

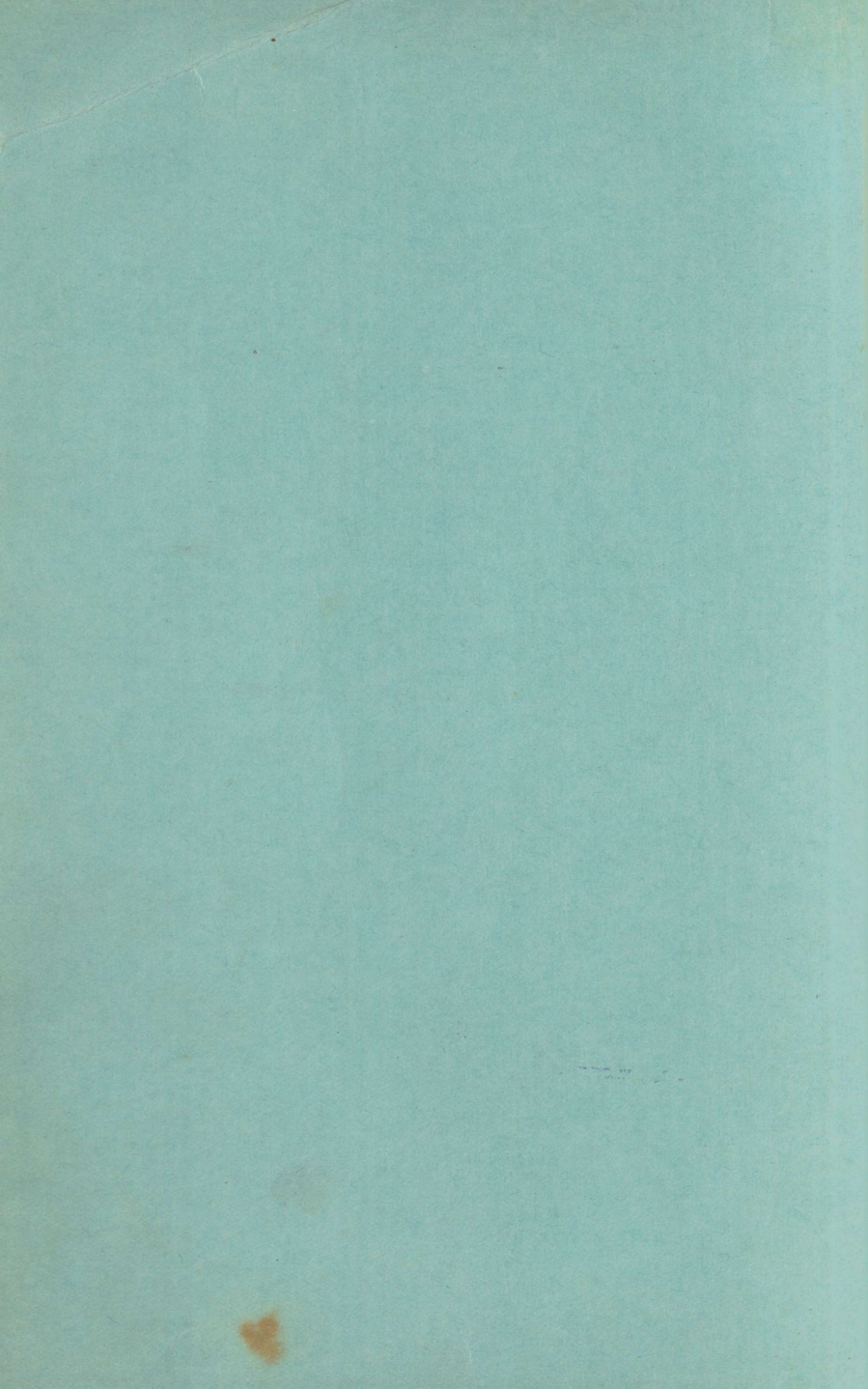
A-11436

ELEKTROTEHNIKA

ÕPPERAAMAT

A. KALMUS

AUTORI KIRJASTUS TALLINNAS



A. KALMUS

ELEKTROTEHNIKA
ÕPPERAAMAT

TEINE TRÜKK

~~25622~~

AUTORI KIRJASTUS TALLINNAS 1939



2-60977

A- 11436

55-22

Saateks

Tutvudes käesoleva raamatu käsikirjaga oli meil hää meel nentida uue ammuoodatud lisandi ilmumist eestikeelsele kehavõitu kirjandusele elektrotehnika alal ja selles otse kisendava lünga täitmist.

Kui mitte arvestada mõnd eriajakirjus ilmunud konspektiivset seeriat kirjutusi elementaarse elektrotehnika üle, siis puudus kuni viimase ajani kapitaalsem teos sellel alal.

Tänavu kevadel ilmunud major H. Jaansonil „Elektrotehnika algõpetus“ ja käesolev „Elektrotehnika õpperaamat“ taotlevad mõlemad eeskätt eesmärki: olla käsiraamatuks eriväeosade klasside õpilasile. Kuna esimene mainitud teoseist on kirjutatud puhtakujulise kursuseõpperaamatuna ja aine käsitus on sellepärast jäänud kitsaisse õppekava raamesse, siis on käesoleva raamatu autor, osaliselt nende ridade kirjutaja ergutusel, hulga rohkem süvenenud ainesse ja püüdnud koostada õpperaamatut, mida saab kasutada ka meie õppiv ja kasvav sugupõlv enda põhjalikumaks ettevalmistamiseks tänapäeval nii suuremõduliselt kõik tegevusalad vallutanud energia kasutamisel. Selleks viimaseks aitab tõhusalt iseõppijaid raamatus rikkalikult toodud praktilised arvutused ning valemite kasutamise ja käsitamise näited.

Raamatu autor on astunud julge sammu loobumisega aastakümnete jooksul tarvitusel olnud voolusuuna tähistamisest ja üle läinud teoreetiliselt ainuõigele elektronide liikumise suuna käsitamisele elektrivoolu suunana. Seetõttu oli vajalik kõike füüsikatundides varemalt õpitud reegleid ja mõisteid ning vanemale põlvele peaaegu aktsioomidena tunduvaid mõisteid uude vormi valada, tekitades teatavas mõttes revolutsiooni. Välismaa kirjanduses tuleb ikka sagedamini

kuuldavale hääli, mis nõuavad selle revolutsiooni universaalset teostamist, ja seal on juba ilmunud rida teoseid, millede on järjekindlalt loobunud aastakümneid tehtud vea kordamisest voolusuuna tähistamisel, siiski on praegu veel selliste teoste arv piiratud ja meie soovime südamest, et see autori tarmukus ei saaks takistuseks raamatu edule, mida ta väärrib.

Raamatu tehnilises terminoloogias on püütud kinni pidada Eesti Entsüklopeedias kasutatud terminoloogiast, mis ei saa ka veel olla ideaalne, kuna meie tehniline terminoloogia on alles väljakujunemisel, kuid on siiski viimistletud silmapaistvalt keeleteadlasilt ja tehnilisilt eriteadlasilt.

Aine käsituses on autor jäänud elementaarse matemaatika piiresse, mis omalt poolt suudab rahuldada suurimat lugejaskonda, samuti nagu ladus ja kristallselge mõttekäik, milles peegelduvad autori pikaajalised kogemused pedagoogilisel tööl.

Loodame, et see raamat saab leidma endale suure lugejaskonna, kus on pikisilmi oodatud sellise teose ilmumist.

F. Olbrei.

Kol.-ltn. insener I. E. T. I. K. E. I. Ü.

Eessõna esimesele triikile

Käesoleva elektrotehnika õpperaamatu koostamisel on väljutud põhimõttest, pakkuda lugejale tervikuna põhimõttelisi aluseid elektrinähetest, -seadustest ja elektri kui energia rakendusvõimalusist.

Et raamat oleks loetav ja arusaadav laiemale lugejaskonnale, selleks on mõningate küsimuste käsitamisel mööda mindud teoreetilistest peenustest. Osaliselt on kasutatud meelevaldseid kordamisi, kui see antud küsimuse selgitamisel näis olevat vajalik.

Raamatust on hoopis välja jäetud elektrostaatika osa, millel ei näi olevat praktilist tähtsust, kuna kõik elektrilised nähted seletuvad praegu palju lihtsamalt — kehtiva elektron-teooria alusel.

Käesolev teos on oma sisult esimene sellesarnane üritus eestikeelses kirjanduses. Seetõttu võib-olla esineb siin mõnigi konarus, mida palun lugupeetavat lugejat lahkesti vabandada.

Tänan härra K. S. dipl. kol. A. Normakit käesoleva õpperaamatu tekkimise idee algatamise ja härra leitn. V. Issakot tehnilise korrektuuri eest.

Erilist tänu võlgnen härra dipl. ins. kol. F. Olbreile käsi-kirja läbivaatamise ja väärtuslike kude paranduste ning täienduste eest.

Autor.

Eessõna teisele trükile

Lähtudes „Elektrotehnika õpperaamatule“ ettenähtud ulatusest pole käesolevas sisulisi muudatusi.

Parandusi on tehtud vaid tingmärkides ja terminites, kus see üldises ühtlustamise mõttes osutus vajalikuks.

September 1939.

Autor.

SISUKORD

Esimene osa.

ALALISVOOL.

I. Aine ja elektronteooria.	Lk.
1. Mis on elekter?	1
2. Aine ja selle koosseis	1
3. Elektronid ja nende omadused	3
4. Ioonid, ionisatsioon ja elektronide saamine	4
5. Elektronide liikumise siht	6
II. Elektrienergia saamine ja elektrivool.	
1. Elektri iseloom ja elektrienergia	7
2. Potentsiaal ja elektrivool	8
3. Voolu sihid — pluss ja miinus	10
III. Elektromotoorne jõud, elektrivool, takistus ja oomiseadus.	
1. Elektromotoorne jõud	11
2. Elektrivool	13
3. Elektriline takistus, juhtivus ja eritakistus	16
4. Isolaatorid	21
5. Oomiseadus	21
IV. Töö, võimsus ja kasulik töö.	
1. Töö	23
2. Energia	24
3. Elektri töö ja võimsus	25
4. Dšauliseadus	28
V. Elektriahelad ja nende seadused.	
1. Elektriahela mõiste	31
2. Takistused järjestikku- ja rööbitiühenduses	34
3. Kirchhoffi seadused	41
VI. Keemilised elektrivooluallikad.	
1. Leclanchéelemendid	44
2. Elementide ühendused	50
VII. Elektrolüüs	54
VIII. Akumulaatorid.	
1. Seatinaakumulaatorite põhimõtte ja ehitus	58
2. Seatinaakumulaatorite omadusi	63
3. Seatinaakumulaatori hooldamine	67
4. Leelisakumulaatorid	68
5. Leelisakumulaatorite hooldamine	71
IX. Magnetism.	
1. Magnetid ja nende omadused	72
2. Magnetiline induktsoon	74
3. Magnetiline läbitavus ja magnetühikud	77
X. Elektromagnetism.	
1. Elektrivoolu magnetiline mõju	81
2. Magnetahelad	87

XI.	Elektromagnetiline induktsioon	96
XII.	Vastastikune induktsioon	101
XIII.	Endainduktsioon	105
XIV.	Induktsiooni mõõtühikud	110
XV.	Elektrimasinate töötamise põhimõte	114
XVI.	Alalisvoolumasinad.	
	1. Generaatorid	122
	2. Alalisvoolumootorid	130

Teine osa.

VAHELDUVVOOL.

I.	Vahelduvvoolu põhimõte.	
	1. Vahelduvvoolu suurused	137
	2. Vahelduvvoolu liitmine	143
II.	Oomiline ja induktiivne takistus vahelduvvoolu ahelas.	
	1. Oomiline takistus vahelduvvoolu ahelas	150
	2. Induktiivne takistus vahelduvvoolu ahelas	152
	3. Oomiline ja induktiivne takistus vahelduvvoolu ahelas	157
III.	Mahtuvus, mahtuvuseline ja oomiline takistus vahelduvvoolu ahelas.	
	1. Mahtuvus ja selle mõõtühikud	160
	2. Mahtuvus vahelduvvoolu ahelas	167
	3. Mahtuvuseline ja oomiline takistus vahelduvvoolu ahelas	171
IV.	Oomiline, induktiivne ja mahtuvuseline takistus vahelduvvoolu ahelas	174
V.	Vahelduvvoolu resonantsnähted	176
VI.	Vahelduvvoolu töö	183
VII.	Hüsterees ja pöörivoolud.	
	1. Hüstererees	189
	2. Pöörivoolud	191
VIII.	Vahelduvvoolu liigitelu ja vahelduvvoolu masinate põhimõtted.	
	1. Ühefaasiline vool	193
	2. Kahefaasiline vool	194
	3. Kolme faasiline vool	196
	4. Keerlev magnetiline voog	200
IX.	Transformaatorid ja voolumuundajad.	
	1. Transformaatorid	201
	2. Voolumuundajad	206

Kolmas osa.

ELEKTRIMÕÕTERIISTAD.

I.	Elektrimõõteriistade põhimõtted.	
	1. Elektrimõõteriistade liigitelu	209
	2. Voolutugevuse mõõtjad	211
	3. Pingemõõtjad	216
	4. Mõõteriistade mõõdupiirkonna laiendamine	217
	5. Voolu tugevuse ja pinge mõõtmine	220
II.	Takistuste mõõtmine	222
III.	Võimsusmõõtjad ja voolutöö arvestajad	226

Esimene osa.

Alalisvool.

I. AINE JA ELEKTRONTEOORIA.

§ 1. Mis on elekter?

Tänapäev pole mõeldav **elektrita**. Elektrit kasutatakse valgustamiseks, masinate käivitamiseks, sidevahendite jne. tööle rakendamiseks. Juba vanad kreeklased panid tähele elektrilisi nähteid merevaigu juures. Nimetus „elekter“ on tuletatud sõnast „elektron“, mis kreeka keeles tähendab merevaiku.

Küsimus, „**mis on elekter**“, pole seni veel lõplikult lahendatud, olgugi et selle probleemi lahendamiseks on teadlased töötanud paljud aastad. Küsimuses eneses polegi meil tarvis juurelda, sest praktiline teadus ei huvitu niivõrd loodusenähetest nende tuumas, kui nende nähete kindlaile seadusile allutamise, mistõttu neid nähteid on võimalik rakendada praktilisse tööle.

Ülesande lahendamiseks seab teadus üles kindlate vaatluste põhjal **oletuse** (hüpoteesi). Oletuse najal seletatakse mitmesuguseid nähteid ja allutatakse vastavaile reegleile. Aja möödudes tehakse sageli uusi tähelepanekuid ja avastusi. Nii võib esineda, et varem püstitatud oletus ei pea mõnede nähete seletamisel enam paika. Moodne teadus pole aga dogmaatiline, vaid painutab end uute tähelepanekute kohaselt, mis seisab selles, et luuakse uus oletus uute nähete alusel. Elektriliste nähete seletamiseks on seni olnud mitu oletust. Kõige tõenäolisem näib olevat aga praegune „**elektronteooria**“.

§ 2. Aine ja selle koosseis.

Kogu ilmas mõistetakse aine all kõike, mis täidab maailma-ruumi, välja arvatud ainult eeter. Eeter ei kujuta endast ainet,

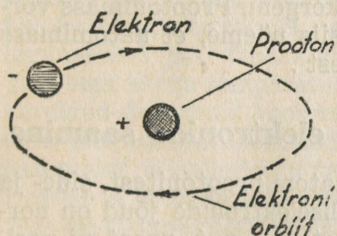
olgugi et ta täidab pidevalt maailmaruumi ja täidab isegi aine vähimad kujuteldavad osakesed. Eeter on oletatav keskkond, mille kaudu levib valgus ja soojus. Kõiki elektrilisi ja magnetilisi nähteid oletatakse eetris tekkivaiks nähteiks — eetri-deformatsiooneks, ja kõiki noid nähteid püütakse seletada eetrihüpoteesi abil.

Iga keha on aine mingisugusel kujul. Aine on sama igal pool. Kõik, mis omab kaalu ja mõõte, mida võime tajuda oma nägemis-, kompamis- ja haistmismeeltega, on aine. Mõned aine kujud pole meile nähtavad, nagu puhas õhk, vesinik, valgustusgaas jne., olgugi et need täidavad ruumi ja omavad kaalu, kuid me võime tajuda nende olemasolu teiste meeltega. Aine koosneb lõpmata paljudest üksikuist väikesist osist. Aine vähimaiks kujuteldavaiks osiks on molekulid. Neid pole enam võimalik vähemaiks osiks muuta, ilma et ei muutuks aine omadused. Nii näiteks keedusoola ($NaCl$) molekuli lahutamisel saame naatriumi (metall) ja kloori (gaas) aatomid, millel pole enam keedusoola omadusi. Molekulid pole aines üksteisega puutes. Nende vahed pole millegagi täidetud. Kuna aga pole kujuteldav absoluutne tühjus, siis peab molekulide vahesid täitma eeter. Molekulid on aines alati liikvel, nad omavad energiat. Aine molekulide liikumiskiirust määritleb selle aine temperatuur. Molekulide molekulaarliikumine on aine kõrgema temperatuuri juures kiirem, madalama temperatuuri juures aga aeglasem. Nõnda määritleb siis aine kogu soojuse hulk energia hulka, mida omavad vastava aine molekulid.

Molekulid koosnevad omakorda veel vähemaist osist, nn. aine koosseisu kuuluvaist keemiliste elementide aatomeist. On olemas alg- ja liitained. Elemendid on liitainete põhi- ehk algained, mida pole võimalik praeguste kasutada olevate vahenditega enam vähemaiks osiks lahutada. Täiesti selgusel ollakse praegu 89 elemendi suhtes ja vastavate uurimuste põhjal oletatakse veel kolme elemendi olemasolu. Seega on siis ka aatomeid 92 liiki. Aine süsteemi omadused on sõltuvad tema molekulide koosseisu kuuluvate aatomite arvust. Näit. keedukoola molekul koosneb kahest, vee molekul kolmest ja munavalge molekul umbes 1000 aatomist. Molekul koosneb aatomite kogumist. Aatomid on molekulis seotud vastastikuste külgetõmbe jõudude kaudu. Uuemate uurimuste põhjal on kindlaks tehtud, et aatom omakorda koosneb veel vähemaist osakesist, nn. elektronidest ja protonitest.

§ 3. Elektronid ja nende omadused.

Aine vähimad osakesed on ühtlasi ka elektri algosakesed. Neid on kahte liiki: suuremad ja kaalult kergemad on **elektronid**, vähemad ja kaalult elektronidest 1839 korda raskemad — **prootonid**. Elektronid ja prootonid omavad üksteise suhtes **tõmbejõu**, kuid elektronid elektronide ja prootonid prootonite suhtes omavad **tõukejõu**. Vastavate katsete põhjal on kindlaks tehtud, et elektron on negatiivne elektri-elementaarlaeng ehk negatiivse elektri algosake. Elektronid ja prootonid moodustavad aatomi. Aatomis on normaalselt võrdne arv elektrone ja prootoneid. Prootonid moodustavad päämiselt **aatomisüdamikku**. Südamikku kuulub ka veel osa aatomi koosseisu kuuluvaid elektrone. Need moodustavad sidematerjali südamikus asetsevate prootonite kooshoidmiseks. Neid nimetatakse **sideelektronideks** ja nad püsivad südamikus paigal. Teine osa elektrone tiirleb oma orbiitidel südamiku ümber ja neid nimetatakse **väliselektronideks**. Iga aatomisüdamiku koosseisu kuuluvate prootonite arv vastab aine aatomkaalule. Väliselektronide arv aatomis on võrdne



Joon. 1.

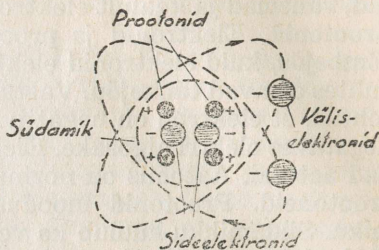
aine aatomilisele arvule. Aatomiline arv on elementide tabelis aine järjekorra number tõusvas aatomikaalude järjestuses. Nii näit. vesinik on aatomkaalu poolest kõige kergem element. Tema aatomkaal on umbes 1, seega järjestusarv tabelis või aatomiline arv on ka 1. Tabelis järgmine on heelium, mille aatomkaal on 4,002 ja aatomiline arv 2.

Elementidest omab uraan kõige suurema kaalu 238,17 ja ta aatomiline arv on 92. Ta aseneb tabelis viimasel kohal.

Aatomkaalu ja aatomilise arvu aritmeetiline vahe annab sideelektronide arvu. Näiteks uraani sideelektronide arv (238—92) on 146 ja väliselektronide arv on tal 92. Vesiniku aatom koosneb ühest prootonist ja ühest väliselektronist (joon. 1). Sideelektrone selles südamikus pole. Vesiniku aatom on kõige lihtsama aatomilise struktuuriga. Palju keerukam aatomiline struktuur on heeliumil. Selle aatomi südamikus on 4 prootonit ja 2 sideelektroni. Väliselektrone on tal 2 (joon. 2). Elektronide ja prootonite arv aatomis määrab ära viimase omadused. Mida raskem on aine, seda rohkem sisaldab ta

prootoneid, seda keerukam on ka selle südamiku ehitus ja väliselektronide süsteem.

Selliseis orbiitide rägastikes võib elektronide liikumisel esineda nende sagedasi pörkumisi, mis põhjustavad aine püsiva lagunemise ning ümber kujundamise madalama aatomkaaluga aineiks. On tähele pandud, et radioaktiivseist aineist uraan muutub ajajooksul jooniumiks, joonium radiumiks ja viimane seatinaks. Elektronide läbimõõt on lõpmata väike, umbes $2,82 \cdot 10^{-13}$ sm. Sellist väikest suurust pole üldse võimalik kujutella. Samuti pole



Joon. 2.

elektron nähtav ka kõige tugevama suurendusega mikroskoobis. Kui võrduseks kujutella aatomit maakera suurusena, siis selle aatomi elektronid oleksid väikese kummipalli suurusel. Elektronimass on väga kerge ja kaalub $8,98 \cdot 10^{-28}$ grammi, olles vesiniku aatomist 1839 korda kergem. Prootonimass võrdub vesiniku aatomimassiga. Nii siis näeme, et aatomimass moodustub peaaegu vaid prootonitest.

§ 4. Ioonid, ionisatsioon ja elektronide saamine.

Eelnenu kohaselt koosneb iga aatom prootonitest, side- ja väliselektronidest. Südamiku ja väliselektronide jõud on normaalselt üksteise suhtes tasakaalustatud, s. t. prootoni positiivne elektrilaeng on sama suur kui elektroni negatiivne elektrilaeng. Suurema osa algainete aatomeis võib mõnikord olla rohkem või vähem väliselektrone, kui ta normaalkoosseis seda lubaks. Olukorda, kus aatomi südamik on ümbritsetud suurema arvu elektronidega, kui neid tavaliselt tema ehituse koosseisu kuulub, nim. aatomi negatiivseks elektrilaengu nähtuseks. Sellises olukorras on aatomi tasakaal rikutud, ta omab elektrone, mida südamik ei jõua küllaldasel määral siduda. Vabad elektronid lahkuvad aatomist esimesel soodsal juhul. Kui aatom on kaotanud osa oma väliselektronest, siis aatomi südamik püüab esimesel soodsal juhul puuduvaid elektrone tagasi saada. Säärast olukorda nim. aatomi positiivseks elektrilaengu nähtuseks. Oma sisemise jõu tasakaalustamiseks püüab selline aatom soodsal juhul juurde saada puuduvaid elektrone.

Tasakaalustamata aatomid omavad üksteise suhtes kas tõmbe- või tõukejõu. Selliseid aatomeid nim. elektriseerituiks või **ioniseerituiks**. Üldiselt nim. tasakaalustamata aatomit **iooniks**. Aatom, mille normaalsest koosseisust mõni elektron eraldatud, nim. **positiivseks iooniks** (vahel ka katiooniks). Aatom, mis omab vabu elektrone, nim. **negatiivseks iooniks** (aniooniks).

Oma orbiidil keerlevad elektronid omavad erineva energiahulga. Väheema energiahulgaga elektronide keerlemisorbiidid asetsevad südamikule lähemal, suuremaga kaugemal. Kui elektron sunnitakse kuidagi oma liikumissuunda orbiidil muutma, või tõkestatakse tema edasiliikumist, siis ta kaotab osa oma energiast. Omades väheema energiaastme, asetseb ta oma orbiidiga südamikule lähemale. Kui aga elektronile antakse väljastpoolt mingil teel lisaenergiat, siis ta nihkub oma orbiidiga aatomi südamikust kaugemale. Kui see lisaenergia ületab üldise energia tasakaalu, siis mõni elektron võib aatomist lahkuda täielikult.

Vabad elektronid hõljuvad aatomite vahel, kuni neid seob mõni aatom. Vabu elektrone saadakse elektronide kokkupõrkel, katoodekiirte toimel raadiolambes, radioaktiivsete ainete lagunemisel jne. Üheks elektronide kiirglemisvoolude tekitaajaks oma kõrge temperatuuri tõttu on ka päike. Päikese poolt kiireldud elektronid koos kiirgamisenergiaga põhjustavad maa-keras ülemistes õhkkonnakihtides elektronide vabanemise oma aatomeist ja selle tõttu teatud kihid ioniseeritakse (Kennely Heaviside ja Appletoni kihid). Need kihid evivad erilise tähtsuse elektromagnetiliste lainete levimisel.

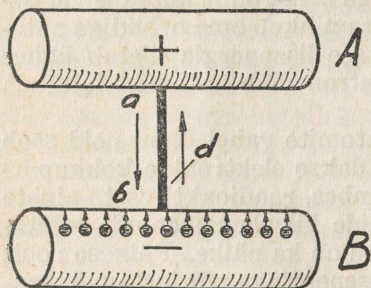
Praktilises elektrotehnikas sünnib kehade aatomeist elektronide eraldamine mehaaniliste või elektromagnetiliste jõudude toimel. Keha aatomist eraldamisvõimalike elektronide arv on väga väike. Mõne miljoni aatomi kohta eraldatakse kehast võib olla vaid üks elektron. Kuid et keha koosneb paljudest miljonitest aatomitest, siis võib ka eraldatav elektronide hulk võrdlemisi suur olla. Seega teatav hulk vabu elektrone, või selle hulga muutus, on elektriliste nähete tekkimise põhjuseks. Vabad elektronid omavad üksteise suhtes võrdlemisi suure tõukejõu (kaks elektroni ühe sentimeetri kaugusel omavad üksteisest eemaletõukejõu $1,16 \cdot 10^{-19}$ düüni).

§ 5. Elektronide liikumise siht.

Aatomeist võivad vabaneda ainult aine negatiivsed algosad — elektronid. Aatomiga liituda võivad samuti ainult elektronid. Seega elektri alkosadest on ainult elektronid liikuvad.

Kui viime mõnelt neutraalkehalt elektrone üle mõnele teisele kehale, siis esimeses kehas pääseb mõjule prootonite energia, ta tõmbab elektrone külge. Teises kehas on ülekaalus elektronide energia, ta on laetud negatiivselt ja võib elektrone ära anda.

Olgu meil kaks keha *A* ja *B* (joon. 3), mis on üksteisest õhuga eraldatud. Keha *A* on laetud positiivselt ja keha *B*



Joon. 3.

negatiivselt. Seega keha *A* omab elektrone normaalarvust vähem ja keha *B* rohkem. Keha *A* püüab teda ümbritsevast õhust ja kehalt *B* külge tõmmata puuduvaid elektrone. Õhk on aga suureks takistuseks elektronide liikumisele ja seetõttu on raskendatud elektronide üleminek kehalt *B* kehale *A*. Elektronide soodus liikumine võib toimuda vaid neid juhtivais kehis, millistena

tulevad vaatlusele praktiliselt peamiselt metallid. Ühendame kehad *A* ja *B* juhtmega *d*, siis voolab kehalt *B* vastav arv elektrone kehale *A*. Praegusel juhul elektronide liikumissiht oli juhtmes *d* alt üles. Vahetades kehade *A* ja *B* asendid juhtme *d* suhtes ümber, näeme, et elektronide liikumissiht on nüüd juhtmes ülalt alla. Eelnenust paneme tähele, et elektronide liikumissuund on alati negatiivsema laenguga kehalt positiivsema laenguga kehale. Ainult juhtme *d* suhtes oli elektronide liikumissiht kumbki kord erinev — esimesel juhul *b* — *a* ja teisel juhul *a* — *b* suunas.

II. ELEKTRIENERGIA SAAMINE JA ELEKTRIVOOL.

§ 1. Elektri iseloom ja elektrienergia.

Nagu eelpool öeldud, pole elektri põhiloomus siiani veel täpsalt välja selgitatud. Küll on aga elektrinähted allutatud vastavatele seadustele, mille abil elekter rakendatakse praktilisse tööle. Tuleb kujutella, et elektrit on algollusena igas kehas. Elektrilaengute jõud on normaalselt aatomis (resp. kehas) tasakaalustatud olekus. Selliselt ei mõju kehas peituvad jõud väljaspoole keha. Keha elektriline tasakaal püsib, kuni ta elektrilaengud on võrdsed.

Aatomis väliselektronid on alati liikvel. Nendest mõned üksikud võivad niihästi mingi välise kui ka aatomist enesest lähtuva mõju tõttu aatomist lahkuda. Selleks kulutatud energia ei hävi, vaid muundatakse elektriliseks energiaks. Seega elekter on üks energia kujudest. Kogu elektri hulk maailma ulatuses on jääv, ta ei muutu. Elektrit ei saa tekitada ega ka hävitada. Elektri negatiivseid osakesi on võimalik ainult liikuma panna, neid üle kanda ühest kehast teise. Seejuures ilmnevad nähted, milledega tutvustamine on selle raamatu edasine ülesanne.

Tegelikus elus räägitakse sageli, nagu seda võime leida ka õpperaamatuist, et elektrit tekitatakse keemilisis vooluallikais, elektrimasinainis jne. See väljendusviis pole aga kuigi täppis, sest keemilised vooluallikad või elektrimasinad ei tekitavad elektrit, vaid nende abil tekitatakse **elektromotoorne jõud**, millega pannakse ainult liikuma elektronid, mis juba varem on igas kehas olemas. Kõik elektrienergia allikad on seadised, milledega mingi iseliiki energia muundatakse elektrienergiaks.

Tehniliseks otstarbeks kasutatav elektrienergia saadakse peamiselt:

- 1) Elektrokeemilisel teel:
 - a) keemilistest elementidest,
 - b) akumulaatoreist.

Sellistes seadistes muundatakse keemilisest reaktsioonist vabanev energia elektriliseks energiaks. Nende seadiste abil on võimalik saada ainult väikesi energia hulki. See energia on ka võrdlemisi kallis. Seda kasutatakse peamiselt telefoni-, telegraafi-, radio- ja signalisatsiooniseadmete töölerakendamiseks.

2) Elektromagnetilise induktsiooni abil elektrimasinais.

Elektromagnetilisel teel on võimalik saada määratud energia hulki. Nende masinate abil mehaaniline energia muundatakse elektriliseks energiaks. Sellisel teel saadud elektrienergiat kasutatakse majapidamise ja tööstuse otstarbeks, nagu valgustamiseks, masinate käivitamiseks jne. Ta on umbes 200 korda odavam elektrokeemilisel teel saadud elektrienergiast.

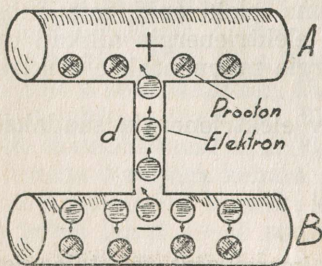
Elektrienergiat on veel võimalik saada termoelemendest. See ilmneb kahe erineva metalli kokkujootmise koha soojendamisel. Termoelemendest saadud elektrienergia on lõpmata väike ja seda kasutatakse ainult mõõdutehnikas.

Ajalooliselt vanim mehaaniline energia elektriliseks energiaks muundamise viis on hõõrumismeetod. See pole suutnud tehnikas omandada praktilist väärtust ja selle tõttu ei tule käesolevas raamatus üldse vaatlusele.

§ 2. Potentsiaal ja elektrivool.

Energia kujutab endast keha sees peituvat töötavavara. Iga energia-ilming muundub teiseks energia-ilminguks, kui muundumistingimused on soodsad. Näit. keha potentsiaalne energia muundub keha vabal langemisel kineetiliseks energiaks (vaata IV päätükk), keemiline energia galvanielemendes ja akumulaatoreis elektrodünaamiliseks energiaks jne.

Iga keha omab elektrilist energiat positiivsete ja negatiivsete elektrilaengute näol. Elektrilaengu suurus on olenev keha aatomi elektronide ja prootonite sisaldavusest. Keha negatiivse elektrilaengu hulka on võimalik muuta. Laengu suuruse muutmine võib toimuda kas kehalt teatud hulga elektronide eemaldamisega või nende lisandamisega. Kui ühelt kehalt mingil teel osa elektrone üle viia teisele, siis rikutakse nende kehade vahel elektriline tasakaal. On hõlbus kujutella, et siis kehal, mis omab ülearuseid (vabu) elektrone, valitseb elektriline ülirohke ja teisel



Joon. 4.

kehal elektriline alarõhk negatiivsete elektrilaengute suhtes. Selliselt need kaks keha omavad teineteise suhtes elektriliste **potentsiaalide** (potentsiaal kujutab füüsiliselt töövõimet) vahe

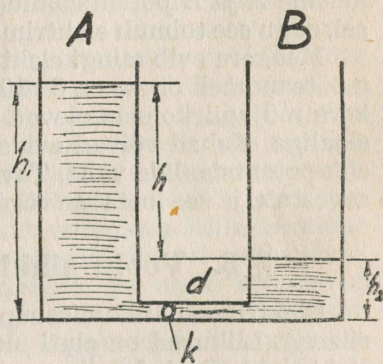
ehk **pinevuse** (joon. 4). Elektrilise tasakaalu saavutamiseks püüavad keha *B* ülearused elektronid pääseda kehale *A*. Keha *A* ja *B* ühendamisel mingi elektrit juhtiva kehaga voolavad ülearused elektronid kehalt *B* kehale *A*, kuni on kadunud keha-devaheline pinevus ja mõlemad kehad omavad jälle normaalse arvu elektroone.

