge oleneb temperatuurist. Järelikult, kui koostada vooluring kahest metallist ja ühte ühenduskohta soojendada, teist aga hoida endisel, madalal temperatuuril, siis niisuguses ringis mõjub sooja ja külma ühenduskoha kontaktpingete vahega võrdne elektromotoorjõud, nn. termoelektromotoorjõud. Vooluringis tekib vool - termovool. Termoelektromotoorjõud sõltub sooja ja külma ühenduskoha temperatuuride vahest ning oleneb muidugi ka kasutatavatest metallidest. Alljärgnevas tabelis on toodud mõnede termopaaride ehk termoelementide (kontakti moodustavate metallide paaride) termopinged.

Termopaar	Termopinge μV/deg
Vask-konstantaan	47
Raud-konstantaan	53
Plaatina-plaatina-roodium	10
Raud-nikkel	22

Termopaare kasutatakse peamiselt temperatuuride mõõtmisel. Selleks viiakse tundliku mõõteriistaga (millivoltmeetriga) ühendatud termopaar kontakti mõõdetava keskkonnaga. Toatemperatuurile lähedaste temperatuuride mõõtmisel asetatakse teine metallide ühenduskoht konstantse temperatuuriga keskkonda, tavaliselt sulavasse jäässe (joonis 22). Kõrgete temperatuuride mõõtmisel võib teine ühendus-

koht asuda ümbritseva õhu temperatuuril. Siin ühendatakse termopaar vahetult mõõteriistaga (joonis 23).



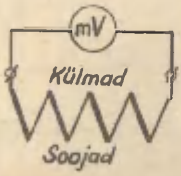
Joonis 22

Joonis 23

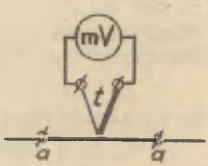
Võrreldes vedeliktermomeetritega on termoelektrilistel termomeetritel rida eeliseid. Nendega võib mõõta temperatuure väga suures vahemikus. Nad võimaldavad mõõta eemal asuvate objektide temperatuure. Väikeste termopaaride abil võib kiiresti mõõta väga väikeste objektide temperatuure (näit. putukate temperatuuri). Termoelektrilise termomeetri tundlikkus oleneb kasutatava mõõteriista tundlikkusest.

Tundlikkust võib ka tõsta, ühendades mitu termopaari järjestikku termopatareiks ehk termosambaks (joonis 24).

Termopaare kasutatakse veel voolu tugevuse mõõtmisel kõrgsageduslikes vooluringides (joonis 25). Kõrgsagedusvoolu läbiminekul juhtmest a-a eraldub soojus, mis tekitab termopaari t klemmidel termopinge, mida mõõdab millivoltmeeter mV. Viimane on kaliibritud voolutugevuse ühikutes.



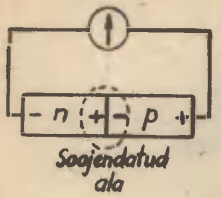
Joonis 24



Joonis 25

Viimasel ajal leiavad järjest suuremat kasutamist pooljuhtidest termopaarid. Niisuguse termopaari moodus-

tab n- ja p-pooljuhi kontakt (joonis 26). Kui niisugust kontakti soojendada, siis vabaneb n-tüüpi pooljuhi soojendatud osas hulgaliselt elektrone. Need intensiivses soojusliikumises olevad elektronid difundeeruvad n-pooljuhi külma otsa poole. Tulemusena laadub soojendatud osa positiivselt, külm negatiivselt. Aukjuhtivusega pooljuhis tekib analoogiline aukude difusioon, mille tulemusena tekib soojendatud otsas negatiivne ja külmas positiivne laeng. Pooljuhtide otstel tekkinud pinged liituvad ja termopaari ühendamisel mõõteriistaga tekib vooluringis vool.



Joonis 26

Pooljuhttermopaarid tekitavad tunduvalt suurema termoelektromotoorjõu (mõni mV/deg) kui metallilised. Seega on nende kasutegur suurem ja neid võib mõnel juhtumil kasutada peale temperatuuri mõõtmise ka soojusenergia otseseks muundamiseks elektrienergiaks.

Seni vaatlesime termoelektrilist nähtust, kus kontaktkohtade temperatuuride vahe tekitas elektrivoolu. Kui aga lasta termopaaridega vooluringist voolu läbi, siis üks kontaktkoht soojeneb, teine jahtub. Seda nähtust nimetatakse Peltier' efektiks. Kriti tugev Peltier' efekt on pooljuhttermopaaridel.

Peltier' efekti võib kasutada soojendus- ja külmutusaparaatide ehitamisel. Näiteks sellel põhimõttel töötava külmutuskapi seina on paigutatud pooljuhttermopatarei nii, et kõik jahtuvad jootekohad asuvad kapi sisemuses ja soojenevad väljae. Niisugusel külmutuskapil puuduvad liikuvad osad ja vedelikud, mistõttu ta on tavalisest külmutuskapist töökindlam. Ka on tema kasutegur palju suurem. Samal põhimõttel võib ehitada ka termostaate, milledes voolusuuna muutmisega võime tekitada nii madalaid kui ka kõrgeid temperatuure. Võimalik, et tuleviku majades kasutatakse pooljuhttermopatareisid talvel kütmiseks välissoojuse arvel,

suvel aga jahutamiseks, andes liigee soojuse välisõhku.

13. ELEKTRIVOOL ELEKTROLÜÜTIDES. POLARISATSIOON. MITTEPOLARISEERUVAD ELEKTROODID

Teise liigi juhtides (soolade, hapete ja aluste lahustes), nn. elektrolüütidee on lahustunud aine molekulid osaliselt dissotsieerunud ioonideks. Elektrivälja rakendamisel hakkavad need ioonid liikuma, tekib vool. Positiivsed ioonid liiguvad negatiivse elektroodi poole, negatiivsed positiivse poole. Jõudes elektroodidele ioonid kas annavad ära või omandavad elektroni ja neutraliseeruvad. Seda protsessi elektroodidel nimetatakse primaarseks reaktsiooniks.

Näiteks keedusoola (NaCl) lahustamisel vees ta laguneb (dissotsieerub) Na^+ ja Cl^- ioonideks.

$$NaCl \rightleftharpoons Na^+ + Cl^- .$$

Jõudes katoodile saab Na^+ ioon juurde elektroni, muutudes neutraalseks Na aatomiks. Cl^- ioon annab anoodil elektroni ära, muutudes Cl aatomiks.

Tavaliselt astuvad elektroodidel eraldunud ained keemilisse ühendusse elektroodide või lahustaja ainega. Need reaktsioonid kuuluvad juba sekundaarsete reaktsioonide hulka.

Keedusoola elektrolüüsi juures katoodil eralduva Na aatomid reageerivad veega, s.o. lahustajaga, tekitades naatriumhüdroksiidi, kusjuures eraldub vesinik

$$2\ Na + 2\ H_2O \rightarrow 2\ NaOH + H_2 .$$

Enamik eraldunud kloori aatomeid reageerib samuti veega. Tulemusena tekib anoodi ümber soolhape ja eraldub hapnik

$$4\ Cl + 2\ H_2O \rightarrow 4\ HCl + O_2 .$$

Elektrivälja rakendamisel algab ioonide liikumine kobe kogu elektroodidevahelisee elektrolüüdi ruumalas, kuid üksikute ioonide kiirus on üsna väike. See kiirus sõltub iooni loomusest, lahuse temperatuurist ja rakendatud elektriväljatugevusest. Ioonide liikumiskiirust ühikulise elektriväljatugevuse puhul nimetatakse ioonide liikuvuseks. Mõõtes liikumiskiirust cm/s ja väljatugevust V/cm, saame liikuvuse ühikuks

$$\frac{cm}{s}/\frac{V}{cm} = cm^2/Vs \ .$$

Mõnede ioonide liikuvused temperatuuril 18°C on toodud järgnevas tabelis.

Ioon	Liikuvus (cm^2/Vs)
Vesinik (H^+)	$32{,}6 \cdot 10^{-4}$
Naatrium (Na^+)	$4{,}5 \cdot 10^{-4}$
Kloor (Cl^-)	$6{,}8 \cdot 10^{-4}$
Radikaal $[(SO_4)^{--}]$	$6{,}9 \cdot 10^{-4}$

Elusa organismi koed koosnevad põhiliselt elektrolüütidest (peamiselt NaCl-lahus) ja kolloidlahustest. Kudedega ekvivalentseks loetakse NaCl-lahust kontsentratsiooniga 0,9% (füsioloogiline lahus).

Elektrolüütide elektrilisi omadusi iseloomustatakse nende elektrijuhtivusega (takistuse pöördväärtusega)

$$G = \frac{1}{R} \ ;$$

elektrijuhtivuse ühikuks on siimens (S). Kuna

$$R = \rho \frac{1}{S} \ ,$$

siis

$$G = \frac{1}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{S}{l} = \gamma \cdot \frac{S}{l} ,$$

kus ρ - eritakistus,

$\gamma = \frac{1}{\rho}$ - erijuhtivus,

S - elektroodide ristlõike pind,

l - elektroodidevaheline kaugus.

Erijuhtivuse γ mõõtühikuks on $\frac{1}{\Omega \cdot m} = \frac{S}{m}$.

Voolu läbiminekul elektroodidest toimuvad elektroodidel keemilised protsessid, mille tulemusena võivad elektroodide pindkihtides toimuda muutused, nad võivad kattuda erinevate gaaside mullikestega jne. Selle tagajärjel võib tekkida elektroodide vahel rakendatud välispingega vastupidine emj., nn. polarisatsiooni emj. Nähtust nimetatakse elektroodiliseks polarisatsiooniks.

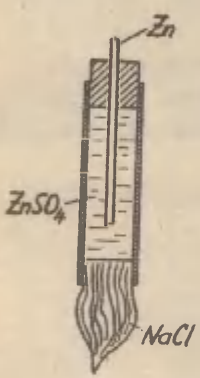
Polarisatsiooni olemasolu võime teha kindlaks järgmise katsega. Laseksime kahe sõepulga kaudu alalisvoolu läbi elektroodide, näiteks NaCl-lahuse (joonis 27a). Elektroodide juures toimuvad varem kirjeldatud keemilised reaktsioonid ja me võime jälgida, et anood kattub hapnikumullikestega, katood vesinikumullikestega. Kui nüüd ühendada vooluallikas lahti ja sõepulgad ühendada ainult galvanomeetriga (joonis 27b), siis näitab viimane lühikese aja jooksul endisega vastupidist voolu. Samaaegselt kaovad ka elektroode katnud mullid. Voolu teket põhjustas polarisatsiooni emj.

Joonis 27

Enamikul praktilistel juhtudel on elektroodiliste polarisatsiooni nähtus segav. Vastupidise polarisatsioonipinge olemasolu vähendab päripidist voolu, vooluringi ta-

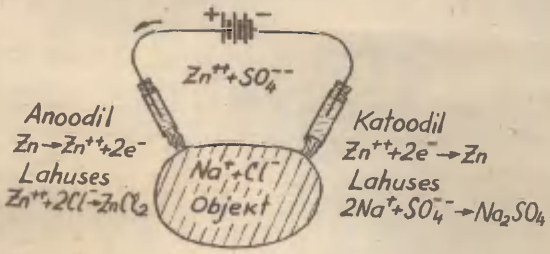
kistus suureneb. Pealegi võib see elektrolüüsi ajal muutuda. Näiteks võib niisugune segav polarisatsioon esineda bioloogiliste objektide mõjutamisel alalisvooluga. Polarisatsiooni vältimiseks kasutatakse mittepolariseeruvaid elektroode.

Mittepolariseeruvaks elektroodiks on metallvarb, mis on asetatud sama metalli soola lahusesse. Elektrolüüsil toimub siis anoodil metalli lahustumine, katoodil sadestumine ja mingisuguseid sekundaarseid reaktsioone ei teki. Sagedamini kasutatakse tsingist ja hõbedast mittepolariseeruvaid elektroode. Tsinkelektrood koosneb tsinkvardast, mis asub $ZnSO_4$-lahusega täidetud klaastorus (joonis 28). Toru alumine ava on suletud poorse kaoliinist või želatiinist korgiga, mis on immutatud füsioloogilise lahusega. Tihti kinnitatakse korgi otsa sama lahusega immutatud pintslike, mis viiakse kontakti uuritava objektiga.



Joonis 28

Vaatleme protsesse, mis toimuvad voolu läbiminekul mittepolariseeruvatest elektroodidest ja bioloogilisest uurimisobjektist (joonis 29). Anoodil tsingi aatomid, andes ära elektrone, lähevad lahusesse positiivsete ioonidena (Zn^{++}). Tsingi ioonid ühinevad lahuses objektist tulevate kloori ioonidega, tekitades



Joonis 29

tsinkkloriidi ($ZnCl_2$). Katoodil saavad lahusest tulevad tsingi ioonid puuduvad elektronid ja sadestuvad katoodi pinnale Zn aatomitena. Lahuse radikaali SO_4^{--} ioonid ühinevad objektist tulevate naatriumi ioonidega, tekitades naatriumsulfaadi (Na_2SO_4). Kuna aja jooksul tekib elektroodide lahustesse tsinkkloriidi ja naatriumsulfaati, siis tuleb neid aeg-ajalt uuendada.

Hõbeelektroodi puhul on lahuseks hõbenitraadi lahus.

14. FARADAY SEADUSED

Elektrolüüdis elektrivoolu mõjul toimuvate keemiliste protsesside, nn. elektrolüüsi käigus eralduvad elektroodidel ained. Inglise teadlane Faraday avastas siin kehtivad põhiseadused.

1. seadus. Elektroodil eralduva aine mass m on võrdeline elektrolüüti läbinud elektrihulgaga q

$$m = kq = kIt.$$

Võrdetegur k sõltub ainult ainest ja seda nimetatakse elektrokeemiliseks ekvivalendiks.

2. seadus. Elektroodidel eralduvate erinevate ainete messid on elektrolüüti läbiva ühesuguse elektrihulga korral võrdelised nende ainete keemiliste ekvivalentidega. (Keemiliseks ekvivalendiks nimetatakse aatommassi μ suhet valentsiga z.)

$$k = C\frac{\mu}{z},$$

kus C on võrdetegur, ühesugune kõikide ainete jaoks. Tavaliselt kasutatakse selle teguri pöördväärtust F, nn. Faraday arvu ($\frac{1}{F} = C$)

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{\mu}{z}.$$

Ühendades mõlemad Faraday seadused, saame

$$m = \frac{\mu q}{zF}.$$

Siit järgneb, et kui eraldub üks grammekvivalent ainet, s.t. mass

$$m = \frac{\mu}{z},$$

siis q = F. Tähendab, Faraday arv võrdub elektrihulgega, mis eraldab ühe grammekvivalendi ainet. Mõõtmised näitavad, et F = 96494 C/g-ekv.

Alljärgnevas tabelis on toodud mõnede ainete elektrokeemilised ekvivalendid milligrammides kuloni kohta.

Aine	k(mg/C)
Vesinik	0,010
Naatrium	0,238
Kloor	0,367
Radikaal SO_4	0,498
Hõbe	1,118

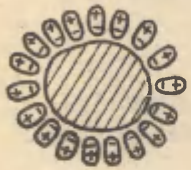
15. ELEKTROKINEETILISED NÄHTUSED

Elektroforees ja elektroosmoos

Elektrivälja mõjul liiguvad lahuses peale ioonide kõik laetud osakesed, näiteks tahke aine osakesed, gaasimullikesed, teise vedeliku tilgakesed, kolloidlahuse osakesed jne. Laetud osakeste liikumist lahuses nimetatakse elektroforeesiks. Varemvaadeldnd ioonide liikumine lahu-

ses on elektroforeesi erijuht ja teda nimetatakse tihti ionoforeesiks.

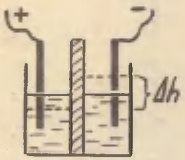
Laetud osakesed lahuses võivad tekkida ka suurte molekulide lagunemisel, samuti kui vedelikku sattunud osake adsorbeerib oma pinnale peamiselt ühemärgilisi ioone või ka polaarseid molekule (dipoole), kui need tõmmatakse osakese külge ühenimeliste otstega (joonis 30).



Joonis 30

Osakeste liikumise kiirus elektroforeesi juures sõltub nende iseloomust (suurusest, laengust jne.) ja ka mõjuvast elektrivälja tugevusest. Nende liikuvus asub tavaliselt vahemikus $3...5 \cdot 10^{-4}$ cm^2/Vs.

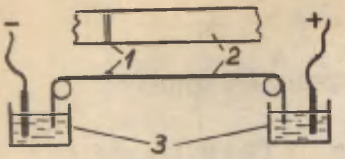
Elektrivälja mõjul võivad vedeliku osakesed liikuda läbi kapillaaride, pooriliste vaheseinte ja peene pulbrilise aine. Niisugust nähtust nimetatakse elektroosmoosiks. Elektroosmoosi võib demonstreerida joonisel 31 kujutatud katse abil. Poorilise vaheseinaga jagatud anumas on vesi. Voolu läbijuhtimisel näeme, et vee nivoo katoodipoolses osas tõuseb, s.t. voolu toimel kantakse vedeliku osakesed läbi poorilise seina sinna.



Joonis 31

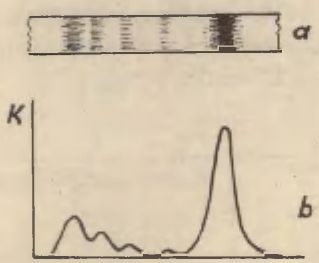
Nii elektroforees kui ka elektroosmoos kuuluvad elektrokineetiliste nähtuste hulka.