Seda elektronide liikumist nim. elektrivooluks. Elektrivool on seda tugevam, mida rohkem elektrone teatud aegühiku jooksul voolab kehalt *B* kehale *A*. Aegühikuks määramiseks on 1 sekund. Teisest küljest elektrivoolu tugevus on sõltuv kehade *A* ja *B* vahelisest elektrilisest pinevusest. Pinevuse määr on keha *A* puuduvate ja keha *B* ülearuste elektronide arvust.

Eelnenust peame meeles, et emj. *E* tekitamiseks on vaja teatud kehade vahel hävitada elektriline tasakaal, s. o. tekitada elektriline potentsiaalide vahe. Kui kahe punkti vaheline potentsiaal on suur, siis tung elektrivoolu tekkimiseks on ka suur. Vähepinevuse puhul on ka tung elektrivoolu tekkimiseks vastavalt väiksem. Kui kahe punkti potentsiaalid on võrdsed, siis nende vahel elektrivoolu ei teki, sest nende elektriline pinevus või potentsiaalide vahe on null.

Kehade potentsiaalide vahe tekitamiseks kulutatakse vastav hulk mehaanilist või keemilist energiat. See kulutatud energia muundatakse algul elektrostaatiliseks (paigalseisvaks) energiaks. See võib soodsal juhul tekitada elektrivoolu, mis on elektrodünaamilise (liikuva) energia kujuks ja mis jälle omakord muundatakse mõneks teiseks energia kujuks, näit. soojuseks, keemiliseks energiaks, mehaaniliseks energiaks jne.

Elektri potentsiaali võib võrrelda järgmise näitega: olgu meil kaks veenõu *A* ja *B* ühendatud toruga *d* (joon. 5). Toru *d* on kraani *k* abil suletud. Nõudes on vesi. Vee nivood kummaski nõus olgu erinevad. Vee nivood h_1 ja h_2 vahet iseloomustab kõrgus *h*. Avades kraani *k*, voolab vesi nõust *A* nõusse *B*. Vee voolamine kestab kuni vee nivood mõlemas nõus saavutavad sama kõrguse. Vee voo-



Joon. 5.

lamise põhjuseks oli nõus A kõrgemale tõstetud veehulga potentsiaalne energia, mida võib määratella h suurusega.

Siin võime tähele panna, et algul, kui avame kraani, on vee nivoode vahe h suur ja seetõttu on ka algul teatud aja jooksul vee voolamise kiirus suur. Vee nivoode vahe h vähenemisega väheneb ka vee voolamise kiirus (või vee hulk, mida teatud aegühiku jooksul ühest nõust teise voolab), kuni vee nivood mõlemas nõus on samal kõrgusel ja vee voolamine nõust A nõusse B jääb seisma. Vee voolamisel muundus veesamba h potentsiaalne energia kineetiliseks energiaks. Veevoolu on võimalik ära kasutada tööks, kui torusse d asetame mingisuguse vesiratta. Püsiva ja kestva veevoolu (töö) saamiseks torus d on vaja iga hetk nõusse B voolanud veehulk vastava pumba abil tagasi viia nõusse A . Seega hoitakse alal veesammaste h_1 ja h_2 vaheline potentsiaalenergia.

Analoogiline nähe on ka elektriga. Kehade A ja B (joon. 4) vahel on algul teatud elektriline pinevus. Pinevuse langemisega väheneb ka elektrivoolu hulk ühendusjuhtmes d . Kui potentsiaalid kehadel A ja B saavad võrdseks, siis elektronide üleminek kehalt B kehale A lõpeb. Juhtmes d elektrivoolu enam pole. Püsiva ja kestva elektrivoolu saamiseks on vaja kehadel A ja B potentsiaalide vahe alal hoida ka voolu kestusel, nagu see toimub elektrimasinais, galvaanielemendes jne.

Maakera evib mingi elektrilise potentsiaali, mis vastavatel mõõteandmeil on — ca $6 \cdot 10^8$ volti. Seetõttu on ka kõik maakera mõjupiirkonnas olevad kehad normaalselt sama potentsiaaliga. Kehad võivad evida maa suhtes elektrilise pinevuse ehk potentsiaalide vahe. Tavaliselt maakera potentsiaaliga ei arvestata ja see loetakse võrdseks nulliga — võrdlustasemeks.

§ 3. Voolu sihid — pluss ja miinus.

Elektrivoolu liikumissuuna määrajaks on negatiivne elektrilaeng. Liikuvad on alati negatiivsed elektrialgosakesed — elektronid. Paljudes õpperaamatutes seletatakse, et elekter algab liikumist positiivselt laetud kehalt ja liigub negatiivselt laetud kehale. See elektrivoolu suund on puhtkonventsionaalne ja määratud ajajärgul, mil teadmised elektri tõelisest iseloomust olid alles algastmel. On selge, et paljude aastate vältel kasutatud voolusuuna muutmine pole sugugi hõlbus ja seetõttu tuleb alati vahet teha tõelise, s. o. elektronide voolusuuna (liikumise) ja konventsionaalse voolusuuna vahel. Eelnenud seletuse järele on elektronide voolusuund täiesti vastu-

pidine harilikult tähistatavale (konventsionaalsele) voolusuunale, mille õpetlased on määranud juhuslikult. Üldiselt tähistatakse veel praegugi elektrivoolu väljumise siht plussiga ja sisenemise siht miinusega. Vastavalt sellele on konstrueeritud ka kõik elektrivoolu seadmed ja mõõteriistad.

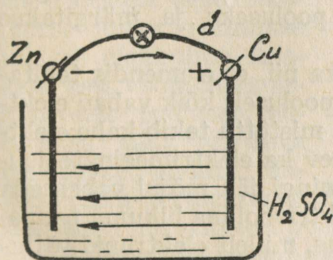
Edaspidi märgitakse käesolevas raamatus elektrivoolu suund elektronteooria kohaselt negatiivse laenguga kehalt positiivse laenguga kehale. Sellele vastavalt on kohandatud ka elektromagnetilise induktsiooni juures ettetulevad reeglid. Nendega rööbiti on toodud ka reeglid konventsionaalse voolusuuna tähistamise kohaselt. Tegelikult polegi ju oluline, misugust voolusuuna tähistamisviisi kasutada, kui lõppresultaat jääb üheks ja samaks.

III. ELEKTROMOTOORNE JÕUD. ELEKTRIVOO, TAKISTUS JA OOMISEADUS.

§ 1. Elektromotoorne jõud.

Asetame väävelhappega (H_2SO_4) täidetud klaasnõusse kaks metallriba (joon. 6), ühe tsingist ja teise vasest. Metallribade ja happe vahel tekib keemiline reaktsioon, põhjustades vedeliku molekulide lagunemise kaheks osaks — H_2 ja SO_4 . Osa jagunenud väävelhappe molekulidest ühineb tsingiga, tekitades tsingivitriooli ($ZnSO_4$), mis lahustub vedelikku. Selle keemilise reaktsiooni toimel vabanevad elektronid ja need kogunevad tsingile. Mida enam lahustub tsinki happesse, seda suurem on vabanenud elektronide hulk, mis põhjustab omakord elektronide juurdevoolu tsinkribale.

Joon. 6.



Nii rikutakse keemilise reaktsiooni mõjul tsinkribal elektriline tasakaal. Tsingiaatomite prootonid ei suuda enam siduda üha juurdetoodavaid elektrone. Sellega ühes kasvab ka tõukejõud, mille mõjul elektronid püüavad vedelikust väljaulatavalt tsinkriba otsalt edasi pääseda. Kuna õhk on elektronide liikumisele suureks takistuseks, ei pääse need tsinkribalt edasi

ja tekitavad vedelikus lõpuks vasturõhu, mis pidurdab edasise elektronide kogunemise tsingile. Samast hetkest lakkab ka tsingi ühinemine väävelhappega ja keemiline reaktsioon vaibub.

Vask- ja tsinkribade vedelikust väljaulatuvate otste ühendamisel mingisuguse elektrone juhtiva kehaga, näit. vasktraadiga d , avaneb elektronidel võimalus liikuda tsinkribalt vaskribale kui madalama potentsiaaliga kehale. Seetõttu väheneb tsinkribal elektronide arv ja ka vedelikus valitsev reaktiivne vasturõhk, mistõttu tekib uuesti keemiline reaktsioon. Kord liikuma pandud elektronid pääsevad läbi juhtme vaskribasse, kust nad keemilise reaktsiooni toimel kantakse vedelikku ja säält uuesti tsinkribale jne. Läbi vasktraadi ja vedeliku liikuvad elektronid moodustavad elektrivoolu. Voolu kindlakstegemiseks lülime juhtmesse d elektrilambikese, mis voolu puhul helendub. Kord sellisel teel ringlema pandud elektronide arv on kindel suurus. Analooiline nähe ilmneb ka mõnede teiste metallide ja hapete kasutamisel.

Kirjeldatud seadeldist nimetatakse galvaanielemendiks või lihtsalt keemiliseks elektrenergia allikaks. Elemendis kasutatakse vedelikku nim. **elektrolüüdiks** ja metallribu — **elektroodideks**. Tehakse vahet positiivse ja negatiivse elektroodi või pooluse vahel. Negatiivseks pooluseks nim. seda metallriba, millele elektronid vedelikust kogunevad, ja märgitakse **miinus**ega (—). Elektrood, mille kaudu elektronid vedelikku tagasi viiakse, nimetatakse positiivseks pooluseks ja märgitakse **plussiga** (+).

Ilmnenud nähet võib kujutella ka nii, et elemendis tekitatakse mingi jõud, mis kannab ühelt pooluselt kõik vabad elektronid läbi vedeliku teisele poolusele, mistõttu tekib kahe elektroodi vahel pinevus. Sama on maksev ka elektrimasinate juures, sest põhimõtteliselt on tarvis mingi jõu mõjul vabastada elektronid aatomeist ja need siis elektrivooluna liikuma panna.

Tegeliku voolusihhi määrab poolus, millelt elektronid väljuvad. Alati on selleks negatiivne poolus. Konventsionaalse tähistamise järele oleks pidanud elektronide väljumine olema positiivselt pooluselt.

Jõudu, mis põhjustab kehade vahel elektrilise pinevuse tekkimise, nim. **elektromotoorseks jõuks** (E). Üldises mõttes on E jõud, mis paneb elektronid liikuma, mistõttu muutub elektronide hulk kehaes ja nende vahel tekib pinge. See pärast võib ka elektromotoorset jõudu E mõõta pingega U , mida ta suudab tekitada.

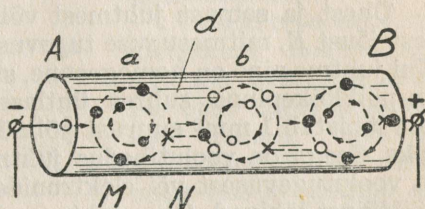
Pinge põhimõõtühikuks on **volt (V)**. Suuremaid pingesid mõõdetakse **kilovoltides (kV)**, vähemaid **millivoltides (mV)** ja **mikrovoltides (μV)**, kusjuures:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ V} = 0,001 \text{ kV}; & 1 \text{ kV} = 1\,000 \text{ V}; \\ 1 \text{ V} = 1\,000 \text{ mV}; & 1 \text{ mV} = 0,001 \text{ V}; \\ 1 \text{ V} = 1\,000\,000 \mu\text{V}; & 1 \mu\text{V} = 0,000\,001 \text{ V}. \end{array}$$

Kinnituskohad vooluallika elektroodidel, millede külge kinnitatakse ühendusjuhe d , nim. klemmideks. Kui vooluallika klemmid on ühendatud juhtmega, siis säärast seadet nim. kinniseks vooluahelaks, s. t. vooluallikast võetakse voolu. Seni kui vooluallikast voolu ei võeta, võrdub selle E klemmipingele (U). Välisahela sulgemisel juhtmega saame ahelas elektrivoolu. Voolu tarvitamisel kulutatakse osa E vooluallika sisetakistuse ületamiseks, mistõttu U on suletud vooluahelas alati väiksem kui E .

§ 2. Elektrivool.

Elektronide liikumist neid juhtivais kehis nimet. **elektrivooluks**. See on kujuteldav järgmiselt: Juhtmes d (joon. 7) on normaalolukorras positiivsed ja negatiivsed elektrijõud tasakaalus. Niipea kui mõjume juhtme d otstele elektromotoorse jõuga, rikutakse juhtme elektriline tasakaal, sest vooluallika negatiivselt pooluselt surutakse sääl valitseva negatiivse elektri üli-



Joon. 7.

rõhu tõttu osa elektrone juhtme A pooluselt otsalt juhtmesse d . Esimesed negatiivselt pooluselt juhtmesse d surutud elektronid M pörkavad kokku aatomiga a ja asuvad selle koosseisu. Aatomi elektrilise tasakaalu säilitamiseks liiguvad sellest N elektroni madalama potentsiaaliga aatomi b poole jne., kuni neid juhtmest on lahkunud sisenduselektronide võrra. Juhtmest lahkunud elektronid juhatakse vooluallikasse. Säärastelt valitseks juhtmes jällegi elektriline tasakaal, kui ei surutaks vooluallika E tõttu juhtmesse uusi elektronide hulki, mis põhjustavad juhtmes elektronide pideva liikumise aatomilt aatomile, kuni vooluallikasse tagasi.

Elektrivoolu mõju on olemas elektronide hulga, mis ühe sekundi jooksul juhtme põiklõikest läbi voolab. Seega iseloomustab (teatud) aegühikus juhete läbiv elektronide hulk voolutugevust. On sekundi vältel läbiv elektronide arv suur, siis on ka voolu mõju suur, vähema elektronide arvu puhul on ka voolu mõju vastavalt väiksem. Voolutugevuse praktiline mõõtühik on amper (A). Voolutugevus on üks amper, kui juhtme põiklõiget läbib ühe sekundi jooksul 10^{19} (kümme miljonit \times miljon \times miljon) elektroni. Rahvusvaheliselt on võetud ampri aluseks voolutugevus, mis, läbides hõbenitraadi ($AgNO_3$) vesilahust, sellest ühe sekundi jooksul eraldab 1,118 mg hõbedat. Kui hõbenitraadi vesilahusest eraldatakse ühes sekundis rohkem või vähem hõbedat, siis on ka vool vastavalt tugevam või nõrgem. Näide: 3,354 mg hõbedat eraldamiseks on vajalik ühes sekundis kolmeampriine, või 6 sekundi vältel 0,5-ampriine voolutugevus.

Voolutugevust mõõdetakse päälle ampriite veel vähemais mõõtühikus nagu milliampreis (mA) ja mikroampreis (μA), kusjuures:

$$\begin{array}{ll} 1 \text{ A} = 1\,000 \text{ mA}; & 1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}; \\ 1 \text{ A} = 1\,000\,000 \mu\text{A}; & 1 \mu\text{A} = 0,000\,001 \text{ A}. \end{array}$$

Ühest ja samast juhtmest võib, olenevalt elektromotoorset jõust E , mitmesuguse tugevusega elektrivoolu läbi saata. Kui juhtme aine on homogeenne, siis selles liiguvad elektronid on põiklõikepinna suhtes ühtlaselt jaotatud. Voolutugevus, mis läbib 1 mm² suurust põiklõikepinda, nim. voolutiheduseks. Seega on voolutihedus juhtmes olemas põiklõikepinnast ja voolutugevusest või elektronide arvust, mis seda juhtme põiklõiget läbivad. Olgu juhtme põiklõikepind 1 mm² ja seda läbiva voolu tugevus 1 amper, siis voolu tihedus juhtmes on 1 amper / 1 mm². Kaks korda suurema põiklõikega juhtmes samal voolutugevusel on voolutihedus 0,5 ampri 1 mm². Voolutihedust avaldatakse valemiga:

$$I_t = \frac{I}{q}$$

kus I_t on voolutihedus ampriis mm² kohta, I juhtme põiklõikepind mm²-reis ja I üldine voolutugevus ampriis.

Näide: Juhete, mille põiklõikepind on 0,5 mm², läbib 1,5-ampriine vooli. Kui suur on voolutihedus juhtmes?

$$I_t = \frac{1,5}{0,5} = 3 \text{ A/mm}^2$$

Praktiliselt on lubatav voolutihedus jahutusvõimalusega juhtmes 2—3 amprit mm^2 . Kinnises, s. o. jahutusvõimaluseta ruumis aga vaid 0,5 amprit mm^2 . Suuremate voolutiheduste puhul juhe kuumendub ja võib rikutud saada.

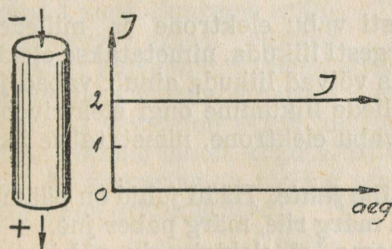
Elektrivoolu võivad tekitada ioonid ja elektronid. Selle järele eristatakse ionide- ja elektronidevoolu. Ioonid tekitavad elektrivoolu gaasides ja elektrolüütides. Elektrolüüt on vedelik, mis juhib elektrit. Samuti juhivad gaasid nende osakeste ioniseerumisel elektrit. Nii gaasid kui ka elektrolüüt lagunevad elektrivoolu mõjul.

Elektronide liikumisel tekitatud elektrivool eksisteerib peamiselt metallides, kuid võib esineda ka gaasides. Metallid ei muutu voolu juhtimisel.

Mõlemad vooluliigid on elektrotehnikas kasutamisel. Suurema praktilise tähtsuse evib aga elektronidevool.

Tavaliselt kasutatavad vooluliigid on alalis- ja vahelduvvool.

Alalisvooluks nim. elektrivoolu, mille tugevus ja suund on aja kestel püsiv (joon. 8). Joonisel on näidatud, et 2-ampriline voolutugevus on juhtmes aja kestel püsiv ja ühesuunaline.



Joon. 8.

Vahelduvvooluks nimetatakse elektrivoolu, mis aja kestel muutub nii oma tugevuselt kui ka suunalt, voolates juhtmesse kord ühest, kord teisest juhtme otsast (joon. 9), kusjuures ta tugevus muutub null-

väärtusest maksimaal- ja uuesti nullväärtuseks. Näide: vool voolab juhtmes d pidevalt muutuva tugevusega esimesel sekundil ab suunas, saavutades seejuures tugevused 0 amprist 2 amprini ja sealt uuesti 0 amprini. Seda voolu liikumist aja suhtes kujutab graafiliselt kõver $a-b$ (joon. 9). Järgmise sekundi jooksul voolab vool ba suunas, muutudes tugevuselt täpselt samuti kui esimesel sekundil, jne. Voolusuuna muutused järgnevad üksteisele võrdsete ajavahemikkude järele, olenevalt vooluallika omadusist. Nii võivad voolusuuna muutused juhtmes olla näit. 10, 100, 1000 ja enam korda sekundis.

Horisontaalteljest ülalpool olevat voolusuunda nimetame **positiivseks** ja allpoolset **negatiivseks** voolusuunaks (vt.

joon. 9). Seda võib eristada aga ka teisiti, märkides ülalpool horisontaaltelge voolusuuna juhtme suhtes paremalt vasakule ja allpool vasakult paremale. (Vaata ka joonis 3.)

Praktikas esineb harva niinimetatud pulseeriv vool, mis on juhtmes alati ühesihiline (joon. 10), kuid muutub tugevuselt pidevalt 0-väärtusest maksimaal- ja uuesti 0-väärtuseks. Mõnikord nimetatakse ka sellist voolu, mille tugevus ebakorrapäraselt muutuv, pulseerivaks vooluks.

§ 3. Elektriline takistus.

Nagu I päätükist mäletame, võivad aine aatomeist eralduda elektronid, mis asetuvad aatomite vahelisse ruumi. Samuti võib aatomeis esineda nõrgalt sidestatud elektrone. Üldiselt nimetatakse sääraseid elektrone **vabuks elektroneks**.

Kõigi algainete aatomeis ei seo südamik elektrone võrdse jõuga; mõnedes on seondus tugevam, mõnedes nõrgem. Nõrgema seondusega aatomeist võib kergesti eraldada üksikuid elektrone. Seetõttu võib vabu elektrone esineda ühes kehas rohkem, teises vähem.

Kehad, mis evivad rohkesti vabu elektrone ja milledes elektronid seetõttu võivad kergesti liikuda, nimetatakse elektrijuhtideks. Normaaloalukorras võivad liikuda ainult vabad ja nõrgalt seotud elektronid, millede liikumine ongi elektrivool. Kehad, milledes leidub vähe vabu elektrone, nimetatakse **isolaatoreiks** või **mittejuhtideks**.

Eristatakse veel **häid** ja **halbu juhte**. Hääd juhid on päämiselt metallid, halvad juhid aga märg riie, märg paber jne.

Eelnenud päätükkidest teame, et elektrivoolu põhjustab elektromotoorne jõud E . Mida suurem on vooluahelas elektromotoorne jõud, seda suurem on selles ahelas ka voolutugevus. Pääle elektromotoorse jõu sõltub voolutugevus veel juhtme elektrilisest **takistusest**. Juhtme takistuse all mõeldakse juhtme omadusi, mis takistavad neis suuremal või vähemal määral elektronide liikumist. Takistuse suurus on igal juhtmel erinev ja oleneb juhtme aine omadusist, s. o. aine aatomstruktuurist. Nii on hõbeda takistus elektrivoolule väga väike, raua takistus seevastu aga suur, ligikaudu 10 korda suurem kui hõbedal. Kuid isolaatorite (kummi, eboniidi jne.) takistused on juhtide takistusist miljoneid kordi suuremad. Elektrotehnikas asendatakse tavaliselt sõna „**juhtmetakistus**“ lihtsalt sõnaga „**takistus**“. Seega tuleb silmas pidada, et mõisted „**juhtme elektriline takistus**“ ja „**takistus**“ on ühtuvad.

Nagu voolutugevuse mõõtühikuks on amper, kehade potentsiaali või pinge mõõtühikuks volt, nii on ka takistuse mõõtmiseks vastav mõõtühik ja nimelt oom (Ω). Elektritakistuse praktiliseks mõõtühikuks peetakse rahvusvaheliselt oomi, mille aluseks on võetud 106,3 sm pikkuse ja 1 mm² põiklõikepinnaga ühtlase elavhõbedasamba elektriline takistus. Oomist tuhat korda suuremaid takistusi mõõdetakse kilo-oomides (k Ω) ja miljon korda suuremaid megoomides (M Ω). Seega

$$1\,000\ \Omega = 1\ \text{k}\Omega$$

$$1\,000\,000\ \Omega = 1\ \text{M}\Omega$$

Tavaliselt mõõdetakse kilo-oomides takistusi tuhandest kuni miljon oomini.

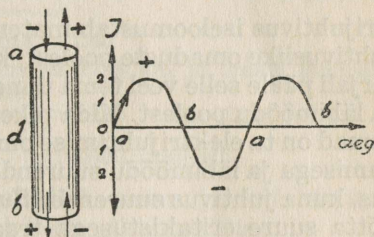
Esinevate erinevuste tõttu iseloomustatakse juhtide takistusi nn. eritakistusega. Eritakistus on arv, mis näitab aine (juhtme) takistust oomides, kui selle mõõted on: pikkus 1 m ja põiklõikepind 1 mm². Suurema eritakistusega ained juhivad

elektrit halvemini, vähema eritakistusega paremini. Tuleb alati vahet teha juhtmetakistuse ja eritakistuse vahel. Juhtmetakistuse all mõistame antud juhtme kogutakistust, kuna eritakistuse võtame ainult kogutakistuse arvutamise aluseks.

Alljärgnevas on toodud praktikas enim tarvitataivate materjalide eritakistused:

Alumiinium	— 0,04	Nikkel	— 0,15
Elavhõbe	— 0,95	Nikeliin	— 0,42
Hõbe	— 0,017	Plaatina	— 0,14
Konstantaan	— 0,5	Raud	— 0,11
Kuld	— 0,022	Teras	— 0,20
Manganiin	— 0,42	Tsink	— 0,06
Süsi	— 100—1000	Tina	— 0,22
Vask	— 0,018		

Vedelike takistus sõltub põlvamiselt neis sisalduvast metallsoolade kvantumist. Seetõttu vedelike eritakistused on väga muutuvad ja neid ei avaldata arvuliselt kindlais suuris. Destilleeritud vesi ja kontsentreeritud happed ei juhi elektrit, nad on isolaatorid. Samuti evib puhas õhk ioniseerimatult isolaatori omadusi.



Joon. 9.

Elektrijuhtivus on pöördvõrdeline suurus takistusele, seega juhtme juhtivus

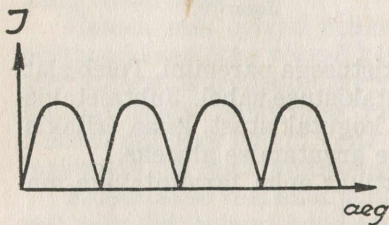
$$G = \frac{1}{R}$$

kus R on juhtme kogutakistus. Sellekohaselt iseloomustataksegi sageli materjali tema elektrijuhtivusega.

Samuti kui juhtivus takistusele, on ka erijuhtivus eritakistusele pöördvõrdeline. Erijuhtivus

$$\lambda = \frac{1}{\rho}$$

Erijuhtivus iseloomustab materjali peamiselt tema elektrijuhtivuslike omaduste poolest, kuna juhtivus iseloomustab materjali päale selle veel tema dimensioonide, s. o. juhtme pikkuse ja läbimõõdu poolest. Mida pikem ja peenem on juhe, seda halvemad on ta elektrijuhtimise omadused. Juhtme pikkuse vähendamise ja läbimõõdu suurendamisega väheneb juhtme takistus, kuna juhtivus suureneb. Suure takistusega juhtmeks tuleb võtta suure eritakistusega traat, nagu nikeliin, konstantaan jne. Väikese takistuse saavutamiseks kasutatakse aga jämedat ja võrdlemisi väikese eritakistusega traati, nagu vask.



Joon. 10.

Päale pikkuse ja eritakistuse oleneb juhtmetakistus suurel määral veel juhtme põiklõikepinnast. Mida peenem on juhe, seda vähem aatomeid asetseb ka

selle põiklõikes. Seetõttu on ka vabu elektroone peenes juhtmes vähe, mis ongi takistavaks põhjuseks elektrivoolule. Jämedam juhe sisaldab suurema põiklõikepinna tõttu vabu elektrone rohkem, seega on ka tema juhtivus parem. Nii näeme, et juhtme põiklõikepinna suurendamisel kasvab juhtmes aatomite, ühtlasi aga ka vabade elektronide arv. Seda nähet ei tohi segada materjali eritakistuse ja juhtivusega. Juhtme jämedus iseloomustab ainult antud juhtmes põiklõikepinna suurendamise tõttu saadud vabade elektronide suhtelist juurdekasvu, kuna eritakistus näitab selle materjali takistuslikke omadusi ja juhtivust, kui selle põiklõikepind on 1 mm^2 .

Seega siis, juhtme põiklõikepinna suurendamisel 2 korda, avaneb elektronidel 2 korda suurem läbipääs ja juhtme takis-

tus väheneb 2 korda. Üldiselt võime öelda, et juhtme takistus on võrdeline juhtme pikkusele ja pöördvõrdeline tema läbilõikepinnale ja arvutatakse valemiga:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{q}$$

kus R on takistus oomides, l juhtme pikkus meetrites, ρ on kasutatava aine eritakistus ja q juhtme põiklõikepind ruutmillimeetris.

Näide:

1) Kui suur on vasktraadi takistus, mille pikkus on 100 m ja põiklõikepind q on 1 mm^2 ?

$$R = l \cdot \rho = 100 \cdot 0,018 = 1,8 \Omega$$

2) Kasutatava raudtraadi pikkus on 1256 km ja traadi läbimõõt $d = 4 \text{ mm}$. Kui suur on traadi takistus?

Traadi põiklõikepind $q = \pi r^2 = 3,14 \cdot 4 = 12,56 \text{ mm}^2$

$$R = \frac{l \cdot \rho}{q} = \frac{1256 \cdot 1000 \cdot 0,1}{12,56} = 10000 \Omega = 10 \text{ k}\Omega$$

Teades juhtme takistuse, põiklõikepinna ja eritakistuse, võime eelpool esinenud valemist leida pikkuse, kus

$$l = \frac{R \cdot q}{\rho}$$

Näide: Raudtraadi takistus on 200Ω ja $q = 6 \text{ mm}^2$.

Kui suur on l ?

$$l = \frac{R \cdot q}{\rho} = \frac{200 \cdot 6}{0,1} = 12000 \text{ m}$$

Samast valemist leitakse ka juhtme põiklõikepind

$$q = \frac{l \cdot \rho}{R}$$

Päale juhtme materjali eriomaduste ja mõõdete sõltub juhtme takistus veel juhtme temperatuurist. Nimelt evivad metallid takistuse suhtes positiivse **temperatuurteguri**, s. t. et metalli temperatuuri tõustes suureneb vastavalt ka selle takistus, kuna temperatuuri langedes ka takistus väheneb. Mitte kõigi ainete takistused ei suurene temperatuuri tõustes. Näiteks süsi ja igasugu vedelikud evivad negatiivse temperatuurteguri, s. t. et temperatuuri tõustes nende takistus väheneb. Mõnel algainel väheneb takistus temperatuuri tõustes ainult teatud piirini, kust edasine temperatuuri tõus tingib juba takistuse suurenemise. Selliste algainete hulka kuuluvad räni, titaan, toorium, tsirkoonium ja mõned väärtmetallide ühendid hapnikuga, väävelhappega jne. On mitmesuguseid sooli, millede takistus temperatuuri tõustes samuti väheneb. Need on hõõguvas olekus hääd juhid, kuigi nad soojendamatuult esinevad isolaatoritena.

Mõnede metallide ühendite juures ei esine temperatuuri tõustes peaaegu mingit takistuse juurdekasvu, nagu mangaan, konstantaan, kroomnikkel jne.

Temperatuurtegur on arv, mis näitab juhtme takistuse juurdekasvu, kui juhtme temperatuur tõuseb 1°C võrra. Järgnevas on toodud mõningate tarvitatavamate materjalide temperatuurtegurid.

Alumiinium	0,0036	Raud	0,0045
Elavhõbe	0,00091	Teras	0,0052
Hõbe	0,0034—0,0040	Tina	0,0042
Manganiin	0,00001	Tsink	0,0037
Uushõbe	0,0002	Volfram	0,0041
Konstantaan	0,000005	Vask	0,0037
Süsi	0,0003—0,0008		

Toodud temperatuurtegurid on kehtivad ainult teatud piirini, sest kui aine temperatuur on tõusnud juba 100°C , omandab ta takistuse juurdekasv temperatuuri jatkuval tõusul õige ebahütlase ilme. Iga aine täpsed temperatuurtegurid, vastavalt nende temperatuurile, saadakse mõõtmiste teel. Näiteks vase täppis temperatuurtegur 30°C juures on 0,00373 ja 50°C juures 0,00347. Soojenenud traadi takistus arvutatakse ligikaudselt järgmise valemi abil:

$$R_t = R [1 + k (T_2 - T_1)]$$

kus R_t on juhtme takistus oomides kõrgema temperatuuri juures, R juhtme takistus enne soojenemist, k temperatuurtegur eelpooltoodud tabelist, T_1 metalli temperatuur enne soojenemist ja T_2 selle temperatuur kuumendatult.

Näide: Raudtraadi takistus on 15°C juures 200Ω . Kui suur on selle takistus 95°C juures?

$$R_t = R [1 + k (T_2 - T_1)] = 200 [1 + 0,0045 (95 - 15)] = 200 \cdot 1,36 = 272 \Omega$$

Ülesande lahendusest nähtub, et temperatuuri tõusuga muutub tunduvalt ka metalli takistus.

Teades temperatuurist tingitud juhtme takistuse muutused, on võimalik kindlaks teha juhtme temperatuur ka kuumendatud olekus. See saadakse valemist:

$$T = T_1 + \left(\frac{R_t - R}{k \cdot R} \right) \text{ (Celsiuse järele)}$$

kus T on juhtme temperatuur kuumendatud olekus, T_1 esialgne temperatuur, R_t juhtme takistus kuumendatud olekus R esialgne takistus ja k temperatuurtegur.

Näide: Vasktraadi takistus 25°C juures oli 50Ω , kuumendatult aga 52Ω . Kui suur on kuumendatud traadi temperatuur?

$$T = T_1 + \left(\frac{R_t - R}{k \cdot R} \right) = 25 + \left(\frac{52 - 50}{0,0037 \cdot 50} \right) = 35,8^{\circ}\text{C}$$

Igas juhtmes, milles voolab elektrivool, tekib soojust. Soojuse hulk sõltub suurel määral voolu tugevusest. Üldse tuleb igasugu elektriseadmete juures hoolt kanda, et nad ei kuume-neks üle ettenähtud normi.

§ 4. Isolaatorid.

Mõningais kehis on elektronid ja prootonid oma asukohta-dega elastselt seotud, mistõttu nad ei saa liikuda ühest molekulist teise. Selliste kehade elektronid võivad ainult molekuli koosseisus ümber paigutada ja seetõttu ei kõlba nad elektri-juhtideks. Nad on **isolaatorid** või **dielektrikud**. Praegu tuntud materjalide hulgas absoluutseid isolaatoreid ei leidu. Ka isolaatoreis on võimalik vähesel määral elektrone liikuma panna, kui sellele mõjuda küllaldaselt suure elektromotoorse jõu E -ga. Sellisel juhul ilmneb elektronide vool ainult hetkeliselt ja taga-järjeks on, et isolaator lõhutakse, või tehnilises kõnekeeles öelduna — lüüakse läbi. Isolaatorid jaotatakse:

- 1) looduslikeks — vilgukivi, kvarts, marmor, puuvill, siid, linaõli, kummi, vaha jne.;
- 2) kunstlikeks — klaas, portselan, trolituul, kaliit, para-fiin, mitmesugused lakid jne.

Isolaatoreid kasutatakse elektrijuhtmete ja elektriliste seadmete üksteisest eraldamiseks. Isolaatoriteta oleks elektrivoolu ilmnenemine võimatu.

§ 5. Oomiseadus.

Ampri ja oomi suurus on täpselt määrateldud ja need on aluseks ka kõigi teiste elektrialaliste mõõtühikute tuletamisel. Nende kahe suuruse kaudu avaldatakse ka voldi suurus. **Selle kohaselt volt on pinge (U) suurus, mis suudab juhtmest takistusega 1 oom*) läbi saata voolutugevuse 1 amper. Selle lause**

- *) 1) Käesolevas on võetud ampri ja oomi aluseks rahvusvaheliselt kindlaks määratud suurused.
 2) On olemas veel absoluutsed praktilised mõõtühikud. Lahkumine nende ja eelmiste vahel on väga väike.
 3) Kõik tehnikas tarvitavad elektri mõõteriistad näitavad rahvusvahelises mõõtühikuis.

põhjal valitseb pingeline, voolutugevuse ja takistuse vahel kindel vahekord.

Kui ühendame 1-oomilise takistusega juhtme mõne vooluallika klemmidega, mille klemmipingeline U on 1 volt, siis eelnenud lause põhjal peab takistust läbiv vool tugevusega 1 amper. Kui suurendame vooluallika klemmipinget U kahe voldini, siis voolab läbi juhtme kaheampriilise tugevusega vool. Nii näeme, et suurendades vooluallika pinget kaks korda, suureneb ka voolutugevus kaks korda. Sellest võime järeldada, et kui mitu korda suurendame vooluallika elektromotoorset jõudu, nii mitu korda suureneb ka voolutugevus, muidugi kui ahela takistus jääb endiseks.

Kui lülida vooluallika klemmide vahele, mille pingeline U on 1 volt, 2-oomiline takistus, siis takistust läbiv vool kahaneb oma tugevusest 0,5 amprini. Seega näeme, et suurendades vooluallika pinget endiseks jäädes, vooluahela takistust, väheneb vastavalt ka voolutugevus ja nii mitu korda, kui mitu korda suurenes takistus.

Voolutugevuse, pingeline ja takistuse suhet väljendatakse oomi seadusega, mis evib järgmised valemilised kujud:

$$I = \frac{U}{R}; \text{ Voolutugevus} = \frac{\text{pingeline}}{\text{takistus}}$$

$$R = \frac{U}{I}; \text{ Takistus} = \frac{\text{pingeline}}{\text{voolutugevus}}$$

$$U = IR; \text{ pingeline} = \text{voolutugevus} \times \text{takistus}$$

kus voolutugevus I on amprites, pingeline U voltides ja takistus R oomides.

Toodud valemis valitsevat seost mõistes, ei tee raskusi kaht liiget tundes kolmanda leidmine.

Näide: 1) Vooluallika pingeline on 4 V. Klemmide vahele lülitatud takistus on 1000Ω. Kui suur on takistust läbiva voolu tugevus?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{4}{1000} = 0,004 \text{ A} = 4 \text{ mA}$$

2) Vooluallika pingeline on 20 V. Kui suur takistus tuleks lülitada vooluahelasse, et takistust läbiva voolu tugevus oleks 50 mA (50 mA = 0,05A).

$$R = \frac{U}{I} = \frac{20}{0,05} = 400 \Omega$$

3) Vooluallika klemmide vahele on lülitatud takistus 28 oomi, mida läbib vool tugevusega 2,5 amprit. Kui suur on vooluallika pingeline?

$$U = I \cdot R = 2,5 \cdot 28 = 70 \text{ V.}$$

Säärasel kujul on oomiseadus kehtiv üksnes alalisvoolu ahelas. Väikeste muudatustega rakendatakse see aga ka vahelduvvoolu ahelasse.

IV. TÖÖ, VÕIMSUS JA KASULIK TÖÖ.

§ 1. Töö.

Energia esineb looduses väga mitmesugusel kujul. Kehis peituvat energiat kasutatakse tööks. Tehtud töö hulk sõltub energia hulgast. Teame ju, et kaks vedurit, evides liikumisel võrdsed koormad ja teepikkused, teevad ka võrdse töö. Kui üks neist sõidab kaugemale, siis teeb see suurema töö. On teepikkused võrdsed ja koormad erineva raskusega, siis suurema töö teeb vedur, mille koorem on raskem.

Töö ilmneb mitmesugusel kujul. Näiteks väljub püssist püssirohu plahvatuse mõjul kuul. Sütiku paneb plahvatama löökvedrust saadud tõuke mõjul lööknõel. Nii püssirohi kui ka löökvedru pinguli tõmmatud olekus, evivad töötagavara ja võivad teha tööd. On selge, et pääle siinnimetatute on veel mitmesuguseid teisi energia ilminguid. Näiteks veeaur paneb tööle aurumasina, elekter elektrimasinad jne.

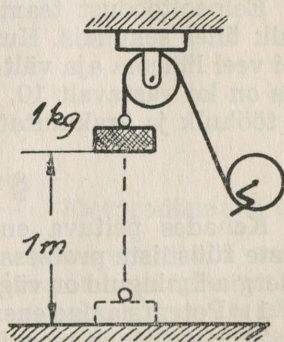
Kõigest eelnenust nähtub, et töö hulk koosneb jõust ja selle liikumisest.

Tööd (A) mõõdetakse **kilogramm-meetreis**. See on töö hulk, mis tehakse, kui tõstetakse ühe kilogrammi raskune koorem ühe meetri kõrgusele (vt. joon. 11). Töö väljendatakse valemis $A = \text{kilogramm} \times \text{meetrid}$.

Näide: 1) Kui tõsta 20 kg raskune koorem 2 m kõrgusele, siis tehtud töö võrdub 40 kg-meetritele.

2) 1000 liitri vee pumpamiseks 10 m kõrgusele on vajalik töö 10 000 kg-m.

Iga töö sooritatakse teatava aja jooksul. Töö võib aja suhtes olla väga erinev ja sõltub suurel määral tööle rakendatud jõust. Näiteks võib üks 1000 liitrit vett ühes tunnis 10 m kõrgusele pumbata, mõnel teisel kuluks selleks aga kaks tundi. Siit näeme, et esimese mehe töövõime oli suurem kui teise.



Joon. 11.

Mida kiiremini töö sooritatakse, seda suurem on töötegiaja töövõime.

Võimsuseks nimetatakse tehtud tööd teatud aegühiku jooksul. Kilogramm-meeter-sekund on seega võimsuse mõõtühikuks. $\left(\frac{kgm}{sec}\right)$

Eelnev on kehtiv peamiselt mehaanilise töö arvestamisel, kus tööd tehakse püsiva võimsusega ja pika aja vältel.

Võimsust mõõdetakse ka hobusejõududes (HJ). Üks hobusejõud võrdub tööle 75 kg/m. Hobusejõud arvestatakse valemist:

$$HJ = \frac{l \cdot P^1}{75 t}$$

Näide: Mitu hobujõudu on tarvis ühetonnilise koorma tõstmiseks ühe minuti jooksul 9 m kõrgusele.

$$HJ = \frac{l \cdot P}{75 t} = \frac{9 \cdot 1000}{75 \cdot 60} = 2$$

Eelpooltoodust teame, et võimsuse mõõtühikuks on tööhulk ühes sekundis. Kui sama töö tehakse 0,1, 0,01 sekundi või veel lühema aja vältel, siis selle töötegiaja hetkeline võimsus on ka vastavalt 10, 100 ja rohkem korda suurem, olgugi et tööhulk ja ära kulutatud energiahulk on sama.

§ 2. Energia.

Kehades peituva energia kasutamine toimub mitmesuguste füüsiliste protsesside kaudu, milledes energia vabaneb. Energia ilminguid on väga mitmesuguseid. Tuntumad neist on:

- 1) Potentsiaalne energia, mida evib keha oma asendi tõttu.
- 2) Kineetiline energia ehk hoog, mida keha evib liikumisel.
- 3) Soojusenergia, mida kasutatakse soojusjõumasinais.
- 4) Keemiline energia, mis vabaneb keemilisis reaktsioones.
- 5) Elektrostaatiline energia, mis ilmneb paigalolevate elektrilaengute-vaheliste tõmbe- või tõuketungide mõjul.
- 6) Elektrodünaamiline energia, mis peitub liikuvais elektronis, s. o. energia, mis peitub **elektrivoolus**. Elektrodünaamiline energia jaguneb veel järgmistesse praktiliselt kasutatavasse alaliigesse:

- a) magnetiline energia, mille põhjustab elektrivool (vaata X ptk.);

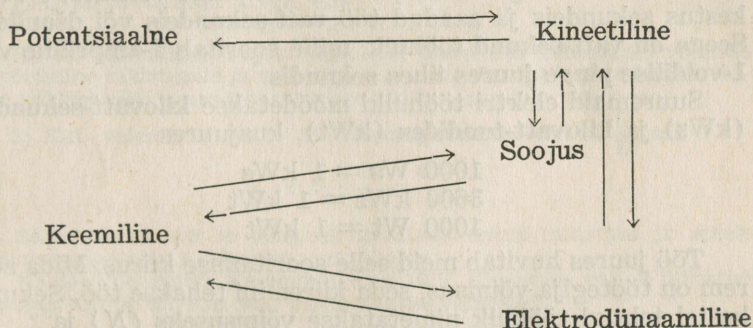
¹⁾ Kus l on koorma liikumise tee meetreis vertikaal pinnas, P koorma raskus kilogrammes ja t aeg sekundeis, mis kulub sellele töö sooritamiseks.

b) kiirgav energia, mida põhjustab muutuv elektromagnetiline väli.

Iga energia-ilming võib teiseks muunduda. Näiteks soojus võib soojusjõumasinal sidurdatud generaatoris muunduda elektrodünaamiliseks energiaks, elektrodünaamiline energia elektrimootoris omakorda kineetiliseks, või vastavais juhtmeis ka soojusenergiaks. Katsete varal on tõestatud, et ükski energia-ilming muundumisel ei kao, vaid selle näilisel kadumisel tekitatakse jälle mõni teine energia-ilming võrdses hulgas kadunule.

Alljärgnevas on toodud mõningaid energia-ilmingute muundumisvõimalusi:

Paigalolevate ja liikuvate kehade energia-ilmingud.



Energia-ilmingute muundumisvõimalused on tabelis nooltega näidatud. Näiteks võib potentsiaalne energia muunduda kineetiliseks, kineetiline soojusenergiaks, soojus keemiliseks energiaks, keemiline omakorda elektrodünaamiliseks energiaks jne. jne. Sellest selgub, et iga energiakuju on võimalik teiseks muundada kui mitte otseselt, siis vähemalt asteastmelt.

§ 3. Elektri töö ja võimsus.

Elektronid pörkuvad oma teekonnal läbi juhtme (joon. 7) alatasa keha aatomite või molekulidega, tõugates neid kiiremini õõtsuma. Seetõttu tõuseb juhtme temperatuur (Joule'i soojus). Juhtme soojenedes hakkavad tema aine osakesed veel kiiremini õõtsuma, põhjustades ühtlasi elektronide pörkumisi. Seetõttu väheneb läbi juhtme liikuvate elektronide kiirus, s. o. elektri voolu tugevus langeb. Selliselt juhtmes teatava tugevusega voolu hoidmiseks kulutatakse vastav hulk elektriener-

giat, mida vooluallikast elektromotoorse jõu abil alatasa juhtmesse juurde tuleb anda.

Vastavate mõõtmiste abil on leitud, et juhtme soojenemine oleneb temas voolava voolu tugevusest. Voolutugevuse määrab juhtmes päämiselt juhtmele mõjuv elektromotoorne jõud. On see suurem, siis on ka vastavalt elektrivool juhtmes tugevam. Selliselt sõltub soojusehulk juhtmes voolutugevusest, juhtme otstele mõjuvast pingest ja voolu kestusest. On selge, et mida suurem on juhtmes voolu kestus, seda suurem on ka tekitatud soojusehulk, s. o. **voolutöö**. Alalisvoolu töö (A) määratakse valemiga, milles

$$A = I \cdot U \cdot t$$

kus I on voolu tugevus ampreis, U on pinge voltides, t voolu kestus sekundeis ja saadud töö **vatt-sekundeis** või **dšaulides**. Seega on **vatt-sekund** **tööhulk**, mille sooritab **1-ampriline vool 1-voldilise pinge juures ühes sekundis**.

Suuremaid elektri tööhulki mõõdetakse **kilovatt-sekundeis** (kWs) ja **kilovatt-tundides** (kWt), kusjuures

$$\begin{aligned} 1000 \text{ Ws} &= 1 \text{ kWs} \\ 3600 \text{ kWs} &= 1 \text{ kWt} \\ 1000 \text{ Wt} &= 1 \text{ kWt} \end{aligned}$$

Töö juures huvitab meid selle sooritamise kiirus. Mida suurem on töötajaja võimsus, seda kiiremini tehakse töö. Sekundi kestel tehtud tööhulk nimetatakse **võimsuseks** (N) ja

$$N = I \cdot U$$

kus I on voolutugevus ampreis, U pinge voltides ja N võimsus vattides. Et saada vooluahelas suuremat võimsust, tuleb suurendada vastavalt elektromotoorset jõudu ja voolutugevust. Voolu võimsuse mõõtühikuks on **vatt** ja

$$1 \text{ vatt} = 1 \text{ amper} \times 1 \text{ volt.}$$

Võimsust mõõdetakse ka **kilovattides** (kW) ja **millivattides** (mW)

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 1000 \text{ W}; & 1 \text{ W} &= 0,001 \text{ kW}; \\ 1 \text{ W} &= 1000 \text{ mW}; & 1 \text{ mW} &= 0,001 \text{ W}. \end{aligned}$$

Näide: 1) Vooluallika klemmipinge on 100 V. Voolutugevus juhtmes on 2 amprit. Kui suur on võimsus?

$$N = 100 \cdot 2 = 200 \text{ vatti.}$$

2) Vooluallikast, mille klemmipinge on 220 volti, võeti 10 tunni kestel 100 amprilise tugevusega voolu. Kui suur oli tarvitatud võimsus, elektri tööhulk ja kui kalliks osutub selline elektrienergia, kui teame, et kilovatt-tund maksab 25 senti?

$$N = U \cdot I = 220 \cdot 100 = 22000 \text{ W} = 22 \text{ kW.}$$

10 tunni kestel tarvitati võimet 22 kW, seega elektri töö hulk

$$A = 22 \cdot 10 = 220 \text{ kWt}$$

ja tarvitatud elektrienergia maksab

$$220 \cdot 25 = 55 \text{ krooni.}$$

Elektrivoolu tööd võib võrrelda ka mõne teise töö ilminguga. Nii vastab näiteks ühele mehaanilisele tööühikule, s. o. kilogramm-meeter-sekundile 9,81 Ws. Seega hobujõud

$$HJ = 75 \cdot 9,81 = 736 \text{ W} = 0,736 \text{ kW}$$

Praegu tarvitatakse igasuguste elektrimasinate võimsuse määritlemiseks vatte ja kilovatte. Öeldakse näiteks, generaatori või mootori võimsus on 0,2 kW, 50 kW jne.

Asendades voolu, võimsuse põhivalemis $N = IU$, I või U nende valemiliste suurustega oomi seadusest, saab võimsusevalem veel järgmised kujud:

1) U on asendatud IR -ga, siis

$$N = I \cdot I \cdot R = I^2 R$$

Sellest valemilisest kujust näeme, et takistuses kuulutatud võimsus on võrdeline takistusele ja voolutugevuse ruudule. Juhtmetes voolukadudest hoidumiseks peavad need evima väikese oomilise takistuse.

2) Kui valemis $N = I \cdot U$ voolutugevus asendada $\frac{U}{R}$, siis

$$N = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R}$$

Selle valemi abil on võimalik arvutada antud takistuse ja sellele mõjuva pinge puhul võimsust vooluahelas.

Näide: Vooluallika klemmpinge on 10 V. Klemmide vahele lülitatud takistus võrdub 2Ω . Kui suur on tarvitatud võimsus?

$$N = \frac{U^2}{2} = 50 \text{ W} = 0,05 \text{ kW}$$

Võimsuse ja takistuse abil on võimalik arvutada voolutugevust ja takistuse otstele (vt. V pt.) mõjuvat pinget järgnevalt:

$$U = \sqrt{N \cdot R} \text{ ja } I = \sqrt{\frac{N}{R}}$$

Igasuguseis valemilisis arvutuisis on tarvitusel põhimõõtühikud, nagu volt, amper, oom, vatt jne. Suurused nagu mW, mA, kW jne. tuleb enne valemisse asetamist ümber arvata põhimõõtühikuiks.

Energia-ilmingute muundumisel läheb teatav hulk energiat, mis kulutatakse soojuseks, hõõrumise ületamiseks jne., kaotsi. Seetõttu pole võimalik ühtegi energiailmingut täielikult teiseks muunduda. Näiteks soojusenergia muundamisel kineetiliseks läheb suur osa soojusest kaotsi masina massi soojendamiseks, osa kiirgab niisama õhku, osa kulutatakse masina liikuvate osade hõõrumise ületamiseks jne. Ainult teatav %

muundatakse kasulikuks tööks, s. o. rihmaratta ringiajamiseks. Selliselt saadud energia on alati väiksem kui kulutatud energia (töö). Nende suhet nimetatakse **kasuteguriks** (η).

$$\text{Kasutegur} = \frac{\text{Saadud töö}}{\text{Kulutatud töö}}$$

Tavaliselt avaldatakse kasutegur protsentides.

Näide: 1) Elektrigeneraatori käivitamiseks kulutatud võimsus on $800 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$

Generaatorist saadakse võimsus $560 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$. Kui suur on kasutegur?

$$\eta = \frac{560}{800} = 0,7 = 70\%$$

2) Elektrimootori käivitamiseks kulutatud võimsus on 3,6 kW. Saadud mehaaniline võimsus on $306 \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$. Kui suur on mootori kasutegur?

1 $\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ mehaanilist võimsust vastab 9,81 vatilise elektrilisele võimsusele, seega saadud mehaaniline võimsus võrdub

$$306 \cdot 9,81 = 3000 \text{ W} = 3 \text{ kW}$$

Kasutegur

$$\eta = \frac{3}{3,6} = 0,833 = 83,3\%$$

Kasutegur on alati vähem kui 1 või vähem kui 100%. Kui oleks võimalik ehitada masinat, mille kasutegur oleks 1, siis lahenduks siiani nii paljudele huvikeskuseks olnud „perpetuum mobile“ küsimus.

Praegu võimalikud saavutatavad kasutegurid on:

- 1) elektrigeneraatoreis kuni 98%;
- 2) elektrimootoreis kuni 96%;
- 3) transformaatoreis 98%.

§ 4. Dšauliseadus.

Sageli võib märgata, et juhe, milles voolab elektrivool, soojeneb. Sellest tuleb järeldada, et elektrienergia muundatakse juhtmes soojuseks. Energia jäävuse seaduse põhjal ei või juhtmes voolavast elektrienergiast midagi kaotsi minna ja see peaks muunduma täielikult soojuseks. Inglise Joule määras hulga katsete varal kindlaks energia-ilmingute muundumisel kaduvate ja tekkivate energiatega vahekorra. Tema katsete tagajärgedest selgubki, et ükski energia-ilming ei kao jäljetult, sest igal näilisel kadumisel tekib mingi teine energia-ilming ekviva-

lentses hulgas näiliselt kadunule. Joule tegi kindlaks, et juhtmes, millele mõjutakse 1-voldilise pingega ja mida läbib 1-amprilise tugevusega vool, tekitatakse sekundi kestes soojus, mis võrdub 0,24 kalorile (cal). **Kalor** on soojusehulga ühik ja näitab soojusehulka, mida on vaja 1 g vee soojendamiseks 1° C võrra.

Kui vooluallika pinge on U volti, voolutugevus I amprit ja t voolu kestus sekundeis, siis juhtmes tekkiv soojuste hulk

$$Q = 0,24 \cdot U \cdot I \cdot t \text{ cal.}$$

Täies ulatuses on see valem kehtiv vaid siis, kui kogu elektrienergia soojuseks muundatakse, nagu see toimub takistus- traades. Vastupidiselt eelnenule muundatakse elektrimasinasis suurem osa elektrienergiat mehaaniliseks tööks, kuna juhtmete soojendamiseks sellest vaid väike osa kulutatakse.

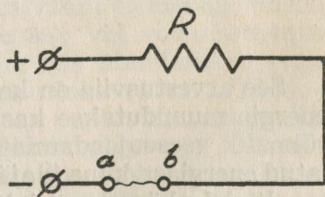
Juhtmes voolu mõjul tekitatava soojusehulga arvutamiseks asendatakse eelmises valemis pinge U , IR -ga ja siis

$$Q = 0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ cal.}$$

See valem kujutab endast dšauliseadust. Tundes suurusi I , R ja t on võimalik välja arvata juhtmes voolu mõjul tekkivat soojusehulka, samuti ka temperatuuri, milleni juhe kuumendub.

Voolu mõjul tekitatud soojust kasutatakse keedunõudes, küttekehades, triikraudades jne.

Dšauliseaduse alusel on konstrueeritud ülivoolu kaitsed. Olgu meil näiteks vooluahel, mida läbiva voolutugevus ei või olla suurem kui 25 amprit. Suurema voolutugevuse puhul vigastatakse juhtmeid ja vooluseadmeid. Selle hädaohu vältimiseks lülitatakse juhtmesse (joon. 12) a ja b vahel peenike juhe, mis suurema voolutugevuse puhul kui 25 amprit niivõrd kuumeneb, et paramatult sulab. Selliselt välditakse voolutarvitaja R ülekoormamine. Sageli kasutatakse voolukaitseks ka vastavaid madala sulamistemperatuuriga metalle, nagu Wood'i metall jt. Voolukaitsele on märgitud, millisele voolutugevusele nad on ehitatud, näit. 220 V 1A; 40 V 6A jne.



Joon. 12.

Elektriseadmeis ja juhtmeis, milledes elektrienergia muundatakse mehaaniliseks tööks, pole soovitatav elektrivoolust tekkiv soojenemine. Liiga suure kuumenemise tagajärjel need võivad rikunduda. Elektrijuhtmete ja seadmete asjatul soojenemisel kulutatakse energiat. Seepärast peavad need juhtmed ja seadised, mida ei kasutata otseselt soojendamise otstarbeks, evima võimalikult väikese takistuse, s. o. nad peavad olema kaovaesed.

Näide: Kui palju kulutatakse elektrivõimsust ühe liitri vee soojendamiseks kuni 100°C 10 min. kestel, kui selle algtemperatuur on 10°C ?

Ühe liitri vee soojendamiseks 1°C võrra on vajalik soojuse hulk 1000 kalorit. Käesoleval juhul tuleb vee temperatuur tõsta 10°C kuni 100°C , s. o. 90°C võrra. Selleks on vaja

$$Q = 90 \cdot 1000 = 90000 \text{ cal.}$$

Ülalarvutatud soojuse hulka on vaja aga tekitada 10 min., s. o. 600 sekundi kestel, seega

$$0,24 \cdot I^2 \cdot R \cdot 600 = 9000 \text{ cal}$$

millest

$$I^2 \cdot R = 625 \text{ W}$$

Seega 1 liitri vee soojendamiseks 90°C võrra 10 min. kestel on vajalik elektrivõimsus 625 W. 220-voldilise võrgupinge puhul on vaja keedunõule soojenduskeha, mille takistus $R = 220/I$. Asendades eelmises valemis R avaldisega $220/I$, saame:

$$625 = I^2 \cdot \frac{220}{I} = I \cdot 220 \text{ ja } I = \frac{625}{220} = 2,84 \text{ A}$$

Keedunõude, elektripliitade jne. soojendamiseks kasutatakse nende otstarbele vastavaid takistustraate. Käesoleval juhul peaks selle traadi takistus olema

$$R = \frac{220}{2,82} = 77,4 \Omega$$

See arvestusviis on kehtiv vaid siis, kui kõik kulutatud energia muundatakse kasutatavaks soojuseks. Keedunõus on võimalik veesoojendamiseks kasutada ainult 55—75% kulutatud energiast, kuna ülejäänud osa haihtub lihtsalt õhku. Vastavalt oleks käesoleval juhul, võttes kasuteguriks 70%, 1 liitri vee soojendamiseks vajalik elektrivõimsus 10 min. kestel

$$N = \frac{100 \cdot 625}{70} = 900 \text{ W}$$

Takistustraades on võimalik tekitada võrdlemisi kõrgeid temperatuure, mis tavaliste abinõudega raskesti saavutatavad.

Nagu juba eelpool seletatud, ei muundu ükski energia-ilming täielikult teiseks energia-ilminguks. Näiteks elektri-

energia muundamisel elektrimasinate abil mehaaniliseks tööks kulutatakse sellest osa energiat juhtmeis dšaulisoojuseks, osa hõõrumise ületamiseks. Hõõrumiskohis muundatakse ka hõõrumise ületamiseks kulutatud energia soojuseks.

Elektrienergia muundumisel soojuseks või mehaaniliseks tööks on kehtivad kindlad vahekorrad. Näiteks üks vatt-sekund või dšaul vastab $\frac{1}{9,81}$ kilogramm-meetrile mehaanilisele tööle sekundis. Seega üks kg-m tööd sekundis võrdub 9,81 vatt-sekundile või dšaulile.

Arvu $\frac{1}{9,81}$ nimetatakse elektrienergia mehaaniliseks ekvivalendiks, nagu see soojuse juures on 0,24.

Elektrivool ja mehaaniline töö on järgmises vahekorras:

1) 1 vatt-sekund annab 0,24 cal soojust sekundis.

2) 1 vatt-sekund annab $\frac{1}{9,81} \frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ mehaanilist tööd sekundis.

3) 1 $\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ annab 9,81 W sekundis.

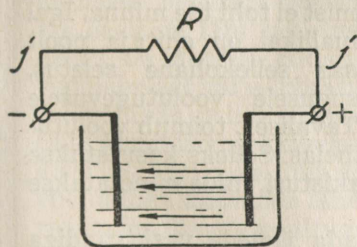
4) 75 $\frac{\text{kgm}}{\text{sec}}$ annab 736 W sekundis.

V. ELEKTRIAHELAD JA NENDE SEADUSED.

§ 1. Elektriahela mõiste.

Kui mingil vooluallikal, näiteks galvaani elemendil, ühendada poolused juhtmega mõne takistuse või voolutarvitaja

kaudu, siis nimetatakse seda vooluahelaks (joon. 13). Joonisel on vooluallika klemmid märgitud pluss- ja miinusmärgiga ja voolujuhtmeid kujutavad $j - j$. Viimased peavad evima võrdlemisi väikese takistuse. R on voolutarvitaja takistus, mida läbiv elektrienergia muundatakse käesoleval juhul soojuseks. Selles vooluallikas surutakse elektromotoorse jõu mõjul negatiivsele elektroodile kogunenud elektronid läbi takistuse R positiivsele elektroodile, kust nad



Joon. 13.

romotoorse jõu mõjul negatiivsele elektroodile kogunenud elektronid läbi takistuse R positiivsele elektroodile, kust nad

läbi vedeliku uuesti uut ringkäiku algavad. Selliselt ringlevad elektroonid moodustavad nn. kinnise vooluahela.

Elektriseadmete juures tehakse vahet välis- ja siseahela vahel. Välisahela moodustavad juhtmed $j - j$ ja R . Siseahela koosseisu kuuluvad aga elektrolüüt ja elektroodid. Nii väliskui ka siseahelas on elektronide liikumisele takistus. Selle kohaselt eristatakse ka **välisahela takistust** (R_v) ja **siseahela takistust** (R_s). Seega koosneb vooluahela üldine takistus R välis- ja siseahela takistuste summast $R_v + R_s$ ja voolutugevus ahelas on sõltuv elektrimootorsest jõust ja üldtakistusest, seega

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{R_v + R_s}$$

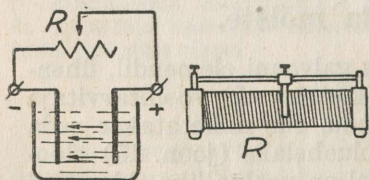
kus I on võetud amprites, E voltides, R_v välis- ja R_s siseahela takistus oomides.

Näide: Elemendi elektromotoorne jõud on 1,5 V. Välisahela takistus $R_v = 7,4$ ja siseahela takistus $R_s = 0,1$. Kui suur on voolutugevus I ?

$$I = \frac{E}{R_v + R_s} = \frac{1,5}{7,4 + 0,1} = \frac{1,5}{7,5} = 0,2 \text{ A}$$

Voolutugevuse määritleb vastavalt eelnenule vooluahela üldtakistus. Suurem osa vooluallikaid evivad võrdlemisi väikese sisetakistuse, mille tõttu ahela voolutugevuse määritlejaks

on peamiselt selle **välisakistust**. Välisakistust nimetatakse veel **koormustakistuseks**. Normaalooskorras võib vooluallikast võtta vaid teatud tugevusega voolu ja lubatud normist ei tohi üle minna. Igal vooluallikal on ehitaja poolt kaasas sellekohane seletus missugusele voolutugevusele

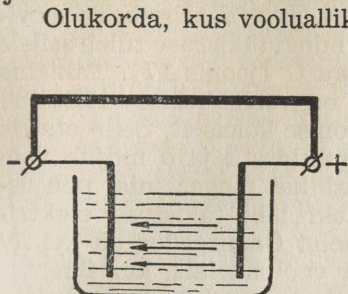


Joon. 14.

ja pingele see on dimensioneeritud. Tavaliselt toimub voolutugevuse ja pinge reguleerimine välisahelas. Selleks kasutatakse tarbekorral muudetava suurusega takistusi, mida nimetatakse reostaatideks (joon. 14).

Kui vooluallika klemmid ühendada jämeda vasktraadiga (joon. 15), siis läbib seda ja elektrolüüti väga suure tugevusega vool. See on tingitud vasktraadi, s. o. välisahela takistuse väiksusest. Seetõttu jääb voolutugevuse päämiseks olen dajaks just sisetakistus, mis iseenesest on väga väike. Nii võe

takse vooluallikast liiga tugevat voolu, mis põhjustab enamal juhtudel vooluallika rikundumise.

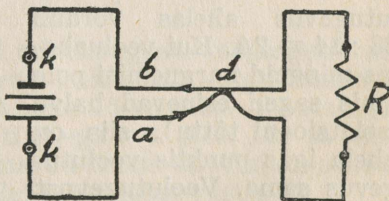


Joon. 15.

Näide: Olgu viimati esitatud näites elementi lubatud koormata voolutugevusega 0,2 amprit. Seega oli maksimaalse koormatuse puhul välisahela takistus 7,4 Ω. Suurendame selle elemendi koormust, s. o. vähendame välisahela takistust 100 korda, siis suureneb ka voolutugevus ja ületab kaugelt lubatud maksimaalse voolutugevuse, kuna siis

$$I = \frac{E}{R_v + R_s} = \frac{1,5}{0,074 + 0,1} = \frac{1,5}{0,174} = 8,5 \text{ A.}$$

Tavaliselt tekivad lühiühendused kõige sagedamini üksteisele lähedal-olevate juhtmete kaudu. Lühiühenduse võib põhjustada kas juhtmete halb isolatsioon või paljasjuhtmete puhul nende halb montaaž. Ühendusjuhtmete *a* ja *b* metallises puutekohas *d* (joon. 16) avaneb elektronele vooluallikasse hõlpsam tagasipääs kui seda oli läbi takistuse *R*. Seega on ühtlasi takistus *R* vooluahelast välja lülitatud ja vooluallikas on lühiühenduses.



Joon. 16.

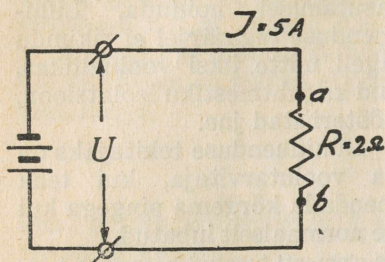
Lühiühendusist tekkivaist rikkeist hoidumiseks lülitatakse ühendusjuhtmetesse võimalikult vooluallika klemmide lähedale voolukaitsed *k* — *k*. Voolu suurenemisel üle normaaltugevuse põlevad kaitsed läbi, vooluahel katkeb ja nii välditakse seadmete rikundumine.

Enne kui voolukaitsed asendada uutega, tuleb leida ja kõrvaldada lühiühenduse põhjused.

¹⁾ ka hõlpuhenduseks.

§ 2. Takistused järjestikku- ja rööbitiühenduses.

Oomiseaduse valemilisest kujust $U = IR$ selgub, et soovitava voolutugevuse saamiseks läbi mingi takistuse tuleb sellele takistusele mõjuda vastava pingega U (joonis 17). Takistus



Joon. 17.

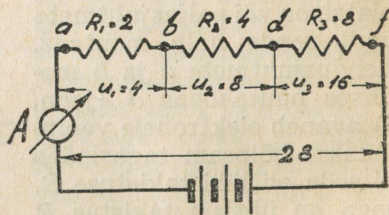
R on vooluahelasse lülitatud joonise kohaselt. Selle otstele punktides a ja b mõjub vooluallika pinge, mis põhjustabki läbi takistuse elektrivoolu. Oomiseadus on kehtiv ka vooluahelais, kus ühe takistuse asemel on järjestikku ühendatud rohkem takistusi. (joon. 18). Elektronid liikudes sellises ahelas läbivad kordamööda takistused R_1 , R_2 ja R_3 . Seetõttu sum-

meeruvad nende takistuse üksikmõjud voolutugevusele ja välisahela üldtakistus

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

Siit selgub, et takistuste järjestikku vooluahelasse lülitamisel üldtakistus võrdub üksikute takistuste summale.