Neid nähtusi rakendatakse praktikas, sealhulgas ka meditsiinis. Näiteks elektroforeesi abil uuritakse vereseerumi valkude koostist. Vereseerum koosneb 5 põhilisest valgufraktsioonist (albumiin ja 4 fraktsiooni globuliini), millede osakestel on erinev liikuvus, mistõttu neid saab eraldada elektroforeesi abil. Selleks vastavalt ettevalmistatud vereseerumi lahuse pikergune tilk 1 (joonis 32) asetatakse lahusega immutatud filterpaberist lindile 2. Selle otsad ulatuvad lahusega täidetud vannidesse 3, mil-



Joonis 32

les on elektroodid. Valgu osakesed omandavad lahuses negatiivse laengu. Elektroodid ühendatakse alalisvoolu allikaga (500 - 700 V). Elektrivälja mõjul hakkavad valgu osakesed liikuma piki linti positiivse pooluse poole, jagunedes seejuures liikuvuste järgi. Elektroforees kestab 10...15 tundi, siis lint kuivatatakse ja värvitakse. Tulemusena saadakse lindil erineva värvuse intensiivsusega jooned (joonis 33a), millest igaüks vastab kindlale valgufraktsioonile. Värvuste intensiivsuste järgi (kolorimetreerimise teel) saadakse valkude fraktsioonide kontsentratsioonid vereseerumis (joonis 33b).



Joonis 33

Elektroosmoosi kasutatakse lahuste (näit. vereseerumi) puhastamisel. Siin eraldatavad lisandid ei pääse läbi poorilise membraani.

16. GALVANISATSIOON JA IOONGALVANISATSIOON

Galvanieatsiooniks nimetatakse ravimeetodit, mille puhul kehast või kehaosast lastakse läbi alalisvoolu. Pinge ei ületa siin 60 - 80 V ja voolutugevue 40 - 50 mA. Voolu läbilaskmisel organismist on tähtis teada erinevate kudede juhtivust. Parim juhtivus on organismi vedelikel (kesknärvisüsteemi kudesid ümbritsev vedelik, vedelik perifeersetes närvitüvedes, vereseerum). Veidi halvema juhtivusega on veri ja lihased. Kuiv ja terve nahk on halb elektrijuht. Et tavaliselt lastakse vool organismi just naha kaudu, siis kulgeb voolu tee peamiselt higi- ja osaliselt rasunäärmete kanalite kaudu. Naha elektrijuhtivus sõltub tugevasti tema pindmise kihi olukorrast (näiteks noor, higine või vigastatud epidermisega nahk juhib paremini). Järgnevas tabelis on toodud mõnede inimese kudede elektrierijuhtivused alaliavoolu puhul.

Koed	Elektrierijuhtivus $\frac{S}{m}$
Seljaaju vedelik	1,8
Vereseerum	1,4
Veri	0,6
Lihased	0,5
Peaaju ja närvid	0,07
Kuiv, terve nahk	10^{-5}
Luu ilma luuümbriseta	10^{-7}

Tänu kudede üsna erinevale juhtivusele võib voolu teekond organismis olla väga keeruline, vool võib läbida alasid, mis on elektroodidest päris kaugel. Vool läbib

paljude harudena vähima takistusega teed (näiteks piki vere ja lümfi kanaleid).

Et organismi kudede ehitus ei ole ühesugune, nende elektrijuhtivus on aga tingitud elektrolüütide olemasolust, siis alalisvoolu läbiminekul esineb siin elektrolüütilise polarisatsiooni nähtus. Kudedes tekivad kohalikud, rakendatud välispingega vastasmärgilised potentsiaalide vahed, mistõttu organismi takistus alalisvoolule on suurem kui vahelduvvoolule.

Galvanieatsiooniproteeduuri puhul juhitakse vool vastavast vooluallikast kehasse sellele asetatud painduvate plaatelektroodide kaudu. Elektroodid valmistatakse tavaliselt pliist (seatinast), sest viimane on pehme, mis võimaldab elektroodidele kergesti anda soovitud kuju, samuti on ta keemiliselt üsna inertne. Kuid elektroode ei tohi vahetult nahale asetada, sest elektrolüüsil tekkivad sekundaarsed ühendid avaldaksid nahale soovitavat mõju. Elektroodide alla asetatakse umbes 1 cm paksused hügroskoopsest riidematerjalist padjakesed, mis on niisutatud kas lihtsalt sooja veega, füsioloogilise lahusega või, nagu hiljem näeme, ravimi lahusega. Sekundaarsed ühendid elektroodidel jäävad neisse padjakestesse.

Galvanisatsiooni kasutatakse põhiliselt ravi otstarbel, kuid ka kirurgilisel elektrolüüsil (näiteks sünnimärkide, tüügaste ja ülearuste karvade eemaldamisel).

Laetud osakeste suunatud liikumist elektrivälja mõjul elektrolüüdis kasutatakse ka ravimite sisseviimisel läbi naha organismi. Seda protseduuri nimetatakse ioongalvanisatsiooniks ehk elektroforeesiks (1958.a. otsustasid füsioterapeudid kasutada ainult terminit "elektroforees"). Vastavalt ravimi iooni märgile viiakse nad sisse kas positiivselt või negatiivselt elektroodilt.

Näiteks positiivselt elektroodilt viiakse sisse naatriumi, kaltsiumi, hiniini, kodeiini, novokaiini, sulfidiini jne., negatiivselt elektroodilt aga kloori, broomi, joodi, fosforhappe radikaali, kofeiini, penitsilliini

(Na või K soolast). Viimasel ajal on katsetatud ka strep- + nütsiini ja vitamiinide sisseviimisega elektroforeesi teel.

Siin kaasneb eiseeviidava ravimi toimega ka elektrivoolu raviv toime (nagu galvanisatsioonil).

Tihti kasutatakse galvanisatsiooni ja elektroforeesi juures vanne, nn. hüdrogalvaanilisi vanne (tavaliselt 4 vanni). Vannid täidetakse sooja veega või vastava ravimi lahusega ja neisse asetatakse ravialuse jäsemed (joonis 34).

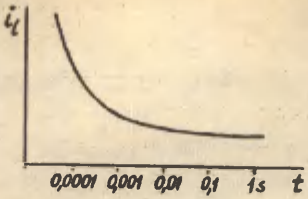
Joonis 34

Mõni ravim (näit. penitsilliin) on väga tundlik teatud inaktiveerivate ühendite suhtes. Seepärast võetakse tihti tarvitusele erilised abinõud, mis väldivad nende sattumist organismi koos ravimiga, näiteks kasutatakse erilisi puhverlahusega elektroode.

17. ALALISVOOLU MÕJU KUDEDELE

Alalisvoolu mõju organismi kudedele on seotud ioonide ja teiste laetud osakeste liikumisega. Kuna erinevate osakeste liikuvused, nagu eespool nägime, on erinevad, siis toimub ioonide ümberjaotus kudedes. Samuti võivad osakesed peatuma jääda erinevate kudede ja kelmete (membraanide) piiril, kui viimased lasevad erinevalt läbi erinevaid ioone (olenevalt nende märgist, suurusest jne.). Tulemusena muutub laetud osakeste kontsentratsioon organismis: seal võivad tekkida ühe- või teisemärgilised kohalikud laengud. Kõik need füüsikalis-keemilised protsessid kutsuvad esile üsna keerulisi bioloogilisi protsesse. Viimaste seletamiseks on püstitatud mitmeid teooriaid. üks neist on nn. ärrituse ioonne teooria, mille kujundas lõplikult välja arst ning füüsik P.Lazarev. Selle teooria järgi tekib ärritus teatud kindla ioonide kontsentratsiooni muutuse saabumisel (kaaliumi, naatriumi, kaltsiumi ja magneesiumi ioonide kindla vahekorra juures). Teooria põhiliseks puuduseks on asjaolu, et ei ole arvestatud ärritatavuse aluseks olevate ainevahetusprotsesside kogu keerukust, vaid on peetud tähtsaks ainult koe ioonse koosseisu muutust. On olemas veel nn. ärrituse kondensaatorteooria, milles elektrivoolu ärritavat mõju seletatakse membraanidel (kelmetel) erinimeliste laengute tekkimisega.

Pikaajalisel vooluga mõjutamisel selle ärritav toime langeb. Lühiajaliste vooluimpulsside puhul sõltub ärritav mõju impulsi kestusest. Joonisel 35 on toodud elektrilise ärritatavuse kõver; ärrituslävele vastava voolutugevuse i_1 (minimaalne ärritust esilekutsuv voolutugevus) sõltuvus impulsi kestusest t. Näeme, et väga lühikeste impulsside puhul ei tekita ärritust isegi väga tugev vool, sest lühikese aja tõttu ei jõua ioonid kudedes nihkuda. Küllalt pikkade impulsside puhul ei sõltu ärrituslävi impulsi kestusest.



Joonis 35

18. MEDITSIINIS KASUTATAVAD IMPULSSVOOLUD

Peale pideva alalisvoolu kasutatakse meditsiinis ka mitmesuguse kestuse ja kujuga tõukelist alalisvoolu, s.t. impulssvoolu. Seda kasutatakse nii diagnostilistel kui ka ravi eesmärkidel.

Impulssvoolu iseloomustab:

a) impulsside kordumise sagedus,

b) üksikute impulsside kestus,

c) impulsi kuju.

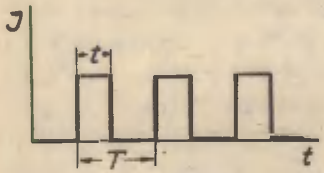
Mõnikord iseloomustatakse impulssvoolu impulsside kordumise perioodi suhtega impulsi kestusse, nn. täiteteguriga:

$$\Delta = \frac{T}{t} .$$

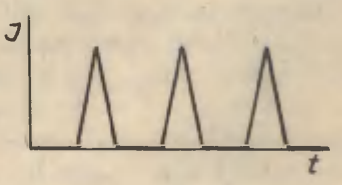
Peatume meditsiinis sagedamini kasutatavatel impulssvooludel. Meditsiinis kasutatava täisnurkse kujuga impulssvoolu (joonis 36) sagedus on 5 - 100 Hz ja impulsi kestus 0,1 - 1 ms. Niisugust voolu kasutatakse näiteks kesknärvisüsteemi pidurduse esilekutsumiseks, mille tulemusena saavutatakse patsiendil unetaoline seisund (elekt-

riuni). Niisugust voolu saadi varem alalisvoolu katkestamisel mehaanilise katkesti abil, praegu aga saadakse elektrooniliste aparaatide abil.

Meditsiinis kasutatakse veel teravatipulist impulssvoolu (joonis 37), mida nimetatakse tetaniseerivaks (varem ka faraadiliseks) vooluks. Nagu nimetus ütleb, tekitab see vool lihaste kokkutõmbumise. Kasutatakse seda elektrostimulatsiooniks häiritud liikumisfunktsiooniga lihaste harjutamisel. Kasutatavad sagedused on 80 - 100 Hz, impulsi kestus 1 - 1,5 ms ja pinge suurus 100 - 150 V. Varem saadi seda voolu induktori abil, nüüd aga samuti elektrooniliste aparaatide abil.



Joonis 36



Joonis 37

Kasutatakse ka eksponentsiaalvoolu (joonis 38). Ka seda kasutatakse elektrostimulatsiooniks, kuid võrreldes tetaniseeriva vooluga, mis kutsub esile vaid häirimata innervatsiooniga lihaste kokkutõmbe, tekitab eksponentsiaalvool kokkutõmbeid ka degeneratiivse atroofia seisundis olevates lihastes. Eksponentsiaalvoolu saab kondensaatori laadimisel ja tühjendamisel läbi takistuse (läbi objekti).

Joonis 38

19. BIOPINGED (BIOPOTENTSIAALID)

Elutegevusprotsesside käigus tekivad organismi kudedes potentsiaalide vahed ja seetõttu ka voolud. Neid nimetatakse biopotentsiaalideks (õigem oleks biopingeteks) ja biovooludeks. Biopingete suurus loomade organismi rakkudes ulatub 0,05 - 0,1 V. Eristatakse kahesuguseid pingeid. Kui koed on ärritamata, s.o. rahuolekus, siis nimetame biopinget rahupingeks, kui aga koed on ärritatud, siis tegevuspingeks. Rahupinge on alati olemas raku sisemise ja välise keskkonna vahel, terve ja vigastatud koe või rakuosa vahel. See on kas muutumatu või muutub väga aeglaselt. Selle suurus ulatub 50 mV-ni. Teine, s.o. tegevuspinge, on alati kiiresti muutuv ja tekib ärritusel, kusjuures koe ärritatud piirkond omandab ärritamata piirkondade suhtes negatiivse laengu. Niisugused pinged tekivad näiteks lihaste kokkutõmbumisel, närviimpulsside kulgemisel ja näärmete sekretoorse tegevuse juures. Nende suurus ulatub 100 mV-ni.

Mõnedel troopilistel kaladel on eriline elektriline organ, mis võib tekitada üsna kõrget pinget. Näiteks elektriangerjal (Electrophorus electricus) ulatub pinge 500 V-ni ja voolutugevus võib ulatuda 80 mA-ni. Kalal elektrirail ulatub pinge 230 V-ni ja vool 10 A-ni. See pinge tekitatakse 5 - 20 lühikese impulsina.

Biopingete tekkepõhjused ei ole veel päris selged. On teada, et biopinged kaovad hapendumisprotsesside lakkamisel. On täheldatud, et rahupinge oleneb K^+-ioonide kontsentratsioonist rakku ümbritsevas keskkonnas. Biopingete tekkimise kohta on püstitatud mitmeid hüpoteese. Varasemates hüpoteesides vaadeldakse organismi kui elektrolüüti. Viimastel aastatel on avastatud, et valgud, kloroplastid ja närviretseptorid on korrapärase kvasikristallilise

struktuuriga ja et nende elektrilised omadused on lähedased pooljuhtide omadustele. Siit ka püüded seletada kudede biofüüsikalisi protsesse tahke keha füüsika seisukohalt.

Biopingete, eriti tegevuspingete registreerimine on vastavate organite tegevuse tundlikumaid ja objektiivsemaid uurimismeetodeid. Seepärast leiab biopingete registreerimine ja uurimine laialdast rakendamist kliinilises praktikas. Eriti ulatuslikult on levinud elektrokardiograafia, mis on väärtuslikuks diagnostiliseks meetodiks südamehäirete puhul. Kasutatakse veel elektroentsefalograafiat - aju biopingete registreerimist ja elektromüograafiat - lihaste pingete registreerimist.

20. GAASI IONISATSIOON

Tavalistes tingimustes on gaasid (sealhulgas ka õhk) üsna head isolaatorid. Kuid gaas muutub juhtivaks, kui tema neutraalsed molekulid või aatomid muuta ioonideks, s.o. teda ioniseerida. Gaasi võib ioniseerida kuumutamisel, kiiritades elektromagnetilise kiirgusega (näiteks röntgeni-, ultravioletт- ja radioaktiivsete ainete kiirgus), pommitades tema osakesi elementaarosakestega jne.

Kui vaadelda lähemalt meie atmosfääri õhku, siis näeme, et seal leidub alati väike hulk mõlema märgiga ioone ja isegi elektrone. Nende tekitajateks on õhus ja pinnases leiduvate radioaktiivsete ainete kiirgus, maailmaruumist tulev kosmiline kiirgus, Päikese ultravioletтkiirgus, äikeselahendused jne. Kuid üheaegselt ionisatsiooniga kulgeb ka ioonide rekombinatsioon, s.o. ionisatsioonile vastupidine protsess. Sellega seletubki, miks ioonide hulk õhus ei muutu väga suureks.

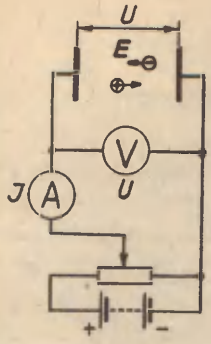
Atmosfääris leiduvaid ioone ja laetud osakesi nimetatakse aeroioonideks. Aeroioonid jagunevad kergeteks, keskmisteks ja rasketeks. Kergeteks nimetame gaasi ioone, mil-

lel väikese massi tõttu on ïsna suur liikuvus - 1 - 2 cm^2/Vs. Keskmisteks ja rasketeks aeroioonideks nimetame gaasi ioone, mis on seotud õhus hõljuvate vedelate ja tahkete osakestega. Nad on suhteliselt suure massiga, mistõttu nende liikuvus on palju väiksem, keskmistel 0,01 - 0,001 ja rasketel 0,001 - 0,00025 cm^2/Vs.

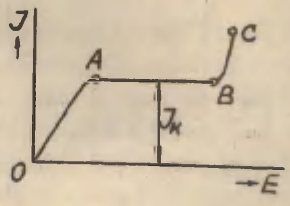
Linnas on 1 cm^3 õhus keskmiselt mitusada kerget ning kuni mitukümmend tuhat keskmist ja rasket iooni. Maal, linnast kaugel, on kergete ioonide hulk suurem: kuni mõni tuhat, kuna keskmisi ja raskeid ioone seal peaaegu ei esine. Võrdluseks tuletame meelde, et normaaltingimustes sisaldab 1 cm^3 õhku $2{,}7 \cdot 10^{19}$ molekuli. Üldiselt oleneb ioonide hulk õhus paljudest teguritest ja muutub alatasa. Maapinna lähedal on tavaliselt arvulises ülekaalus positiivsed ioonid. Veekogude läheduses, samuti pärast äikesevihma on suurem negatiivsete ioonide arv. Vee pihustamisel tekivad negatiivsed aeroioonid (ülipeened tilgakesed omandavad tekkimisel negatiivse laengu).