Joonisel 18 esitatud juhul $R = 2 + 4 + 8 = 14$ ja voolutugevus ahelas võrdub $28 : 14 = 2A$. Kui vooluahelas mingeid hargnemisi pole (mis sageli esinevad halva isolatsiooni tõttu), siis on ahela igas punktis voolutugevus sama. Voolutugevust mõõdetakse mõõteriistadega, mida nimetatakse amper-



Joon. 18.

meetriks (A). Ampermeeter lülitatakse vooluahelasse järjestikku takistusega. Joonisel 18 näeme, et vooluallika pinge, mis võrdub $28 V$, mõjub järjestikku ühendatud takistusele punktides a ja f . Oomiseaduse kohaselt peab ka iga üksiku takistuse otstel mõjuma vastav elektromotoorne jõud, et takistusi läbiks elektrivool. Et vaadeldaval juhul välisahel koosneb kolmest üksikust takistusest, siis jaguneb vooluallika pinge vastavalt üksikute takistuste suurusele punktides a , b ja d kolmeks. Takistuste otstele punktides a ja b , b ja d , d ja f mõjuvaid pingeviisi

nimetatakse pingelangusiks. Et takistust R_2 läbiks 2-ampriline vool, peab selle otstele mõjuva pinge suurus olema $I \cdot R_2$, s. o. 2×4 volti. Säärane mõju on saavutatav, kui R_2 otstele rakendame mingi vooluallika, mille pinge on 8 volti, siis oleks selle mõju täiesti identne pingelanguse U_2 mõjuga. Igas ahela osas on voolutugevus ühtlane ja seetõttu kulutatakse suuremale takistusele enam pinget kui väiksemale, s. t. suuremas takistuses tekitatakse suurem pingelangus kui väiksemas. Pingelangus on sama, mis potentsiaalivahe. Pingelangust mõõdetakse voltmeetriga, kusjuures see lülitatakse kahe punkti vahele, mille vahel asub ka takistus ja mida läbib vool. Samuti kui arvutatakse pingelangus takistusele R_2 , leitakse see ka takistusile R_1 ja R_3 . Takistusele R_1 vastab pingelangus U_2 ($2 \times 2 = 4$ V) ja takistusele R_3 pingelangus U_3 ($2 \times 8 = 16$ V). Üksikuile takistusile kulutatud pingelanguste summa peab võrduma üldtakistusele kulutatud pingega, s. o. vooluallika pingega. Seega

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 4 + 8 + 16 = 28 \text{ V.}$$

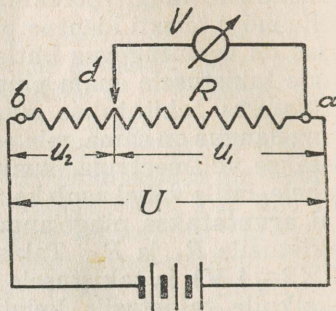
Ülaltoodu kohaselt on üksikute takistuste abil võimalik vooluallika üldist pinget jaotada. Seepärast nimetatakse vooluahelasse järjestikku lülitatud takistusi **pingejaotajaiks**¹⁾. Üksikute takistuste suurust vabalt valides võime saada igasuguse suurusega pinge, mis on küll alati väiksem kui vooluallika elektromotoorne jõud.

Pingejaotajad on vajalikud mitmesuguste tööpingete tarvitajaile, et pinget neile vastavalt kohandada. Olgu meil näiteks voolutarvitajad üks 4- ja teine 16-voldilise tööpingega. Esimese tarvitaja lülime rööbiti R_1 -ga (vt. joon. 18) ja teise R_3 -ga. Takistused R_1 ja R_3 esinevad nende tarvitajate suhtes vooluallikaina, millede klemmidel tekitatakse vastav U .

Teine moodus voolutarvitaja tööerakendamiseks on selle otsene vooluahelasse lülitamine. Kui meil on näiteks voolutarvitaja, mille takistus on 8Ω ja tööpinge 16 V, siis selle tööerakendamiseks lülitame ta vooluahelasse (joon. 18) R_3 asemele. R_1 ja R_2 sellises lülituses nimetatakse eeltakistuseks, milledest voolu läbisaatmisel kulutatakse ülearune pinge 12 V, sest voolutarvitajast 2-amprilise voolu läbisaatmiseks on vajalik ainult 16-voldiline pinge.

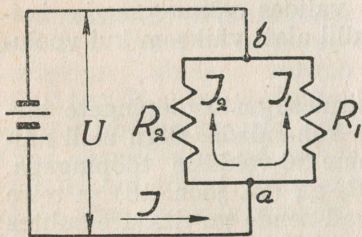
¹⁾ ka potentsiomeetreiks.

On pingajaotajaid, mis ei koosne üksikuist takistustest, vaid kujutavad endast ainult ühte takistust ja on varustatud libiseva kontaktiga (joon. 19). Sellise seadeldise abil on võimalik saavutada kõik pingeväärtused nullväärtuse ja kogu pingesuuruse vahel. Pingemõõtmiseks lülitatakse rööbiti takistusele voltmeter V . Pingesuurus takistuse otsa ja libiseva kontakti d vahel sõltub ahela voolutugevusest ja takistuse suurusest. Mida lähemale libistame takistuse otsale b kontakti d , seda enam suureneb takistus R_1 ja ühtlasi ka U_1 . Kui kontakt d viiakse punkti b , siis $U_1 = U$.



Joon. 19.

Takistuse ahelasse rööbiti lülitamisel läbib vool neid üheaegselt, kuna järjestikku lülitamisel vool läbib takistusi järjekorras. Takistuste rööbiti lülituses mõjub kõigile takistustele nende suurusele vaatamata üks ja sama pinge U . Vooluallikast väljunud elektronid (joon 20) harunevad punktis a kahte ossa, üks osa läbib takistuse R_1 ja teine osa takistuse R_2 . Muidugi kehtib siingi sama tõik, et mida suurem on takistus, seda halvem on selle juhtivus ja seda vähem pääseb sellest antud pinge mõjul elektrone läbi. Takistust R_1 läbiva voolu tugevus $I_1 = U/R_1$, ja takistus R_2 läbiva voolu tugevus $I_2 = U/R_2$. Näeme, et haruvoolude suurus oleneb harutakistuste juhtivusest.



Joon. 20.

Kui näiteks vooluahelasse on lülitatud ainult R_1 , siis seda läbiva voolu tugevus on I_1 . Kui lülime takistusele R_1 rööbiti teise takistuse R_2 , siis läbib seda vool I_2 . Üldine voolutugevus kasvas seega I_2 võrra, millest järeldame, et ahela üldtakistus on vähenenud. III peatükist mäletame, et juhtme takistus väheneb, kui selle läbilõikepind suureneb, või et juhtme läbilõikepinna suurenemisel suureneb ka selle juhtivus. Käesoleval juhul suurenes juhtme läbilõikepind R_2 võrra, mis põhjustas ka ahela juhtivuse suurenemise ja päävool

$I = I_1 + I_2$. Avaldades haruvoolud (I_1 ja I_2) pinge ja takistuste kaudu, saame

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

Avaldust $\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ võib vaadelda kui üht takistust ja et R_1 ning R_2 kogumõju moodustabki ahela üldtakistuse R ja ahela üldvoolu tugevus $I = U/R$. Asendades valemis $I = I_1 + I_2$, I , I_1 ja I_2 nende väärtustega oomiseadusest, saame

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

ja jagades ülaltoodud võrrandi U -ga, saame

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \text{ kust } R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Saadud valemi abil arvutataksegi kahe rööbiti lülitatud takistuse üldtakistus. Kui ahelas on lülitatud rööbiti kaks võrdset takistust ($R_1 = R_2$), siis ahela üldtakistus

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_2 + R_1} = \frac{R_1 \cdot R_1}{2R_1} = \frac{R_1}{2}$$

Nii näeme, et kahe võrdse takistuse rööbiti-lülituses on nende üldtakistus poole vähem kui üks neist takistusist.

Näide: 1) Vooluahelas on rööbiti-lülituses kaks takistust

$R_1 = 1000 \Omega$ ja $R_2 = 1 \Omega$. Kui suur on R ?

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1000 \cdot 1}{1001} = 0,99 \text{ oomi}$$

2) Vooluahelas on rööbiti-lülituses kaks ühesugust valgustuslampi. Neist ühe takistus on 1000Ω . Kui suur on üldtakistus?

$$R = \frac{R_1}{2} = \frac{1000}{2} = 500 \text{ oomi.}$$

Kui vooluahelasse on rööbiti lülitatud rohkem kui kaks takistust, tähendab $R_1, R_2 \dots R_n$, siis läbib neid samuti iga takistuse suurusele vastav voolutugevus ja üldvoolu tugevus

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n$$

Avaldades voolu suurused oomiseaduse alusel pinge ja takistuse kaudu, saame

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \dots + \frac{U}{R_n} \text{ ja}$$

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

Ülaltoodust nähtub, et ahela üldjuhtivus võrdub üksikute rööbiti lülitatud takistuste juhtivuste summale. Selle valemi abil on võimalik arvutada ükskõik kui suure arvu rööbiti lülitatud takistuste üldtakistust.

Kui lülitada vooluahelasse rohkem kui kaks näit. n võrdset takistust, siis on selle ahela üldjuhtivus

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \cdot \cdot \cdot + \frac{1}{R_n},$$

et aga $R_1 = R_2 = R_3$, siis

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1} \cdot \cdot \cdot + \frac{1}{R_1} = \frac{n}{R_1}$$

ja ahela üldtakistus

$$R = \frac{R_1}{n}$$

s. t. et rööbiti-lülituses on võrdsete takistuste kogutakistus väiksem üksiku takistuse takistusest nii mitu korda, kui palju on võrdseid takistusi rööbiti lülitatud.

Näide: 1) Vooluahelasse on rööbiti lülitatud 5 takistust à 1 k Ω . Kui suur on R ?

$$R = \frac{R_1}{n} = \frac{1 \cdot 1000}{5} = 200 \Omega$$

2) Vooluahelas on rööbiti-lülituses kolm takistust $R_1 = 10 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ ja $R_3 = 40 \Omega$. Kui suur on R ?

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{40} = \frac{7}{40}; \quad R = \frac{40}{7} = 5,71 \Omega$$

3) Vooluahelasse on rööbiti lülitatud 2 valgustuslampi à 44 vatti. Kui suur on ahela üldtakistus ja lampe läbiva voolu tugevus, kui võrgu pingeline on 220 volti?

Lampides tarvitatud võimsus võrdub $44 + 44 = 88$ vatti ja

$$88 = U \cdot I = 220 \cdot I$$

sellest üldvoolu tugevus

$$I = \frac{88}{220} = 0,4 \text{ A}$$

ja üldtakistus

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0,4} = 550 \Omega$$

4) Vooluahelasse on lülitatud rööbiti takistused $R_1 = 4 \Omega$ ja $R_2 = 6 \Omega$. Nendega on järjestikku lülitatud takistus $R_3 = 1,6 \Omega$ (joon. 21). Kui suur on ahela üldtakistus ja voolutugevus, kui vooluallika pinge on 12 volti?

Kõigepeält leiame rööbiti lülitatud takistuste R_1 ja R_2 kogutakistuse R^1

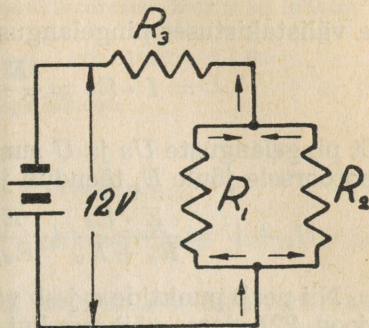
$$R^1 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6 \cdot 4}{6 + 4} = \frac{24}{10} = 2,4 \Omega$$

Takistusega R_1 ja R_2 on järjestikku takistus R_3 . Seega vooluallika üldtakistus $R = R_1 + R_3 = 2,4 + 1,6 = 4 \Omega$.

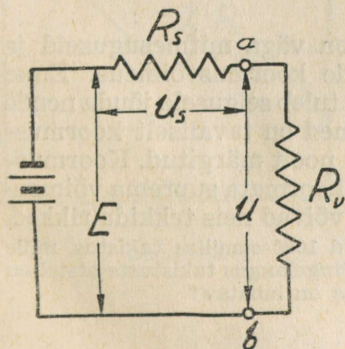
Ahelat läbiva voolu tugevus

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{4} = 3 \text{ A}$$

Vooluallika koormamisel kulutatakse osa elektromotoorsest jõust vooluallika sisetakistuse ületamiseks ja seetõttu on klemmpinge elektromotoorsest jõust väiksem. **Klemmpinge U võrdub elektromotoorsele jõule ainult siis, kui vooluallikast voolu ei võeta.**



Joon. 21.



Joon. 22.

Joonisel 22 on vooluallika sisetakistus märgitud R_s -ga ja pingelangus selles takistuses U_s -ga. Mida väiksem on koormustakistus R_v , seda suurem on voolutugevus ahelas. Tugevama voolu puhul tekitatakse sisetakistuse R_s ka suurem pingelangus U_s . Seega väheneb paratamatult klemmpinge. Ahela voolutugevuse piiritleb selle ahela sise- ja välistakistuse summa, seega

$$I = \frac{E}{R_s + R_v}$$

Saadud voolutugevuse alalhoidmiseks kulutatakse sisetakistusele ja välistakistusele kogu vooluallika elektromotoorne jõud.

Sisetakistuses pingelangus

$$U_s = I \cdot R_s = \frac{E \cdot R_s}{R_s + R_v} = \frac{R_s}{1 + R_v/R_s}$$

ja välistakistuses pingelangus

$$U = I \cdot R_v = \frac{E \cdot R_v}{R_s + R_v} = \frac{E}{1 + R_s/R_v}$$

Et pingelanguste U_s ja U summa võrdub vooluallika elektromotoorsele jõule E , tõendub järgmiselt:

$$U_s + U = \frac{E \cdot R_s}{R_s + R_v} + \frac{E \cdot R_v}{R_s + R_v} = \frac{E(R_s + R_v)}{R_s + R_v} = E$$

Nii peab punktide a ja b vahel välisahelale mõjuv pinge U (joon. 22) olema väiksem kui elektromotoorne jõud E . Pingelangus U suureneb vooluallika välisahela takistus R_v kasvamisel ja võrdub vooluallika elektromotoorsele jõule siis, kui avaldus $R_s/R_v = 0$. Seega peab suurema klemmpinge saamiseks vooluallika sisetakistus olema võimalikult väike, või välisahela takistus väga suur.

Vooluallika siseahelas kulutatud võimsus $N_s = I \cdot U_s$ ja välisahelas kulutatud võimsus $N_v = I \cdot U$. Välisahelas saavutame maksimaalse võimsuse siis, kui välisahela takistus R_v võrdub siseahela takistusele R_s . Sel juhul $R_s/R_v = 1$ ja klemmpinge $U = E/2$.

Vooluallika koormustakistusi on väga mitmesuguseid ja sellele vastavalt kujuneb ka nende koormusvõimsus. Enne koormustakistuste tarvituselevõttu tuleb selgusele jõuda nende koormusvõimsuses. Vastavad andmed on tavaliselt koormustakistustele juba nende valmistajate poolt märgitud. Koormustakistusi (voolutarvitajaid) ei tohi koormata suurema võimsusega kui see ette nähtud on, muidu võivad neis tekkida rikked.

Näide: 1) Vooluahelasse on lülitatud 1000-oomiline takistus, mille maksimaalne koormus võib olla 1 vatt. Pingelangus takistuste otstel on 100 volti. Kas takistuse koormusvõimsus on lubatav?

Takistust läbib vool, mille tugevus

$$I = \frac{U}{R} = \frac{100}{1000} = 0,1 \text{ A}$$

ja sellele kulutatav võimsus $N = I^2 \cdot R = 0,1^2 \cdot 1000 = 10 \text{ W}$.

Nagu arvutustest nähtub, on praegusel juhul takistus üle koormatud 10-kordselt, mis on lubamatu, sest liigselt kuunedes muutub takistus tarvitamiskõlbmatuks. Käesoleval

juhul tuleb 1-vatilise takistuse asemel kasutada 10-vatilist takistust.

Näide: 2) Takistust $100 \text{ k}\Omega$, mille lubatav koormusvõimsus on $0,5 \text{ W}$, läbib vool tugevusega 2 mA . Kas kujunev koormusvõimsus on lubatav?

$$\text{Võimsus } N = I^2 \cdot R = \left(\frac{2}{1000}\right)^2 \cdot 100 \cdot 1000 = 0,4 \text{ W}$$

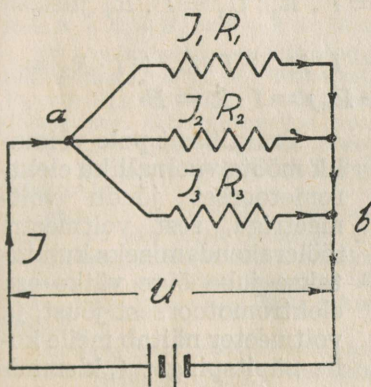
mis on lubatavast koormusvõimsusest väiksem.

§ 3. Kirchhoffi seadused.

Eelmises osas seletatu on kokkuvõtlikult väljendatud Kirchhoffi seadustega.

Kirchhoffi I seadus väidab, et kõigi ühte punkti voolavate voolude summa võrdub säält äravoolavate voolude summale, seega

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \dots + I_n$$



Joon. 23.

Joonisel 23 on punktide a ja b vahel voolule avatud kolm teed ja seetõttu üldvool I jaguneb punktis a kolme harru ning $I = I_1 + I_2 + I_3$. Haruvoolude tugevused on oomi-seaduse põhjal sõltuvad harutakistuste suurusist. Et punktide a ja b vahel mõjub kõigile kolmele takistusele üks ja sama pinge, siis

$$U = I_1 R_1$$

$$U = I_2 R_2$$

$$U = I_3 R_3$$

kust

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3$$

ja

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1; \quad I_2 : I_3 = R_3 : R_2$$

seega

$$I_1 : I_2 : I_3 = R_3 : R_2 : R_1$$

Nii näeme, et haruvoolude tugevused on pöördvõrdelised nende takistustele. Seega väiksemat takistust läbib tugevam ja suuremat nõrgem vool.

Kirchhoffi II seadus väidab, et vooluahelas võrdub üksikutes järjestikku lülitatud takistustes tekitatud pingelanguste summa vooluallika elektromotoorsele jõule, s. o.

$$E = U_s + U_1 + U_2 + U_3 \dots + U_n$$

Selle kohaselt arvutatakse ka pingelangus sisetakistuses R_s .

Voolutugevuse vooluahelas määrab ahela üldtakistus ja elektromotoorne jõud E (joon. 24).

Joonisel 24 esineval juhul üldtakistus

$$R = R_s + R_1 + R_2 + R_3$$

Kui vooluahelas oleks järjestikku-lülituses kui palju tahes takistusi, siis üldtakistus

$$R = R_s + R_1 + R_2 \dots + R_n$$

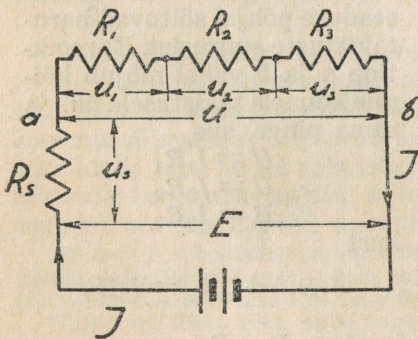
ja voolutugevus

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{R_s + R_1 + R_2 + R_3 + R_n} \dots$$

Joonisel 24 toodud lülituses on voolutugevus igas ahela punktis sama. Seega pingelangused üksikuis takistustis

$U_s = I \cdot R_s$; $U_1 = I \cdot R_1$; $U_2 = I \cdot R_2$; $U_3 = I \cdot R_3$ jne. millest

$$\begin{aligned} U_s + U_1 + U_2 + U_3 &= I \cdot R_s + I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 = \\ &= I(R_s + R_1 + R_2 + R_3) = I \cdot R = E \end{aligned}$$



Joon. 24.

Praktiliselt pole võimalik mõõta vooluallika elektromotoorset jõudu voltmeetriga, sest voltmeetri töölerakendamiseks kulutatakse juba õige väike osa elektromotoorsest jõust, ja voltmeeter näitab meile kohe näpitspinget („klemmipinget“ asemel tarvitatakse ka „näpitspinge“). Tegelikult arvestataksegi vooluallikate kasutamisel näpitspingega, mille kohta kehtib samuti seadus:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \dots + U_n$$

Üldiselt on vooluallika näpitspinge suurel määral sõltuv koormustakistusest. Isegi suuril vooluallikail, näit. linnade elektrijaamadel väheneb koorma suurenedes näpitspinge. Nor-

maalse voolutarvituse puhul püsib see siiski enam-vähem konstantsena. Suuremais jõujaamus rakendatakse näpitspinge teataval kõrgusel hoidmiseks tööle veel automaat lisaseadeid.

Näide: 1) Vooluahelasse on rööbiti lülitatud takistused $R_1 = 4 \Omega$ ja $R_2 = 8 \Omega$. Voolutugevus $I = 6$ A. Kui suured on haruvoolude tugevused?

Haruvoolude tugevused on pöördvõrdelised harutakistustele, seega

$$I_1 : I_2 = R_2 : R_1 = 8 : 4$$

Nii peab takistust R_1 läbima 8 osa ja takistust R_2 4 osa üldvoolust. Seega

$$I_1 = \frac{6 \cdot 8}{8+4} = 4 \text{ A ja } I_2 = \frac{6 \cdot 4}{8+4} = 2 \text{ A}$$

2) Vooluahelasse on järjestikku lülitatud kolm takistust, $R_1 = 6 \Omega$, $R_2 = 8 \Omega$ ja $R_3 = 10 \Omega$. Kui suured on pingelangused üksikutes takistustes ja kui suur on näpitspinge, kui voolutugevus ahelas võrdub 2 A.

Pingelangused üksikuis takistustis on:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 6 \cdot 2 = 12 \text{ V}$$

$$U_2 = R_2 \cdot I = 8 \cdot 2 = 16 \text{ V}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I = 10 \cdot 2 = 20 \text{ V}$$

Vooluallika näpitspinge leitakse ahela üksikute pingelanguste liitmisel:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 = 12 + 16 + 20 = 48 \text{ V.}$$

Näpitspinget on võimalik leida ka üldise takistuse ja voolutugevuse kaudu.

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 6 + 8 + 10 = 24 \Omega \text{ ja } U = R \cdot I = 24 \cdot 2 = 48 \text{ V.}$$

3) Vooluahelasse on lülitatud joonis 25 kohaselt neli takistust. Vooluallika pinge on 12 V. Takistuste suurused on: $R_1 = 0,4 \Omega$, $R_2 = 2 \Omega$, $R_3 = 8 \Omega$ ja $R_4 = 2 \Omega$. Leida ahela üldtakistus, üldvoolutugevus, voolutugevused läbi üksikute takistuste ja pingelangused üksikuis takistustis.

Punktis *a* haruneb vool kaheks: üks osa läbib takistuse R_1 , harunedes punktis *d* uuesti kaheks, millest siis osa läbib takistuse R_3 ja osa R_4 . Teine osa läbib takistuse R_2 .

Leiame alul rööbiti lülitatud takistuse R_3 ja R_4 mõjutakistuse R' .

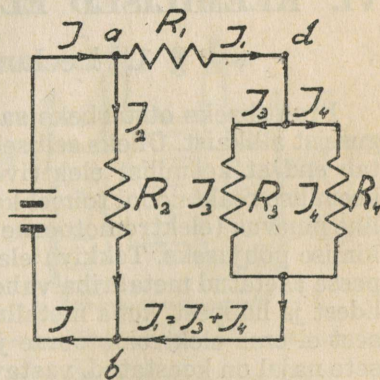
$$R' = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{8 \cdot 2}{8 + 2} = 1,6 \Omega$$

Leitud mõjutakistus on järjestikku takistusega R_1 . Seega parempoolse harutakistus

$$R'' = R' + R_1 = 1,6 + 0,4 = 2 \Omega$$

Parempoolse haru mõjutakistus R'' on rööbiti takistusega R_2 . Takistused R'' ja R_2 on võrdsed, seega ahela üldtakistus

$$R = \frac{R_2}{2} = \frac{2}{2} = 1 \Omega$$



Joon. 25.

Ja ahela üldvoolutugevus

$$I = U/R = 12/1 = 12 \text{ A}$$

Parempoolset haru läbiva voolu tugevus $I = U/R'' = 12/2 = 6 \text{ A}$.
Vasakpoolset haru läbiva voolu tugevus $I = U/R_2 = 12/2 = 6 \text{ A}$.

Seega läbib takistusi R_1 ja R_2 , 6-amprilise tugevusega vool. Takistust R_1 läbiv vool hargneb punktis d takistusele R_3 ja R_4 . Viimaseid läbiv vool I_3 ja I_4 on pöördvõrdelise tugevusega nende takistusele.

Seega

$$I_3 : I_4 = R_4 : R_3 = 2 : 8$$

millest

$$I_3 = \frac{6 \cdot 2}{8 + 2} = 1,2 \text{ A ja } I_4 = \frac{6 \cdot 8}{8 + 2} = 4,8 \text{ A}$$

Pingelangused üksikuis takistuis saame järgmiselt:

$$U_1 = R_1 \cdot I = 0,4 \cdot 6 = 2,4 \text{ V; } U_2 = R_2 \cdot I_2 = 2 \cdot 6 = 12 \text{ V.}$$

$$U_3 = R_3 \cdot I_3 = 8 \cdot 1,2 = 9,6 \text{ V; } U_4 = R_4 \cdot I_4 = 2 \cdot 4,8 = 9,6 \text{ V.}$$

Seega punkti a ja b vahel mõjub vooluallika näpitspinge, punktide a ja b vahel aga viimasest pingelanguse U_1 võrra väiksem pinge.

Kui harutakistustele mõjuva pinge suurus on teada, siis on harutakistuste voolutugevused arvatavad lihtsalt oomiseaduse järgi.

Näit. ülesande lahendamisel leidsime, et punktide d ja b vahel mõjub pinge 9,6 volti, seega harutakistuste R_3 ja R_4 voolutugevused

$$I_3 = \frac{U_d}{R_3} = \frac{9,6}{8} = 1,2 \text{ A ja } I_4 = \frac{U_d}{R_4} = \frac{9,6}{2} = 4,8 \text{ A}$$

VI. KEEMILISED ELEKTRIVOO LUALLIKAD.

§ 1. Leclanchéelemendid.

Praktiliseks otstarbeks saadakse elektrienergiat mitmesuguseist allikaist. Üheks selliseks on **galvaanielement**, mis kujutab endast keemilist elektrivooluallikat, sest siin tekitatakse keemilise reaktsiooni toimel kahe erineva metalli vahel elektriline pinevus (elektromotoorne jõud), mis ongi elektrivoolu tekkimise põhjuseks. Tekkiva elektrilise pinevuse aste kahe happesse asetatud metallriba vahel sõltub ainult kasutatud metallidest ja hapest, kuna metallribade suurus ja kaugus teineteisest ei oma elektromotoorse jõu suursele mingit mõju. Katsete najal on koostatud, vastavalt happeile, pinge tekitamiseks kõlbulikkude olluste elektrilised read.

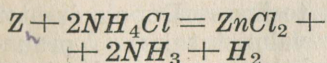
Salmiaaklahuse puhul on elektrilisse ritta kuuluvaist olluseist tähtsamad tsink, seatina, raud, vismut, koobalt, arseen, vask, antimon, plaatina, elavhõbe, süsi, tinaläige, grafiit ja pruunkivi. Sellesse ritta kuuluva kahe olluse vahel tekitatud elektriline pinevus on seda suurem, mida kaugemal nad reas

teineteisest asetsevad. Elektronid kogunevad alati sellest ollu-
sest elektroodile, mis asetseb reas eespool ja nii on see siis
negatiivseks elektroodiks. Näiteks võttes elektroodideks tsingi
ja raua, koguneksid elektronid elektrolüüdis tsinkribale. Tek-
kiv elektromotoorne jõud oleks võrdlemisi väike, sest nimeta-
tud metallid asetsevad elektrilises reas lähestikku. Kui elekt-
roodideks kasutada rauda ja grafiiti, oleks negatiivseks elekt-
roodiks raud ja positiivseks grafiit. Nende vahel tekitatud
pinevus oleks juba palju suurem. Kui mõlemad elektroodid on
ühest ollusest, näiteks tsingist, siis nende vahel elektrilist pine-
vust ei teki.

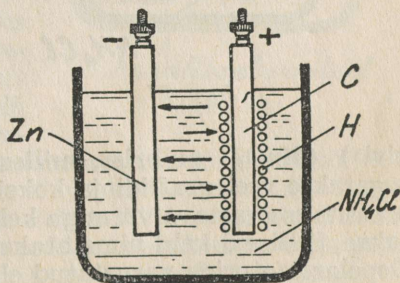
Toodud elektrilisest reast nähtub, et kõige suurem elektro-
motoorne jõud saavutatakse tsingi ja pruunkivi kasutamisel.
Viimast kombinatsiooni kasutatakse meil levinenud nn. leclan-
ché-tüübilistes elementides. Tegelikul kasutusel eristatakse
neid järgmiselt: märjad, kuivad ja täidetavad leclanché-ele-
mendid.

Lihtsaim leclanché-element on märg element (joon. 26
ja 27). Klaasnõusse on asetatud kaks elektroodi, kusjuures
tsink (Zn) on negatiivne ja süsi (C) positiivne elektrood.
Elektrolüüdiks on salmiaaklahus (NH_4Cl), millesse elemendi
töötamise ajal tekib veel lisandina klooritsink ($ZnCl_2$).

Kui elemendi elektroodid ühendada metalliliselt, s. o. mingi
koormustakistuse kaudu, siis tekib elemendis keemiline reakt-
sioon, mille toimel keemili-
ne energia muundub elekt-
riliseks energiaks. Reakt-
sioon on järgmine:

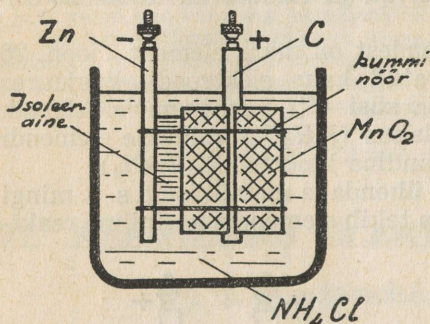


Toodud reaktsioonis tõr-
jub tsink salmiaaklahusest
välja ammoniaagi (NH_3)
ja vesiniku (H). Tsink, as-
tudes väljatõrjutud ammo-
niagi ja vesiniku asemele,
ühineb klooriga, tekitades
klooritsingi. Reaktsiooni
toimel vabanevad elektro-
nid ja kogunevad vedelikust tsingile, tekitades tsingi ja söe
vahel elektrilise pinevuse, mille mõjul elektronid surutakse
tsingilt läbi välisahela söele ja säält uuesti elektrolüüti jne.



Joon. 26.

Kui muuta välisahela koormust suuremaks, siis muutub ka reaktsioon elemendis intensiivsemaks, mille mõjul vabaneb rohkem vesinikku. Sama nähe ilmneb, kui võtta elemendist voolu pikema aja kestel, ka siis on vabanenud vesniku hulk suur. Vabanenud vesinik ladestub söepulgale mullikestena (joon. 26) kattes nii söepulga pinna. Söepulga vesinikumullikestega kattumise tõttu isoleerub söepulk elektrolüüdist ja elemendi sisetakistus tõuseb. Selle nähte tagajärjel lakkab element lõpuks töötamast. Elemendi töökorras hoidmiseks tuleks voolu tarvitamisel positiivsele elektroodile kogunev vesinik hävitada. Seda protsessi võib vaadelda veel järgmiselt: Vabanenud vesinik tekitab tsiingiga salmiaaklahuses omakorda elektromotoorse jõu, mis on aga suunatud vastupidi algvoolule, s. o. elektronide voolule. Seda nähet nimetatakse **polarisatsiooniks**. Polariseerimise tõttu pole joonisel 26 toodud element suuteline pikema

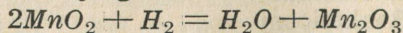


Joon. 27.

aja kestel püsivat voolu andma.

Polariseerimise nähte vältimiseks peab reaktsiooni mõjul vabanenud vesiniku osakesed juba enne nende söeribale jõudmist kõrvaldama. Selleks ümbritsetakse söeriba hapnikurikka olusega (joon. 27), mida nimetatakse **depolarisaatoriks**. Depolarisaator valmistatakse pruun-

kivi¹⁾ (MnO_2) pulbrist, millesse juhtivuse suurendamiseks segatakse veel grafiidi ja koksi puru. Nii koostatud segust pressitakse vastava vormiga kehad, millega söeriba ümbritsetakse. Selliseid kehi nimetatakse vahest ka aglomeraatideks. Depolarisaatoriga varustatud elemendis ühinevad elektrolüüdist söeribale liikuvad vesiniku osakesed juba enne sellele jõudmist pruunkivi vaba hapnikuga, tekitades vee (H_2O). Reaktsiooni käik on järgmine:



Nagu nähtub reaktsioonist, kulutatakse elemendi töötamisel tsinki, pruunkivi ja salmiaaklahust. Seega oleneb elemendi

¹⁾ Mangaandioksiid.

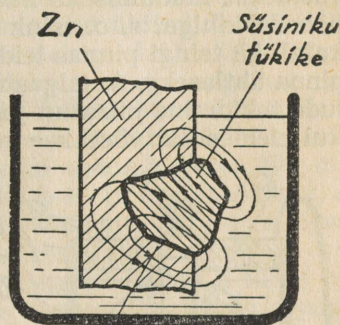
eluiga sellest võetavast voolutugevusest ja voolu tarvitamise kestusest. Suure voolutugevuse puhul kulutatakse ülalnimetatud olluseid kiiremini ja element tühjeneb lühema ajaga.

Reaktsiooni mõjul vabanevast ammoniaagist koguneb osa söele, osa haihtub õhku ja osa ühineb veega, tekitades ammoooniumhüdrosüüdi (NH_4OH). Viimane ühineb omakorda elektrolüüdis lahustunud tsingiga, tekitades tsinksooli, mis elemendi juures tuntud nn. roomavate sooladena. Need soolad põhjustavad elemendi sisetakistuse suurenemise.

Üldiselt pole leclanché-tüübilised elemendid suutelised andma tugevat voolu pikema aja kestel, kuigi nad on varustatud depolarisaatoriga. Tugeva voolu puhul on vesinikueraldumine niivõrd intensiivne, et depolarisaator ei jõua tekkivat vesinikku korruga siduda ja nii kattub süsi vesinikuga, mistõttu langeb ka elemendi näpitspinge. Katkestades vooluahela mõneks minutiks, kõrvaldub vesiniku mõju ja element töötab jällegi endiselt.

Märja elemendi töövalmis seadmiseks kasutatakse keedetud leiget vett, milles on lahustatud ühe liitri vee peale 40—60 g salmiaaki. Elemendis tekkivate roomsoolade vältimiseks kaetakse elektrolüüdist väljaulatuvad elektroodid ja nõu seesmised seinad õhukese vaseliini või parafiini kihiga. Ajajooksul äraauranud vee asemele kallatakse destilleeritud või keedetud vett. Umbes $-10^{\circ}C$ juures külmub elektrolüüt. Aastas tuleb elementi kaks korda puhastada ja elektrolüüti uuendada. Puhastamisel pestakse kõik elemendi osad keedetud leige veega puhtaks ja alles siis võidakse asuda selle uuesti tarvitamisele. Aglomeraadid peavad vastu umbes 1,5 aastat; selle aja kestel tarvitatakse tavaliselt nendest vaba hapnik ja nad muutuvad kõlbmatuks. Tsinkriba võib kasutada kuni tast veel veerand alal.

Tavaliselt pole elementides kasutatav tsink keemiliselt puhas, tas leidub lisandina süsinikku, rauda jm. Kui selline tsinkriba asetada elektrolüüti, siis tekib tsingi ja selle lisandite vahel keemiline reaktsioon, mille tagajärjel ilmnevad nn. ko-



Kohalikud voolud

Joon. 28.

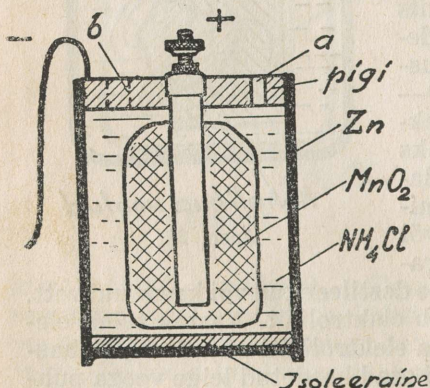
halikud voolud. Neid lisandeid võib tsingi pinnas olla paljudes kohtades ja need mõjuvad siis kui üksikud väikesed elemendid.

Joonisel 28 on näidatud tsinkriba, milles on lisandina süsinikku. (Suurema selguse saavutamiseks on see süsiniku tükike siin võetud tegelikkusega võrreldes hoopis suurem.) Tsinkriba selles kohas tekitatakse süsiniku ja tsingi vahel elektromotoorne jõud, mis põhjustab elektri voolu tsingilt läbi vedeliku süsinikule, säält uuesti tsingi ja süsiniku puutekohtade kaudu. Need voolud töötavad kasutatavale elektronide voolule vastu ja seega langeb välisahelas voolutugevus. Kohaliku reaktsiooni tõttu kulutatakse tsinki ka siis, kui elemendist voolu ei võeta.

Keemiliselt puhta tsingi puhul need nähted ei ilmne, kuid viimane on liiga kallis elementide valmistamiseks. Kohalikest vooludest hoidumiseks kaetakse harilik tsink õhukese elavhõbeda kihiga, s. o. tsink amalgaamitakse. Elavhõbeda kiht katab ka tsingi pinnas leiduvad lisandid, muutes seega tsingi pinna ühtlaseks. Amalgaamitud tsingi puhul on kohalike voolude tekkimine piiratud ja tsinki satub lahusesse ainult siis, kui elemendist võetakse voolu. Üldiselt peab aga ütlema, et amalgaamimine ei kõrvalda kohalike reaktsioonide võimalusi täiel määral.

Märka elementi kasutatakse paikseadistes, näit. signaalkellade, seinatelefoniparaatide jne. töölerakendamiseks. Kaasaskandmiseks ja vedamiseks pole nad aga sobivad. Viimaseks otstarbeks on kohased kuivad ja täidetavad elemendid.

Kuiv element koosneb tsinknõust (joon. 29), millesse on asetatud elektrolyüt (NH_4Cl) ja söepulka



Joon. 29.

depolarisaatoriga (C ja MnO_2). Tsinknõu on ühtlasi ka elemendi negatiivseks elektroodiks. Positiivseks elektroodiks on süsi. Depolarisaator ja süsi on tsingist isoleeritud. Selleks on nõupõhja ja depolarisaatori vahele asetatud parafineeritud paber või mõni teine isoleeraine. Elektrolyüdina kasutatakse siin salmiaaklahust segatuna saepuru, kipsi, tärklise või mõne

teise poorse ollusega. Saadud segu on sültjas tarretis. Depolariseeriv segu on kotikeses, mille keskel asub söepulk. Tsinknõu on päält kinni valatud pigiga, mis takistab elektrolüüdi auramist. Pigikattes on neil elementidel väike avaus a (vaata joon. 29), mille kaudu elemendis keemilise reaktsiooni tagajärjel tekkinud gaasid välja pääsevad. Vähemad elemendid on sageli ilma sellise avausega.

Kuivad elemendid on kohe pärast valmistamist töökorras. Neid pole aga võimalik kuigi kaua alal hoida, sest nad tühjenevad iseenesest kohalike voolude tõttu. Kõrgema temperatuuri juures nende alalhoiu kestus väheneb, temperatuuri langedes tõuseb. **Neid tuleb alal hoida külmas ja kuivas ruumis.** Üldiseks reegliks jäägu siiski — kuivad elemendid võtta tarvitusele otsekohe pärast valmistamist.

Täidetavad elemendid on kohased alalhoidmiseks hoopis pikemaks ajaks. Ehituselt sarnlevad nad üldiselt kuivile elementidele. Valmistamisel asetatakse neisse elektrolüüt kuivas olekus, s. o. purustatud ja pooriliste ainetega segatud salmiaak. Enne tarvituselevõtmist täidetakse element destilleeritud või keedetud leige veega. Vee sissekallamiseks on selle elemendi pigikattes veel teine avaram avaus b (joon. 29), mis varustatud korgiga. Vee sissekallamisel tuleb hoolitseda, et **element täitaks veega võimalikult täielikult.** Pärast esialgset veega täitmist lastakse element umbes 8 tundi seista ja siis lisatakse veelgi vett. Seejärel on element umbes 6 tunni pärast töökorras. Tavaliselt antakse elemendi valmistaja poolt selle kasutamise juhtnõõrid kaasa.

Täidetavaid elemente tuleb alal hoida kuivas ruumis. Vastasel korral elementi asetatud kemikaalid niiskuvad, mille tagajärjel tekib elemendis reaktsioon ja element tühjub iseenesest. Täidetavate elementide ladus hoidmisel tuleb neid aegajalt kontrollida. Nad ei tohi pinget näidata. Leides selliseid elemente, tulevad need kohe tarvitusele võtta.

Leclanché-tüübiliste elementide näpitspinge on keskmiselt 1,5 volti. Tarvitamisel nende näpitspinge langeb elemendi sisetakistuse suurenemise tõttu. Tarvitamata elemendi sisetakistus on 0,1—0,4 Ω . Sisetakistus oleneb elemendi suurusest. Suuremal elemendil on sisetakistus väiksem ja seetõttu võib teda ka tugevama vooluga koormata. Väheema elemendi juures on see vastupidi. Kaua tarvitusel olnud elemendi sisetakistus võib kününida kümneisse oomesse. Selline element näitab mõnikord mõõtmisel küll normaalset pinget, kuid tarvitamisel ta voolu ei anna, sest näidatud pinge kulutatakse sisetakistuses.

Elemendid on suutelised voolu andma ainult teatava aja. Kui võetakse elemendist tugevat voolu, siis elemendi vooluandmise võime on lühema kestusega kui nõrgema voolu võtmise puhul. Seda elektri hulka, mida keemiline vooluallikas tühjenemisel võib anda, nimetatakse **mahtuvuseks**. Mahtuvus väljendatakse tühjenemise voolutugevusega ja tühjenemise aja kestvuse korrutisega. Aega normaalselt arvestatakse voolu võtmise algusest kuni tühjendatava elemendi pingelangemiseni 0,75 voldile.

Vooluallika mahtuvuse mõõtühikuks on ampertund (AT), mida võime avaldada ka järgmiselt:

$$AT = I \cdot t$$

kus I on tühjendamise voolutugevus ampriks ja t tühjendamise aeg tundides.

Näide: 1) Elemendi mahtuvus on 5 ampertundi. Mitme tunni kestel on võimalik seda elementi koormata voolutugevusega 20 mA?

$$t = \frac{AT}{I} = \frac{5 \cdot 1000}{20} = 250 \text{ tundi}$$

2) Element andis 10 mA tugevuselise voolu 200 tundi. Kui suur oli elemendi mahtuvus?

$$AT = \frac{10 \cdot 200}{1000} = 2 \text{ ampertundi.}$$

Mahtuvus sõltub elemendi valmistamiseks kulutatud materjalide kogust ja ka hädusest. Seetõttu võivad suuruselt võrdsed elemendid olla erineva mahtuvusega. Temperatuuri tõustes kasvab kõigi leclanché-tüübiliste elementide mahtuvus, temperatuuri langedes see aga väheneb. Täidetavad elemendid jäävad umbes -15°C ja kuivad -20°C juures ning lakkavad seetõttu töötamast. Sulanenult töötavad nad jällegi normaalselt. Mittepideva tarvitamise puhul on elementide töökestus suurem kui pideval tarvitamisel. Üldiselt tuleb tähele panna seda, et elemente ei koormataks liiga suure voolutugevusega, mille tõttu need kiiresti laostuksid. **Eriti tuleb aga hoiduda lühiühendusist.**

§ 2. Elementide ühendused.

Praktikas ei piisa sageli ühe elemendi elektromotoorsest jõust. Suurema elektromotoorse jõu saamiseks kasutatakse elemente **järjestikkuühenduses**. Selleks ühendatakse ühe elemendi positiivne elektrood järgmise elemendi negatiivse elektrodiga, mille positiivne elektrood järgmise elemendi negatiivse elektrodiga jne. (joon. 30).

Selliselt saadud elementide patarei negatiivseks elektroodiks on esimese elemendi negatiivne elektrood ja positiivseks viimase elemendi positiivne elektrood. Nimetatud elektroodide vahele lülitatakse ka koormustakistus.

Järjestikku lülitatud elementide patarei juures võime märkida järgmist:

1) Patarei elektromotoorne jõud võrdub üksikute elementide elektromotoorsete jõudude summale ($n \cdot E$).

2) Patarei sisetakistus võrdub üksikute elementide sisetakistuste summale ($n \cdot R_s$).

3) Patareist pole võimalik võtta suurema tugevusega voolu, kui teda koostavast ühest elemendist. Ka pole patarei mahtuvus suurem, kui tema üksikul elemendil.

Järjestikku ühendatud elementide patareid koormates voolutugevus

$$I = \frac{n \cdot E}{n \cdot R_s + R_v}$$

kus n on elementide arv, E on ühe elemendi elektromotoorne jõud, R_s on elemendi sisetakistus ja R_v on välistakistus.

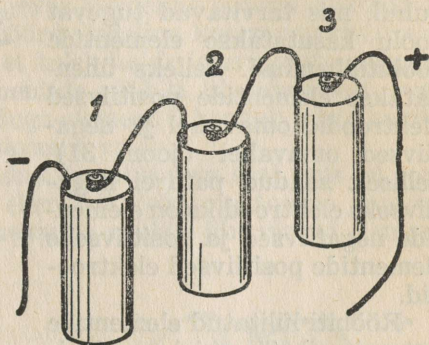
Näide: Järjestikku on ühendatud 20 elementi. Ühe elemendi sisetakistus $R_s = 0,2 \Omega$ ja koormatustakistus $R_v = 2 \text{ k}\Omega$. Kui suur on ahelas voolutugevus?

$$I = \frac{nE}{nR_s + R_v} = \frac{20 \cdot 1,5}{20 \cdot 0,2 + 2000} \approx 0,015 \text{ A} \approx 15 \text{ mA.}$$

2) Samas ahelas asendati koormustakistus $2 \text{ k}\Omega$ takistusega $0,1 \Omega$. Kui suur on voolutugevus ahelas?

$$I = \frac{20 \cdot 1,5}{20 \cdot 0,2 + 0,1} \approx 7,5 \text{ A.}$$

Toodud näiteist nähtub, et välisahela takistuse vähenedes 20 000 korda, suurenes voolutugevus kõigest 500 korda. Sellest järeldub, et voolutugevus välisahelas on suuremal määral sõltuv patarei sisetakistusest.



Joon. 30.

Suure koormustakistuse puhul on voolutugevus välisahelas peaaegu võrdeline patarei elektromotoorsele jõule (vt. näide 1). Väikese koormustakistuse puhul piirab voolutugevust välisahelas patarei sisetakistus (vt. näide 2).

Väikeste koormustakistuste puhul, mis tarvitavad tugevat voolu kasutatakse elementide rööbitiühendusi. Selleks ühendatakse elementide positiivsed elektroodid omavahel ja negatiivsed omavahel (joon. 31). Selliselt saadud patarei negatiivseks elektroodiks on elementide negatiivsed ja positiivseks elementide positiivsed elektroodid.

Rööbiti lülitatud elementide patarei evib järgmisi omadusi:

1) Patarei elektromotoorne jõud on sama suur kui ühel teda koostavaist elemendest.

2) Patarei sisetakistus on nii mitu korda vähem ühe elemendi sisetakistusest, kui mitu

elementi on rööbitilülituses $\left(R = \frac{R_s}{m} \right)$

3) Patareist võib võtta ühenduses olevate elementide arvu m korda tugevamat voolu kui ühest elemendist, sest igale elemendile langeb vaid üks osa üldisest voolutugevusest. Nii suureneb ka patarei mahtuvus võrdeliselt elementide arvule.

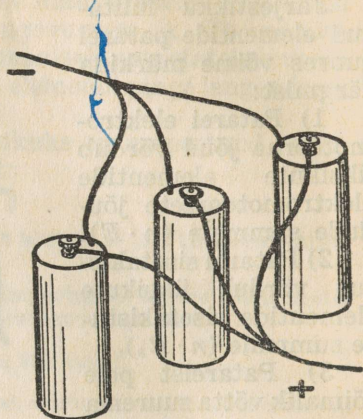
Rööbiti ühendatud elementide patarei koormamisel ahelas voolutugevus

$$I = \frac{E}{R_s/m + R_v}$$

kus m on rööbiti lülitatud elementide arv, teiste tähtede tähendused on samad, mis eelmises valemiski.

Näide: 1) Rööbitilülituses on 20 elementi. Ühe elemendi sisetakistus on $0,1 \Omega$. Kui suur on 2000Ω koormustakistuse puhul voolutugevus ahelas?

$$I = \frac{E}{R_s/m + R_v} = \frac{1,5}{0,1/20 + 2000} = 0,00075 \text{ A} = 0,75 \text{ mA.}$$



Joon. 31.

2) Kui suur on volutugevus samas ahelas $0,1 \Omega$ koormustakistuse puhul?

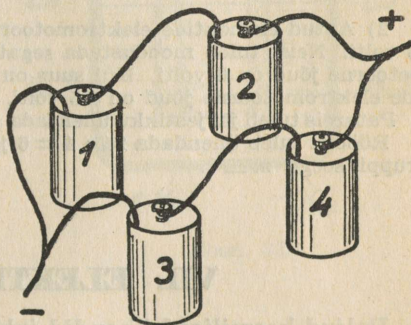
$$I = \frac{1,5}{0,1/20 + 0,1} = 14,99 \text{ A.}$$

Toodud näiteist nähtub, et rööbiti lülitatud elementide patarei koormamisel on volutugevus võrdeline patarei elektromotoorsele jõule ja peaaegu pöördvõrdeline koormustakistusele.

Üldiselt peab märkima, et tuleb hoiduda erinevate elektromotoorsete jõududega elementide rööbiti ühendamisest, sest suurema elektromotoorse jõuga element lahendub teiste kaudu ja tekitab niiviisi patareis sisemisi voole.

Elementide rööbitiühendusi kasutatakse seal, kus on tarvis tugevat voolu. Et ühe elemendi elektromotoorne jõud on väga väike, kasutatakse ühekaupa rööbiti ühendatud elementide patareid harva.

Sagedasem on elementide segaühenduste kasutamine. Sellisel juhul koosneb patarei järjestikku ja rööbiti ühendatud elementide gruppidest (joon. 32). Joonisel on elemendid 1 ja 2, samuti ka 3 ja 4 järjestikku ühenduses. Mõlemad paarid on aga omavahel ühendatud veel rööbiti. Segaühenduse, s. o. järjestikku ja rööbiti ühendatud elementide kohta



Joon. 32.

on kehtiv sama, mis nende ühenduste kohta öeldud juba üksikult.

Kokkuvõetult evib segaühenduse elementide patarei järgmisi omadusi:

1) Patarei elektromotoorne jõud võrdub järjestikku ühendatud elementide pingete summale (nE).

2) Patarei sisetakistus on rööbitiühenduses olevate gruppide arvu (m) korda vähem ühe grupi järjestikku olevate elementide sisetakistuse summast. Seega on patarei sisetakistus $n \cdot R_s / m$, kus n on järjestikkuühenduses olevate gruppide ja m rööbitiühenduses olevate gruppide arv.

3) Patareist võib võtta rööbitiühenduses olevate elementide arvu (m) korda tugevamat voolu kui ühest elemendist.

4) Patarei mahtuvus on sõltuv rööbiti ühendatud elementide gruppide arvust m ja on m korda suurem kui ühel elemendil.

Segaühenduses elementide patarei koormamisel ahelas voolutugevus

$$I = \frac{n \cdot E}{n \cdot R_s / m + R_v} = \frac{m \cdot n \cdot E}{n \cdot R_s + m R_v}$$

Näide: 1) 20 elementi on ühendatud 5 kaupa järjestikku ja 4 kaupa rööbiti. Ühe elemendi sisetakistus on $0,2 \Omega$. Kui suur on patarei elektromotoorne jõud ja sisetakistus?

Patarei elektromotoorne jõud on

$$n \cdot E = 5 \cdot 1,5 = 7,5 \text{ V}$$

Patarei sisetakistus

$$R = \frac{n \cdot R_s}{m} = \frac{5 \cdot 0,2}{4} = 0,25 \Omega.$$

2) Antud elementide elektromotoorne jõud on järjestikkuühenduses 36 volti. Neist tuleb moodustada segaühenduses patarei, mille elektromotoorne jõud on 6 volti. Kui suur on n ja m ? Tarvitatavate elementide elektromotoorne jõud on 1,5 volti.

Patareis tuleb järjestikku ühendada $6 : 1,5 = 4$ elementi, seega $n = 4$.

Rööbiti tuleb ühendada $24 : 4 = 6$ järjestikku ühendatud elementide gruppi, seega $m = 6$.

VII. ELEKTROLÜÜS.

Paljud keemilised ühendid juhivad elektrit ainult lahustunud või sulanud olekus, kusjuures elektrit juhtides neis toimub pidev lagunemisprotsess. Sellist elektri juhtimisviisi nimetatakse elektrolüütiliseks juhtimiseks ja sellega kaasaskäivat keemilist protsessi elektrolüüsiks.

Elektrijuhid liigituvad elektri juhtimisel ilmnevate kaasnähtete järele kahte liiki:

1) Metallid — esimese liigi juhid juhivad elektrit, ilma et nad ise seejuures muutuksid.

2) Elektrolüüdid — teise liigi juhid; juhtides elektrit, nad lagunevad selle toimel.

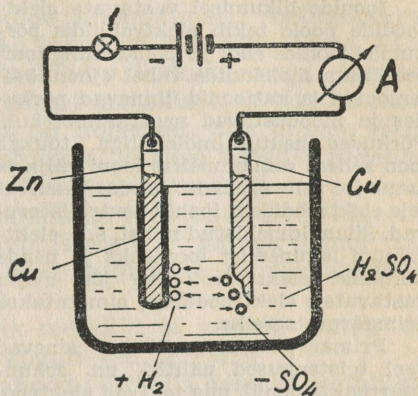
Asetame klaasnõusse, millesse valatud vees lahjendatud väävelhaput (H_2SO_4), ühe vasest, teise tsingist elektroodi (joon. 33). Elektroodide metallilisel ühendamisel mingi vooluallikaga läbi elektrilambikese, hakkab see helendama. Sama nähe ilmneks ka mõne teise happe või metallisoolade vesila-

huse puhul. See on tõenduseks elektrivoolu olemasolule läbi nimetatud vedelikkude.

Korrates katset aga destilleeritud vee või kontsentreeritud happega, lamp ei helendu. Siit võime järeldada, et destilleeritud vesi, kui ka kontsentreeritud happed ei juhi elektrit, nad on isolaatorid. Kui kallata mõni tilk hapet puhtasse vette või segada kontsentreeritud hapet veega, muutuvad need teise liigi elektrijuhiks, s. o. elektrolüüdiks.

Vaatleme lähemalt mõningaid elektrivoolu mõjul tekkinud nähteid elektrolüüdes. Võtame näiteks lahjendatud väävelhappe. Selle neutraalne molekul (joon 33) laguneb kaheks aatomgrupiks: H_2 ja SO_4 . Neid molekuli osi nimetatakse ioonideks. Oletatakse, et ioonid pole elektriliselt enam tasakaalustatud ja et SO_4 aatomgrupp pärib väävelhappe molekuli lagunemisel elektrone rohkem kui see normaalolukorrale omane, vesinik-aatomgrupp aga sama võrra vähem. Seega peavad need osakesed evima vedelikus erineva potentsiaali. Kõrgema potentsiaaliga ioone, nagu mainisime esimeses päätükis ionisatsiooni käsitelles, nimetatakse anioonideks ja madalama potentsiaaliga — katioonideks. Välisahela elektromotoorse jõu mõjul liiguvad anioonid vooluallika madalama potentsiaaliga (positiivse) elektroodi juurde ja katioonid vooluallika kõrgema potentsiaaliga (negatiivse) elektroodi juurde. Elektroodi, mis on vooluallika positiivse elektroodiga metallilises ühenduses, nimetatakse anoodiks ja vooluallika negatiivse elektroodiga ühendatud elektroodi — katoodiks. Kokkupuutel anoodiga, kus on elektriline alarõhk, annab anioon ära ülearused elektronid, kuna katioon, puutudes kokku katoodiga, kus valitsemas elektriline üliarõhk, täiendab end puuduvate elektronide võrra. Seega toimub ioonide neutraliseerumine ka vooluallika mõjul. Neutraliseeritud ioonide asemele tekitatakse aga üha uusi ja nende neutraliseerimiseks kulutatakse vooluallika arvel ka vastavalt rohkem voolu.

Et paljude ainete lagunemine elektrolüüsil toimub juba väga nõrka voolude puhul, siis oletatakse, et elektrolüüdes, s. o. soolade ja hapete vesilahustes teatav osa molekule on juba iseendast jagunenud elektriliselt tasakaalustamata osadeks — ioonideks. Elektromotoorne jõud sunnib neid ainult liikuma vastavate elektroodide suunas ja sinna jõudnult kas oma vabu elektrone sinna jätma või viimaste puuduoleku puhul end elektronidega negatiivse elektroodi arvel täiendama. Katsed näita-



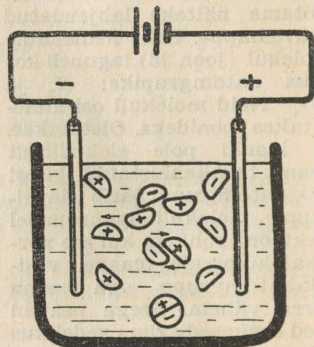
Joon. 33.

vad, et molekulide ioonideks lagunemise % sõltub lahuse kontsentratsioonist. On kontsentratsioon liiga tugev, siis on ioonide % vähem. Puhas hape, samuti ka puhas vesi ei juhi elektrit. Seega ei saa ka tekitada läbi nende elektrivoolu, millest selgub, et vedelik juhib elektrit ainult siis, kui selles leidub ioone. Nii näeme, et elektrolüüdis tekitatud elektrivool on ioonide vool (võrdle polarisatsiooniga).

Siin võime eraldada ioonide voolu, mis tekib ainult elektrolüütides, elektronide voolust, mis esineb ka metallides. Seega on õigem nimetada kohta, kus elektronid lähevad üht liiki juhilt üle teist liiki juhile järgmiselt: katoodiks seda elektroodi, millelt elektronid lahkuvad ja anoodiks seda, millele nad suunduvad. Seega on vooluallika negatiivne elektrood katood ja positiivne elektrood anood.

Ioonide liikumisel vastavate elektrootodide poole tekib elektrolüüdis pörkumisi ioonide endi ja ioonide ning ioniseerimata molekulide vahel (joon. 34). Anioonid ja katioonid ühinevad pörkudes ja moodustavad neutraalmolekuli. Pörkudes neutraalmolekuliga, tõukab ioon sellest samanimelise iooni välja ja astub ise selle asemele. Jõudes vastavatele elektrootodidele, ioonid neutraliseeruvad. Siiani kirjeldatud nähet, s. o. elektrolüüdi lagunemist ioonideks ja nende liikumist elektromotoorse jõu mõjul vastavatele elektrootodidele, nimetatakse primaarprotsessiks.

Primaarprotsessiga rööbiti esinevad veel teistsugused nähted, nn. sekundaarreaktsioonid, mis tekivad elektrootodidele eraldatud ainete ja lahustajate või elektrootodaine vahel, tekitades uusi, omakorda elektrolüüsile alluvaid aineid. Näiteks väävelhappe anioon SO_4 , jõudnud vaskribale (joon. 33) neutraliseerudes ühineb säääl vasega. Tekkinud vaskvitriool $CuSO_4$ lahustub vedelikku, kust samavõrra vaske ladestub tsingile, nii et tsinkriba kattub vase kihiga. Vabaks jääb SO_4 , mis elektrolüüdis leiduva veega tekitab uuesti väävelhappe ($H_2O + SO_4 = H_2SO_4 + O$). Sellest hetkest algab primaarprotsess uuesti.



Joon. 34.

2 Asendame nõus (joonis 33) lahjendatud väävelhappe vaskvitriooli ($CuSO_4$) vesilahusega. Selles on $CuSO_4$ jagunenud katiooniks Cu ja aniooniks SO_4 . Jagunenult kanduvad need osad vastavaile elektrootodidele. Cu ladestub katoodile, kuna SO_4 jõudnud anoodile, ühineb neutraliseerudes vasega ja tekitab vaskvitriooli ($SO_4 + Cu = CuSO_4$). Seejuures jääb vedeliku koosseis muutumatuks, kuid säääl muutus ka elektrolüüt. Kaalumise abil võime kindlaks teha, et anoodilt kulutatud vase hulk võrdub katoodile ladestunud vase hulga. Sama on kehtiv ka teiste metallide suhtes.

3 Asetame vaskvitriooli vesilahusesse mõlemad elektrootodid ühest ja samast metallist, näit. plaatinast ($CuSO_4$ ioonideks on Cu ja SO_4). Vask ladestub katoodile, kuna SO_4 ühineb elektrolüüdis oleva veega, tekitades väävelhappe ja hapniku ($SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$). Hapnik koguneb anoodile. Vase ladestumine katoodile kestab nii kaua kuni kõik vask on kantud elektrolüüdist katoodile. Nüüd osutub aga elektrolüüt täiesti muutunuks. Vaskvitriooli vesilahuse asemele oleme saanud lahjendatud

väävelhappe (H_2SO_4). Edasisel elektrolüüsil laguneb väävelhape omakorda ioonideks — H_2 ja SO_4 , kusjuures vesinik koguneb mullidena katoodile ja SO_4 ühineb uuesti veega, tekitades väävelhappe ja hapniku. Nii kestab see, kuni nõusse on jäänud ainult kontsentreeritud väävelhape. Siis vaibub ühtlasi ka elektrolüüs ja sellega kaasaskäiv keemiline lagunemine.

Esitatud katsete põhjal võime öelda, et voolu toimel kantakse vask katoodile, olgu siis elektrolüüdist või anoodi metallist ja katoodi pind kaetakse niiviisi vase kihiga. Analooiliselt toimub see ka mõningate teiste hapete ja metallsoolade vesilahuste kasutamisel. Näiteks hõbenitraadi ($AgNO_3$) vesilahusesse asetatud elektrootide ühendamisil vooluallikaga tekivad ioonid Ag ja NO_3 . Ag ladestub katoodile, kuna NO_3 neutraliseerudes ühineb elektrolüüdis leiduva veega (anood mitte hõbedast, vaid mõnest teisest metallist), ja tekitab lämmastikhappe jne. Kui anood on hõbedast, siis ühineb NO_3 anoodiga. Hõbenitraadi lahustumisel viiakse hõbedat vedeliku samas kvantumis kui seda ladestub katoodilgi.

Elektrivoolu mõjul on võimalik ka vett lahutada ta algosadeks — vesinikuks (H_2) ja hapnikuks (O). Et aga puhas vesi on isolaator, siis lisatakse veele juhtimise suurendamiseks juurde teatav % väävelhapet.

On tähele pandud, et kõik metallid ja vesinik eralduvad katoodile, kuna happejäägid kogunevad anoodile.

Elektrolüüdis kasutatud anood võib olla samast metallist, mille soolade vesilahus on elektrolüüdiks, või ka mõnest muust metallist. See oleneb täiesti elektrolüüsi otstarbest. Näiteks vase katmisel hõbedaga, asetatakse see katoodiks, kuna anoodiks kasutatakse hõbedat ja elektrolüüdiks hõbenitraadi vesilahust. Vesiniku ja hapniku eraldamiseks on mõlemad elektrootid ühest metallist jne.

Inglise õpetlane Faraday tegi vastavate katsete põhjal kindlaks, et elektrolüüsil elektrootidele eraldunud aine hulk on:

1) võrdeline elektrolüüti läbistava voolu tugevusega ja voolu kestusega;

2) võrdeline aine ekvivalentkaaluga.

Matemaatiliselt on Faraday seaduste järele elektrootidele eraldatud aine hulk

$$m = \alpha \cdot I \cdot t$$

kus α on elektrokeemiline ekvivalent, I voolutugevus ampriks ja t aeg sekundis. Eraldatud olluse hulk saadakse kas milligrammides või grammides, olenevalt sellest, kas elektrokeemiline ekvivalent on antud grammides või milligrammides.

Aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks nimetatakse arvu, mis näitab, kui palju antud ainet elektrolüüsil eraldub elektroodile ühes sekundis ühe amprilise voolu mõjul. Järgnevas on toodud mõningate metallide elektrokeemilised ekvivalendid milligrammides:

Hõbe — 1,118	Nikkel — 0,304
Kuld — 2,048	Vask — 0,329

Näide: 1) Mitu grammi hõbedat eraldatakse hõbenitraadi vesilahusest 10 minuti kestel, kui seda läbib vool tugevusega 4 amprit?

$$m = \frac{1,118 \cdot 4 \cdot 600}{1000} = 2,683 \text{ g}$$

2) Kui tugevat voolu tuleb tarvitada, et ühe tunni kestel ühelt vask-elektroodilt üle kanda teisele 9 g vaske?

$$I = \frac{m}{a \cdot t} = \frac{9 \cdot 1000}{0,329 \cdot 3600} = 7,6 \text{ A}$$

Kui kasutada tahkseid aineid, nagu hõbe, kuld jne., on voolutugevused elektrolüüsi abil täpselt määratavad. See pärast on ka voolutugevuse mõõtühik — rahvusvaheline amper hõbeda elektrolüüsi kaudu avaldatud.

Elektrolüüsil ilmnevaid nähteid kasutatakse mitmesuguseks otstarbeks. Näiteks elektrokeemias — keemilise energia muundamiseks elektrienergiaks ja vastupidi, elektrokeemilises tööstuses — naatriumi, kaaliumi, alumiiniumi, vesiniku, hapniku jne. saamiseks, galvanosteegias metallide katmiseks teiste metallidega, galvanoplastikas, s. o. metallesemete valmistamiseks vastavate matriitside abil, metallide puhastamiseks jne.

VIII. AKUMULAATORID.

§ 1. Seatinaakumulaatorite põhimõte ja ehitus.

Keemiliste vooluallikate hulka kuuluvad ka akumulaatorid. Praktelist kasutamist leiavad neist peamiselt kaks tüüpi:

1) seatina- ja 2) leelisakumulaatorid.

Seatinaakumulaatori põhimõte on järgmine: Lahjendatud väävelhappega täidetud klaasanumasse (joon. 35) on asetatud kaks teineteisest eraldatud seatinast plaati. Väävelhappe mõjul tekib kohe algul mõlema plaadi pinnale õhuke seatina-sulfaadi kiht $PbSO_4$. Et plaadid on ühest ollusest, siis ei teki

säärases seadises keemilise reaktsiooni mõjul elektromotoorset jõudu.

Kui ühendame mõlemad plaadid mingi alalisvoolu allikaga, siis tekivad akumulaatoris elektrolüüsi nähted — väävelhape jaguneb ionideks — H_2 ja SO_4 .

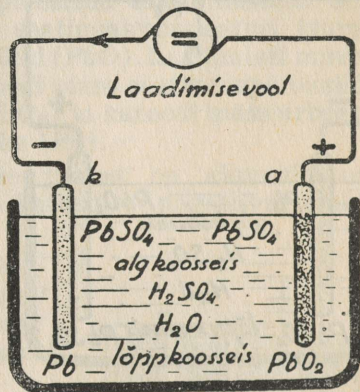
Vesinikuaatomid (katioonid) eralduvad katoodile k , kuna happejääk SO_4 (anioon) eraldub anoodile a . Vesinikuaatomid ühinevad katoodil seatinasulfaadiga, tekitades väävelhappe ja puhta seatina ($PbSO_4 + H_2 = H_2SO_4 + Pb$). Reaktsiooni mõjul vabanenud seatina jääb katoodi pinnale urbse massina. Anoodile eraldunud happejääk SO_4 ühineb seatinasulfaadi ja veega, tekitades väävelhappe ja seatinasuperoksüüdi ($PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + PbO_2$). Viimane katab anoodi pinna tumepruuni massina.

Kui plaatide pinnad on juba täielikult mainitud olustega kaetud, siis ei saa ionid enam seatinaga ühineda (elektrolüüt ei puutu enam seatinaga kokku) ja elektrolüüsi toimel laguneb ainult vesi. Vesinik ja hapnik eralduvad mullikestena vastavate elektrodide pinnale, kust nad õhku haihtuvad. Nüüd enam elektrodollused ei muutu.

Eelnenust näeme, et anumas asetsevad seatinaplaadid on oma omadusilt muutunud.

Üks neist koosneb puhtast seatinast ja teine seatinasuperoksüüdist. Seega on ühenimelised ollused muutunud erinimelisteks ollusteks, mistõttu tekitatakse nende vahel keemilise reaktsiooni toimel elektromotoorne jõud, nagu keemilistes elementideski. Ühendades elektrodid mingi volutarvitajaga, võime märgata elektrivoolu olemasolu. Säärane seadis kujutabki endast keemilist vooluallikat.