Negatiivsete kergete ioonide ülekaal avaldab soodsat mõju organismile (parandab enesetunnet jne.). Seda mõju kasutatakse aeroionoteraapias, kus haigel lastakse sisse hingata kunstlikult ioniseeritud õhku. Õhu kunstlikuks ioniseerimiseks kasutatakse kõige sagedamini vaikset elektrilahendust (koroonalahendust), õhu kuumutamist ja radioaktiivsete ainete kiirgust. Kasutatakse ka pihustatud ioniseeritud ravimite sissehingamist (aerosoolteraapia). Aerosoole, s.o. pihustatud lahuseid, tekitatakse kas mehaanilise pihustamisega või ultraheli abil.

Kui aeroioonid satuvad elektrivälja, näiteks kondensaatori plaatide vahele, siis hakkavad nad liikuma - positiivsed negatiivse elektroodi poole, negatiivsed positiivse elektroodi poole. Elektroodide vahel tekib vool. Kui uurida selle voolu olenevust mõjuvast elektrivälja tugevusest joonisel 39 toodud skeemi abil, siis saame joonisel 40 toodud kõvera. Kõverat uurides näeme, et väikeste elektrivälja tugevuste puhul on vool võrdeline



Joonis 39



Joonis 40

välja tugevusega (piirkond OA), sest viimase suurenemisel jõuab antud tingimustes järjest rohkem plaatide vahel tekkivatest ioonidest elektroodidele. Teatud välja tugevuse juures jõuavad kõik tekkivad ioonid elektroodidele (punkt A). Edasisel välja suurendamisel jääb nende arv ikka samaks (piirkond AB), saame küllastusvoolu I_k. Väga suurte välja tugevuste korral (umbes 30 kV/cm) muutub ioonide kiirus niivõrd suureks, et nad neutraalsete molekulidega põrkudes ioniseerivad neid. Selle nn. <u>tõukeionisatsiooni</u> tulemusena ioonide hulk suureneb järsku - suureneb ka vool (piirkond BC). Kahe esimese piirkonna puhul, kus elektriväli ei tekitanud laengukandjaid, räägime mitteiseseisvast lahendusest. Tõukeionisatsiooni piirkonnas, kus elektriväli ise tekitas ioone, toimub aga iseseisev lahendus.

21. ELEKTRILAHENDUS GAASIS ATMOSFÄÄRIRÕHUL

Sõltuvalt voolutihedusest võime elektrilahenduse gaasis (elektrivoolu läbi gaasilise keskkonna) jaotada vaikseks, säde- ja kaarlahenduseks. Lahendusega võivad kaasneda mitmesugused nähtavad, kuuldavad ja teised efektid. Gaasi helendumine on seotud aatomite ja molekulide ergastamisega, kui nendega põrkuvad suure kineetilise energiaga elektronid või ioonid. Heliefektid (sisin, kahin, ragin jne.) on seotud gaasi paikse kuumenemisega ja sellest tingitud liikumisega.

Vaikse lahenduse puhul on elektroodidevaheline ioonide vool väikese tihedusega. Intensiivsem vaikne lahendus tekib tugevama elektriväljaga kohtades, nagu elektroodi teravikul, väljaulatuvatel osadel, juhtme paindekohtades jne. Niisugust lahendust saadab iseloomulik sisin ja pimedas võib näha lillakat helendust, mida nimetatakse koroonaks.

Koroonalahendust kasutatakse näiteks elektroefluviaal-aeroionisaatoris. Selle teravikelektroodid (joonis 41) on riista kere suhtes kõrge negatiivse potentsiaali all. Vaiksel lahendusel tekkivad negatiivsed ioonid ja elektronid tõugatakse teravikust eemale ümbritsevasse ruumi. Positiivsed ioonid tõmmatakse aga teravikule, kus nad neutraliseeritakse.

Joonis 41

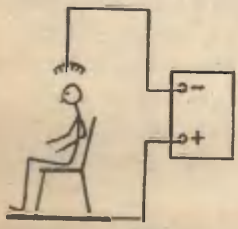
Koroonalahendust rakendatakse ka elektrofiltrites, mida kasutatakse suitsu või tolmuosakeste sadestamiseks. Filtris leiduvatel peentel traatidel tekitatakse koroonalahendus, mis sunnib õhus hõljuvaid ja laengut saanud osakesi seintele sadestuma.

Küllalt suure pinge puhul (õhus normaaltingimustes ca 31 kV 1-cm elektroodidevahe puhul) tekib sädelahendus, mida näeme heleda sakilise joonena. Sädelahenduskanalis tekib kõrge temperatuur (ulatub kuni 10 000°C). Sädelahendusel on plahvatuse iseloom, kuna väga lühikese aja jooksul (miljardikud sekundist) eraldub küllalt suur energia. Seetõttu saadab sädelahendust tugev heliefekt (raksatus, kõuemürin, mida põhjustab välgulöök).

Kaarlahendust iseloomustab suur voolutihedus. Et kaarlahendus tekiks, peavad elektroodid emiteerima (välja saatma) elektrone. Elektronide emissiooni võib saada näiteks elektroodide kuumutamisel (termoemissioon). Kaarlahenduse võime tekitada vooluallikaga ühendatud kahe söe- või metallpulga vahel, neid pärast kokkupuudet teineteisest eemale viies. Elektrikaart kasutatakse kõrge temperatuuri allikana (temperatuur kaares ulatub kuni 4000°C), näiteks metallide keevitamisel, sulatamisel jne. Elektrikaart kasutatakse ka võimsates valgusallikates.

22. TUGEVA ALALISELEKTRIVÄLJA RAKENDUSI MEDITSIINIS

Tugeva alaliselektrivälja rakendust meditsiinis tuntakse elektrostaatilise dušši ehk franklinisatsiooni nimetuse all. Siin kasutatakse kõrgepingeallikat pingega 40 - 60 kV. Patsiendi keha ühendatakse kõrgepingeallika ühe poolusega (sagedamini plusspoolusega). Tavaliselt patsient istub toolil ja tema jalad asuvad pingeallika ühe poolusega ühendatud metallplaadil (joonis 42). Pea kohal, 10 - 15 cm kaugusel, asub nõgus, teravikega varustatud elektrood, mis on ühendatud pingeallika teise poolusega. Kasutatakse ka paikset franklinisatsiooni, näiteks asetatakse elektrood ainult käe, jala kohale.



Joonis 42

Kirjeldatud ravi korral mõjub patsiendile korraga mitu faktorit:

a) kõrgepingeline elektriväli ise,

b) vaiksel lahendusel teravikelt tekkivad aeroioonid,

c) vaiksel lahendusel tekkivad osoon ja lämmastikoksiid.

Varem kasutati franklinisatsiooni puhul pingeallikana elektrostaatilisi masinaid. Praegusaegseid aparaate toidetakse vahelduvvooluvõrgust. Neis transformeeritakse transformaatori abil pinge nõutavale kõrgusele ja siis alaldatakse. Aparaat võimaldab reguleerida pinge suurust. Et vältida õnnetusjuhtumeid aparaadi elektroodi juhuslikul puudutamisel, ühendatakse elektroodiga järjestikku suureoomiline takistus.

23. ELEKTRILAHENDUS HÕRENDATUD GAASIDES

Lahenduse tekitamiseks gaasis normaalrõhul on vaja väga suurt elektrivälja tugevust. Näiteks sädelahenduse tekitamiseks 1 cm kaugusel asuvate kuulelektroodide vahel peame rakendama pinge ca 31 kV. Seda sellepärast, et välja mõjul liikuvad ioonid põrkuvad alatasa gaasi molekulidega, nende põrgetevahelised teepikkused on väga väikesed ja nõrgas elektriväljas ei jõua nad saavutada molekulide ioniseerimiseks vajalikku energiat.

Hõrendatud gaasis on iooni põrgetevaheline teepikkus palju suurem ja juba suhteliselt väikeste pingete puhul algab tõukeionisatsioon, gaasis tekib lahendus, nn. huumlahendus. Gaas hakkab helenduma (värvus sõltub gaasist).

Huumlahenduse toimumisel pikemas torus rõhul ca 1 mmHg (joonis 43) ei helendu gaas ühtlaselt. Katoodi juures on katoodi pimeruum, seal liikuvate elektronide kiirus ei ole veel küllaldane ionisatsiooni esilekutsumiseks.

Joonis 43

Sellepärast on seal vähe ioone, mistõttu selle piirkonna elektritakistus on suur ja sellel langeb suurem osa torule rakendatud pingest. Selles piirkonnas kiirendatakse katoodi poole liikuvaid positiivseid ioone, mis katoodi pinnaga põrkudes löövad sealt välja elektrone (põhjustavad elektronide emissiooni). Samuti kutsub emissiooni katoodilt esile torus tekkiv ultravioletkiirgus. Väljunud elektronid kiirendatakse pimeruumi läbimisel ja sealt väljumisel on nende energia küllaldane tõukeionisatsiooni esilekutsumiseks.

Suurem osa torust on täidetud helenduva gaasiga - positiivse sambaga. Selles helenduvas sambas on gaas plasmana, s.o. koosneb kaootiliselt liikuvatest elektronidest, ioonidest ning neutraalsetest aatomitest ja molekulidest.

Kui huumlahendust toidab küllalt võimas vooluallikas ja vooluringi takistus on väike, siis läheb huumlahendus üle kaarlahenduseks. Ka kaare "leegis" on gaas plasmaolekus.

Peale elektrilahendustel tekkiva plasma tuntakse veel kõrgetemperatuurilist plasmat. Niisugune plasma tekib gaasist (ainest) ülikõrgetel temperatuuridel (10^5 °K ja kõrgemad), kui intensiivses soojusliikumises olevate aineosakeste energia on küllaldane aatomite täielikuks ioniseerimiseks. Niisugune plasma on üliintensiivses soojusliikumises olevate elektronide ja aatomituumade segu. Niisugune plasma esineb näiteks Päikesel ja kuumadel tähtedel ning seda on viimasel ajal saadud ka laboratoorselt.

24. ELEKTRIVOOLU MAGNETVÄLI

On kindlaks tehtud, et magnetilised nähtused on alati seotud liikuvate elektrilaengutega, s.t. elektrivooluga. Ka püsivmagneti magnetism on seotud elektronide liikumisega tema aatomites. Tähendab, liikuvate laengute ümber on eriline mateerialiik, mida nimetame magnetväljaks.

Magnetvälja iseloomustame magnetvälja tugevusega H. Magnetvälja tugevuse vektori suund ühtib vaadeldavasse punkti paigutatud N-poolusele mõjuva jõu suunaga.

Lõpmata pika peenikese sirge juhtme poolt tekitatud välja tugevus juhtmest kaugusel I avaldub

$$H = k \frac{2I}{l} .$$

Kui k = 0,1 ja voolutugevust I mõõdame amprites, kaugust sentimeetrites, siis saame välja tugevuse õrstedites (Oe).

Kui

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

ja voolutugevust mõõdame amprites ning kaugust meetrites, saame magnetvälja tugevuse amprites meetri kohta ($\frac{A}{m}$).

Magnetväljade uurimisel kasutatakse tihti nende kujutamist magnetvälja jõujoonte abil. Magnetvälja jõujoone all mõeldakse niisugust joont magnetväljas, mille puutujad kõigis punktides ühtivad magnetvälja tugevuse vektorite sihtidega. Jõujoonte tihedus (jõujoonte arv läbi nendega risti asetatud pinnaühiku) võetakse arvuliselt võrdseks magnetvälja tugevusega. Jõujoonte abil võime kujutada mitmesuguse kujuga juhtmete poolt tekitatud magnetvälju.

Et määrata tekitatud magnetvälja suunda olenevalt voolu suunast, kasutatakse mitmesuguseid meelespidamise reegleid. Sirge juhtme puhul kasutame nn. kruvireeglit, mis ütleb, et kui kruvi kulgev liikumine ühtib voolu suunaga, siis kruvipea pöördumise suund ühtib magnetvälja suunaga. Poolil lõunapoolus tekib otsas, kust vaadates voolu suund poolis on päripäeva.

Kui pool on mähitud ühtlaselt ja selle pikkus on läbimõõdust tunduvalt (vähemalt 5 korda) suurem, siis magnetväli tema sees on ühtlane ja selle tugevus võrdub

$$H = k \frac{4\pi nI}{l},$$

kus k - võrdetegur,
H - magnetvälja tugevus,
n - pooli keerdude arv,
I - voolutugevus,
l - pooli pikkus.

Valemist nähtub, et siin määrab magnetvälja tugevuse pooli ühele pikkusühikule tulev voolutugevuse korrutis keerdude arvuga.

Kui tahame magnetvälja tugevust poolis saada örstedites, siis tuleb võtta voolutugevus amprites, pikkus sentimeetrites ja k = 0,1.

Kui aga tahame saada magnetvälja tugevust SI süsteemi ühikutes amprites meetri kohta (amperkeerdudes meetri kohta), siis võetakse voolutugevus amprites, pikkus meetrites ja

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

Valem lihtsustub

$$H = \frac{nI}{l} \left(\frac{A}{m}\right).$$

25. AINETE MAGNETILISED OMADUSED

Ainete erinevat käitumist magnetväljas võib seletada molekulaarmagnetismi seisukohalt. Aine koostisosakestes (aatomites, molekulides või nende grupeeringutes) tiirlevad tuumade ümber elektronid, samuti pöörlevad elektronid oma telje ümber, tekitades ringvoole. Need nn. elementaarvoolud tekitavad omakorda magnetvälju. Aine nagu koosneks elementaarmagnetitest. Tavaliselt paiknevad need elementaarmagnetid kaootiliselt, muutes pidevalt molekulaarliikumise tõttu oma orientatsiooni. Välise magnetvälja mõjul orienteeruvad need elementaarmagnetid suuremal või vähemal mää-

ral välja sihis. Nende mõju liitub ja olenevalt nende summaarse välja suunast toimub aines mõjuva välja tugevnemine või nõrgenemine. Enamikul ainetel elementaarmagnetite kindel orientatsioon välise välja kadumisel kaob. Mõnel ainel aga elementaarmagnetite orientatsioon säilib - aine jääb magnetiks. Seda nimetatakse jääkmagnetismi nähtuseks.

Magnetiliste omaduste järgi jaotatakse ained dia-, para-, ja ferromagnetilisteks.

Diamagnetilistel ainetel välisvälja mõjul tekkiv nõrk sisemine, s.o. elementaarmagnetite väli on välisväljaga vastassuunaline, mistõttu viimast veidi nõrgendatakse. Diamagnetilistel ainetel ei esine jääkmagnetismi. Diamagnetiliste hulka kuuluvad järgmised ained: Bi, Zn, Cu, Au, vesi, vesinik jne.

Paramagnetilistel ainetel on nõrk sisemine väli välisväljaga samasuunaline, mistõttu viimane veidi tugevneb. Ka paramagnetilistel ainetel puudub jääkmagnetism. Nende hulka kuuluvad Al, Mn, Cr, Pt, hapnik jne.

Ferromagnetilistel ainetel, tänu nende erilisele struktuurile, tekib tunduvalt tugevam välisväljaga samasuunaline sisemine magnetväli kui paramagnetilistel, mistõttu nad magneetuvad väga tugevasti. Ferromagnetilistel ainetel esineb ka jääkmagnetism. Siia kuuluvad Fe, Ni, Co ja rida sulameid, kusjuures mõned sulamid, mis ei sisalda ferromagnetilisi elemente, osutuvad ferromagnetilisteks.

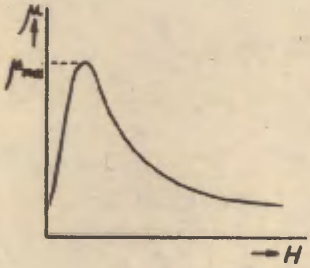
Ferromagnetilistel ainetel esineb magnetiline küllastus, mis seisneb selles, et küllalt tugeva välisvälja puhul saavutatakse elementaarmagnetite maksimaalne orientatsioon ja seetõttu edasine välisvälja tugevdamine enam ei tugevda magnetvälja aines.

Ainete magnetilisi omadusi iseloomustab suhteline <u>magnetiline läbitavus</u> μ_s. Suhteline magnetiline läbitavus on arv, mis näitab, mitu korda tugevneb välisväli (näit. poolis) antud aines võrreldes vaakuumiga. Vaakuumi magnetiline läbitavus on võetud üheks. Diamagnetilistel ainetel μ_s on veidi väiksem ühest ($\mu_s < 1$); paramagneti-

listel on ta veidi suurem ühest ($\mu_s > 1$) ja ferromagnetilistel on ta palju suurem ühest ($\mu_s \gg 1$), võib ulatuda siin kümnetesse tuhandetesse. Järgnevas tabelis on toodud mõnede ainete suhtelised magnetilised läbitavused.

Diamagnetilised	Paramagnetilised	Ferromagnetilised
a i n e d		
Bi - 0,999824	Al - 1,000023	Fe - 7000-10000
Cu - 0,999988	Pt - 1,000360	Ni - 290
Hg - 0,999967	O - 1,0000019	Co - 170
Vesi - 0,999991	Õhk - 1,0000004	Permalloi - 100000

Ferromagnetilistel ainetel sõltub magnetiline läbitavus välja tugevusest (joonis 44). Tavaliselt antakse siin maksimaalne väärtus (eelmises tabelis).



Joonis 44

Et dia- ja paramagnetilistel ainetel μ_s erineb vähe ühest, siis loeme neid igapäevases elus mittemagnetilisteks aineteks. Magnetilisteks loeme ainult ferromagnetilisi aineid. Sellest seisukohast võime lugeda ka organismi kudesid mittemagnetilisteks (tegelikult on nad nagu enamik orgaanilisi aineid diamagnetilised).

Keskkonna magnetiline läbitavus SI süsteemis

$$\mu^* = \mu_0^* \cdot \mu_s$$

kus μ_0^* on magnetiline konstant ($\mu_0^* = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{H}{m}$)
ja μ_s suhteline magnetiline läbitavus.

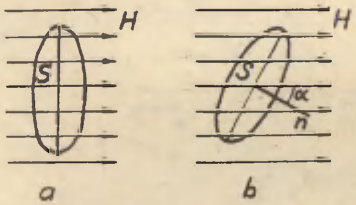
26. MAGNETVOOG

Magnetvälja iseloomustame veel magnetvooga. Ühtlase magnetvälja puhul tühjuses magnetvoog

$$\Phi = HS,$$

s.o. magnetvoog on magnetvälja tugevuse H korrutis välja tugevuse vektoriga risti asetseva pindalaga S (joonis 45a). Kui aga vaadeldava pinna S normaal n moodustab välja vektoriga nurga α (joonis 45b), siis magnetvoog läbi selle pinna on

$$\Phi = HS \cos\alpha .$$



Joonis 45

Kasutades lk. 51 toodud pooli magnetvälja tugevuse valemit, võime arvutada magnetvoo niisuguses poolis

$$\Phi = HS = k\,\frac{4\pi nIS}{l} .$$

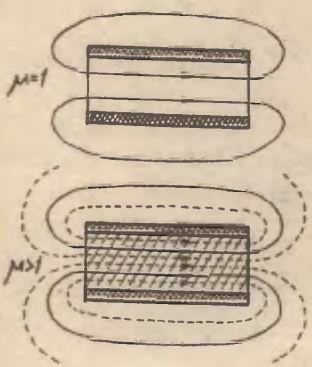
Magnetvoo ühikuks CGS-süsteemis on maksvell (Mx); 1 Mx = 1 Oe·cm^2. SI süsteemis on ühikuks veeber (Wb); 1 Wb = 10^8 Mx.

Eespool öeldu kehtib vaakuumi kohta. Kui aga magnetväli tekitatakse ferromagnetilises aines (näiteks pooli asetatud raudsüdamikus), siis teatavasti tugevneb väli selles aines μ korda. Tekkinud magnetvälja nimetame magnetiliseks induktsiooniks

$$B = \mu H .$$

Magnetiline induktsioon on vektor, mille suund ühtib magnetvälja tugevuse vektori suunaga. Magnetilise induktsiooni ühikuks CGS-süsteemis on gauss (Gs); SI süsteemis tesla (T);

$$1\ T = \frac{Wb}{m^2} .$$



Joonis 46

Ferromagnetilise südamiku puhul suureneb ka jõujoonte arv (joonis 46). Jõujooni nimetatakse siin induktsioonijoonteks.

Magnetvoog südamikus on

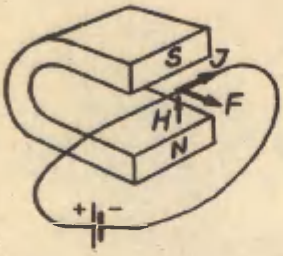
$$\Phi = \mu HS = BS$$

Pooli asetatud ferromagnetilisest ainest (rauast) südamikke, nn. elektromagneteid kasutatakse laialdaselt praktikas. Kui südamik on jääkmagnetismiga, siis pärast voolu läbilaskmist poolist muutub südamik püsivmagnetiks.

Mitmesuguseid püsiv- ja elektromagneteid kasutatakse ka meditsiinis, näiteks magnetilise puru eemaldamisel silmast (silmamagnet), söögitorust jne.

27. MAGNETVÄLJA MÕJU ELEKTRIVOOLULE

Korraldades joonisel 47 kujutatud katset, võime järeldada, et magnetväljas asuvale juhtmele mõjub jõud, mis on risti nii voolu kui ka magnetvälja suunaga. Jõu suuna määramiseks kasutatakse nn. vasaku käe reeglit: kui sõrmed näitavad voolu suunda ja magnetvälja jõujooned sisenevad peopessa, siis eemale sirutatud põial näitab jõu suunda.



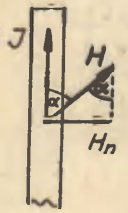
Joonis 47

Jõu suurus on võrdeline magnetvälja tugevusega H, voolutugevusega I ja magnetväljas asuva juhtmeosa pikkusega l

$$F = kHIl .$$

Kui F on düünides, I amprites, H örstedites ja l sentimeetrites, siis võrdetegur k = 0,1.

Kui voolu ja magnetvälja suuna vahel on nurk α (joonis 48), siis mõjuva jõu arvutamisel arvestame ainult magnetvälja normaalkomponendiga



Joonis 48

$$H_n = H \sin\alpha$$

ja

$$F = kHIl \sin\alpha .$$

Juhtme liikumise põhjuseks on magnetvälja mõju liikuvatele laengutele. Jõudu, mis mõjub magnetväljas liikuvatele laetud osakestele, uuris tuntud hollandi õpetlane Lorentz, mistõttu seda nimetatakse sageli Lorentzi jõuks.

Näitena vaatame Lorentzi jõudu, mis mõjub ühtlases magnetväljas liikuvale elektronile (joonis 49). Liikugu elektron kiirusega v. Magnetvälja suund olgu joonisega risti, sissepoole. Elektronile mõjuva jõu suuna võime leida vasaku käe reegli abil. Tuleb ainult arvestada, et voolu tehniline suund on elektroni liikumissuunaga vastupidine. See jõud F_n on risti elektroni kiirusega, ta sunnib elektroni liikuma mööda ringjoont (on tsentripetaaljõuks). Jõu suuruse võime määrata valemi F = 0,1 HIl abil. Asendades korrutise II korrutisega ev (elektroni laeng korda tema kiirus), saame

Joonis 49

$$F_n = 0{,}1\ evH.$$

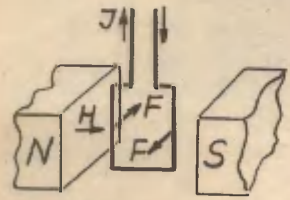
Kuna see jõud on tsentripetaaljõuks ($F_n = \frac{mv^2}{r}$, kus m - elektroni mass ja r - trajektoori raadius), siis

$$\frac{mv^2}{r} = 0{,}1\ evH\ ,$$

kust võime avaldada trajektoori raadiuse

$$r = \frac{mv}{0{,}1\ eH}\ .$$

Lõpuks vaatleme magnetvälja mõju raamikujulisele vooluringile (joonis 50). Joonisest selgub, et raamile mõjub pöördemoment, mis püüab raami pöörata nõnda, et raami poolt tekitatav magnetvälja suund ühtiks mõjuva välja suunaga.

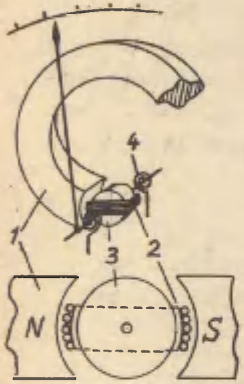


Joonis 50

Magnetvälja mõju elektrivoolule leiab kasutamist paljudes elektrimõõteriistades, elektrimootorites, valjuhääldites jne.

28. ELEKTRIMÕÕTERIISTAD

Elektrimõõteriistu, kus on kasutatud vooluga juhtme ja püsivmagneti vahelist toimet, nimetatakse magnet-elektrilisteks. Levinum nendest on pöördpooliga (raamiga) mõõteriist (joonis 51). Magnetväli tekitatakse magneti (1) pooluskingade ja raudsilindri (3) vahelises õhupilus. Õhupilus võib vabalt pöörduda nelinurkne raam (2), millele on mähitud peenest traadist mähis (pool). Vool juhitakse raami spiraalvedrude (4) abil, mis tekitavad ka tasakaalustava momendi. Tänu ühtlasele magnetväljale õhupilus on niisugusel mõõteriistal ühtlane skaala. Kuna tekkiva pöördemomendi märk sõltub voolu suunast, siis kõlbavad niisugused riistad ainult alalisvoolu mõõtmiseks.

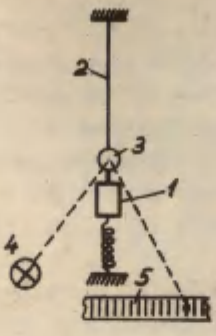


Joonis 51

Vahelduvvoolu mõõtmisel kasutatakse magnet-elektrilisi mõõteriistu koos vahelduvvoolu muundajatega alalisvooluks (pooljuhtdioodid, termomuundi, elektronlambid).

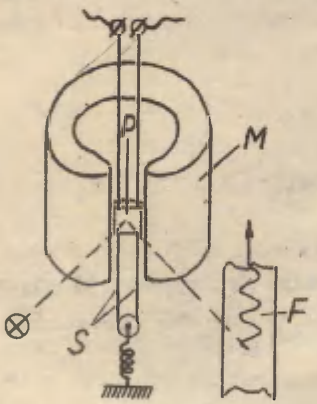
Pöördpooliga magnet-elektrilisi süsteeme kasutatakse ka galvanomeetrites - suure tundlikkusega mõõteriistades väikeste voolutugevuste, pingete ja elektrihulkade mõõtmiseks. Galvanomeetrid võivad olla osuti- ja peegelgalvanomeetrid, viimased võimaldavad mõõta voolutugevusi alates 10^{-10} A.

Galvanomeetri raamike (1) (joonis 52) on riputatud elastse (fosforpronksist) niidi (2) külge. Raamikese külge on kinnitatud kerge peeglike (3). Valgusallikast (4) tulev ja peeglikeselt peegelduv valguskiir annab skaalal (5) lugemi.



Joonis 52

Elektrivõnkumiste jälgimisel ja registreerimisel kasutatakse tihti silmusvibraatoreid (šleifgalvanomeetreid). Vibraator koosneb püsivmagnetist M (joonis 53), mille pooluste vahel asub peenest traadist silmus (šleif) S. Selle küljes on kerge peeglike P. Voolu läbiminekul silmusest pöördub ta analoogiliselt galvanomeetri raamikesega, pöörates ka peeglikese. Perioodiliselt muutuva voolu korral on peeglikese võnked vastavuses voolu võngetega. Vibraatoreid kasutatakse elektromagnetilistes ostsillograafides, kus peeglikeselt peegeldunud kiir jätab jälje liikuval filmil või fotopaberil F.



Joonis 53

Peale magnet-elektriliste mõõteriistade on üsna levinud veel elektromagnetilised ja elektrodünaamilised mõõ-

teriistad. Elektromagnetilistes riistades mõõdetav vool läbib liikumatut pooli, selles tekkiv magnetväli paneb liikuma osutiga ühendatud pehmest rauast südamiku. Neid kasutatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul. Elektrodünaamilistes mõõteriistades läbib vool liikumatu ja liikuva pooli, neis tekkinud magnetväljade toimel hakkab viimane koos tema külge kinnitatud osutiga liikuma. Neid mõõteriistu kasutatakse samuti alalis- ja vahelduvvoolu mõõtmisel.

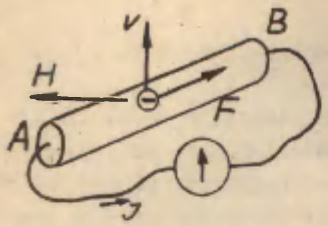
Voolu tugevuse mõõtmiseks ettenähtud mõõteriistu lülitatakse vooluringi järjestikku. Kui mõõdetav voolutugevus ületab kasutatava mõõteriista maksimaalse voolutugevuse, siis kasutatakse riista mõõtepiirkonna laiendamiseks šunti, s.o. mõõteriistaga paralleelselt ühendatavat takistit.

Pinge mõõtmiseks ettenähtud mõõteriistad ühendatakse vooluringiga paralleelselt. Mõõtepiirkonna laiendamiseks ühendatakse nendega järjestikku eeltakistid.

29. ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON

Elektromagnetilise induktsiooni nähtuse avastas 1831. aastal inglise füüsik M.Faraday. Selle järgi kinnises vooluringis tekib vool siis, kui muutub magnetvoog läbi vooluringi poolt piiratud pindala. Induktsioonivoolu tekitamise katsed on teada juba keskkoolikursusest ja neil siin enam ei peatuta.

Elektromagnetilise induktsiooni nähtust võib seletada juhi liikuvatele laengutele mõjuva Lorentzi jõuga. Näiteks metalse juhtme AB liikumisel risti magnetvälja jõujoontega (joonis 54) liiguvad koos juhtmega ka selle vabad elektronid. Magnetväljas liikuvale elektronile mõjub Lorentzi jõud F, mille mõjul elektron liigub juhtme otsa B suunas.



Joonis 54

Juhtme otsa B koondunud elektronid tekitavad seal negatiivse potentsiaali, otsas A tekkiv elektronide puudujääk aga tekitab seal positiivse potentsiaali. Tekkinud potentsiaalide vahet nimetatakse induktsiooni elektromotoorjõuks. Vooluringi sulgemisel põhjustab see emj. vooluringis elektrivoolu.

Indutseeritud voolu suunda on hõlpus määrata Lenzi reegli abil, mis ütleb: indutseeritud vool on sellise suunaga, et tema magnetväli takistab induktsiooni esilekutsuvat magnetvoo muutumist (induktsiooni põhjust).

Indutseeritud emj. suuruse annab induktsiooni põhiseadus (Faraday seadus): indutseeritud emj. on võrdeline vooluringi pinda läbiva magnetvoo muutumise kiirusega

$$E = -k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} ,$$

kus k on mõõtühikute valikust sõltuv võrdetegur.

See valem on SI süsteemi magnetvoo ühiku veeberi (Wb) defineerimise aluseks. Selleks võetakse E = 1 V; Δt = 1 s; k = 1 ja saadakse $\Delta \Phi$ = 1 Wb. Sõnastatult: magnetvoog on 1 Wb, kui tema kahanemisel nullini 1 s jooksul tekib teda ümbritseva vooluringi otstel emj. 1 V (1 Wb = 1Vs).

Magnetvoo mõõtmisel CGS-süsteemi ühikutes, maksvellides (Mx), võrdetegur $k = 10^{-8}$ ja indutseeritud emj. valem võtab kuju

$$E = -10^{-8} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

30. VASTASTIKUNE JA ENDAINDUKTSIOON

Induktsioonivoolu tekitamise katsetest on teada, et voolutugevuse muutmisel ühes voolukontuuris indutseeritakse emj. lähedal asetsevas teises kontuuris. Põhjuseks on teist voolukontuuri läbiva magnetvoo muutus, mis on omakorda tingitud voolutugevuse muutumisest esimeses kontuuris. Kuna magnetvoo muutus on võrdeline voolutugevuse muutusega ($\Delta\Phi \sim \Delta I$), siis lähtudes induktsiooni põhiseadusest

$$E = -k \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

võime kirjutada

$$E = -M \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

kus esinevat uut võrdetegurit M nimetatakse <u>vastastikuseks induktsiooniks</u>. Selle suurus sõltub voolukontuuride kujust, nende suhtelisest asendist ja ümbritseva keskkonna magnetilisest läbitavusest.

Valemist nähtub, et sekundaarses voolukontuuris indutseeritud emj. võrdub voolu muutumise kiirusega primaarkontuuris, korrutatud kontuuride vastastikuse induktiivsusega.

Valem võimaldab saada ka vastastikuse induktiivsuse ühiku. Selleks on henri (H). Kahe voolukontuuri vastastikune induktiivsus on 1 H, kui voolutugevuse muutumisel ühes nendest 1 A võrra 1 sekundis indutseeritakse teises emj. 1 V.

Mingis vooluringis toimuv voolutugevuse muutus tekitab muutuva magnetvoo. See muutuv magnetvoog, läbides sellesama vooluringi pindala, põhjustab vooluringis induktsiooni - <u>endainduktsiooni</u>.

Endainduktsiooni emj. on väljendatav

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

võrdetegurit L nimetatakse vooluringi induktiivsuseks. Ka induktiivsust mõõdetakse henrides. Vooluringi induktiivsus on 1 H, kui voolutugevuse muutumisel 1 A võrra sekundis tema otstel tekib emj. 1 V.

Praktikas huvitab meid kõige sagedamini igasuguste poolide induktiivsus. Toome tuletamata valemi solenoidi induktiivsuse jaoks (SI ühikute korral)

$$L = \frac{\mu_0^* \mu_s n^2 \cdot S}{l} \text{ (H)},$$

kus μ_0^* - magnetiline konstant,
μ_s - solenoidi südamiku suhteline magnetiline läbitavus,
n - solenoidi keerdude arv,
S - solenoidi ristlõike pindala,
l - solenoidi pikkus.

31. PÖÖRISVOOLUD

Eespool nägime, et magnetvoo muutumisel juhtmekontuuris indutseeriti voolu. Kui asendada juhtmekontuur massiivse juhiga, siis tekib ka selles indutseeritud vool. Et aga massiivse juhi takistus on väike, omandavad need massiivse juhi sees lühiühendatud voolud väga suure tugevuse, mistõttu nendega kaasneb tugev magnetväli ja soojuslik toime. Neid voole nimetame pöörisvooludeks (Foucault' vooludeks).

Ka pöörisvoolude kohta kehtib Lenzi reegel, s.o. ka neil on niisugune suund, mis püüab vähendada nende tekitamise põhjust. Seda tõendab näiteks katse, milles massiivne vaskpendel, liikudes magnetpooluste vahel, pidurdub.

Pöörisvooludega kaasnev soojus, näiteks elektrimasinate massiivsetes osades, on seotud mittetootliku energiakaoga. Selle vähendamiseks tehakse transformaatorite südamikud, masinate rootorid ja staatorid mitte massiivsetena,

vaid kokkulaotuna õhukestest lehtedest.

Mõnikord aga kasutatakse pöörisvoolude soojuslikku toimet näiteks metallide sulatamiseks ja nende termilisel töötlemisel.

32. VAHELDUVVOOL

Vahelduvvooluks nimetatakse elektrivoolu, mille suund perioodiliselt muutub. Praktikas kasutatakse kõige sagedamini siinusseaduse järgi muutuvat (siinuselist) vahelduvvoolu. Niisugust voolu sagedusega 50 Hz toodavad ka kõik meie maa elektrijaamad.