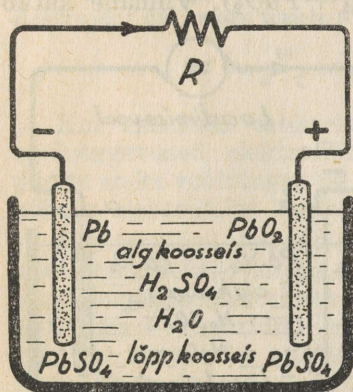
Siin on tegemist nähtega, kus elektrolüüsi toimel tekitatud keemilised ühendid püüavad elektrolüüsi katkedes uuesti muunduda endisiks aineiks. Elektrodide ühendamisel juhtmega tekib nende ja happe vahel keemiline reaktsioon, kusjuures vabaneb elektrolüüsil kulutatud energia. Seega on elektrit võimalik koguda ja alal hoida keemilise energia näol.



Joon. 35.

Akumulaatori juures eraldatakse kahte tegevust: 1) Kus elektriline energia muundatakse keemiliseks energiaks ja 2) kus keemiline energia muundatakse jälle elektriliseks energiaks. Seepärast nimetatakse akumulaatorit **sekundaarelemendiks**. Esimest tegevust nimetatakse akumulaatori **laadimiseks** ja teist akumulaatori **tühjendamiseks**.

Tühjendamisel laguneb hape keemilise reaktsiooni tõttu uuesti ionideks — H_2 ja SO_4 . Vesinik koguneb anoodile, kus ühinedes seatinasuperoksüüdi ja väävelhappega, tekitab seatinasulfaadi ja vee ($H_2 + PbO_2 + H_2SO_4 = PbSO_4 + 2H_2O$). Happejääk SO_4 koguneb katoodile, kus tekitab seatinaga ühinedes seatinasulfaadi ($Pb + SO_4 = PbSO_4$). Nii näeme, et



Joon. 36.

akumulaatori tühjenemine võib kesta seni, kuni plaadid on muutunud koosseisult ühesuguseks. Tühjenenud akumulaator enam voolu ei anna. Uuesti laetuna on ta aga jällegi suuteline voolu andma.

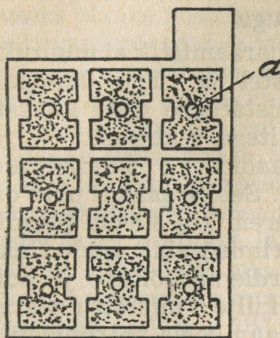
Võrreldes akumulaatorit keemilise elemendiga, võime tähele panna, et keemilised elemendid on suutelised voolu andma niikaua kuni neis on kulutatud elektrolüüt ja elektroodained. Elemendi töökorda seadmiseks on tarvis kulutatud ollused asendada uutega. Elektrivooluga neid laadida ei saa.

Nad on nn. **primaarsed vooluallikad**. Akumulaatoris on aga võimalik tühjenemisel keemiliselt muutunud olluseid elektrivoolu mõjul endiseks muuta, s. o. neid võib laadimise abil töökorda seada.

Akumulaatori plaatide keemiliselt muutunud pinna kihte (urbne seatina ja seatinasuperoksüüd) nimetatakse **aktiivmassiks**. Mida suurem on aktiivmassi kogum, seda suurem on ka akumulaatori elektriline mahtuvus, s. o. seda rohkem suudab ta keemilise energia näol elektrit koguda. Eelpool kirjeldatud ühe- või kahekordse laadimise tagajärjel on plaatidel tekitatud aktiivmassi kiht õige õhuke. Seetõttu on ka sellise akumulaatori mahtuvus väga väike. Mida sügavamale seatinasse eelpool kirjeldatud reaktsioonid mõjuvad, seda pakse-

maks muutub aktiivmassi kiht ja seda enam suureneb akumulaatori mahtuvus.

Aktiivmassi suurendamiseks on kaks võimalust. Esimesel juhul saadakse see akumulaatori korduvate (ka vastassuunaliste) laadimiste ja tühjendamiste teel. Selliselt viiakse tegevusse kordkorralt seatinaplaatide sügavamad kihid. Seda tegevust nimetatakse formeerimiseks. Formeerimisel kulutatakse palju elektrivoolu ja see pärast on niiviisi saadud akumulaatorid võrdlemisi kallid. Teisel puhul tarvitatakse plaate, mis juba koosnevad pressitud aktiivmassist. Selleks on seatinaakumulaatori juures tinaoksüüd (PbO). Laadimisel muundub anoodi mass seatinasuperoksüüdiks (PbO_2) ja katoodi mass urbseks seatinaks (Pb).



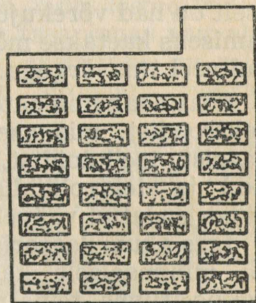
Joon. 37.

Konventsionaalse tähistamise juures on akumulaatori anood — positiivne elektrood ja katood — negatiivne elektrood.

Praktikas kasutatavad seatinaakumulaatorid jaotuvad positiivsete plaatide ehitusviisi järgi järgmiselt:

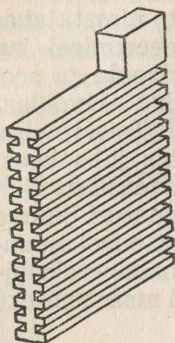
- 1) **Massplaatidega akumulaatorid**; need on kas
 - a) raami- või
 - b) võre-kujuliste plaatidega.
- 2) **Formeeritud plaatidega akumulaatorid.**

Raamplaat koosneb seatinaraamistikust, mille ruutudesse on asetatud aktiivmassist pressitud tahvlike sed (joon. 37). Nendest on läbi puuritud väikesed augukesed a , mis hõlbustavad elektrolüüdi kokkupuutumist massi sügavamate kihidega. Need plaadid pole kuigi vastupidavad mehaanilistele mõjudele. Juba väikeste korduvate pörotuste juures aktiivmass pudeneb. Samuti pudeneb aktiivmass, kui akumulaatorit laadida või tühjendada lubatust tugevama vooluga. Nad on kohased paikseks kasutamiseks ja sääli, kus vajatakse vaid nõrka voolu.



Joon. 38.

Võreplaat koosneb samuti seatinaraamistikust, mille ruudud on aga palju vähemad kui raamikujulistel plaatidel (joon. 38). Neisse ruutudesse ongi pressitud aktiivmass. Võreplaadid on raamplaatidest hoopis vastupidavamad, sest vähemate ruudukeste tõttu püsib aktiivmass kindlamalt raamis. Neid võib koormata ka tugevama vooluga.



Joon. 39.

Et plaatide seatinaraamistik ei muutuks korduvatel laadimistel ja tühjendamistel aktiivmassiks, valmistatakse need kõvast, s. o. antimonilisanditega seatinast.

Formeeritud plaadid on valmistatud soonilisest seatinast. Sellise plaadi pind on umbes 20 korda suurem kui siledal plaadil (joon. 39). Formeerimise abil saadud aktiivmassikiht on võrdlemisi õhuke ja hoiudub tugevalt plaadi küljes, mistõttu säärased plaadid on mehaaniliselt vastupidavamad. Formeeritud plaatidega akumulaatoreid võib laadida ja tühjendada võrdlemisi tugevate vooludega, ilma et plaadid seejuures rikki läheks.

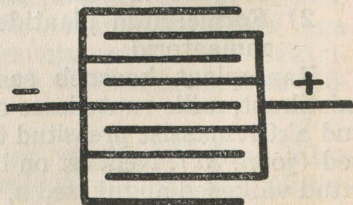
Keemiliste protsesside iseloomu tõttu on negatiivsed plaadid vastupidavamad kui positiivsed. Tavaliselt on nad võrekujulised (joon. 38). Vastupidavuse suurendamiseks kaetakse mõningail tüübel negatiivsete plaatide pinnad veel tinavõrguga.

Seatinaakumulaatorid koosnevad kahest rippuvas asendis elektroodist, mis asetsevad happekindlas anumast (need on klaasist, tselluloidist, eboniidist jne.) ja elektrolüüdist, milleks on lahjendatud väävelhape.

Igas akumulaatoris peab olema minimaalselt kaks plaati, üks positiivne, teine negatiivne. Kolmeplaadilise akumulaatori puhul koosneb negatiivne elektrod kahest ja positiivne ühest plaadist. Positiivne plaat asetseb kahe negatiivse plaadi vahel.

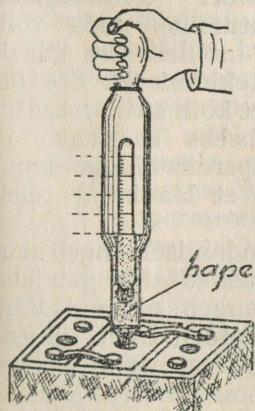
Vastasel korral töötaks positiivne plaat pigemini ühe küljega, mistõttu ta kergesti kõverduks.

Akumulaatori mahtuvus sõltub aktiivmassi kogusest ja plaatide pindala suuruselt. Seepärast peaks suure mahtuvusega



Joon. 40.

akumulaator koosnema ka võrdlemisi suurist plaatidest, mis aga raskendaks akumulaatoriga ümberkäimist. Et seda vältida, koostatakse elektroodid mitmest üksikust plaatidest, mis on omavahel ühendatud. Positiivsete plaatide grupp asetseb alati negatiivsete plaatide vahel (joon. 40). Seega on negatiivseid plaaite positiivseist ühe võrra rohkem. Negatiivsed ja positiivsed plaadid ei või üksteisega kokku puutuda, sellepärast nad eraldatakse üksteisest vastava isoleerainega. Iga plaatidegrupp töötab kui üks suur plaat, mille pindala võrdub teda koostavate üksikute plaatide pindalade summale. Elektrolüüdiks kasutatakse täiesti puhast **väävelhapet**. Hape lahjendatakse destilleeritud veega. Lahuse kangust mõõdetakse kas erikaaluga või Beaume (Be) kraadides. Uute akumulaatorite jaoks võetakse lahus $+15^{\circ}\text{C}$ juures erikaaluga (tihedusega) 1,17—1,19, mis vastab $21\text{—}23^{\circ}\text{Be}$. Töötavate akumulaatorite happetagavara täiendamiseks võetakse hape, mille tihedus on 1,14, s. o. 18°Be . Tavaliselt kasutatakse happe tiheduse määramiseks happemõõtjat ehk nn. areomeetrit. See on kinniste otstega klaastoru, mille ühte otsa on paigutatud mingi raskus. Kuna toru on vastavalt gradueeritud, näitab ta happesse vajumise sügavus happetiheduse Beaume kraadides, mille loeme vedeliku nivooga ühes tasapinnas asuvalt jaotuselt. Vägagi käepärane on selleks kasutada nn. sifoonareomeetrit (joon. 41).



Joon. 41.

Nagu juba öeldud, valmistatakse elektrolüüt keemiliselt puhtast happest ja destilleeritud veest. Kumbki neist ei tohi sisaldada mingeid lisandeid. Segu valmistamisel **valatakse hape peenikese nirena vette** ja segatakse klaaspulgaga hästi segi. **Vett ei**

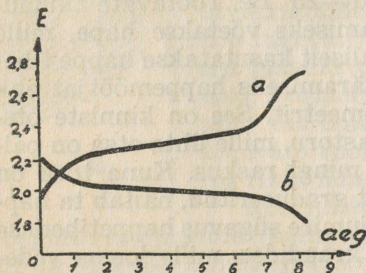
tohi mingil tingimusel happesse valada, sest siis võib hape pritsuda laiali ja tekitada põletishaavu.

§ 2. Seatinaakumulaatorite omadusi.

Akumulaatorid evivad elementidega võrreldes väga väikese sisetakistuse, mille suurus kõigub umbes 0,01—0,001 oomi piires. Sisetakistus sõltub peamiselt plaatide ja elektrolüüdi

puutepinna suurusel, s. o. akumulaatorite mahtuvusest. Suure mahtuvusega akumulaatoritel on sisetakistus väiksem kui väikse mahtuvusega akumulaatoritel. Osaliselt määrab akumulaatori sisetakistuse ka elektrolüüdi tihedus, mis pole aga sugugi püsiv. Laetud akumulaatoris on elektrolüüdi tihedus suurem, laadimatus vähem. Seetõttu kasvab ka akumulaatori tühjenedes selle sisetakistus, s. o. väheneb elektrolüüdi juhtivus.

Akumulaatori keskmine elektromotoorne jõud on 2 volti. Et akumulaatori sisetakistus on võrdlemisi väike, siis loetakse nõrkade voolude puhul näpitspinge võrdseks elektromotoorse jõuga ($U = E$) ja öeldakse lihtsalt „akumulaatori pinge“. Juba laadimise alul tõuseb akumulaatori pinge 2,2 voldile ja jääb sellele kõrgusele suurema osa laadimise kestusest (joonis 42).



Joon. 42.

Laadimise lõpul tõuseb pinge kiiresti 2,6—2,7 voldini. Tollest hetkest algab akumulaatori elektrolüüdis vee lahutamine, mida võib märgata intensiivsest gaasimullide tekkimisest. See tähendab, et kõik aktiivmass on nüüd urbseks seatinaks ja seatinasuperoksüüdiks muutunud ja et laadimine tuleb lõpetada.

Tühjendamisel langeb akumulaatori pinge alul kiiresti 2-le voldile, kust edasi langeb juba väga aeglaselt. Tühjenemise lõpul aga langeb akumulaatori pinge jälle kiiresti (joonis 42 b). Akumulaatorit tohib tühjendada kuni pinge langemiseni 1,8 voldile. Sellest normist pinge allapoole langeda enam ei tohi, kuna vastasel korral akumulaatoris paratamatult tekivad rikked. Tingitud on see sellest, et tühjenemisel muutub akumulaatori plaatidele kogunenud pehme hästijuhtiv seatinasulfaadi kiht kõvaks kristalseks sulfaadiks, mis vähendab aktiivmassi ja elektrolüüdi puutepinda, mille tõttu väheneb tunduvalt ka akumulaatori mahtuvus.

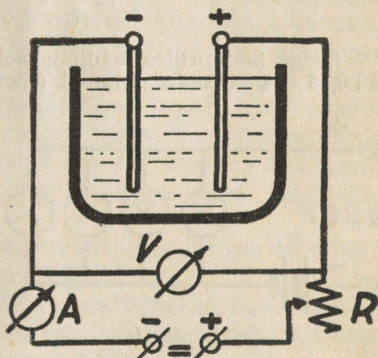
Akumulaatori mahtuvust, nagu teistegi keemiliste vooluallikate mahtuvust, mõõdetakse ampertundides. See on elektri hulk, mida laetud akumulaator võib anda normaalsel tühjenemisel. Seatinaakumulaatori mahtuvus sõltub suurel määral ka tühjenemisvoolu tugevusest. Kui tarvitatakse

nõrka voolu, siis võib akumulaatori mahtuvus kujuneda kuni 20% suuremaks kui tugevamate voolude puhul. Normaalselt on akumulaatori mahtuvus ühe kilogrammi plaatide kohta 4—6 ampertundi. Olenevalt otstarbest valmistatakse akumulaatoreid mahtuvusega 0,5—1000 ampertundi ja suuremaidki. Temperatuuri suurenemisel kasvab akumulaatori mahtuvus iga kraadi kohta 1,5% võrra, aluseks võttes tema mahtuvust 15° C juures. Temperatuuri langedes väheneb ka vastavalt akumulaatori mahtuvus. Laetud, kuid mitte töötava akumulaatori mahtuvus väheneb sisemiste reaktsioonide tõttu ööpäeva jooksul iseenesest umbes 2% võrra oma kogu-mahtuvusest.

Akumulaatori laadimiseks võib kasutada ainult alalist või pulseerivat voolu. Laadimispinge peab olema alati vähemalt 10% võrra suurem laetava akumulaatori pingest, sest vastasel korral tühjeneb akumulaator laadimiseks kasutatava vooluallika kaudu. Laadimispinge reguleerimine toimub vastavate mõõteriistade ja reostaadi abil (joon. 43).

Joonise kohaselt kontrollitakse voltmeetriga laadimispinget ja ampermeetriga laadimisvoolu tugevust. Laadimiseks kasutatakse alalisvoolu generaatoreid ja vahelduva voolu puhul vastavaid vahelduva voolu õgvendajaid. Äärmise tarbe korral võib väikese mahtuvusega akumulaatoreid laadida ka suure mahtuvusega akumulaatoreist.

Akumulaatorit ei tohi millalgi laadida ega tühjendada tugevama vooluga, kui see on valmistaja poolt kaasaantud juhtnöörides ette nähtud. Laadimisel ühendatakse akumulaatori positiivne elektrood laadimiseks kasutatava vooluallika positiivse ja negatiivne — negatiivse elektrodiga.



Joon. 43.

Näide: 1) Alalisvoolu generaatori näpitspinge on 15 volti. Laadida tuleb 4 ühesugust akumulaatorit 2-amprilise vooluga. Kui suur tuleb valida ettelülitava reostaadi takistus laadimise algul ja lõpul?

Laadimiseks ühendatakse akumulaatorid järjestikku, seega on saadud patarei pinge $4 \times 2,2 = 8,8$ volti (2,2 V on suurus, mille akumulaatori pinge kohe laadimise alul omandab). Nii tuleb laadi-

mise ajal hävitada $15 - 8,8 = 6,2$ V ja järelkult pinget hävitamiseks kasutatav takistus

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6,2}{2} = 3,1 \Omega$$

Laadimise lõpul on patarei pinget $4 \times 2,7 = 10,8$ V. Seega tuleb hävitada pinget $15 - 10,8 = 4,2$ V ja tarvitav takistus

$$R = \frac{4,2}{2} = 2,1 \Omega$$

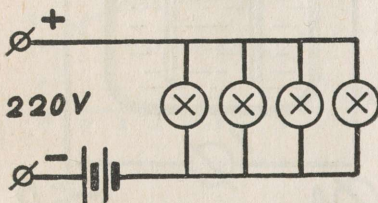
Nii näeme, et laadimise kestel tuleb reostaadi takistust muuta $3,1 - 2,1 = 1$ oomi piirides.

2) 220-voldilise pingega alalisvoolu valgustusvõrgust tuleb laadida 2-amprilise vooluga 40-voldilise pingega akumulaator-patarei. Voolutugevuse reguleerimiseks on võimalik kasutada 100-vatilisi valgustuslampe. Mitu lampi peame valima ja kuidas tuleb neid lülitada?

100-vatiline valgustuslamp tarvitab voolu

$$I = \frac{W}{U} = \frac{100}{220} = 0,45 \text{ A}$$

Seega 2-amprilise laadimisvoolu saamiseks peame rööbiti lülitama $2 : 0,45 = 4-5$ säärast lampi (joon. 44).



Joon. 44.

Akumulaatori laadimisel muundub väike osa elektrienergiast soojuseks ja väike osa sellest kulutatakse ka vee lahustamiseks. Seepärast osutub akumulaatorist saadav vooluhulk väiksemaks kui laadimisel kulutatud vooluhulk. Tühjenemisvoolu suhet laadimisvoolule vatt-tundides

nimetatakse kasuteguriks. Seega kasutegur

$$\frac{\text{tühjenemisvool vatt-tundides}}{\text{laadimisvool vatt-tundides}}$$

Uute tinaakumulaatorite kasutegur on 70—85%. Vanade ja rikundunud akumulaatorite kasutegur on aga palju väiksem.

Akumulaatoreid kasutatakse peamiselt järjestikku-ühenduses, kusjuures on soovitatav, et need oleksid võrdsete mahtuvustega. Mitmesuguste mahtuvustega akumulaatorite puhul väiksema mahtuvusega akumulaator tühjeneb varem ja võib rikunduda. Rööbiti- ja segaühenduses kasutatakse akumulaatoreid harvem. Tugeva voolu saamiseks on otstarbekas kasutada mitme rööbiti-ühenduses oleva vähema akumulaatori asemel üht suurema mahtuvuselist akumulaatorit.

§ 3. Seatinaakumulaatori hooldamine.

Seatinaakumulaatoritega ümberkäimisel on hää hooldamine peamine tegur, mis tagab akumulaatori laitmatu töötamise ja tarvitamiskõlbulikkuse. Normaalselt püsib akumulaatori töökõlbulikkus 5 ja enamgi aastat. Akumulaatori käsitsemisel tuleb silmas pidada:

A. Elektrolüüt.

1) Elektrolüüdiks tuleb tarvitada puhast hapet ja destilleeritud vett.

2) Kasutatava happe tihedus peab vastama akumulaatori valmistaja poolt kaasaantud juhtnöörides ettenähtud happe tihedusele.

3) Hape peab ulatuma umbes 1—1,5 sm üle plaatide ülemiste otste. Vastasel korral kattuvad vedelikust väljaulatuvad plaatide osad tinasulfaadiga (valge kiht). Puuduva happe asemele tuleb valada destilleeritud vett, kuni lahuse pind tõuseb normaalse nivooni. Vastava tihedusega hapet võib juurde valada vaid siis, kui osa akumulaatori hapest on kuidagi anumast välja jooksnud. Destilleeritud vee või vastava kontsentratsiooniga happe juurdevalamine sündigu enne laadimise alustamist.

4) Vähemalt igas kuus tuleb kontrollida happe tihedust, milleks kasutatakse sifoon-areomeetrit.

Sageli on kantavad akumulaatorid varustatud vastava ujuviga, mis happe tiheduse vähenemisel (tühjenenud akumulaator) alla normaalseisu vajub (langeb põhja).

Elektrolüüdi uuendamisel tuleb vana elektrolüüt välja valada ja plaadid destilleeritud vees leotada ja puhtaks pesta.

B. Plaadid.

1) Plaadid ei tohi üksteisega kokku puutuda, kuna see põhjustaks seesmise lühiühenduse.

2) Plaatide vahel ei tohi olla mingit lühiühendust põhjustavat ollust, nagu seda on seatinatükikesed, pudunud aktiivmass jne.

3) Kui anuma põhja pudenenud aktiivmassi kiht ulatub juba plaatideni, tuleb see kõrvaldada.

4) Sulfateerumise vältimiseks:

a) olgu plaadid alati kaetud elektrolüüdiga,

b) akumulaatorit ärgu tühjendatagu pinge langemiseni alla 1,8 voldi.

Sulfaadi kõrvaldamiseks tuleb säärast akumulaatorit kordvalt laadida ja tühjendada õige nõrga vooluga. Maksimaalselt võib see olla $\frac{1}{3}$ normaalsest laadimisvoolust.

D. Laadimine ja tühjendamine.

1) Happeda täidetud akumulaatoreid tuleb lasta enne laadimist kuni 6 tundi seista. See on tarvilik elektrolüüdi elektrootse tungimiseks.

2) Akumulaatoreid ei tohi laadida ega ka tühjendada suure vooluga, kui see on vastavais juhtnõres ette nähtud. Tugevate voolude puhul pudeneb aktiivmass ja positiivsed plaadid võivad kaarduda. Eriti tuleb hoiduda lühiühendusist.

3) Laadimise lõppu võib tunda intensiivsest gaaside eraldumisest. Laadimise lõpul muutuvad positiivsed plaadid tumepruuniks. Laadimine tuleb lõpetada, kui laetava akumulaatori pinge on laadija ühendises olles 2,6—2,7 volti, või happetihedus on juba 26—27° Be.

4) Tühjenenud akumulaatorit ei tohi jätta seisma, vaid tuleb kohe laadida. Laetult võib akumulaator seista umbes kuu aega, mille järele tuleb teda uuesti laadida. Kui akumulaator jääb seisma pikemaks ajaks, siis tuleb elektrolüüt asendada destilleeritud veega.

5) Ruumis, kus laetakse või tühjendatakse akumulaatoreid, tuleb olla tulega ettevaatlik, sest akumulaatoreist eralduv paukgaas võib kergesti plahvatada.

§ 4. Leelisakumulaatorid.

Leelisakumulaatoreist on praktilist kasutamist leidnud peamiselt **Edisoni** ja **Jungneri** akumulaatorid.

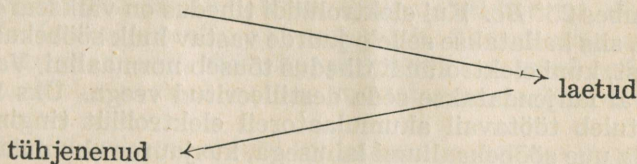
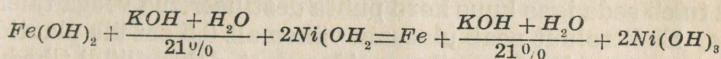
Edisoni akumulaatoril koosneb aktiivmass negatiivsel plaadil rauaoksüüdilt ($Fe(OH)_2$) ja positiivsel — nikkelühendist ($Ni(OH)_2$). Aktiivmass on pressitud nikeldatud raudplekist karbikesse, millede seinad on varustatud augukestega, kust kaudu elektrolüüt puutub kokku aktiivmassiga. Need karbikesed on kinnitatud nikeldatud¹⁾ raudplekist valmistatud raami külge. Iga raam koos karbikesega moodustab ühe plaadi.

Elektroodid koosnevad vastavast arvust plaatidest ja on asetatud nikeldatud raudplekist anumasse, milles on elektrolüüt. Plaadid on üksteisest eraldatud eboniitribadega. Samuti on nad eraldatud ka anumast.

¹⁾ Raudplekist osade vastupidavuse suurendamiseks need nikeldatakse.

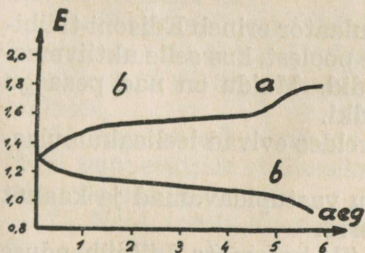
Edisoni akumulaatoris kasutatakse elektrolüüdina 21-protsendilist sööbekaaliumi (KOH) lahust, mis saadakse 21 osa sööbekaaliumi lahustamisel 100 osas destilleeritud vees. Elektrolüüt ei võta laadimisel ja tühjendamisel keemilisest reaktsioonist osa ja seepärast tema koosseis ei muutu. Elektrolüüdi ülesandeks on ainult voolu juhtimine.

Keemiliselt muutub ainult plaatide aktiivmass. Laadimisel oksüdeerub positiivsete plaatide aktiivmass, s. o. muutub hapnikurikkamaks, kuna negatiivsed — kaotades hapniku, muutuvad puhtaks rauaks. Elektrolüüt jääb muutumatuks. Tühjenemisel toimub reaktsioon vastupidiselt. Reaktsiooni käik on järgmine:



Leelisakumulaatori keskmine elektromotoorne jõud on 1,25 volti. Laadimise lõpul tõuseb see kiiresti 1,8 voldile (joon. 45 a).

Akumulaatorit loetakse tühjenenuks, kui ta elektromotoorne jõud on langenud ühele voldile (joon 45 b). Ka leelisakumulaatorite siseta- kistus on väga väike ja seepärast loetakse nõrkade voolude puhul nende elektromotoorne jõud võrdseks näpitspingele ($E = U$).



Joon. 45.

Et elektrolüüt imbuks hästi aktiivmassi, tuleb uut akumulaatorit päale elektrolüüdiga täitmist vähemalt 2 tundi seista lasta. Seejärel laetakse teda normaalse vooluga, kuni näpitspinge on tõusnud umbes 1,8 voldile ja kui pinge 40—50 minuti kestel enam ei tõuse, siis on akumulaator laetud. Akumulaatori laadimisel tuleb laadimise lõpp määrata voltmeetri abil, sest seda pole võimalik kindlaks määrata areomeetriga, kuna elektrolüüdi tihedus ei muutu laadimisel märgatavalt.

Laadimisel eralduvate gaaside hapniku ja vesiniku väljalaskmiseks tuleb kaanes leiduv metallkork avada.

Temperatuuri muutused -17°C kuni $+40^{\circ}\text{C}$ ei avalda leelisakumulaatori mahtuvusele mingit mõju. Kui temperatuur tõuseb aga juba üle $+40^{\circ}\text{C}$, siis kaotab akumulaator oma mahtuvusest 50%. Umbes -30°C juures elektrolüüt jäätub ja akumulaator lakkab töötamast.

Leelisakumulaatorid on võrdlemisi vastupidavad mehaanilistele mõjudele. Neid võib vajaduse korral laadida ja tühjendada 2—3 korda normaalsest tugevama vooluga, ilma et plaadid seejuures rikki läheks.

Laadimisel aurab ajajooksul osa elektrolüüdist ja seepärast tuleb seda igas kuus kord puhta destilleeritud veega täiendada. Elektrolüüt peab ulatuma vähemalt 0,5 sm üle plaatide ülemiste otste. Peab ka silmas pidama, et elektrolüüdi tihedus oleks umbes 25°Be . Kui elektrolüüdi tihedus on väiksem ettenähtust, siis kallatakse sellele juurde vastav hulk sööbekaaliumi lahust, kuni elektrolüüdi tihedus tõuseb normaalinii. Vastasel korral lahjendatakse seda destilleeritud veega. Üks kord aastas tuleb töötavil akumulaatoreil elektrolüüt tingimata vahetada uue sööbekaaliumi lahusega, kusjuures akumulaator enne hästi loputatakse.

Kasutegur vatt-tundides on leelisakumulaatoril umbes 55—60%, mis, nagu näha, on hoopis väiksem kui seatinaakumulaatoril.

Jungneri-tüübiline leelisakumulaator erineb Edisoni-tüübilistest ainult negatiivsete plaatide poolest, kus selle aktiivmassiks on raua- ja kadmiumi-ühendid. Muidu on nad peaaegu samad mis Edisoni akumulaatoridki.

Seatinaakumulaatoritega võrreldes evivad leelisakumulaatorid järgmisi paremusi:

1) Nad on mehaaniliselt palju vastupidavamad ja kaalult kergemad kui seatinaakumulaatorid.

2) Neid võib lühemat aega ka üle koormata. Lühiühenduse korral nad ei rikundu.

3) Nad võivad kuude kaupa tarvitamatult seista, ilma et neid järellaadida tuleks, sest neis ei avalda elektrolüüt mingit keemilist mõju aktiivmassile. Nad ei sulfateeru.

4) Neist ei eraldu mürgiseid gaase. Elektrolüüdi äraauramine on neis 4—5 korda suurem kui seatinaakumulaatoreist, sest neis toimub kogu laadimise kestel vee lahutamine.

5) Üldiselt ei vaja nad nii piinlikku hooldamist kui seatinaakumulaatorid.

Puudusiks on:

- 1) Kallim hind.
- 2) Seatinaakumulaatorist väiksem elektromotoorne jõud.
- 3) Tühjenemisel langeb pinge kiiresti, mistõttu ei kõlba seal, kus nõutakse püsivat pinget.

Seevastu evivad seatinaakumulaatorid püsivama pinge, parema kasuteguri ja on palju odavamad kui leelisakumulaatorid.

§ 5. Leelisakumulaatorite hooldamine.

Leelisakumulaatorite hooldamisel tuleb tähele panna järgmisi nõudeid:

1) Nad tulevad hoida puhtad roomsooladest. Selleks olgu nende anumad väljaspoolt vaseliiniga alati kergelt võietud.

2) Leelis- ja seatinaakumulaatorite ühes ruumis laadimine pole soovitatav, sest väävelhappe gaasid kutsuvad esile leelisakumulaatorite raudanumate roostetamist ja aktiivmassi pudenemise.

3) Väävelhapet ei tohi leelisakumulaatorisse kunagi valada, sest aktiivmass rikutakse kohe ära.

4) Elektrolüüt peab alati 0,5—1 sm plaatide ülemistest otstest üle ulatuma. Elektrolüüdi tihedus püsigu alati umbes 25° Be (erikaal 1,2).

5) Söobekaaliumi tuleb hoida alal nõudes (klaasist, plekist), mis on suletud õhukindlalt. Vastasel korral ühineb ta õhus leiduva süsihapugaasi ja veeaurudega ning muutub kõlbmatuks.

6) Laadimisel ja tühjendamisel tuleb jälgida, et elektrolüüdi temperatuur ei tõuseks üle +40° C, sest see on akumulaatorile kahjulik.

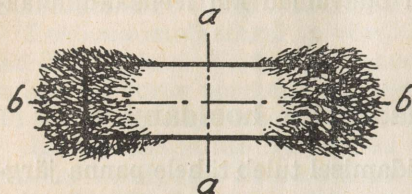
7) Neid tohib koormata ainult kuni pinge langemiseni ühele voldile.

8) Akumulaatoreid tuleb hoida kuivas ja jahedas ruumis. Pikemaajalisel tarvitamatult hoidmisel tuleb neist elektrolüüt välja valada, korgid õhukindlalt sulgeda ja anumad väljaspoolt hästi vaseliiniga üle võida.

IX. MAGNETISM.

§ 1. Magnetid ja nende omadused.

Magnetismiks nimetatakse mõningate kehade omadusi mõjuda üksteisele tõmbe- ja tõuketungi tekitavalt. Magnetiliste



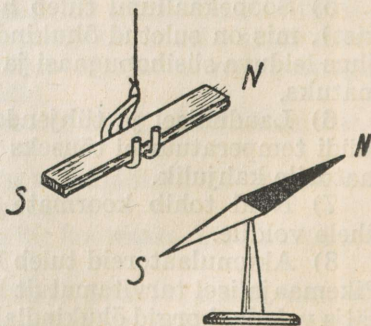
Joon. 46.

omadustega kehi nimetatakse **magneteiks**. Magneti tõmbetungile alluvad peamiselt raud ja teras (kuid vähemal määral ka mõned teised metallid, nagu nikkel, koobalt jne.). Eritellakse looduslikke ja kunstlike magneteid.

Looduslikke magneteid leidub maapõues rauamullana¹⁾ (Fe_3O_4). Nende magnetilised omadused on võrdlemisi nõrgad ja seepärast ei leia nad tegelikku kasutamist, liiategi et ka nende kuju pole kuigi sobiv praktiliseks käsitsemiseks.

Praktikas kasutatakse kunstlike magneteid. Need valmistatakse karastatud terasest magneetimise teel. Nad evivad samuti magnetilisi omadusi, mis aga võivad olla hoopis tugevamad kui looduslikel magneteil. Kujult valmistatakse kunstlike magneteid väga mitmesuguseid, mis esijoones oleneb muidugi magneti otstarbest. Enam kasutatavad on hobuseraua-, ringi-, topsi- ja osutikujulised magnetid.