Siinuselise vahelduvvoolu pinge ajalise muutumise seadus on

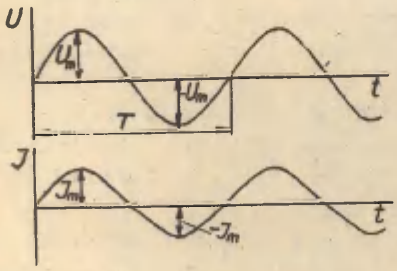
$$U = U_m \sin \omega t,$$

kus U_m on pinge maksimaalväärtus ja ω ringsagedus.

Ainult takisteid sisaldavas vooluringis tekitab niisugune pinge samasuguse seaduse järgi muutuva voolu

$$I = I_m \sin \omega t,$$

kus I_m on voolu maksimaalväärtus.

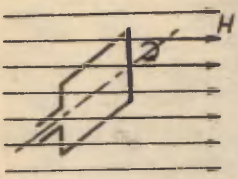


Joonis 55

Graafiliselt on niisugune pinge ja vool kujutatud joonisel 55.

Siinuselist vahelduvvoolu saadakse elektromagnetilise induktsiooni abil vahelduvvoolugeneraatorites. Lihtsaima generaatori saame, kui paneme juhtmekontuuri (raami) pöörlema ühtlases magnetväljas

(joonis 56). Nagu keskkoolikursusest teame, tekib niisuguses kontuuris ühtlasel pöörlemisel siinuseline vahelduvvool. Vahelduvvoolu ja pinget mõõdame efektiivväärtustes. Voolutugevuse efektiivväärtuse all mõeldakse niisugust alalisvoolu tugevust, mis tekitab juhis sama aja jooksul sama soojushulga nagu võrreldav vahelduvvool. Matemaatiliselt on lihtne tõestada, et siinuselise vahelduvvoolu ja pinge efektiivväärtused võrduvad maksimaalväärtuste ja $\sqrt{2}$ jagatisega.



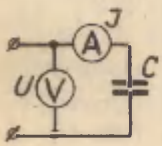
Joonis 56

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} ;$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} .$$

Tehnikas ja meditsiinis kasutatakse ka väga suure sagedusega vahelduvvoolu, mida tekitatakse elektronlampskeemide abil.

33. MAHTUVUS JA INDUKTIIVSUS VAHELDUVVOOLURINGIS



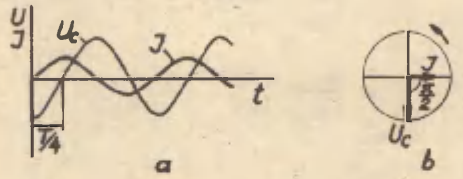
Joonis 57

Kui joonisel 57 kujutatud kondensaatoriga vooluring ühendada alalispingega, laadub kondensaator ja vool lakkab, sest kondensaatori plaadid on teineteisest isoleeritud.

Sama vooluringi toitmisel vahelduvpingega vool vooluringis voolab. Et vahelduvvoolu suund perioodiliselt muutub, siis toimub kondensaatori perioodiline

laadumine ja tühjenemine. Laengud liiguvad juhtmetes kord ühes, kord teises suunas - juhtmetes voolab vool. Vool on seda tugevam, mida suurem on kondensaatori mahtuvus.

Uurides voolu ja pinge kuju, näeme, et nad mõlemad muutuvad siinusseaduse järgi, kuid nad ei ole faasis. Kadudeta kondensaatori korral saabub voolu maksimum T/4 võrra varem pinge maksimumist (joonis 58a). Pöörleval diagrammil (joonis 58b) on siis voolu ja pinge nihe $\pi/2$.



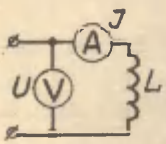
Joonis 58

Vool ja pinge on siin seotud Ohmi seadusega sarnase seosega

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}},$$

kus takistuse osa täidab suurus $\frac{1}{\omega C}$ – mahtuvuslik takistus (mõõdetakse oomides). Valemist näeme, et mahtuvuslik takistus on pöördvõrdeline mahtuvuse ja sagedusega.

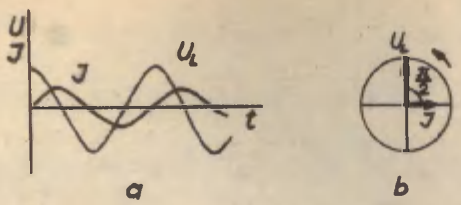
Pooli toitmisel alalisvooluga (joonis 59) näeme, et pool ei osuta alalisvoolule nimetamisväärset takistust.



Joonis 59

Sama vooluringi toitmisel vahelduvvooluga näeme, et vool on nõrgem, s.o. pooli takistus vahelduvvoolule on suurem.

Selgub, et ka siin vool ja pinge ei ole faasis, kuid siin pinge ennetab voolu T/4 ($\pi/2$) võrra (joonis 60 a ja b).



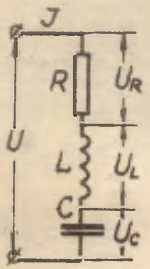
Joonis 60

Vool ja pinge on siin seotud seosega

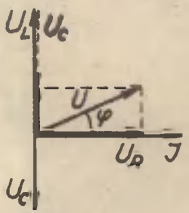
$$I = \frac{U}{\omega L},$$

kus ωL on induktiivne takistus.

Lõpuks vaatleme juhtumit, kus vahelduvvooluringi on järjestikku ühendatud takisti, pool ja kondensaator (joonis 61). Kõiki neid elemente läbib ühine vool I ja nendel tekivad pingelangud U_R, U_L ja U_C. Eespool öeldu põhjal on kõik need osapinged voolu suhtes erinevalt nihutatud. Kogupinge U saamiseks tuleb nad liita geomeetriliselt (joonis 62). Näeme, et ringi klemmidel oleva kogupinge ja voolu vahel on nihkenurk φ, mis võib muutuda osapingete suurustest olenevalt piires $+\frac{\pi}{2} \geq \varphi \geq -\frac{\pi}{2}$



Joonis 61



Joonis 62

Kirjeldades vaadeldud liitmist matemaatiliselt, saame

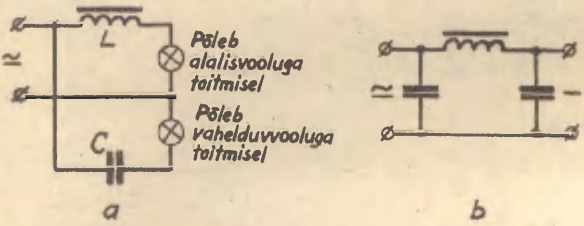
$$U=\sqrt{U_R^2+(U_L-U_C)^2}=\sqrt{I^2R^2+I^2(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}=I\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}\ ,$$

siin esinevat suurust $\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}$ nimetatakse kogu- ehk näivtakistuseks ja tähistatakse tähega Z. Kirjutades tulemuse kujul

$$I=\frac{U}{\sqrt{R^2+(\omega L-\frac{1}{\omega C})^2}}=\frac{U}{Z}\ ,$$

saame Ohmi seaduse vahelduvvoolu kohta.

Asjaolu, et kondensaator laseb läbi vahelduvvoolu ja ei lase läbi alalisvoolu ning et pool laseb hästi läbi alalisvoolu ja halvasti vahelduvvoolu, samuti mahtuvusliku ja induktiivse takistuse sõltuvust sagedusest, võib kasutada alalis- ja vahelduvvoolu või erinevate sagedustega vahelduvvoolude eraldamiseks. Seda tehakse vastavate lülituste abil kondensaatoritest ja poolidest - elektrifiltrite abil. Joonisel 63a toodud filter eraldab alalisvoolu vahelduvvoolust, joonisel 63b kujutatud filter laseb läbi alalisvoolu, vahelduvvoolule on aga väga suureks takistuseks. Viimast filtrit kasutatakse alaldatud pinge silumiseks - pinge pulsatsioonid temast läbi ei pääse.



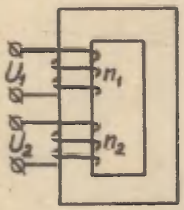
Joonis 63

Vahelduvvoolu võimsus mahtuvust, induktiivsust ja takistust sisaldavas vooluringis on arvutatav valemiga $N = IU \cos \varphi$, kus φ on nihkenurk (faasinihe) voolu ja pinge vahel.

34. TRANSFORMAATOR

Transformaator (lühidalt trafo) on seadeldis vahelduvvoolu pinge muutmiseks. Vahelduvvool tõrjuski tehnikast alalisvoolu välja tänu võimalusele trafode abil hõlpsasti muuta vahelduvvoolu pinget.

Transformaator koosneb suletud raudsüdamikust (joonis 64), mis on kokku laotud õhematest plekklehtedest (pööris-voolude vähendamiseks). Südamikule on mähitud kaks või enam mähist. Primaarmähist, s.o. vooluallikaga ühendatud mähist läbiv vool tekitab südamikus muutuva magnetvoo, mis omakorda indutseerib sekundaarmähises või -mähistes pinge. Sekundaarmähise ühendamisel voolutarbijaga tekib selles vool.



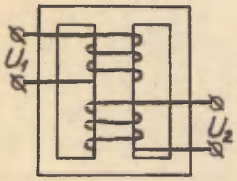
Joonis 64

Kui mitte arvestada transformaatoris esinevaid kadusid (mähiste oomilisel takistusel eralduv soojus, südamiku ümbermagneetimiseks minev energia, magnetvoo hajumine väljaspool südamikku jne.), võime lugeda mähiste pinged ligikaudu võrdeliseks mähiste keerdude arvuga.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k$$

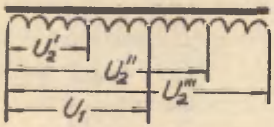
Transformaatorid võivad olla pinget tõstvad ($k < 1$) ja pinget madaldavad ($k > 1$).

Peale kirjeldatud südamiktransformaatori kasutatakse veel manteltransformaatoreid (joonis 65).

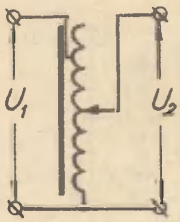


Joonis 65

Tihti kasutatakse veel lihtsustatud transformaatoreid, autotransformaatoreid (säästtransformaatoreid). Neil on ainult üks mähis, mis täidab sekundaar- ja primaarmähise osa, Vajaliku keerdude arvude suhte saamiseks tehakse mähisest väljavõtted (joonis 66a). Laboratoorses praktikas kasutatakse liugkontakti abil reguleeritava sekundaarpingega autotransformaatoreid (joonis 66b). Autotransformaatori puuduseks on asjaolu, et sekundaarmähis on alati elektriliselt ühendatud primaarmähisega, seega ka toitevõrguga.



Joonis 66a



Joonis 66b

35. VAHELDUVVOOLU MÕJU ORGANISMILE

Eespool nägime, et organismi kudesid võis vaadelda kui elektrolüüti. Nägime ka, et elektrivoolu keemiline toime on seotud ioonide liikumisega ja elektroodidel toimuvate reaktsioonidega. Kui kudedele, s.o. elektrolüüdile, rakendada vahelduvpinget, siis hakkavad ioonid võnkuma oma tasakaaluasendi ümber ja elektroodidel toimuv elektronide vahetusprotsess kulgeb igal järgneval poolperioodil erinevas suunas. Selle tõttu ei toimu elektroodidel sekundaarseid reaktsioone ja pöördumatuid protsesse, neid ei toimu ka elektrolüüdis.

Ioonide edasi-tagasi võnkumine organismi kudedes avaldab ärritavat toimet, mis oleneb vahelduvvoolu sagedusest. Kuna sageduse kasvamisel lüheneb poolperioodide kestus, järelikult ka ioonide nihked nende vältel, siis nõrgeneb ka voolu ärritav toime. Küllalt suure sageduse juures vähenevad ioonide nihked sedavõrd, et ärritust enam ei toimu, eraldub vaid soojust, sest esilekutsutavad ioonide võnked vastavad neile võngetele, mida ioonid sooritavad soojusliikumise protsessis.

Kasutades ärrituslävele vastavat voolutugevust, s.o. ärritust esilekutsuvat minimaalset voolutugevust I_1, võime anda siin kehtivad seaduspärasused. Sagedustel mõnestkümnest kuni mõne tuhande hertsini kehtib seos $I_1 = k_1\sqrt{\nu}$ ja sagedustel mõnest tuhandest sadade tuhandete hertsideni $I_1 = k_2\nu$, siin ν on vahelduvvoolu sagedus, võrdetegurid k_1 ja k_2 aga sõltuvad konkreetsetest voolu läbilaskmise tingimustest.

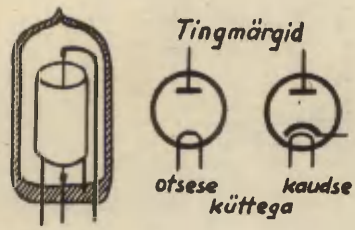
36. TERMOEMISSIOON. DIOOD

Teatavasti leidub metallides suurel hulgal vabu elektrone. Need on alatises kaootilises liikumises metalli sees, kuid tavalistes tingimustes nende energiast ei jätku metallist väljumiseks. Elektroni väljatoomiseks metallist tuleb teha teatud tööd, mida nimetatakse elektroni väljumistööks. Väljumistöö väärtus sõltub metalli liigist. Kui elektronidele anda väljumistööga võrdne või suurem kineetiline energia, saavad nad väljuda metallist. Elektronide väljumist metallist nimetame elektronide emissiooniks. Üheks võimaluseks suurendada elektronide energiat on metalli kuumutamine küllalt kõrge temperatuurini (üle 1000°C). Selle juures toimuvat elektronide emissiooni nimetatakse termoemissiooniks.

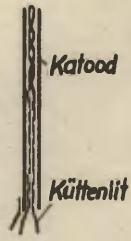
Kui emiteeriv metall ei asu elektriväljas, siis jäävad väljunud elektronid metalli ümbrusse, moodustades selle ümber elektronide pilve. Elektronide lahkumise tagajärjel omandab metall positiivse laengu, mis hoiabki elektronide pilve metalli pinna läheduses. Elektronide pilve negatiivne laeng (ruumilaeng) mõjub takistavalt elektronide väljumisele metallist. Osa elektrone tuleb pilvest metalli tagasi. Saabub liikuva tasakaalu olukord, s.o. metallist väljuvate elektronide hulk saab võrdseks tagasitulevate elektronide hulgaga.

Termoemissioon leiab rakendamist paljudes elektronriistades, sealhulgas ka raadiolampides. Lihtsaimaks raadiolambiks on diood - kahe elektroodiga lamp (joonis 67). Ta koosneb klaasist või metallist anumast (balloonist), millest õhk on välja pumbatud (hõrendus umbes 10^{-7} mmHg).

Balloonis asub metalleilindriga ümbritsetud elektrivoolu abil kuumutatav traat (küttenniit). Niit on katoodiks, silinder anoodiks. Kasutatakse ka kaudse küttega katoode, mis kujutavad endast torukest sisseasetatud küttetraadiga või -spiraaliga (joonis 68).



Joonis 67



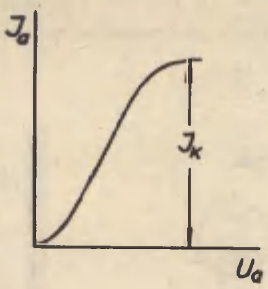
Joonis 68

Kui dioodi anood ühendada vooluallika positiivse poolusega ja katood negatiivsega, siis hakkavad katoodist väljuvad elektronid tekkinud elektrivälja mõjul liikuma anoodile - dioodi läbib vool (voolu suund on anoodilt katoodile, s.o. vastupidine elektronide liikumissuunale). Kui anood ühendada vooluallika negatiivse poolusega, siis tõukab elektriväli elektrone anoodist eemale ja voolu läbi dioodi ei teki.

Dioodi anoodvoolu suurus sõltub nii pingest anoodi-katoodi vahel kui ka katoodi temperatuurist, sest mida kõrgem on viimane, seda rohkem elektrone väljub katoodist. Elektronlampide katoodide temperatuur hoitakse tavaliselt konstantne.

Joonisel 69 on toodud dioodi anoodvoolu sõltuvus anoodpingest. Näeme, et pinge kasvades järjest suureneb anoodile jõudvate elektronide hulk. Teatud pingest alates jõuavad kõik katoodist väljuvad elektronid anoodile ja vool enam ei kasva - saame küllastusvoolu I_k. Tänapäeval kasutatavatel suure emissioonivõimega katoodidel (oksiidkatoodi-

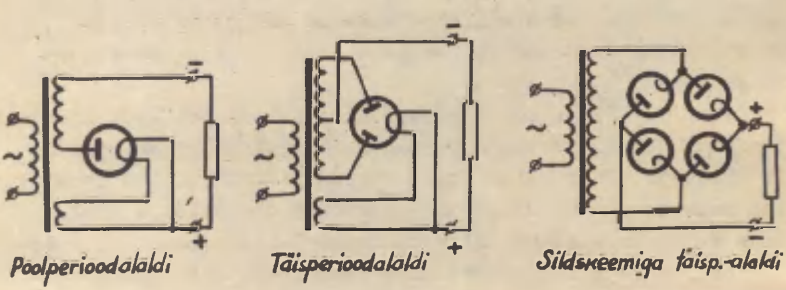
del) katood tavaliselt hävib enne küllastusvoolu saavutamist.