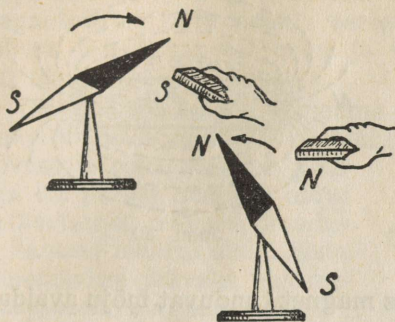
Magneti tõmbejõud pole kogu magnetkeha ulatuses ühtlane. Magneti otstel on see kõige suurem, kuna keskel ei avaldu see üldse. Kui magnet rauapurru kasta, siis näemegi, et (joon. 46) rauapuru kleepub magneti otstele enam kui keskele. Kohti, kus magneti tõmbejõud on kõige tugevam, nimetatakse **magnetpooluseiks**. Keskk kohta a — a aga, kus magneti magnetiline mõju ei avaldu, nimetatakse



Joon. 47.

¹⁾ rauamaak.

neutraalvöök. Pooluseid läbistav keskjoon $b - b$ kujutab endast magnettelge.



Joon. 48.

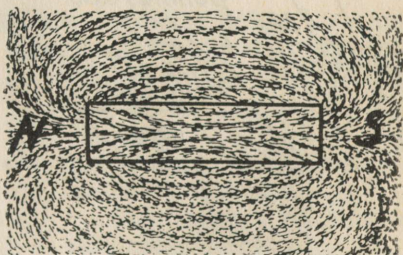
Niidi otsa riputatud või teravikule asetatud magnetpulk (nöel), mis horisontaalpinnas võib vabalt pöörelda, jääb alati põhja-lõuna suunas (joon. 47) seisma. Magnetpoolust, mis alati põhja poole pöörduv, nimetatakse **põhjapooluseks (N)** ja vastaspoolust — **lõunapooluseks (S)**.

Selliseid vabalt pöörlevaid magneteid nime-

tatakse **magnetnõelteks**. Magnetnõela omadusi kasutatakse ilmakaarte määramisel. Magnetnõela põhimõttel on ehitatud kompassid, bussoolid jt.

Kui lähendame magnetnõelale mingisugust magnetit (joonis 48), võime tähele panna, et isenimelised magnetpoolused **tõmbuvad**, kuna samanimelised **tõukavad**.

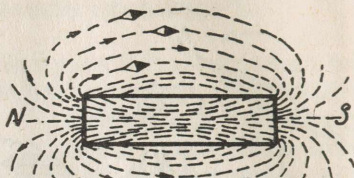
Kui magnetile asetatud paberilehele raputada rauapuru ja paberilehte liigutada, siis näeme, et rauapuru asetub kõverjooni kujutavate kettidena magneti ümber (joon. 49). Võib ka tähele panna, et rauapurust moodustatud kõverjooned ühendavad mõlemaid magnetpooluseid, kujundades magneti kaudu kinnise ringi. Kui nüüd selle magneti kohale asetada magnetnõelakesed, siis võib näha, et need pöörduvad moodustunud kõverjoonte järele nii, et kõigi põhjapoolused suunduvad magneti lõunapooluse poole, ühtudes suunalt rauapuru poolt moodustatud kettide suunaga (joon. 50). Jooni, mille suunas korrastub rauapuru ja ka magnetnõelad, nimetatakse **magnettingjoonteks**, mis on õieti magnetjõu kujuteldavad suunad. Magnettingjooned loetakse kokkuleppeli-



Joon. 49.

selt väljuvaiks põhjapoolusest ning suubuvaiks lõunapoolusesse; niiviisi magneti ümbritsesed moodustavad nad **magnetahela**.

Ruumi, milles magnet-tungjooned veel vähegi teistele kehadele mõju avaldavad, nimetatakse **magnetväljaks**. See väli on lõpmatu suur. Et magnetvälja mõju magnetist kaugenevatele kehadele väheneb proportsionaalselt kauguse ruuduga, siis loetakse praktiliselt magnetväljaks seda ruumi, milles magnet tunduvat mõju avaldab.



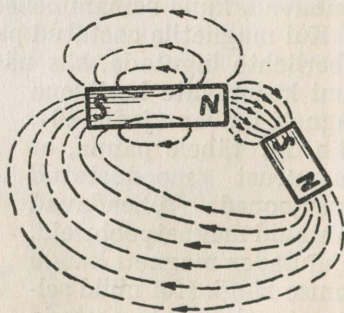
Joon. 50.

§ 2. Magnetiline induksioon.

Kui mõnele magnetile lähendada rauda või terast, siis muutub ka see magnetiks ja tõmbab teisi magnetiliste omadustega kehi külge (joon. 51). Näeme siis, et magneti *a* mõjul muutub ka magnetiseerimata keha *b* magnetiks. Siin oletatakse, et tungjooned, mis väljuvad magnetist *a*, läbistavad temale lähe-



Joon. 51.



Joon. 52.

dal oleva raudtüki *b* ja alles siis pöörduvad lõunapoolusesse tagasi (joon. 52). Magnetiks muutunud raudtükk evib nüüd kõik magneti omadused, kusjuures magneti poolusele lähemal raudtüki otsal tekib isanimeline ja kaugemal samanimeline poolus.

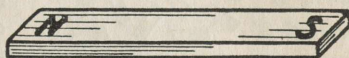
Nähet, kus magneti mõjul kehad muutuvad magnetiks, nimetatakse **magnetiliseks induksiooniks**.

Kui rauatükk magnetmõju piirkonnast eemaldada, siis kaotab ta kohe magneti omadused. Kui aga magnetiga mõjutada raua asemel terast, siis jääb sellele ka pärast magnetmõju piirkonnast eemaldamist magneti omadusi. Sellest järeldame, et raua ja terase magnetilised omadused on erinevad.

On kindlaks tehtud, et pehme raud omandab magneti omadused ainult ajutiseks, s. o. kuni teda magnetiga mõjutatakse.

Kõvemail raua sortidel jääb aga ka pärast magneti mõju katkestamist magneti omadusi vähesel määral alale. Seda nimetatakse jäävaks ehk remanentseks magnetismiks.

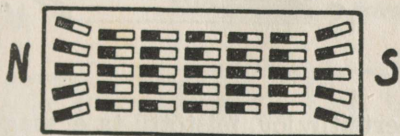
Rauast palju nõrgemini tõmbub magneti külge teras, kuid temasse jäävad päale magnetist eemaldamist magneti omadused alale. Seega on ta muutunud jäävalt magnetiks. Selliseid magneteid nimetatakse püsivaiks ehk permanentseiks magneteiks.



Joon. 53.

Kord magnetiseeritud teras kaotab magneti omadused alles mingi välise mõju, näiteks kuumendamise, põrutamise, külma jne. tagajärjel.

Kui mingi magnet poolitada, siis saadakse kaks uut magnetit, mis evivad kõik magneti omadused. Nende edasisel poolitamisel saaksime jälle uued magnetid jne. (joonis 53). Siit võime järeldada, et magnetpooluseid ei saa teineteisest eraldada.



Joon. 54.

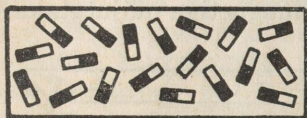
Kui magnet tükeldada vähimaiks mehaaniliselt jagatavaiks osiks — molekulleks, siis eviksid ka need

magneti omadusi. Vähimaid magneti omadusi evivaid aine osakesi nimetatakse molekulaarmagnetiteks.

Enamlevinenud teooria järgi oletatakse, et iga magnet koosneb väikestest molekulaarmagnetitest (vrld. elektromagnetism), mis korraldatult asetsevad magnetkehas nii, et nende isenimelised poolused on omavahel seotud (joon. 54). Sellises

korraldatud magnetis summeerub otstel asuvate ühenimeliste molekulaarmagnetite pooluste mõju, moodustades sel teel magneti poolused, millede mõjupiirkond ulatub väljaspoole magneteid.

Kuna magneti otstel asub hulk ühenimelisi molekulaarmagnetite pooluseid, mis omavahel tõukuvad, ei ole magneti otstel mõjuvad tungjooned rööbiti magnetiteljele, vaid kalduvad sellest kõrvale. Nii ei avaldu pooluste magnetism üksnes magneti otstel, vaid ka magneti otste poolseil külgpindadel. See lubab omakorda oletada, et magneti poolused (kohad, kust tungjooned väljuvad) ei asene otsekohe

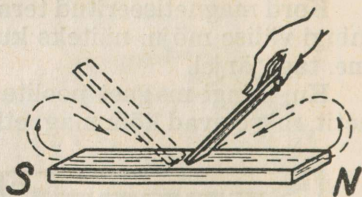


Joon. 55.

magneti otstel, vaid pisut sügavamal magneti sees.

Magnetiseerimata rauas ja terases asuvad molekulaarmagnetid segipaisatuna (joon. 55), mistõttu nad hävitavad üksteise mõju ka magneti otstel ja seega ei avaldu mingit magnetilist mõju väljaspoole. Magneti mõjul korralduvad molekulaarmagnetid nii, et nende samanimelised poolused pöörduvad ühele poole (joon. 54). Oletatakse nimelt, et molekulaarmagnetikesed võivad pöörelda ümber oma telje.

Magnetiseeritavas kehas ei korraldu molekulaarmagnetid ilma takistuseta. Nende korraldumist takistab aine sisemuses magnetiseerivale jõule vastutõotav jõud, nn. **koertsitiivjõud**. Pehmes rauas on see jõud väga väike, kuid kõvemate rauasortide juures on see tunduvalt suurem. Teras evib juba võrdlemisi suure koertsitiivjõu, mistõttu ta ei magnetiseeru ka nii kiiresti kui raud.

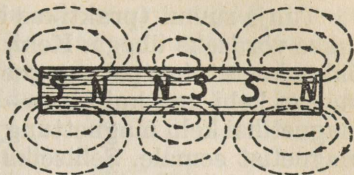


Joon. 56.

See jõud takistab ka juba korraldatud molekulaarmagnetite tagasi pöördumist neutraalolukorda. Et pehmes rauas koertsitiivjõud on väga väike, siis asetuvad raua molekulaarmagnetid magnetmõju piirkonnast eemaldamisel otsekohe neutraalasendisse, mille tõttu pehme raud kaotab kohe magneti omadused. Kõvemate rauasortide juures toimub see aeglasmalt. Teras juures aga jäävad molekulaarmagnetid edasi korraldatud olekusse. Seega on teras muutunud magnetiks.

Kunstlike magnetite valmistamine toimub nn. magnetiseerimise teel. Need valmistatakse erilisest terasest. Magnetiseerimisel mõjutatakse (hõõrutakse) magnetiseeritavat eset vastava magneti poolusega. Selliselt toimitakse mitmeid kordi ja ikka ainult samas suunas (joon. 56). Sel teel saadud magnetid on aga võrdlemisi nõrgad. Tugevamaid magneteid valmistatakse elektrilise magnetiseerimise abil.

Ühes magnetis võib vastava magnetiseerimise abil tekitada ka mitmekordseid pooluseid (joon. 57). Seda magnetite omadust on võimalik kasutada helide edasiandmiseks elektromagnetilisel teel.

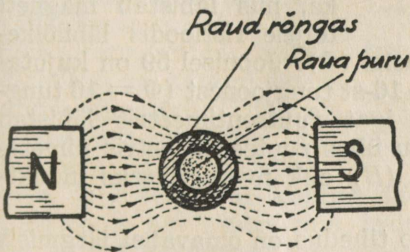


Joon. 57.

On kindlaks tehtud, et magneti omadused peituvad pigemini magnetiseeritud kehade pinnas. Seepärast võetaksegi tugevamate magnetite saamiseks vastav hulk üksikult magnetiseeritud terasvardaid või plaadikesi, mis kinnitatakse omavahel ja nii, et ühenimelised poolused asuksid kõik ühel pool.

§ 3. Magnetiline läbitavus ja magnetühikud.

Kui magnetvälja asetada tükk rauda, siis näeme, et suurem osa magnetitungjooni koondub rauda. Seega peaks rauas magnetitungjoonte tihedus suurem olema kui õhus. Samuti näib, nagu oleks raud parem magnetitungjoonte juht kui õhk. Ent võtame olukorra veidi põhjalikuma vaatluse alla.



Joon. 58.

Kui asetada magnetpooluste vahele raudrõngas (joon. 58), siis näeme rauapuru abil tekitatud magnetvälja spektrumist, et mag-

netitungjooned koonduvad raudrõngasse ja pooluste vaheline magnetväli muutub tihenenud tungjoonte tõttu tugevamaks.

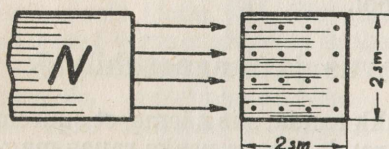
Kui nüüd raudrõngasse raputame rauapuru, siis see ei korraldu. Siit nähtub, et magnetväli ei mõju raudrõnga sisse. Nii näeme, et magnetväljas asuv raud koondab mag-

nettungjooni, kuna rauaga ümbritsetud ruumi magnetvälja mõju ei ulatu.

Kehade omadusi koondada ja juhtida magnettingjooni paremini kui õhutühiruum (kui õhk), nimetatakse **läbitavuseks** ehk **permeaabluseks** (μ). Häa magnetilise läbitavusega on raud ja teras, vähema läbitavusega on aga nikkel, koobaltkroom jne.

Tühja ruumi (praktikas ka õhu) magnetiline läbitavus loetakse võrdseks ühega. Kehi, mis on suurema läbitavusega kui õhk, nimetatakse **paramagnetilisteks** kehadeks, vähema läbitavusega kehi aga kui õhk — **diamagnetilisteks** kehadeks. Diamagnetilisi kehi magnettingjooned ei läbista ja need tõukuvad magnetist eemale. Selliseiks kehiks on vismut, hõbe, tina jt. Nimetatud diamagnetismi mõju on väga väike, mistõttu praktikas vähe kasutatakse.

Joonisel 58 võime näha, et magnetpooluste vahel on tungjooned kohati erineva tihedusega. Rauas on see suurem, õhus aga väiksem. Seega pole magnetvälja tihedus sugugi ühtlane. Ühtlane väljatihedus saadakse, kui isenimelised poolused ase-



Joon. 59.

tatakse võimalikult teineteise lähedale, kusjuures kasutatakse ka vastavakujulisi magneteid. Arvutamiste aluseks võetakse alati ühtlane magnetväli.

Magnettingjoonte hulka, mis läbib magnetiteljele ristloodis läbilõikepinda, nimetatakse **magnetvooks** (Φ). Joonisel 59 on kujutatud magnetvoog, mis koosneb 16-st tungjoonest ($\Phi = 16$ tungjoont). Joonisel näeme, et igat ruutsentimeetrit läbib 4 tungjoont. Tungjoonte arvu ühes ruutsentimeetris nimetatakse **magnetvoo tiheduseks** (B) ehk magnetiliseks induktiooniks.

Magnetvoog ja magnetvoo tihedus on omavahel järgmisiseseis:

$$B = \frac{\Phi}{S}; \quad \Phi = SB; \quad S = \frac{\Phi}{B};$$

kus B on magnetvoo tihedus tungjoontes 1 sm^2 kohta, Φ magnetvoog ehk üldine tungjoonte arv magnetahela antud koha läbilõikepinnas ja S magnetahela antud koha läbilõikepind ruutsentimeetris.

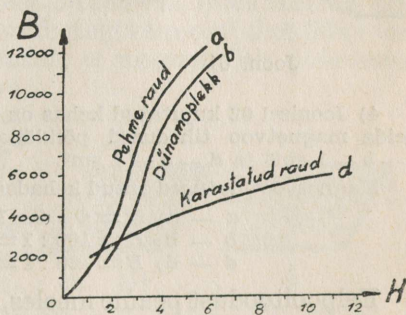
Jõudu, mis kutsub esile magnetilise induktsiooni B , nimetatakse magnetiseerivaks jõuks ehk **magnetvälja tugevuseks** H . Selle suurust mõõdetakse õhus samuti tungjoonte arvuga ühes ruutsentimeetris.

Praktiliselt loetakse õhutühjas ruumis (ka õhus) magnetiline induktsioon võrdseks väljatugevusele (õhuta ruumis ei võrdu magnetiline induktsioon täpselt väljatugevusele, kuid vahe on niivõrd väike, et praktikas seda ei arvestata). Ainega täidetud ruumis on magnetiline induktsioon väljatugevusest alati suurem, kuna ta oleneb iga keha magnetitungjoonte läbitavusest (μ). Matemaatiline avaldus on magnetilisel induktioonil järgmine:

$$B = \mu H; \quad H = \frac{B}{\mu}; \quad \mu = \frac{B}{H};$$

Praktiliselt on läbitavus arv, mis näitab, mitu korda magnetvoog, s. o. magnetitungjoonte hulk on antud kehas suurem kui õhus. Raua läbitavus pole igal puhul sama, kuna ta oleneb rauasordist. Ta ei osutu kindlaks suuruseks ka ühes ja samas rauasordis, vaid muutub

olenevalt väljatugevusest, kuna igale väljatugevusele vastab antud rauas erisugune induktsioon. Joon. 60 on kujutatud konventsionaalse kokkuleppe kohaselt magnetilise induktsiooni ja väljatugevuse suhet tavaliste rauasortide puhul. X-teljele on kantud ühele ruutsentimeetritele langev tungjoonte arv õhus, mis iseloomustab väljatugevust, ja Y-teljele on kantud ühele ruutsentimeetritele langev tungjoonte arv rauas, mis iseloomustab induktsiooni. Vas-



Joon. 60.

tav X ja Y lõikepunkt määrab läbitavuse suuruse.

Näide: 1) Magnetvälja tugevus on 5 tungjoont 1 sm^2 . Leida sellele joonis 60 kohaselt vastav induktsioon ja välja arvata läbitavus, kui meil on tegemist pehme rauaga.

Jooniselt näeme, et väljatugevusele 5 vastab induktsioon 11500. Vastavalt sellele

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{11500}{5} = 2300.$$

2) Keha, mille põhilõikepind S on 6 cm^2 , läbib magnetvoog, mille suurus on 90000 tungjoont. Kui suur on magnetvoo tihedus?

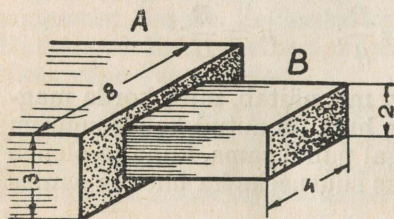
$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{90000}{6} = 15000 \text{ tungjoont / cm}^2.$$

3) Missugune on magnetvoo tihedus keha A ja B (joon. 61), kui üldine magnetvoog on 72000 tungjoont?

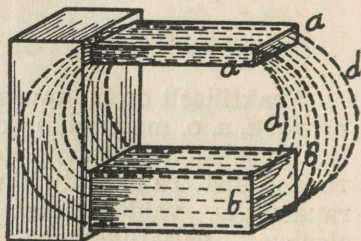
Keha A läbilõikepind $S = 8 \cdot 3 = 24 \text{ cm}^2$ ja tema magnetiline induktioon

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{72000}{24} = 3000 \text{ tungjoont / cm}^2.$$

Keha B läbilõikepind on 8 cm^2 ja B on 9000 tungjoont / cm^2 .



Joon. 61.



Joon. 62.

4) Joonisel 62 kujutatud kehas on magnetvoo suurus 160 tungjoont. Leida magnetvoo tihedused põiklõikeis $a - a$, mis võrdub $0,16 \text{ cm}^2$, $b - b - 1 \text{ cm}^2$ ja $d - d - 4 \text{ cm}^2$.

Magnetvootihedused antud kehaes võrduvad:

$$a - a) B = \Phi : S = 160 : 0,16 = 1000$$

$$b - b) B = 160 : 1 = 160$$

$$d - d) B = 160 : 4 = 40$$

Eelpooltoodust peame meeles, et magnetvoo tihedus sõltub:

1) magnetvälja tugevusest ja tarvitatud materjalist (pehme raud, teras jne.);

2) kindla magnetvoo suuruse puhul ainult magnetahela antud koha läbilõikepinnast.

Kahe magnetpooluse vastastikust tõuke- ja tõmbejõudu nimetatakse magnettingiks. Magnettingi mõõtühikuks on võetud kahe võrdse tugevusega pooluse mõju, kui nad asetsevad teineteisest ühe sentimeetri kaugusel ja seejuures tõukuvad või tõmbuvad ühe düünilise jõuga ($1/981 \text{ g}$).

Jõud, millega magnetid üksteist mõjutavad, oleneb nende kauguse ruudust ja nende (tingi tugevusest (magnetmasside korrutisele ja pöördvõrdeline nende kauguse ruudule).

$$\left(F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}\right).$$

Magneti tõmbe- või tõukejõu suuruse määrab magnetvoo tihedus ja põiklõikepind. Mida suuremad need on, seda suurem on ka magneti tõmbe- või tõukejõud. Põiklõikepinna suurus on vabalt valitav, kuid magnetvoo tiheduse ülemmäär on igal magnetiliste omadustega kehal piiratud suurus. Parimate magnetiliste omadustega kehadel, nagu pehmel raual, dünamoplekil jne., piirdub see kuni 19000 tungjooneni 1 sm² kohta. Praktiliselt suuremat magnetvoo tihedust saavutada pole enam otstarbne ja sellest magnetvoo tihedusastmest loetakse raud juba küllastunuks (vt. elektromagnetism).

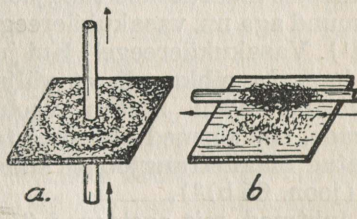
X. ELEKTROMAGNETISM.

§ 1. Elektrivoolu magnetiline mõju.

Kui elektrivoolust läbitava juhtme lähedale asetada magnetnõel, siis kaldub see oma tavalisest põhja-lõuna-asendist kõrvale. Kõrvalekaldumine on seda suurem, mida lähemal asetseb magnetnõel juhtmele ja mida tugevam on juhete läbiv vool. Seejuures võib veel tähele panna, et magnetnõela pöördumise siht oleneb juhtmes voolava voolu sihist. Kui juhtmes vool katkestada, siis pöördub magnetnõel põhja-lõuna suunda tagasi.

On teada, et magnetpoolusele võib tõuke- või tõmbejõudu avaldada ainult magnetjõud. Et magnetnõel elektrivoolu läheduses pöördub, siis peab ka selle põhjuseks olema

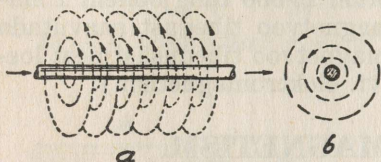
mingi magnetjõud. Seda nähet seletatakse nii, et iga juhtme ümber, mida läbib elektrivool, tekib magnetväli. See koosneb samuti magnettingjoontest, nagu nägime seda tavaliste magnetitegi juures. Magnettingjoonte olemasolu võib nähtavaks teha magnetilise spektrumiga, mida valmistatakse järgmiselt: torkame täisnurga all läbi horisontaalselt asetatud paberilehe, millele on raputatud rauapuru, mingi juhtme. Juhtmest voolu läbilaskmisel paberilehte raputades näeme, et rauapuru korraldub kontsentriliste ringidena juhtme ümber (joon. 63 a). Langetades või tõstes paberilehte, jääb magnetspektrum endiseks.



Joon. 63.

Kui kasta juhe, mida läbib elektrivool, rauapurusse, siis näeme, et rauapuru tõmbub juhtme külge (joon. 63 b). Sellest selgub, et rauapuru on muutunud magnetikesteks ja ka juhe on saavutanud magnetilised omadused. Kui katkestada vool, langeb rauapuru tagasi, millest järeldame, et rauapuru muutub magnetikesteks ainult elektrivoolu mõjul.

Eelnenust selgub, et elektrivoolu mõjul tekitatakse magnettingjooned, mis ümbritsevad juhet juhtmele ristloodis tasapindadel kontsentriliste ringidena (joon. 64 a).



Joon. 64.

Magnetspektrumilt võib näha, et juhtmest kaugemal rauapuru ei korraldu, seega on seal magnettingjoonte mõju väga väike. On kindlaks tehtud, et juhtmest kaugenemisel väheneb magnet-

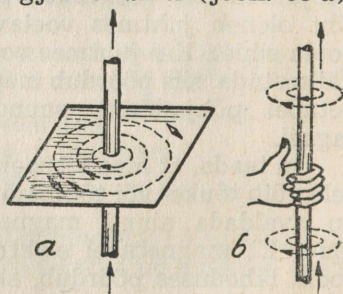
tingjoonte tihedus, s. o. magnetvälja tugevus. Siin on see täpsalt samuti nagu tavaliste magnetitegi juures (joon. 64 b).

Elektrivoolu mõjul tekitatud magnetvälja tungjoonte suund määratakse magnetnõela abil. See pöörduv voolu mõjul alati nii, et põhjapoolus näitab tungjoonte sihti (joon. 65 a).

Tavaliselt määratakse tungjoonte suund aga nn. vasakukäereegli abil¹⁾. Vasakukäereegel: Kui juhe haarata pihku nii, et väljasirutatud põial näitab voolusuunda, siis sõrmed näitavad tekitatud magnettingjoonte suunda (joon. 65 b)²⁾.

Juhtmed, mis asetsevad üksteise lähedal ja mida läbib elektrivool, avaldavad üksteisele magnetilist mõju:

1) Kui rööbiti asetsevais juhtmeis on elektrivoolud samasihilised, siis avaldavad need teineteisele **tõmbetungi** (joon. 66 a). Sellist voolude vastastikust mõju seletatakse magnettingjoonte omaduste abil. Kui



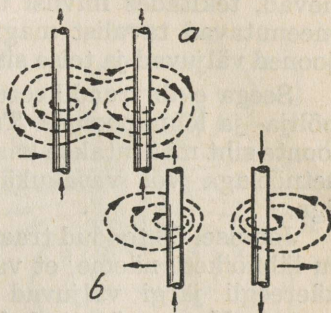
Joon. 65.

1) Joonisel 64 on noolega näidatud elektronide voolu suund.

2) Konventsionaalse voolusuuna tähistamise puhul määratakse tungjoonte suund paremakäereegliga, s. o. kui haarata juhe pihku nii, et väljasirutatud põial näitab voolu suunda, siis sõrmed näitavad tungjoonte suunda.

rööbiti asetsevais juhtmeis on voolud ühesuunalised, siis on ka nende juhtmete ümber tekkinud magnetnungjooned ühesuunalised. Jooniselt 66 a näeme, et juhtmeid ümbritsevaist tungjoontest väiksem osa on (juhtmete vahel) vastassuunalised, nende mõju hävineb. Suurem osa tungjoonist on aga ühesuunalised, mistõttu nende mõju liitub. Ümbritsedes mõlemaid juhtmeid püüavad liitunud tungjooned oma tee lühendamiseks koomale tõmbuda. Tõmbudes koomale, suruvad tungjooned aga ka mõlemaid voolujuhtmeid teineteisele lähemale. Sel puhul on juhtmeid ümbritsev magnetväli tugevam ühe juhtme ümber tekitatud magnetväljast.

2) Kui rööbiti asetsevais juhtmeis on elektrivoolud vastassuunalised, siis avaldavad need teineteisele **tõuketungi** (joon. 66 b).



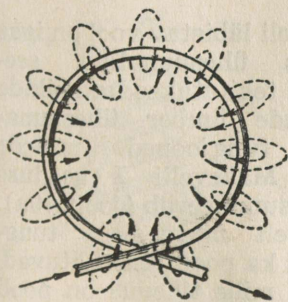
Joon. 66.

Vastassuunaliste voolude puhul on juhtmete ümber tekkinud magnetnungjooned vastassuunalised. Juhtmete vahel on tungjooned aga samasuunalised, mistõttu tungjoonte tihedus seal kasvab (ühnimelised tõukavad) ja tihenened tungjoonte külgrõhumise tõttu surutakse juhtmed üksteisest eemale (joonis 66). Juhtmete väliskülgedel osutuvad tungjooned vastassihilisteks, mistõttu nad teineteise mõju hävitavad. Kui need juhtmed asetsevad üsna lähestikku, siis juhtmete ümber tekkivad magnetväljad hävivad vastastikku peaaegu täielikult.

3) Kui juhtmed asetsevad teineteise suhtes ristamis, siis püüavad nad voolude mõjul asetuda teineteisele rööbiti ja nii, et neid läbivad voolud oleksid ühesuunalised.

Selpuhul püüavad magnetnungjooned asetuda nii, et neist suurem osa liituks ja nende tee ümber mõlema juhtme oleks kõige lühem.

Neis kolmes punktis nimetatud nähted on kokkuvõetult väljendatud **Maksvelli I seadusega: Juhtmed, kui neid läbib vool, püüavad teineteise suhtes ase-**



Joon. 67.

tuda nii, et neid ümbritseks võimalikult rohkem ühe- ja sama-suunalisi tungjooi.

Kui painutame voolujuhtme ringiks, siis võime tähele panna, et seda ümbritsevad magnetitungjooned samuti nagu sirgjuhetki (joon. 67). Samuti võime näha, et voolu mõjul tekitatud tungjooned ühelt poolt ringi väljuvad, teiselt poolt sisenevad, tekitades niiviisi traadikeeru ümber tungjooned, mis meenutavad tavalist magnetvälja, kus ühelt pooluselt tungjooned väljuvad ja teise sisenevad.

Seega evib traadikeeru ümber tekitatud magnetväli ka põhja- ja lõunapooluse. Traadikeeru ümber tekitatud tungjoonte siht määratakse kas magnetnõelaga või vasakukäereegliga.

Joonisel 68 toodud traadikeeru läbilõikest näeme, et vasakukäereegli järgi väljuvad tungjooned *N*-ga märgitud küljelt ja sisenevad *S*-ga märgitud küljel¹⁾. Seega asetsevad traadikeeru *N*- ja *S*-ga märgitud külgedel ka vastavad poolused.

Katsed näitavad, et kraadikeeru ümber tekitatud magnetväli evib kõik tavalise magneti omadused.

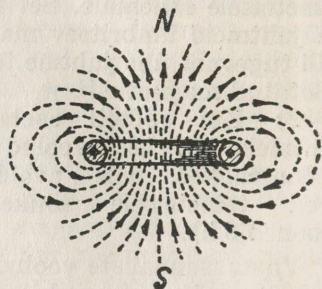
Spiraali kujuliselt kokkukeeratud traat, mille keerud üksteisest isoleeritud, nimetatakse **solenoidiks**, tavalises kõnes ka pooliks (joon. 69).



Joon. 69.

Pooli läbistav vool on igas keerus ühesuunaline, seepärast tekitatakse ka kõikide keerude ümber ühesuunalised tungjooned, millede mõju Maksvelli I seaduse järele summeerub (joon. 70a). Jooniselt näeme, et tungjoonte sihid väljaspool poolikeerde kui ka pooli sees ühtuvad, moodustades seega üldise magnetvoo, mille tihedus on pooli sees suurem kui väljaspool pooli.

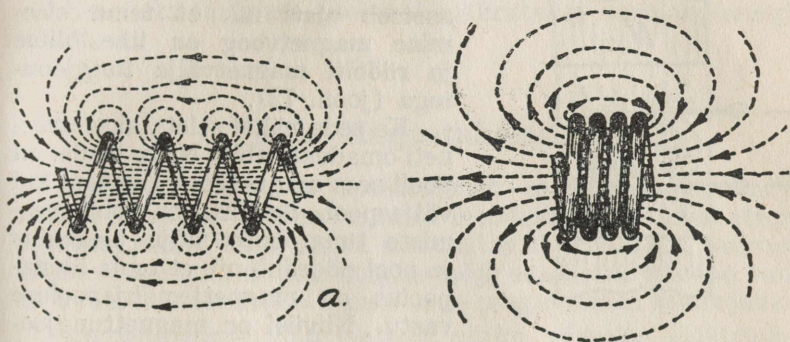
Pooli ümber tekitatud magnetvoog on antud voolutugevuse



Joon. 68.

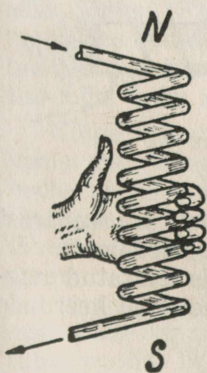
¹⁾ Voolusuund eest tahapoole on siinkohal ja edaspidi märgitud ristikesega ja tagant ettepoole punktiga.

juures seda tugevam, mida lähemal asetsevad poolikeerud üksteisele (joon. 70b). Joonisel 70a näeme, et poolikeerdude vahel on ka tungjooni, millede suunad on aga sääl vastupidised. Seega osa tungjoontest hävitavad üksteise mõju ja pooli ümber tekitatud magnetvoog jääb vastavalt väiksemaks. Mida kaugemal poolikeerud üksteisest asetsevad, seda vähe-



Joon. 70.

maks jääb ka pooli ümber tekitatud magnetvoog, kuid mida lähemal poolikeerud üksteisele asetsevad (joon. 70b), seda vähem hävib tungjooni ja seda enam liitub neid ühiseks magnetvooks.



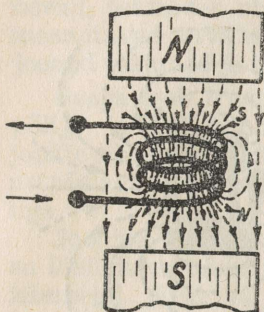
Joon. 71.

Et pooli ümbritsev magnetvoog koosneb üksikute keerdude ümber tekitatud magnetvoogude summast, siis evib pool ka samad magnetilised omadused nagu üksik keerdki, s. o. ta tõmbab rauda külge, tekitab rauas magnetilise induktsiooni, mõjub magnetnõelale, võib täita isegi magnetnõela ülesandeid jne. Nimetatud omadused on aga poolil palju tugevamad kui üksikul keerul.

Nõnda siis evib pool magneti omadusi. Tal on põhja- ja lõunapoolus. Põhjapoolus tekitab sellel pooli otsal, kust tungjooned väljuvad ja lõunapoolus — kuhu nad sisenevad. Pooli pooluste määramiseks rakendatakse

vasakukäereegel järgmisel kujul: Kui vasaku käega haarata pooli, nii et sõrmed näitavad voolusuunda, siis väljasirutatud põial näitab põhjapoolust (joon. 71)¹⁾.