Joonis 69

37. DIOODALALDI

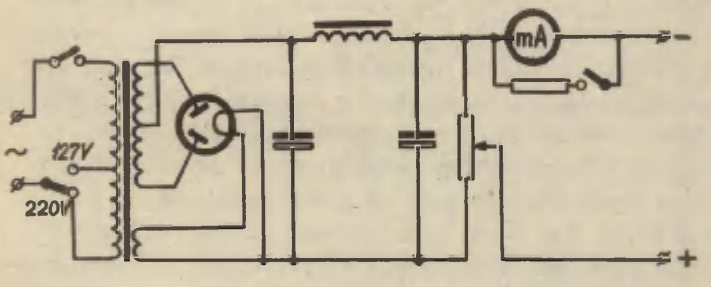
Vahelduvpinge rakendamisel dioodile läbib vool dioodi ainult sellel poolperioodil, mil anood on katoodi suhtes positiivne. Seda dioodi omadust lasta voolu läbi ainult ühes suunas kasutatakse vahelduvvoolu alaldamisel. Vahelduvvoolu alaldamiseks kasutatavaid dioode nimetatakse kenotronideks. Kasutatavamad alaldite lülitusskeemid on toodud joonisel 70.



Joonis 70

Vaadeldud alaldite väljundil saame pulseeriva alalispinge. Kui vajatakse pulsatsioonideta alalisvoolu, siis kasutatakse silumisfiltreid. Lihtsaimaks filtriks võib olla alaldi väljundiga paralleelselt lülitatud kondensaator, kuid paremaid tulemusi annab laialt kasutatav Π -filter (joonis 63b eespool).

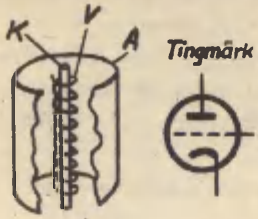
Lõpuks toome meil meditsiinipraktikaa kasutatava galvanisatsiooniaparaadi ГВП-3 lülitusskeemi (joonis 71). Skeemist nähtub, et galvanisatsiooniaparaat on filtri, pinge reguleerimise potentsiomeetri ja voolutugevuse mõõtjaga varustatud kenotronalaldi.



Joonis 71

38. TRIOOD

Triood - kolme elektroodiga elektronlamp (joonis 72) - koosneb nagu dioodki tühjaks pumbatud balloonist, milles asub aga kolm elektroodi: katood (niit või toruke) K, anood (metallsilinder) A ja võre V. Võre asub katoodile väga lähedal (murdosa mm) ja on tavaliselt traadist spi-

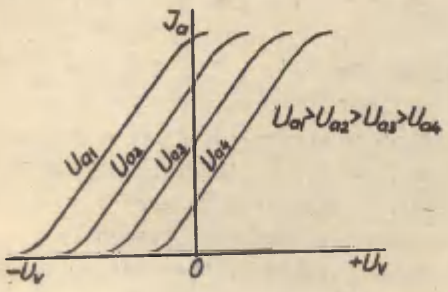


Joonis 72

raali kujuline.

Trioodi anoodpinge (pinge anoodi ja katoodi vahel) on tavaliselt 60...300 V. See pinge tekitab anoodi ja katoodi vahel elektrivälja, mis omakorda põhjustab trioodis anoodvoolu, s.o. elektronide liikumise katoodilt anoodile.

Et võre asub katoodi ja anoodi vahel, siis võib võre potentsiaal oluliselt mõjutada anoodvoolu tugevust. Kui võrel on katoodi suhtes negatiivne potentsiaal, siis võre ja katoodi vaheline elektriväli on anoodi-katoodiväljale vastupidise suunaga, mõjudes katoodilt väljuvatele elektronidele tagasitõrjuvalt, seega vähendades anoodile jõudvate elektronide hulka. Küllalt suure negatiivse võrepinge puhul ei pääse ükski elektron anoodile, voolu läbi trioodi ei voola ja me räägime, et ta on suletud. Kui võre muuta katoodi suhtes positiivseks, siis soodustab tema elektriväli elektronide liikumist anoodi suunas. Kuid võrele ei tohi anda suuri positiivseid potentsiaale, sest siis hakkavad elektronid liikuma võrele ja kuna võre on väga lähedal katoodile, tekib tugev vool võre ja katoodi vahel (võrevool), mis võib lambi hävitada.



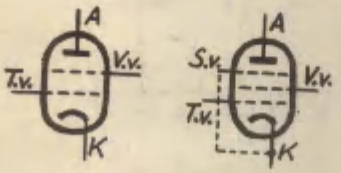
Joonis 73

Suhteliselt väike võrepinge muutus kutsub trioodis esile tunduva anoodvoolu muutuse. Seda näitab ka trioodi võrekarakteristik, s.t. anoodvoolu sõltuvus võrepingest konstantsetel anoodpingetel (joonis 73).

39. TETROOD JA PENTOOD

Tetrood on neljaelektroodiline lamp, millel on katood, kaks võret ja anood. Katoodile lähemat võret, tüürvõret, kasutatakse nagu trioodi võret anoodvoolu tugevuse muutmiseks. Teisel, varivõrel, on katoodi suhtes positiivne potentsiaal, mis on veidi väiksem anoodi omast. Varivõre ülesandeks on varjestada tüürvõret anoodi elektrostaatilise mõju eest. Tänu varivõrele on tetroodi tüürvõre ja anoodi vaheline mahtuvus (parasiitmahtuvus) palju väiksem kui trioodil, mistõttu tetroodi võib kasutada ka kõrgemate sageduste võimendamisel. Tetroodi poolt antav võimendus on märksa suurem kui trioodil.

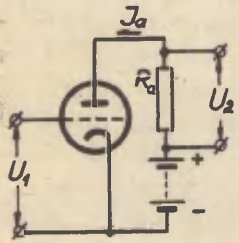
Tetroodi puuduseks on, et elektronide pommitamise tagajärjel anoodi pinnalt väljuvate sekundaarelektronide liikumise tõttu varivõrele toimub voolu ümberjaotus varivõre ja anoodi vahel (dünatronefekt). Selline nähtus on eriti tugev madalate anoodpingete puhul ja selle tagajärjel moonduvad lambi karakteristikud. Pentoodil niisugust puudust ei ole. Pentoodis on varivõre ja anoodi vahele paigutatud kolmas võre, millel on nende suhtes negatiivne potentsiaal (tavaliselt see ühendatakse katoodiga). See nn. sulgvõre tõrjub anoodilt väljunud sekundaarelektronid tagasi anoodile. Tänu oma headele võimendusomadustele on pentood kasutatavaim elektronlamp. Joonisel 74 on kujutatud tetroodi ja pentoodi tingmärgid.



Joonis 74

40. ELEKTRONLAMPVÕIMENDI

Trioodi võrepinge muutused kutsuvad esile suuri anoodvoolu muutusi. Seda kasutatakse elektronlampvõimendites. Võimendi põhimõtteline skeem on toodud joonisel 75.

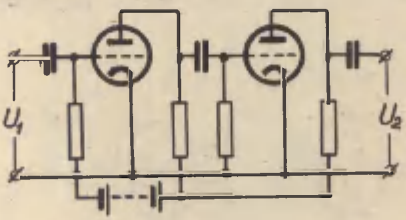


Joonis 75

Võimendatavad elektrilised võnked (pinge U_1) juhitakse võrele, nad kutsuvad esile anoodvoolu võnkumisi. Anoodringi takistil R_a tekivad pinge võnkumised (U_2), mille kuju vastab võrepinge võnkumiste kujule. Kui pinge väljundil (U_2) on suurem kui sisendil (U_1), siis ongi toimunud võimendus. Võimendi võimendus (võimendustegur) on

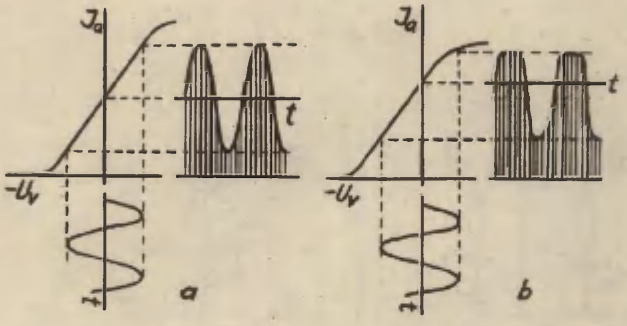
$$K = \frac{U_2}{U_1} .$$

Kui ühe lambi võimendusest ei piisa, siis antakse tema poolt võimendatud pinge järgmise lambi võrele jne. Kuna seejuures ei tohi eelneva lambi anoodi kõrge positiivne potentsiaal sattuda järgmise lambi võrele, siis ühendatakse eelmise lambi anood järgneva võrega kondensaatori kaudu. Kondensaator laseb vahelduvvoolu, s.o. võnkumisi läbi, alalisvoolu aga mitte. Joonisel 76 on toodud kaheastmelise võimendi põhimõtteline skeem.



Joonis 76

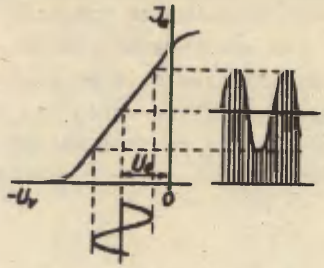
Võimendus peab toimuma ilma moonutusteta, s.o. võimendatud pinge kuju peab täpselt vastama võimendatava pinge kujule. Põhiliseks nõudeks moonutamata võimenduse saamiseks on see, et lambid töötaksid võrekarakteristiku sirge osa ulatuses (joonis 77a), sest ainult siis on anoodvoolu (seega ka väljundpinge) muutus võrdeline võrepinge muutusega. Joonisel 77b on näidatud, kuidas tekivad moonutused, kui võrepinge amplituud ulatub karakteristiku kõverjoonelisse ossa.



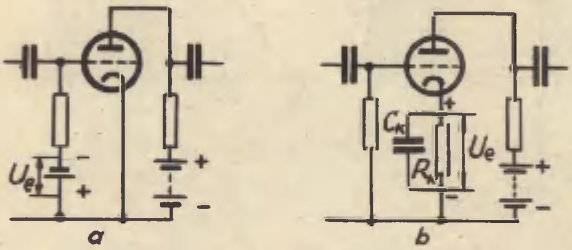
Joonis 77

Moonutusi põhjustab ka võrepinge positiivsel poolperioodil võrevoolu tekkimine. Positiivne võre võtab üle osa anoodile liikuvatest elektronidest, mistõttu anoodvool väheneb. Võreringis voolav vool tekitab seal pingelangu, mis muudab ka võrepinget. Niisuguste moonutuste vältimiseks ei lasta võrel kunagi positiivseks muutuda. Selleks antakse võrele peale võimendatava vahelduvpinge veel konstantne alalispinge, nn. eelpinge U_e. Eelpingestatud võimendi tööd illustreerib joonis 78. Skeemidel (joonised 79a ja 79b) on toodud eelpinge tekitamise võimalused, millest praktikas kasutatakse rohkem viimast. ~~Siin~~ tekitab anoodvoolu alaline komponent takistil R_k pingelangu U_e, mille võrra võre ongi

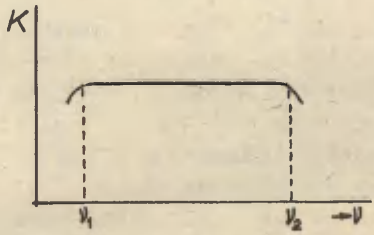
katoodi suhtes negatiivsem. Suure mahtuvusega kondensaator C_k on anoodvoolu muutuva (vahelduva) komponendi lühistamiseks.



Joonis 78



Joonis 79



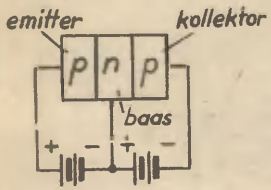
Joonis 80

Võimendi tähtsaks iseloomustajaks on tema sageduskarakteristik, s.o. võimendusteguri K sõltuvus võimendatavast sagedusest ν (joonis 80). Võimendi tuleb alati valida nii, et ta võimendaks kõiki sisendpinges leiduvaid sagedusi.

Näiteks muusika ülekande kõrgekvaliteediliseks võimendamiseks peab võimendi läbilaskeriba (sagedusvahemik ν_1–ν_2 joonisel 80) olema umbes 40 – 14000 Hz, elektrokardiograafi võimendil aga 0,5 – 100 Hz.

41. TRANSISTOR

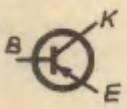
Transistoriks ehk pooljuhttrioodiks nimetatakse kolmeelektroodilist pooljuhtriista, mis võimaldab võimendada ja genereerida elektrilisi võnkeid. Transistor koosneb pooljuhi kristallist, milles on 3 erineva juhtivusega ala: emitter, baas ja kollektor. Vaatleme p-n-p-tüüpi transistori (joonis 81). Toitepinged on rakendatud nõnda, et siire emitter–baas juhiks (väike takistus), baas–kollektor ei juhiks (suur takistus). Emitterilt liiguvad augud läbi tõkkekihi baasi, kus osa neist rekombineerub elektronidega, ülejäänud aga jõuavad kollektorini, tekitades kollektorivoolu. Selle voolu tugevus sõltub emitteri ja baasi vahele rakendatud pingest.



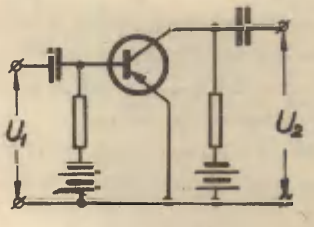
Joonis 81

Võrreldes transistori elektronlambiga, võib emitterit võrrelda katoodiga, baasi võrega, kollektorit anoodiga.

Joonisel 82 on kujutatud p-n-p-tüüpi transistori tingmärk, joonisel 83 on toodud transistorvõimendi üks võimalikest lülitusskeemidest.



Joonis 82

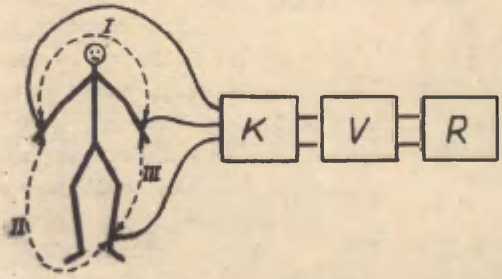


Joonis 83

42. ELEKTROKARDIOGRAAF JA ELEKTROENTSEFALOGRAAF

Nagu eespool mainitud, registreeritakse südame tegevuspingeid (biovoole) diagnostilistel eesmärkidel. Selleks kasutatavat aparaati nimetatakse elektrokardiograafiks. Kardiograafi abil saame kardiogrammi - südame biopingete ajalise muutumise kõvera.

Kardiograaf ühendatakse inimese keha teatud punktidega metallist plaatelektroodide abil. Kõige sagedamini kasutatakse joonisel 84 näidatud standardseid ühendusi. Samal joonisel on toodud ka kardiograafi plokkskeem, mis koosneb ühenduste kommutaatorist K, võimendist V ja registreerivast riistast R.

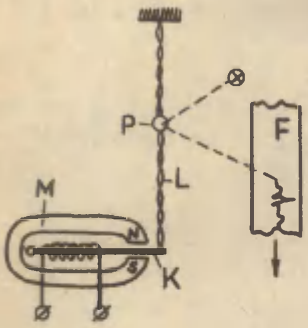


Joonis 84

Kommutaatori (selleks on mehaaniline ümberlüliti) abil valitakse soovitud elektroodide ühendus. Võimendi ülesandeks on nõrkade südame biopingete (järgult 1 mV) võimendamine. Tavaliselt on võimendi 3-astmeline. Viimasel ajal kasutatakse ka transistorvõimendeid.

Varem kasutati kardiograafides eranditult optilisi re-

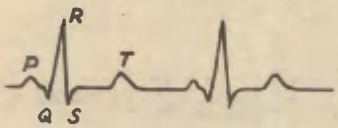
gistreerimisseadeldisi. Neid kasutatakse mõnikord ka praegu. Ühe niisuguse registreerija (vibraatori) põhimõtteline skeem on toodud joonisel 85. Selles asub püsivmagneti M pooluste vahel magnetilisest ainest keel K. Keelt ümbritsevat mähist



Joonis 85

toidab võimendi väljundist saadav vool. Voolu suuna muutumisel mähises muutub magnetvälja suund keeles, mistõttu tema ots tõmbub kord lõuna-, kord põhjapooluse poole. Selle juures muutub tõmme elastses keerutatud lindis L, lindi külge kinnitatud peeglike P pöördub, kallutades kõrvale filmile F langeva valguskiire. Filmi liikumisel jääbki filmile kardiogramm, mida saame näha alles pärast filmi töötlemist.

Viimasel ajal kasutatakse rohkem tindiga otse paberile kirjutavaid kardiograafe. Ka nendes paneb tindiga täidetud kirjutava torukese liikuma elektromagnetiline süsteem. Joonisel 86 on toodud terve inimese kardiogramm (II lülitus).

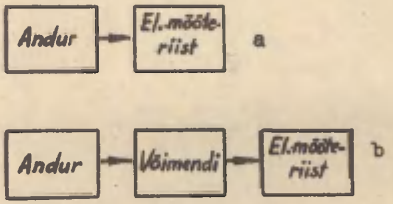


Joonis 86

Elektroentsefalograafi kasutatakse peaaju biopingete registreerimiseks ja selle põhimõtteline skeem ei erine palju kardiograafi omast. Et aga peaaju biopinged on südame omadest märksa väiksemad, kasutatakse siin palju suurema võimendusega võimendeid. Ka on elektroentsefalograafid mitmekanalilised, s.t. nad võimaldavad korraga registreerida mitut pinget.

43. MITTEELEKTRILISTE SUURUSTE ELEKTRILINE MÕÕTMINE. ANDURID

Elektrilised, eriti aga elektroonilised mõõte- ja registreerivad riistad on suure tundlikkusega. Nendel on väga väike inerts ja nad võimaldavad teha mõõtmisi kauge maa tagant. Seepärast püütakse ka mitteelektrilisi suurusi mõõta elektriliste mõõteriistadega, kusjuures tuleb mõõdetavad mitteelektrilised suurused muundada elektrilisteks signaalideks andurite abil. Lihtsaim mõõteskeem koosnebki vastavast andurist ja elektrilisest mõõteriistast (joonis 87a). Kuna enamikul juhtumitel on anduri poolt antav elektriline signaal väga nõrk, siis kasutatakse vahelülina veel võimendit (joonis 87b). Ka meditsiinis rakendatakse seda mõõtmismeetodit. Olenevalt mõõdetava suuruse iseloomust võivad andurid olla mehaanilised, akustilised, termilised, optilised jne.



Joonis 87

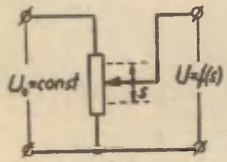
Mõnede anduritega oleme juba tuttavad. Näiteks heli muundamisel elektrilisteks võnkumisteks kasutatakse mikrofoni. Temperatuuriandurit ena kasutatakse eespool vaadeldud termotakisteid (termistore) ja termopaare. Optiliste anduritena

kasutatakse fototakisteid, fotoelemente ja fotorakke (viimastest lähemalt optika peatükis).

Kui mõõdetav suurus muudab anduri elektrilisi parameetreid (takistust, mahtuvust, induktiivsust), siis nimetatakse neid <u>parameetrilisteks anduriteks</u>.

Käesolevas punktis puudutame peamiselt mehaanilisi andureid. Meditsiinis kasutatakse neid vereringesüsteemi uuringutel (vererõhu, pulsatsiooni jne. uurimisel), hingamise uurimisel, keha või tema osade asendi muutumiste registreerimisel jne.

Mehaaniliste nihete registreerimiseks sobivad andurid, mille takistus nihkel muutub, <u>oomilised andurid</u>. Niisugune on joonisel 88 kujutatud potentsiomeetriline andur. Liikuva detailiga ühendatud potentsiomeetri liugkontakti nihkumisel muutub vastavalt anduri väljundpinge U. Oomilistest anduritest võiks mainida veel süsiandurit, mis koosneb peenest söepuruga täidetud kummitorust. Toru painutamisel kontakt söeterakeste vahel muutub, seega muutub ka takistus. Kasutatakse ka analoogilisi elektrolüüdiga täidetud torukesi või elastsest ainest ribale kantud juhtivat lakikihti. Kirjeldatud andureid on kasutatud hingamise uurimisel. Rinnakorvile kinnitatuna muudavad need oma takistust rinnakorvi paisumisel ja kahanemisel.

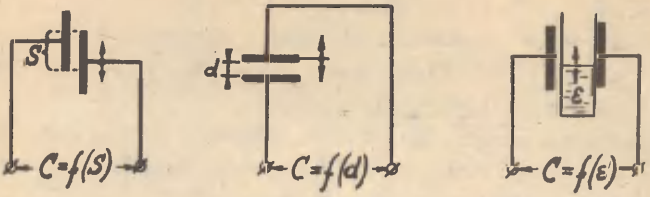


Joonis 88

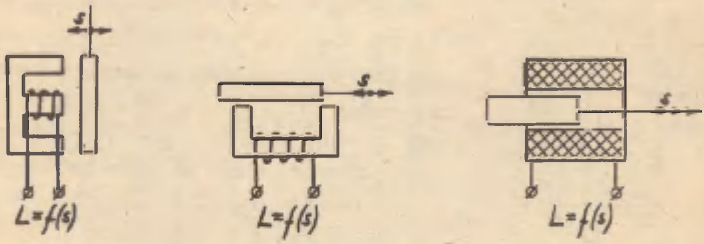
Mahtuvuslikes andurites kasutatakse mahtuvuse sõltuvust kondensaatori plaatidevahelisest kaugusest, nende pindalast ja plaatidevahelise dielektriku elektrilisest läbitavusest. Mahtuvuslike andurite töötamise põhimõtet illustreerib joonis 89.

Induktiivsetel anduritel nihutatakse tavaliselt magnetilisest ainest südamikke (joonis 90).

Mehaanilise andurina võib kasutada ka piesoelektriliste omadustega keha (varem vaadeldud).



Joonis 89



Joonis 90

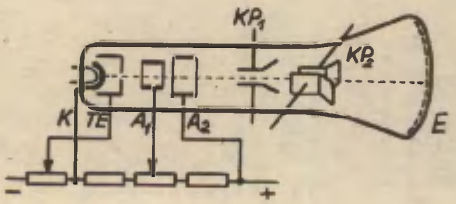
Mõnikord ei saa andurit vahetult mõõteriistaga ühendada, näiteks liikuvate uurimisobjektide puhul. Niisugustel juhtumitel kasutatakse raadiosidet. Näiteks nõnda jälgitakse liikuvate sportlaste ja kosmoses viibivate kosmonautide füsioloogilisi näitajaid.

Viimasel ajal on väga väikeste detailide (väikeste transistoride, vooluallikate jne.) loomine võimaldanud ehitada mikroandureid, mida võib ohutult viia paljude organite sisemusse. Niisuguseid andureid on kasutatud näiteks südamesisesel vererõhu mõõtmisel. Seedetrakti uuringutel kasutatakse nüüd tihti endoraadiosondi. Selle läbimõõt on 6–8 ja pikkus 15–20 mm. Sondis on vooluallikas, transistorsaatja ja uuri-

tavale näitajale reageeriv andur. Patsient neelab sondi ja liikumisel piki seedetrakti reageerib andur näiteks happesusele, temperatuurile jne. Vastavalt muutub saatja (generaatori) sagedus. Väljaspool asuv vastuvõtuaparatuur registreerib nende muutuste järgi happesust, temperatuuri jne.

44. ELEKTRONOSTSILLOGRAAF

Elektronostsillograafi kasutatakse põhiliselt perioodiliste elektriliste nähtuste uurimisel. Elektronostsillograafi peamiseks osaks on elektronkiiretoru (joonis 91). See on õhust tühjaks pumbatud klaaskolb, milles on rida elektroode. Elektronide allikaks torus on elektrivoolu abil köetav katood K. Katoodi ümbritseb silinder väikese avaga põhjas, nn. tüüriv elektrood TE, millele antakse katoodi suhtes väike negatiivne potentsiaal. Selle potentsiaali muutmisega reguleeritakse elektronide hulka elektronkiires, seega ka täpi heledust fluorestseerival ekraanil E. Anoodide A_1 ja A_2 ülesandeks on tekitada elektrone kiirendav elektriväli. Elektriväli torus peab fokusseerima elektronkimbu ühte täppi ekraanil.

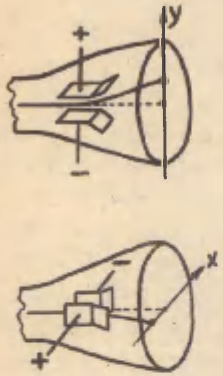


Joonis 91

Fokusseerimise reguleerimiseks on pinge anoodil A_1 muudetav. Katood, tüüriv elektrood ja anoodid moodustavad elektronka-

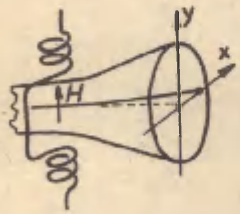
huri. Kõiki kirjeldatud elektroode toidetakse ühisest kõrgepingeallikast pingejagaja abil.

Elektronkahurile järgneb kaks omavahel risti asetsevat paari hälvitusplaate KP_1 ja KP_2, millede potentsiaalide muutmisega võib elektronkiirt ekraanil nihutada vertikaaltelje (y) ja horisontaaltelje (x) sihis (joonis 92). Kiirt võib kallutada ka poolis tekitatava magnetvälja abil (joonis 93), kuid ostsillograafides kasutatakse seda moodust väga harva.

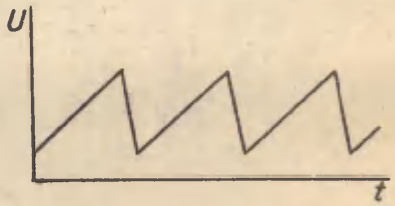


Joonis 92

Võnkumiste uurimisel ostsillograafi abil tahetakse enamikul juhtudel saada nende ajalist sõltuvust (x-teljel aeg). Selleks antakse horisontaalsihis kallutavale plaadipaarile saehambakujuliselt muutuv hälvituspinge (joonis 94). Pinge lineaarsel kasvul liigub kiir ühtlaselt ühest ekraani äärest teise, pinge järsul langemisel aga hüppab tagasi, uue pinge kasvu korral liigub jälle ühtlaselt jne. Kui nüüd juhtida vertikaalsihis kallutava-



Joonis 93



Joonis 94

tele plaatidele uuritav pinge, siia joonistab kiir igal ühtlasel liikumisel selle ajalise muutuse. Et saaksime ekraanil seisva kujutise, peavad igal üksikul kiire liikumisel saadavad kõverad kattuma. Selleks peab olema hälvituspinge sageduse ja uuritava nähtuse sageduse vahel täisarvkordne suhe ja hälvituspinge lineaarne kasv peab alati algama uuritava pinge sama faasi juures (saavutatakse sünkroniseerimise abil).

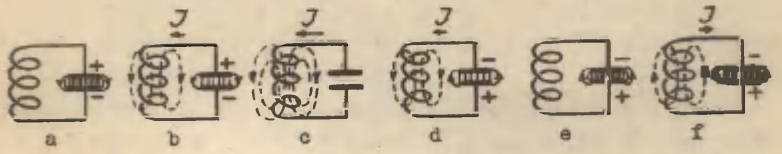
Ostsillograafis on peale elektronkiiretoru ja hälvituspinge allika veel võimendid ja toitepingete allikad.

Elektronostsillograaf on kasutusel ka meditsiinipraktikas. Selle abil võib jälgida näiteks kardiogramme, entsefalogramme, müogramme jne.

45. VÕNKERING

Võnkeringi moodustavad paralleelselt ühendatud pool ja kondensaator (joonis 95). Vaatleme lühidalt võnkeringis toimuvaid protsesse, mis järgnevad kondensaatori laadimisele. Algab kondensaatori tühjenemine läbi pooli (joonis 96a), pinge plaatide vahel hakkab vähenema, pooli läbib vool ja poolis tekib magnetväli (joonis 96b). Kondensaatori täielikul tühjenemisel (joonis 96c) vool poolis kohe ei lakka, vaid jätkub poolis tekkiva samasuunalise induktsioonivooluna. Selle tulemusena

Joonis 95



Joonis 96

laetakse kondensaator ümber (joonised 96d ja 96e). Järgneb uus kondensaatori tühjenemine (joonis 96f), ümberlaadimine jne. Võnkeringis tekivad elektrilised võnkumised, võnkeringis voolab vahelduvvool. Vool poolis ja pinge kondensaatoril muutuvad siinuseliselt (võnguvad harmooniliselt).

Võnkeringi omavõnkeperioodi T määrab Thomsoni valem

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

kus T on sekundites, kui L on henrides ja C faradites.

Omavõnkesagedus avaldub

$$\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

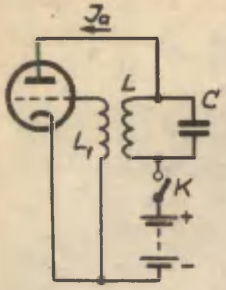
ja ringsagedus

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Võnkumised, mis tekivad võnkeringis kondensaatori ühekordsel laadimisel, osutuvad energiakadude tõttu võnkeringis sumbuvateks.

46. ELEKTRONLAMPGENERAATOR. VÕNKERINGIDE RESONANTS

Elektronlampgeneraatoreid kasutatakse sumbumatute elektriliste võnkumiste saamiseks. Lihtsaima elektronlampgeneraatori lülitusskeem on toodud joonisel 97. Vaatleme selle töötamist. Lüliti K sulgemisel, s.o. anoodpinge sisselülitamisel, laeb võnkeringi pooli L läbiv anoodvool võnkeringi kondensaatori C. Võnkeringis LC tekivad võnkumised ja pooli L läbib vahelduvvool, mis indutseerib lähedal paiknevas nn. tagasisidestuspoolis L_1 vahelduva emj. Pooli L_1 otsad ühendatakse trioodi võrega nõnda, et poolperioodil, mil võnkevoolu suund poolis L ühtib trioodi anoodvoolu suunaga, võre

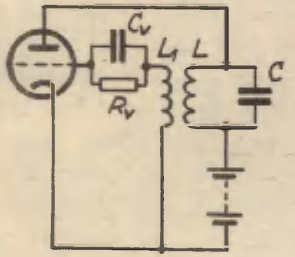


Joonis 97

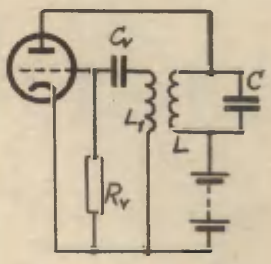
pingestuks positiivselt. See tugevdab anoodvoolu, seega ka võnkevoolu võnkeringis. Järgneval poolperioodil pingestub võre negatiivselt, anoodvool nõrgeneb (lakkab), soodustades sellega nüüd vastupidist voolu võnkeringis.

Generaatori võnkeringis tekkivate sumbumatute võnkumiste sageduse määravad induktiivsuse L ja mahtuvuse C suurused (vt. p. 45).

Generaatorites võimsusega kuni mõnisada vatti kasutatakse oksiidkatoodidega elektronlampe. Et nendes võrepinge positiivsel poolperioodil tekkiv tugev võrevool lampi ei hävitaks, lülitatakse selle piiramiseks võnkeringi takisti R_v (joonised 98a ja 98b). Kondensaatori C_v kaudu pääsevad kõrgsageduslikud võnkumised võrele.

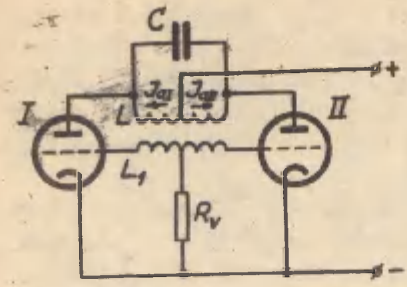


Joonis 98a



Joonis 98b

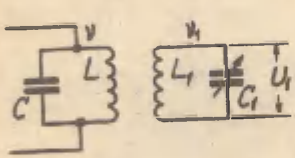
Praktikas kasutatakse tihti kahetaktilisi generaatoreid. Ka enamik meditsiinis kasutatavatest generaatoritest on kahetaktilised. Kahetaktilise generaatori põhimõtteline lülitusskeem on toodud joonisel 99. Lülitusskeemist nähtub, et



Joonis 99

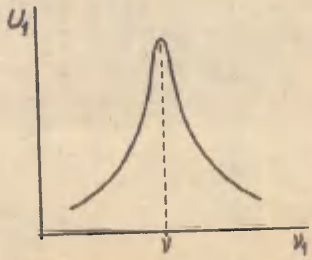
kummagi lambi anoodvool I_{aI} ja I_{aII} läbib võnkeringi pooli L vastava poole. Pooli L läbiv võnkevool indutseerib tagasisidestuspooli L_1 otstel vahelduva emj., mis antakse lampide võredele nii, et anoodvool tugevneks lambil, millel selle suund parajasti ühtib võnkevoolu suunaga võnkeringis, teine lamp aga sulguks selleks ajaks. Niisiis ühel poolperioodil juhib üks lampidest tugevat voolu, teine "puhkab", järgmisel poolperioodil vastupidi jne.

Kui paigutada generaatori võnkeringi LC lähedale teine võnkering L_1C_1 (joonis 100), siis indutseeritakse viimases samuti võnkumised (sundvõnked). Nende võnkumiste amplituud sõltub generaatori sageduse ν ja võnkeringi sageduse ν_1 vahekorrast. Amplituud on suurim, kui $\nu = \nu_1$, s.o. <u>resonantsi</u> puhul. Joonisel 101 on toodud sekundaarringi L_1C_1 pinge U_1 sõltuvus tema sagedusest, nn. <u>resonantsikõver.</u>



Joonis 100

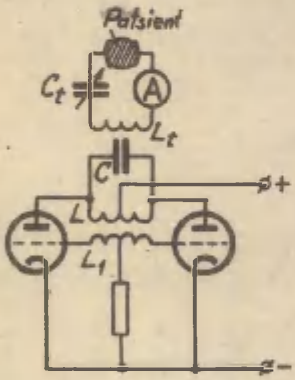
Kuna $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ja $\nu_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$, siis resonantsijuhtumil kehtib $LC = L_1C_1$.



Joonis 101

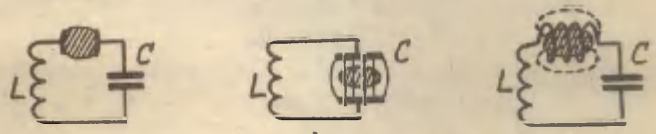
47. KÕ[illegible]VOO[illegible] RAKENDUSI MEDITSIINIS

Kõrgsagedusvoolude saamiseks kasutatakse meditsiinis elektronlampgeneraatoreid. Kuna generaatori võnkering on üsna kõrge alalispinge all, siis ohutustehnilisest seisukohast ei tohi patsienti vahetult sellega ühendada. Patsient ühendatakse terapeutilise võnkeringiga, mis on generaatori võnkeringiga induktiivselt sidestatud (joonis 102). Et toimuks efektiivne energia ülekanne generaatori võnkeringist terapeutilisse, peavad nad olema resonantsis. Kuna aga erinevatel protseduuridel varieerub patsiendi elektroodide vaheline kaugus, elektroodide suurus jne., siis tuleb igal konkreetsel juhul terapeutiline võnkering häälestada generaatori sagedusega resonantsi. Selleks on terapeutilises ringis pöördkondensaator C_t. Tihti on seal ka patsienti läbiva kõrgsagedusvoolu tugevuse mõõtmiseks ampermeeter.



Joonis 102

Organismi võib kõrgsagedusvooludega mõjutada järgneval kolmel viisil: a) kõrgsagedusvoolu objektist vahetul läbilaskmisel (joonis 103a); b) objekti paigutamisel kondensaatori plaatidevahelisse kõrgsageduslikku elektrivälja (joonis 103b); c) objekti paigutamisel pooli kõrgsageduslikku magnetvälja (joonis 103c).



Joonis 103

Kõiki neid viise kasutatakse meditsiinipraktikas. Vastavalt kasutatavale metoodikale, sagedusele jne. on protseduuridel eri nimetused. Allpool peatume lühidalt mõnedel nendest.

Diatermia. Siin läbib kõrgsagedusvool vahetult kudesid. Elektroodid (tavaliselt pliiplaadid) asetatakse vahetult keha pinnale. Voolutugevus ulatub kuni 1...2 A. Et ei tekiks naha pinna põletust, ei tohi voolutihedus ületada 15 mA/cm^2. Kasutatavad sagedused on 500 kHz...2MHz. Nii kõrgetel sagedustel puudub voolu ärritav toime, kudedes eraldub vaid soojus.

Kasutatakse veel nn. kirurgilist diatermiat, kus tekkinud soojust kasutatakse kudede lõikamiseks (diatermotoomia) ja koaguleerimiseks (diatermokoagulatsioon). Esimesel juhul on üks elektrood noakujuline, teine suurepinnaline plaat; teisel juhul üks elektrood on täpikujuline, teine samuti suurepinnaline plaat (joonis 104). Väikese pinnaga elektroodi (nn. aktiivse elektroodi) juures tekib väga suur voolutihedus, seega eraldub ka suur soojushulk.

Joonis 104

Induktotermia juures paigutatakse ravitav kehaosa kõrgsageduslikku magnetvälja. Seda magnetvälja tekitab tavaliselt ravitava kehaosa ümber mähitud või peale asetatud painduvast kaablist pool (spiraal). Induktotermia puhul kasutatavad sagedused on vahemikus 10...15 MHz. Ka siin koed soojenevad.

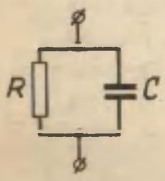
Ultralühilaineteraapia (ultrakõrgsagedusteraapia). Siin paigutatakse ravitav kehaosa plaatidevahelisesse elektriväljа. Selle juures ei tohi plaatide juhtiv pind puutuda vahetult naha pinda (tekib naha põletus), seepärast on plaadid kaetud isolatsioonikihiga. Kasutatavad sagedused on 40–150 MHz.

Arsonvalisatsiooni puhul kasutatakse tõukelist (impulsikujulist) kõrgsagedusvoolu. Kasutatakse üldist arsonvalisatsiooni, kus patsient paigutatakse üleni suurde pooli, ja paikset arsonvalisatsiooni, kus ravitavat kehaosa mõjutatakse nn. vaakuumelektroodi (hõrendatud gaasiga täidetud klaastoru) abil. Kasutatavad sagedused on 150...300 kHz. Arsonvalisatsioonivoolude saamiseks kasutati varem vibreeriva sädemikuga aparaate, mis tekitasid väga tugevaid häireid raadioside töös, seetõttu neid enam ei toodeta ega lubata kasutada.

Mikrolaineteraapia. Selle nimetuse all tuntakse mõne cm pikkuste elektromagnetlainete kasutamist meditsiinis. Lained suunatakse ravitavale kohale reflektorantenniga.

48. KÕRGSAGEDUSVOOLUDE JA -VÄLJADE MÕJU ORGANISMILE

Kõrgsagedusravi kutsub organismis lõppkokkuvõttes esile üsna komplitseeritud bioloogilise reaktsiooni. Selle komplitseeritud mõju esimeseks lüliks on füüsikalised protsessid. Need aga sõltuvad kudede elektrilistest ja magnetilistest omadustest. Nagu teame, võib mõned koed lugeda dielektrikuteks, teised juhtideks (peamiselt ioonse juhtivusega). Magnetiliste omaduste seisukohast võib neid lugeda mittemagnetilisteks aineteks. Organismi mõjutamisel kõrgsagedusvooludega võib seda kujutada lihtsustatud skeemina paralleelselt ühendatud mahtuvusest ja takistusest (joonis 105). Takistus R kujutab endast juhtivaid kudesid, kondensaatori C moodustavad dielektrilised koed.



Joonis 105

Vaatleme organismis toimuvaid füüsikalisi protsesse erinevate ravimeetodite juures.

Diatermia puhul organismist läbilastava kõrgsagedusliku voolu toimel hakkavad ioonid oma keskasendite ümber võnkuma. Nende energia kandub ka teistele osakestele, osakeste siseenergia kasvab - koed soojenevad. Diatermia puhul kasutatavate sageduste korral on dielektriliste kudede mahtuvuslik takistus ($1/\omega C$) küllalt suur, mistõttu kõrgsagedusvool neid ei läbi ja nad ei soojene. Soojus eraldub peamiselt juhtivates elektrolüüte sisaldavates kudedes. Eralduva soojushulga saame Joule-Lenzi seaduse abil. Tavaliselt antakse ruumalaühikus ühes ajaühikus eraldunud soojushulk q.

$$q = k \frac{j^2}{\gamma},$$

kus k - võrdetegur,

j - voolutihedus ($j = \frac{I}{S}$; I - voolutugevus, S - elektroodi pindala),

γ - kudede erijuhtivus.

Induktotermia juures tekitab kõrgsageduslik magnetväli juhtivates kudedes pöörisvoole (joonis 106). Kõrgsagedusliku pöörisvoolud põhjustavad ka siin ioonide võnkeid, mistõttu koed samuti soojenevad. Eralduv soojushulk (ruumalaühiku ja ajaühiku kohta) on

$$q = k \nu^2 \gamma H^2,$$

kus k - võrdetegur,

H - kõrgsageduslik magnetvälja tugevus,

ν - sagedus,

γ - erijuhtivus.

Ultralühilaine puhul, kus sagedus on palju suurem, etendab suurt osa dielektriliste kudede mahtuvuslik juhtivus, sest mahtuvuslik takistus $1/\omega C$ on siin väike. Soojus tekibki siin peamiselt dielektrilistes kudedes (nende polaarsete molekulide ümberorienteerumise tõttu). Vähem soojenevad ka juhtivad koed (ioonide võnkumiste tagajärjel elektrivälja mõjul).

Dielektrilistes kudedes eralduv soojushulk

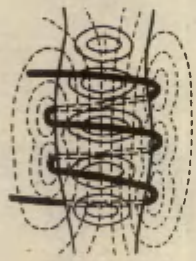
$$q' = k'\nu\varepsilon E^2 \operatorname{tg}\delta,$$

kus k' - võrdetegur,
ν - sagedus,
ε - kudede elektriline läbitavus,
E - kõrgsagedusliku elektrivälja tugevus,
δ - nn. kaonurk, mis iseloomustab energiakadu vahelduvas elektriväljas asuvas dielektrikus.[1]

Juhtivates kudedes eralduv soojushulk

$$q'' = k''\gamma E^2,$$

kus k'' - võrdetegur,
γ - erijuhtivus,
E - elektrivälja tugevus.

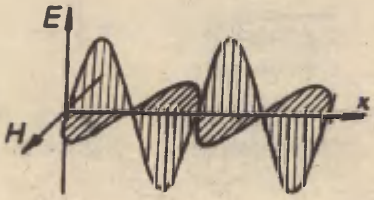


Joonis 106

[1] Nurk, mille võrra erineb energiakadudega dielektrikuga kondensaatoris nihkenurk voolu ja pinge vahel nurgast 90°.

49. ELEKTROMAGNETLAINED

On teada, et magnetvälja muutumine tekitab ümbritsevas ruumis elektrivälja, ja vastupidi, elektrivälja muutumine tekitab magnetvälja. Vastastikku teineteist tekitavaid perioodiliselt muutuvaid elektri- ja magnetvälju nimetame elektromagnetiliseks väljaks. Niisugune väli võib levida ümbritsevasse ruumi elektromagnetlainena. Elektromagnetlained levivad tühjuses kiirusega $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s. Elektromagnetlaine elektrivälja ja magnetvälja tugevuse vektorid on risti nii omavahel kui ka laine levimissuunaga. Joonisel 107 on kujutatud elektromagnetlaine elektri- ja magnetvälja tugevuse muutumise graafikud. Joonisest nähtub, et elektromagnetlaine on ristlaine.



Joonis 107

Punktallikast levivat elektromagnetlainet võib iseloomustada vorranditega, mis määravad elektri- ja magnetvälja tugevuse muutumise laines

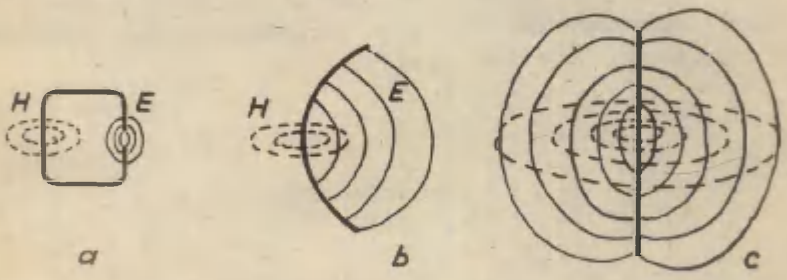
$$E = E_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right) \text{ ja } H = H_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right),$$

kus E_m ja H_m – väljatugevuste maksimaalväärtused,
ω – võnkumiste ringsagedus ($\omega = 2\pi\nu$),

x - kaugus elektromagnetlaine allikast,

v - laine levimiskiirus vaadeldavas keskkonnas (vaakuumis ja õhus $v \approx c$).

Eespool vaadeldud võnkeringis (p. 45) toimuvad elektromagnetilised võnkumised, kuid niisugune nn. kinnine võnkering peaaegu ei kiirga ümbritsevasse ruumi elektromagnetlaineid. Seal on elektriväli praktiliselt kontsentreeritud kondensaatori plaatide vahel ja magnetväli poolis. Asi muutub, kui kinnine võnkering muuta lahtiseks võnkeringiks e. vibraatoriks. Üleminekut kinniselt võnkeringilt lahtisele selgitab joonis 108. Joonisel 108a on kujutatud kinnine võnkering väga kõrge sageduse jaoks, kus 'poolil' on kõigest üks keerd ja kondensaatori moodustavad selle otsad. Selle võnkeringi sirgeks painutamisel saamegi vibraatori (joonis 108c), milles samuti toimuvad võnkumised, kuid nüüd levivad elektri- ja magnetvälja muutused ümbritsevasse ruumi.



Joonis 108

Elektromagnetlaineid kasutatakse signaalide edasiandmisel. Lühidalt toimub see järgnevalt. Saatejaama elektronlampgeneraator tekitab kõrgsageduslikke võnkumisi, need juhitakse antenni, mis töötab analoogiliselt vaadeldud vibraatoriga. Ruumis levivad lained indutseerivad nende teel asuvates juhtides elektrilisi vonkeid. Võnked tekivad ka vastuvõtja an-

tennis. Et eraldada soovitud saatja signaali, kasutatakse resonantsinähtust, s.t. vastuvõtja võnkering häälestatakse saatja sagedusele.

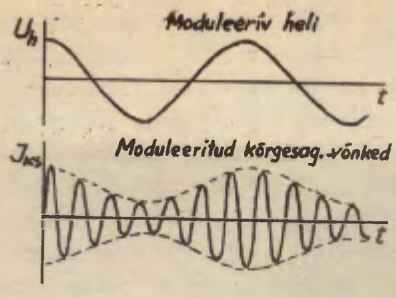
Kõik juhtmed, milles voolavad kõrgsagedusvoolud, võivad samuti töötada vibraatoritena, s.o. võivad samuti kiirata elektromagnetlaineid, mis võivad häirida raadiosidet või muude tundlike aparaatide tööd. Niisugused häirivad raadiolained võivad tekkida ka meditsiinilise kõrgsagedusliku aparatuuri töötamisel. Nende leviku tõkestamiseks varjestatakse segamisi tekitava aparatuuriga ruumid. Ruumi seinad, põrand, lagi, uksed ja aknad kaetakse maandatud metall-lehtede ja võrguga. Samuti häirete vältimiseks lubatakse meditsiinilistel generaatoritel töötada ainult nendele eraldatud rangelt kindlatel sagedustel.

Väljastpoolt tulevad elektromagnetlained võivad häirida väga tundlike elektriliste aparaatide tööd, tekitades neis indutseeritud parasiitvoole. Meditsiinipraktikas on niisugusteks tundlikeks riistadeks entsefalograaf, müograaf ja kardiograaf. Häiretest vabanemiseks paigutatakse nad koos uuritava patsiendiga varjestatud kambrisse.

50. SIGNAALIDE EDASIANDMINE RAADIOLAINETE ABIL. MODULATSIOON

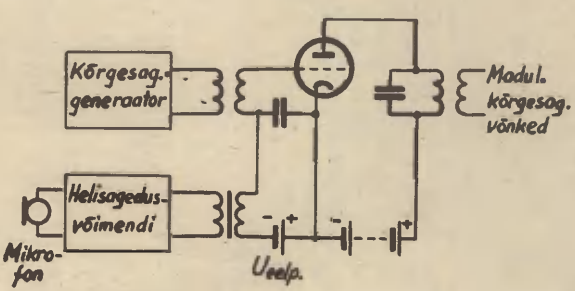
Eelmisest punktist teame, et elektromagnetlaineid (raadiolaineid) kasutatakse signaalide edasiandmiseks. Selleks peame tekitama saatja poolt kiiratavates raadiolainetes muudatusi vastavalt edasiantavale signaalile. Niisugust protsessi nimetatakse modulatsiooniks. Raadiosaatjates kasutatakse kõige sagedamini amplituud- ja sagedusmodulatsiooni.

Amplituudmodulatsiooni puhul muudetakse vastavalt edasiantavale signaalile kiiratavate raadiolainete amplituudi. Joonis 109 selgitab amplituudmodulatsiooni heli (kõne, muusika) edasiandmisel. Niisuguse modulatsiooni saame, kui muu-



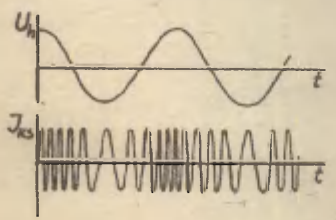
Joonis 109

dame vastavalt mikrofoni helisagedusvõngetele kõrgsagedus-võimenduslambi võre eelpinget (joonis 110).



Joonis 110

Sagedusmodulatsiooni korral muutub vastavalt edasiantavale signaalile raadiolainete sagedus (joonis 111).



Joonis 111

Raadiolainete abil võib edasi anda ka organismi füsioloogilist seisundit iseloomustavat informatsiooni. Nagu punktis 43 juba mainiti, kasutatakse seda võimalust liikuvate ja kaugel asuvate uurimisobjektide puhul. Nõnda võib jälgida elektrokardiogrammi, pulsi sagedust, hingamist jne. Niisugust meetodit nimetatakse raadiotelemeetriaks. Praktikas on raadiotelemeetriat kasutatud füsioloogilise informatsiooni saamiseks teatud harjutusi sooritavate sportlaste ja teatud tööd sooritavate tööliste puhul. Selleks kinnitatakse uuritava külge väike ja kerge saatja. Uuritava külge kinnitatud andurite elektrilised signaalid moduleerivad saatja poolt kiiratavaid raadiolaineid. Ka kosmoses viibivate kosmonautide füsioloogilist seisundit jälgitakse Maa peal raadiotelemeetrilisel teel.

S i s u k o r d

1. Ainete elektrilised omadused 3
2. Elektriväli 4
3. Elektrivälja potentsiaal. Pinge 5
4. Elektrivälja mõju ainele 7
5. Piesoelektriline efekt 11
6. Mahtuvus. Kondensaator 12
7. Elektrivool juhtides. Elektromotoorjõud. Takistus 15
8. Takistuse mõõtmine. Potentsiomeeter 18
9. Elektrivool pooljuhtides 19
10. Termo- ja fototakistid 21
11. p-n siire 23
12. Kontaktpinge. Termoelekter 24
13. Elektrivool elektrolüütides. Polarisatsioon. Mittepolariseeruvad elektroodid 28
14. Faraday seadused 32
15. Elektrokineetilised nähtused 33
16. Galvanisatsioon ja ioongalvanisatsioon 36
17. Alalisvoolu mõju kudedele 39
18. Meditsiinis kasutatavad impulssvoolud 40
19. Biopinged (biopotentsiaalid) 42
20. Gaasi ionisatsioon 43
21. Elektrilahendus gaasis atmosfäärirõhul 46
22. Tugeva alaliselektrivälja rakendusi meditsiinis 47
23. Elektrilahendus hõrendatud gaasides 48
24. Elektrivoolu magnetväli 49
25. Ainete magnetilised omadused 51
26. Magnetvoog 54

27. Magnetvälja mõju elektrivoolule 56
28. Elektrimõõteriistad 58
29. Elektromagnetiline induktsioon 60
30. Vastastikune ja endainduktsioon 62
31. Pöörisvoolud 63
32. Vahelduvvool 64
33. Mahtuvus ja induktiivsus vahelduvvooluringis 65
34. Transformaator 69
35. Vahelduvvoolu mõju organismile 71
36. Termoemissioon. Diood 72
37. Dioodalaldi 74
38. Triood 75
39. Tetrood ja pentood 77
40. Elektronlampvõimendi 78
41. Transistor 81
42. Elektrokardiograaf ja elektroentsefalograaf 82
43. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine. Andurid 84
44. Elektronostsillograaf 87
45. Võnkering 89
46. Elektronlampgeneraator. Võnkeringide resonants 90
47. Kõrgsagedusvoolude rakendusi meditsiinis 93
48. Kõrgsagedusvoolude ja -väljade mõju organismile 95
49. Elektromagnetlained 98
50. Signaalide edasiandmine raadiolainete abil. Modulatsioon 100

Hind 30 kop.