Magneti mõju voolu kandvale juhtmele väljendatakse Maksvelli II seadusega, mis on järgmine: Kui asetada vabalt pöörlev traadikeerd või pool, mida läbib vool, magnetvälja, siis ta asetseb alati nii, et tema sise-simine magnetvoog on ühesihiline ja rööbiti magnetvälja tungjoon-tega (joon. 72).



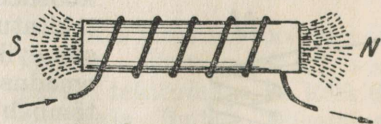
Joon. 72.

ühesuunalised ja rööbiti. Analoogiline on voolu mõju magnetile.

Magneti mõju voolule ja voolu mõju magnetile kasutatakse elektrimasinasis, elektri mõõteriistades jne.

Kui pooli lähedale asetame rauatüki, siis magnetinduktsiooni tõttu muutub see magnetiks. Pooli otsa lähemal tekib raual vastasnimeline poolus. Vastasnimelised poolused tõmbuvad ja seetõttu tõmbub rauatükk pooli külge. Võib tähele panna, et rauatükk seejuures püüab pooli suhtes asetuda nii, et temasse koonduks võimalikult palju poolis tekitatud tungjooni, ja seepärast tungib ta pooli sisse, kus on tungjooni kõige tihedamalt.

Rauatüki külgetõmbe tugevus sõltub poolis tekitatud magnetvoo suuruselt. See omakorda on võrdeline pooli keerdude arvule ja pooli läbiva voolu tugevusele.



Joon. 73.

¹⁾ Konventsionaalse voolusuuna tähistamise puhul oleks see aga järgmine: Kui parema käega haarata pooli, nii et sõrmed näitavad voolusuunda, siis väljasirutatud põial näitab põhjapoolust.

Kui pooli asetada rauatükk, siis pooli sees magnetoog tiheneb. Tihenemise suuruse määrab arvuliselt antud rauasordi läbitavus, mis on õhu läbitavusest palju suurem. Raudsüdamikuga poolis tekitatud magnetvoost koondub suurem osa rauda (joon. 73). Sellist pooli nimetatakse **elektromagnetiks**. Elektromagneti külgetõmbejõud on mitusada korda tugevam, kui samal poolil ilma raudsüdamikuta.

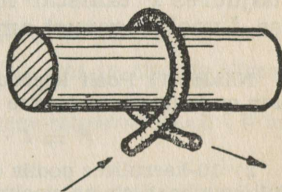
Ka elektromagneti poolused määratakse vasakukäereegli abil.

§ 2. Magnetahelad.

Eelpool, vastavalt spektrumeilt magnettingide mõju suundi jälgides, nägime, et need moodustavad kinnisi ringe, nn. **tungjooni**. Tungjooned moodustavad omakorda **magnetahela**. Parimaks magnettingide mõju edasikandjaks on raud ja teras, mistõttu neid kasutatakse magnetahela materjaliks.

Magnetahelaid võib teatava piirini võrrelda elektriahelatega. Vahe seisab vaid selles, et elektriahelais voolab elektrivool, magnetahelais pole aga mingit voolu, vaid on teatav magnetiline seisukord, milles mõjuvad ainult magnettingid.

Elektriahelais põhjustab elektrivoolu elektromotoorne jõud. Magnetahelais põhjustab magnetvoo tekkimise mingi magnetiline jõud, mida nimetatakse **magnetomotoorseks jõuks** (F). Seega magnetomotoorne jõud on põhjus, miks tekib magnetvoog, või miks muutub mõni keha magnetiks.



Joon. 74.

Kõige lihtsam on magnetomotoorset jõudu tekitada elektrivoolu abil. Magnetnõela abil on võimalik näidata, et elektrivoolu mõjul juhtme ümber tekitatud magnetvälja tugevus (tungjoonte arv) on võrdeline voolutugevusega ja et juhtme lähedal on magnetvälja tugevus (tungjoonte tihedus) kõige suurem.

Sirgjuhtme ümber tekitatud tungjooned on jaotatud palju suuremale ruumalale, kui sama pikkusest juhtmest valmistatud poolis. Et poolis on juhtme ümber tekitatud tungjooned koondatud väiksemale ruumalale, siis on ka poolis magnettingjoonte tihedus ühe ja sama voolutugevuse puhul palju

suurem kui sirgjuhtme ümber. Mida suurem on pooli keerdude arv — seda suurem on ka magnetvoo tihedus. Seega poolis mõjuv magnetväljatihedus on suurem kui sirgjuhtmes.

Poolis tekitatud magnetomotoorse jõu praktiliseks mõõtühikuks on **amperkeerd** (AK).

Keeruks nimetatakse elektromagnetilises mõttes ühte traadikeerdu (joon. 74), olgu selle südamikuks õhk (sole-noidis) või raud (elektromagnetis).

Amperkeerd iseloomustab magnetomotoorse jõu suurust, mille tekitab üheampriline vool läbides ühe traadikeeru. Seega võrdub amperkeerd üheamprilise voolu ja ühe keeru korrutisele ($AK = 1 \text{ amper} \times \text{keerd}$).

Poolis tekitatud magnetomotoorne jõud on võrdeline pooli läbiva voolu tugevusega ja pooli keerdude arvuga (n). Kui muuta voolutugevust ja keerdude arvu nii, et nende korrutis jääb samaks, siis ei muutu ka magnetomotoorne jõud F . F suurusele ei avalda mingit mõju pooliks kasutatud traadi jämedus, selle takistus ja pooli läbilõikepind. Seega magnetomotoorne jõud

$$F = I \cdot n, \text{ kust } I = \frac{F}{n} \text{ ja } n = \frac{F}{I},$$

kusjuures F tähistab magnetomotoorset jõudu amperkeerdudes, I voolutugevust ampreis ja n pooli keerdude arvu.

Näide: 1) Pooli keerdude arv on 100. Neid läbib vool 0,2 A. Kui suur on magnetomotoorne jõud F ?

$$F = I \cdot n = 0,2 \cdot 100 = 20 \text{ AK.}$$

2) 10-keerulises poolis on vaja tekitada F , mille suurus oleks 20 AK. Kui suur peab olema voolutugevus?

$$I = \frac{F}{n} = \frac{20}{10} = 2 \text{ A.}$$

3) Meil on kaks pooli ja kummagi magnetomotoorne jõud F võrdub 200 AK. Esimest pooli läbiva voolu tugevus on 20 mA, teist — 4 A. Leida kummagi pooli keerdude arv.

$$n' = \frac{200 \cdot 1000}{20} = 10000 \text{ ja } n'' = \frac{200}{4} = 50.$$

Magnetahelaid koostavate materjalide omadusi takistada neis magnetvoo tekkimist nimetatakse magnetiliseks takistuseks ehk tõkestuseks (R). Nagu elektriahela takistus sõltub ahela koostamiseks kasutatud materjalist, nii on ka magnetahela **tõkestusega**. Näiteks raud ja teras evivad võrd-

lemisi väikese tõkestuse, s. o. nad omavad suure läbitavuse. Nende tõkestus pole aga ometi jääv suurus, vaid sõltub suurel määral magnetvoo tihedusest (B). Magnetvoo tiheduse suurenedes (kuni südamiküüllastuseni) kasvab ka tõkestus.

Nagu elektriahelais juhtme takistus arvutatakse valemiga.

$$R = \frac{l}{\lambda \cdot q} \quad (\rho \text{ on asendatud erijuhtivuse } \lambda\text{-ga, } \lambda = \frac{1}{\rho}), \text{ nii}$$

arvutatakse ka tõkestus.

Tõkestus on samuti võrdeline magnetahela pikkusele (tungjoonte tee pikkusele) ja pöördvõrdeline materjali läbitavusele ning ahela läbilõikepinnale. Seega tõkestus

$$R = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

Kus l on magnetahela pikkus sentimeetris, μ materjali suhteline läbitavus õhutühja ruumiga (praktiliselt ka õhuga) ja S magnetahela põhilõikepind sm^2 .

Tegelikult loetakse õhu tõkestus võrdseks ühega ja teiste ainete tõkestus leitakse võrreldes neid õhu tõkestusega.

Näide: 1) Pehmest rauast on valmistatud õhupiluga ring. Raua läbitavus $\mu = 300$. Ringi raudosa keskmine pikkus $l = 12$ sm ja õhupilu laius $l' = 0,5$ cm. Ringi põiklõikepind $S = 4$ sm^2 . Kui suur on ahela tõkestus?

Ahela üldine tõkestus koosneb raua tõkestusest ja õhupilu tõkestusest. Raua tõkestus $R' = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{12}{300 \cdot 4} = 0,01$ ja õhupilu tõkestus $R'' = \frac{l'}{\mu \cdot S} = \frac{0,5}{1 \cdot 4} = 0,125$. Seega üldine tõkestus $R = R' + R'' = 0,01 + 0,125 = 0,135$.

2) Kui suur on joonisel 75 toodud raudrõnga tõkestus ilma õhupiluta?

Magnetahela keskmine pikkus on $l + l' = 12 + 0,5 = 12,5$ sm ja seega

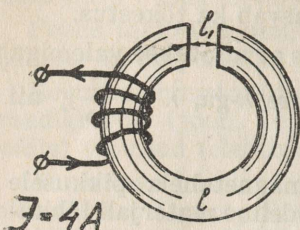
$$R = \frac{l}{\mu \cdot S} = \frac{12,5}{300 \cdot 4} = 0,0104$$

Nagu elektriahelas voolutugevus sõltub elektromotoorsest jõust ja ahela takistusest, nii määravad ka magnetahelas magnetvoo suuruse magnetomotoorne jõud ja tõkestus.

Igas magnetahelas on magnetvoo võrdeline magnetomotoorsele jõule ja pöördvõrdeline tõkestusele. Seega

$$\Phi = \frac{F}{R}$$

kusjuures Φ on magnetvoog tungjoontes, F on magnetomotoorne jõud amperkeerdues ja R tõkestus¹⁾.



Joon. 75.

Magnetvoo avaldamiseks tungjoonte abil tuleb amperkerde veel korrutada $0,4\pi$ -ga. Seega magnetvoog

$$\Phi = \frac{0,4\pi \cdot I \cdot n}{R} = \frac{1,25 \cdot I \cdot n}{R}$$

($0,4\pi = 1,25$)

$$In = \frac{\Phi \cdot R}{0,4\pi} = 0,8 \cdot \Phi \cdot R$$

$$\left(\frac{1}{0,4\pi} = 0,8\right)$$

kus Φ on magnetvoo tungjoonte arv, I on pooli läbiva voolu tugevus ampreis, n on pooli keerdude arv ja R on tõkestus.

Näide: 1) Joonisel 75 toodud õhupiluga raudsüdamikul on 40 kerdu, mida läbib 4-ampriline vool. Leida Φ !

$$\Phi = \frac{1,25 \cdot I \cdot n}{R} = \frac{1,25 \cdot 40 \cdot 4}{0,135} = 1500$$

2) Joonisel 75 toodud südamik on õhupiluta, amperkerde sama palju kui eelmises ülesandeski. Leida Φ !

$$\Phi = \frac{1,25 \cdot 40 \cdot 4}{0,0104} = 20000$$

Arvutusest näeme, et õhupiluga raudsüdamiku puhul on ühe ja sama arvu amperkerdudega poolis tekitatud magnetvoog palju väiksem, kui ilma õhupiluta raudsüdamiku juures. See on seletatav õhu suure tõkestusega. Nagu elektriabelais võib esineda mitmesuguse suurususega takistusi, nii võib ka magnetahelas esineda erinevate suurustega tõkestusi, millede summa moodustab ahela kogutõkestuse.

Tegelikult ei arvestata igakord mitte otsekohe tõkestusega, vaid kasutatakse valemeid, millede tõkestus on avaldatud

¹⁾ CGS-süsteemis on: F mõõtühikuks gilbert, kusjuures $1 \text{ AK} = 0,4\pi$ gilbertit, Φ mõõtühikuks maksvell, B mõõtühikuks gauss ja H mõõtühikuks oersted, kusjuures $1 \text{ AK/sm} = 0,4\pi$ oerstedit.

Käesolevas raamatus on kõik need ühikud avaldatud tungjoontes. Näiteks magnetvoog 100000 maksvelli on 100000 tungjoont, samuti magnetvootihedus 10000 gaussi on 10000 tungjoont sm^2 .

vastavate magnetahela suuruste kaudu ja kus tõkestus on asendatud $\frac{l}{\mu \cdot S}$ -ga. Samuti avaldatakse ka magnetvoog magnetvootiheduse ja ahela põiklõikepinna kaudu — $\Phi = BS$. Seega võime kirjutada

$$I \cdot n = 0,8 \cdot \Phi \cdot R = \frac{0,8 \cdot B \cdot S \cdot l}{\mu \cdot S} = \frac{0,8 \cdot B \cdot l}{\mu} \text{ ja}$$

$$B = \frac{I \cdot n \cdot \mu}{0,8 \cdot l} = \frac{1,25 \cdot I \cdot n \cdot \mu}{l}$$

kusjuures $I \cdot n$ tähistab amperkeerde, B magnetvootihedust tungjoontes ühe ruutsentimeetri kohta, l ahela pikkust sentimeetris (ringikujulisil südamikel keskmist pikkust) ja μ ahela läbitavust.

Viimasest valemist näeme, et magnetvootihedus on võrdeline amperkeerdudele, ahela läbitavusele ning pöördvõrdeline ahela pikkusele. Vastavalt sellele tuleb, et hoida kokku amperkeerde, vähendada ahela pikkust või kasutada suure läbitavusega metalle.

Kui valemist $I \cdot n = 0,8Bl/\mu$ teisendada nii, et $I \cdot n/l = 0,8B/\mu$, siis avaldus $I \cdot n/l$ kujutab endast amperkeerdude arvu ahela ühesentimeetrilisele pikkusele, mida on vaja vastava magnetvootiheduse (induktsiooni) tekitamiseks. Näiteks ahela pikkus on 20 sm. Vajalikud amperkeerdud vastava magnetvootiheduse tekitamiseks ühe sentimeetri ahela pikkusele on 100. Seega on kogu ahelas vaja $20 \cdot 100 = 2000$ AK.

Õhksüdamikuga poolis, kui pooli kuju, keerdude arv ja keerde läbiva voolu tugevus jääb samaks, on magnetvootihedus, võrreldes pooliga, mis varustatud raudsüdamikuga, raua läbitavuse (μ) korda vähem.

Tegelikult on õhksüdamikuga poolis tekitatud magnet-tungjooned nn. magnetiseerivaks jõuks (väljatugevus H), mis kutsubki esile selle südamiku või selle lähedusse asetatud ferromagnetilisis materjales, nagu rauas, terases jne., magnetilise induktsiooni, s. o. tekitab neis μ korda suurema arvu tungjooni. Näiteks õhksüdamikuga poolis on väljatugevus H 2 tungjoont 1 sm^2 . See väljatugevus tekitab pooli südamikku asetatud rauas raua läbitavuse $\mu = 500$ korda suurema tungjoonte arvu. Seega on rauas magnetvootihedus 1000 tungjoont 1 sm^2 .

Et õhu läbitavus loetakse praktiliselt võrdseks ühele, siis

õhksüdamikuga poolis $H = B$ ($\mu = 1$) ja järelikult võime kirjutada

$$I \cdot n = \frac{0,8 \cdot B \cdot l}{\mu} = 0,8 H \cdot l \quad (\mu = 1 \text{ ja } B = H)$$

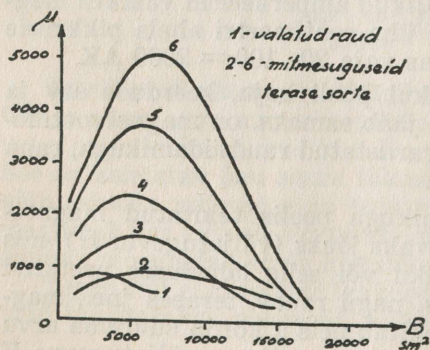
ja siit

$$H = \frac{1,25 \cdot I \cdot n}{l}$$

kusjuures H tähistab väljatugevust tungjoontes ühele sm^2 , $I \cdot n$ amperkeerde ja l pooli pikkust sentimeetris. Siin võib vajalikud amperkeerud ahela ühesentimeetrilisele pikkusele avaldada ka avalduse $I \cdot n/l$ kaudu ($I \cdot n/l = 0,8H$).

Väljatugevuse ja magnetvootiheduse vahekorda iseloomustatakse läbitavusega μ . Eelpool toodud suhe, kus läbitavus $\mu = B/H$, jääb ka raudsüdamikuga poolide (elektromagnetite) kohta kehtivaks.

Rauda sisaldavail olluseil on vahekord väljatugevuse ja magnetvootiheduse vahel võrdlemisi keeruline, sest läbitavus sõltub päälle olluse koostise ka veel väljatugevusest, südamiku temperatuurist jne. Seega pole B ja H analüütiline suhe kuigi täppis, vaid ligikaudne. Joonisel 76 μ muutumise kõverailt näeme, et μ suurus sõltub magnetiseerimise astmest, s. o. magnetvootihedusest, ja et μ on suuris piires muutuv. Magnetiseerimise alguses suureneb ta magnetvootiheduse kasvades



Joon. 76.

kiiresti ja teatava B väärtuse juures saavutab ta oma maksimaalväärtuse. Edasisel B suurenemisel μ väheneb ja magnetvootiheduse 15 000 ja 20 000 juures saavutab ta minimaalse väärtuse.

Seda olukorda, kus B ja H vahekord ferromagnetiliste (raud, teras, malm jne.) südamikkude puhul võrdub ühele, nimetatakse metalli küllastumiseks.

Küllastumise hetkest, vaatamata magnetiseeriva jõu suurenemisele, magnetvootihedus, s. o. magneti tõmbe-tõukejõud enam ei suurene.

Igal terase-, raua- ja malmisordil on erisugune küllastuspiir. Parimail raua- ja terasesortidel on küllastuspiiriks umbes 19 000 tungjoont ühele sm^2 , kuna malmil see aga künüb kuni 10 000-ni.

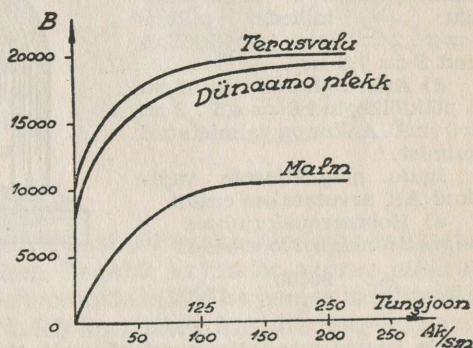
Temperatuuri muutused kuni 50° — 60° C raua läbitavusele mingit mõju ei avalda. 60° — 100° C piirides raua läbitavus kasvab, kuid edasisel temperatuuri tõusul kuni 740° C püsib see peaaegu konstantsena. Umbes 750° C juures kaotab raud magnetilised omadused. Edasisel temperatuuri tõusul ta enam ei magnetiseeru. Seda raua omadust kasutatakse mõnikord remanentse magnetismi hävitamiseks, näit. elektromagnetite südamikest, ankrust jne.

Elektrotehnikas kasutatakse läbitavuse kindlaksmääramiseks analüütilise lahenduse asemel H ja B graafilist kujutist magnetiseerimise kõveratega (joon. 77)¹⁾.

Joonisel on horisontaaltele kantud amperkeerud pooli ühe sentimeetri pikkusel (võib ka tungjoonte arv, siis $1 \text{ AK}/\text{sm} \equiv 1,25 \text{ tungjoont}/\text{sm}^2$).

Vertikaaltele on kantud vastavalt amperkeerdudele antud metallis tekkiv magnetvootihedus. Kõverailt leitakse vastavale metallile kas B või selle tekitamiseks vajalikud AK/sm . Teades amperkeerud, tõmmatakse vastava arvu kohalt vertikaaljoon üles, kuna vastava metalli magnetiseerumiskõverani. Nende lõikepunktist tõmmatud horisontaaljoon vertikaaltele näitab antud amperkeerdudele vastava magnetvootiheduse. B teada olles talitatakse vastupidiselt. Malmisüdamiku puhul näiteks oleks $100 \text{ AK}/\text{sm}$ juures magnetvootihedus $10\,000$ tungjoont 1 sm^2 .

Magnetiseerimise kõverad on valmistatud katselisel teel. Nende abil saavutatakse magnetahelate arvutamisel palju



Joon. 77.

¹⁾ Joonis 77 seletatus on tungjoonte all mõeldud praktilist väljategevuse ühikut — oerstedti.

suurem täpsus kui analüütilisel teel. Üldiselt on arvutustes väljatugevuse asemele otstarbekam kasutada amperkeerde, mis on antud magnetahela ühe sm pikkusele, eeldusel, et magnetiseerumiskõverad on koostatud ka vastavalt amperkeerdudele.

Näide: 1) Kui palju on vaja hobuserauakujulisele magnetile amperkeerde, et selles tekkiv magnetvoog oleks 90 000 tungjoont (joon. 78).

Magneti mõõdet on järgmised:

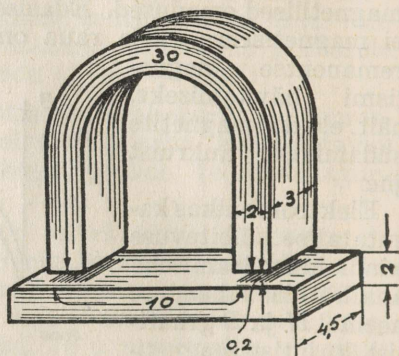
1) Hobuserauakujulise osapikkus $l = 30$ sm ja läbilõikepind $S = 6$ sm² valmistatud dünamoplekist. 2) Kaks õhupilu — millede pikkus $l = 2 \cdot 2 = 4$ mm ja põiklõikepind $S = 7,5$ sm².

3) Ankru pikkus $l = 10$ sm ja põiklõikepind $S = 4,5 \cdot 2 = 9$ sm². Ankur on valmistatud malmist.

Igale magnetiosale vajalikud AK arvutatakse eraldi.

a) Hobuserauakujulises magnetis magnetvootihedus

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{90000}{6} = 15000$$



Joon. 78.

Sellele leiame magnetiseerumiskõveralt (joon. 77) amperkeerdud ühesentimeetrilisele pikkusele, seega saame — $AK/sm = 50$. Kogu pikkusele $AK = 50 \cdot 30 = 1500$.

b) Õhupilus magnetvootihedus $B = \frac{90000}{7,5} = 12000$. Valemist, kus $In = 0,8 H \cdot l$, saame, et õhksüdamikupuhul $In/l = 0,8 \cdot H$. Siin $H = B$ ja seega on vaja $AK/sm = 0,8 \cdot 12000 = 9600$. Õhupilude kogupikkus on 0,4 sm, seega on õhupiludes vajalikud $AK = 9600 \cdot 0,4 = 3840$.

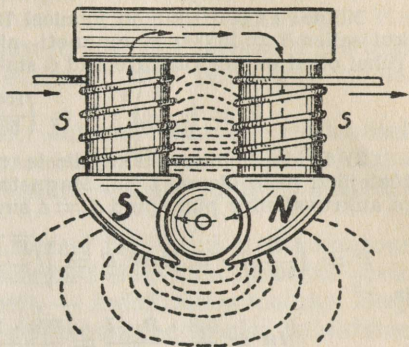
Malmankrus magnetvootihedus $B = \frac{90000}{9} = 10000$ ja sellele vastavalt on vaja $AK/sm = 100$ ning ankru kogupikkusele $AK = 100 \cdot 10 = 1000$. Seega on selles magnetis nõutud magnetvoo tekitamiseks vaja kokku

$$AK = 1500 + 3840 + 1000 = 6340.$$

Arvutusest näeme, et 0,4 sm õhupilu ületamiseks on tarvis rohkem amperkeerde kui terase ja malmi pikkustele kokku. Sama tugeva magnetvoo tekitamiseks vähema arvu amperkeerdudega tuleb õhupilu kitsamaks muuta.

Tegelikult ei asetse kõik tungjooned elektromagneti metallis, vaid osa neist tungib ka metallist välja ja mõjub õhu kaudu (joon. 79). Seda nähet nimetatakse magnet tungide

hajumiseks¹⁾). Seletatakse seda järgmiselt: et õhk pole magnettingidele väga suureks takistuseks, siis osa tekitatud magnettingidest hargneb ka õhu kaudu, kusjuures need tingid asetsevad rööbiti raudsüdamikule. Nii jaotub magnetahel kaheks. Osa sellest läbib ankru ja elektromagneti südamikule ja moodustab kinnise magnetahela (joonisel nooltega näidatud). See allub magnetilistele reeglitele ja on praktiliselt kasutatav. Teine osa (joonisel punktiiriga näidatud) läbib õhu ja moodustab välimise magnetahela. Seda osa praktiliselt kasutada ei saa.



Joon. 79.

Magnetiline hajumine pole analüütiliselt arvutatav, sest on raske kindlaks määrata tungjoonte levimisteid õhus. Tegelik hajumise suurus määratakse katselisel teel ja iseloomustatakse hajumise koefitsiendiga. See on arv, millega tuleb korrutada kasulik magnetvoog, et saada üldist elektrivoolu poolt tekitatud magnetvoogu. Näiteks kui joonisel 79 iga 100 tungjoone kohta, mis läbivad ankru, on vaja tekitada staatori²⁾ südamikule $S-S$ 150 tungjoont, siis selle seade hajumise koefitsient on 1,5. Hajumiskoeffitsient sõltub suurel määral kasutatud südamikulede kujudest kui ka mähiseasetusest. On mähis kogu ahela ulatuses ühtlaselt jaotatud, siis on ka hajumus väiksem. Praktikas tuleb arvestada hajumiskoeffitsiendiga, mis kõigub umbes 1—1,5 piirides.

Elektromagneteid kasutatakse väga mitmesuguseks otstarbeks, näit. elektrimasinain, telefoni- ja telegraafiaparaatides, signaalseadeis, tõstekraanades jne.

Magnettõstejõu arvutamiseks on olemas järgmine valem:

$$P = \frac{B^2 \cdot S}{8\pi \cdot 10^6} \approx \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot S$$

kusjuures P tähistab elektromagneti südamiku- ja ankruvahelist magnettingi suurust kilogrammides, B magnetvootihe-

1) puisteks.

2) Elektrimasinainis paigalseisev osa — ikke.

dust magneti ja ankru kokkupuutepinnal ja S magneti ja ankru kokkupuutepinda ruutsentimeetris.

Päale selle rakendatakse seda valemit ka magnetvootiheduse kui ka magneti ja ankru kokkupuutepinna leidmiseks.

Näide: 1) Kui suur on joonisel 78 toodud elektromagneti tõstejõud, kui selles $B = 15\,000$ ja magneti- ning ankruvaheline kokkupuutepind (ühel otsal on kokkupuutepind 6 sm^2) $S = 2 \cdot 6 = 12\text{ sm}^2$?

$$P = \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot S = \left(\frac{15000}{5000}\right)^2 \cdot 12 = 108\text{ kg}$$

2) Leida hobuserauakujulisele magnetile amperkeerud, kui selle tõstejõud peab olema 1 kg . Magnetahela pikkus $l = 20\text{ sm}$, magneti- ja ankruvaheline puutepind $S = 4\text{ sm}^2$ ja raua läbitavus $\mu = 500$.

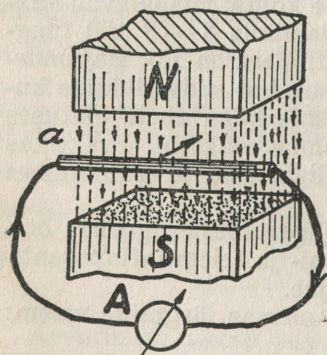
$$P = \left(\frac{B}{5000}\right)^2 \cdot S, \text{ kust } B = \sqrt{\frac{P \cdot 5000^2}{S}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 5000^2}{4}} = 2500$$

ja ;

$$In = \frac{0,8 \cdot B \cdot l}{\mu} = \frac{0,8 \cdot 2500 \cdot 20}{500} = 80\text{ AK}$$

XI. ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON.

Elektrivool põhjustab magnetivälja tekkimise juhtme ümber. Et aga elektrivool pole muud kui elektronide liikumine, siis ka magnetvälja tekitajaks juhtme ümber on juhtmes liikuvad elektronid. Vastavad katsed aga näitavad, et ka alati, kui magnettingjooned lõikavad juhet, tekib selles elektrivool. Sellest väljudes peame järeldama, et ka magnetväli põhjustab juhtmes voolu.



Joon. 80.

Kui näiteks liigutada juhet a (joon. 80) ristloodselt magnettingjoontele, siis juhtmega järjestikku lülitatud galvanomeeter näitab elektrivoolu. Lükanud juhtme läbi magnetvoo, galvanomeeter voolu enam ei näita.

Tõmmates juhtme läbi magnetvoo tagasi, näitab see jälle voolu, mille suund on nüüd vastupidine endisele voolusuunale. Kui jätta juhe magnetvoosse seisma või kui liigutada juhet magnettingjoontele rööbiti, s. o. joonisel 80 esitatud juhul üles ja alla, siis galvanomeeter voolu

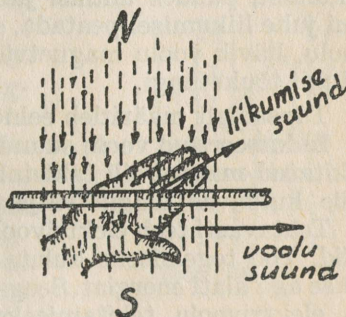
ei näita. Sellest nähtub, et ahelas tekib elektrivool, kui juhe liigub magnetpooluste vahel ristloodis tungjoontele.

Oomiseaduse kohaselt peab ahelas elektrivoolu põhjustama elektromotoorne jõud (pinge), mis käesoleval juhul võis tekkida ainult magnettingjoonte lõikumisel juhtmega. Kui ühendada juhtme a otsad voltmeetriga, siis näitakski see tekitatud elektromotoorse jõu suuruse, mis põhjustab ahelas elektrivoolu.

Eelnenust järgneb reegel: **Juhtme liikudes ristloodselt magnetvoos, tekitatakse juhtmes tema liikumise kestel elektromotoorne jõud, mille mõju suund sõltub juhtme liikumise suunast.**

Magnetvoo ja juhtme lõikumisel tekitatud elektromotoorset jõudu nimetatakse indutseeritud elektromotoorseks jõuks ja selle põhjustatud elektrivoolu — induksioonvooluks. Kogu seda nähet nimetatakse aga elektromagnetiliseks **induksiooniks**. Elektromagnetilise induksiooni nähteid kasutatakse mehaanilise energia muundamisel elektriliseks energiaks.

Indutseeritud voolu suuna määramiseks kasutatakse järgmist reeglit: **Kui asetada parem käsi magnetpooluste vahele nii, et magnettingjooned tungivad peopessa ja väljasirutatud sõrmed näitavad juhtme liikumise suunda, siis harali hoitud põial näitab indutseeritud voolu suunda** (joon. 81)¹).

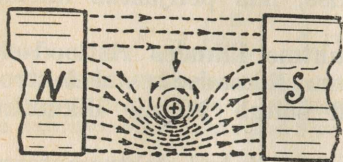


Joon. 81.

Tungjoonte lõikumisel juhtmega indutseeritakse viimases elektromotoorne jõud vaatamata sellele, kas juhe moodustab vooluahela või mitte. Juhtmes võib tekkida vool ainult siis, kui moodustada juhtmest kinnine vooluahel. Voolutugevus antud ahelas sõltub elektromotoorsest jõust ja ahela takistusest. Kaht viimast suurust teades võime oomiseaduse põhjal määrata ka voolutugevuse.

¹) Konventsionaalse voolusuuna tähistamisel määratakse indutseeritud voolu suunad vasakukäereeglga: kui asetada vasak käsi nii, et magnettingjooned tungivad peopessa ja väljasirutatud sõrmed näitavad juhtme liikumise suunda, siis harali hoitud põial näitab indutseeritud voolu suunda.

Kui magnetväljas liigutada sirgjuhet *a* (joonis 80), siis näeme, et juhtme liigutamiseks pole vaja kuigi suurt jõudu. Niipea aga kui suleme voolujuhtme kinniseks ahelaks, siis ilmneb ahelas elektrivool ja ühtlasi ei toimu ka juhtme liikumine enam nii kergesti. Näib, et seda takistab mingi juhtmele liikumissuunas vastumõjuv jõud. Seda seletatakse järgmiselt.



Joon. 82.

Juhtmes indutseeritud vool tekitab ka juhtme ümber magnet-tungjoooni (joon. 82), mis ühel-pool juhete on magneti tung-joontega samasuunalised, teiselpool aga vastasuunalised. Vastasuunalised hävitavad üksteise mõju, samasuunalised aga avaldavad üksteisele vaid tõuketungi. Seetõttu tekibki siin nähe, et samasuunaliste tung-joonte külgrõhumine takistab noolega näidatud suunas juhtme liikumist, püüdes ühtlasi juhete magnetvoost välja tõugata. Kui juhe liikumisel peatada, siis juhtmes ei indutseerita enam voolu, hävib voolu magnetväli ja juhtmele ei mõju ka enam mingit tõuketungi.

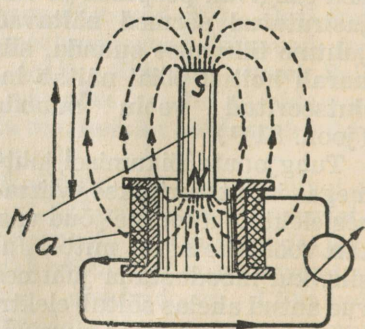
Täpsamalt määritleb eelnenut Lenzi seadus:

Indutseeritud voolu suund on alati niisugune, et tema poolt tekitatud magnetväli takistab juhtme liikumist induksiooni esile kutsuvas magnetväljas.

Teatavasti teeb elektrivool tööd. Töö tegemiseks kulutatakse aga alati energiat. Seega ka elektrivoolu tekitamiseks tuleb kulutada ekvivalentset hulgas mingisugust energiat. Eelpool nägime, et juhtme liikumist takistas indutseeritud voolu magnetväli ja selle takistuse ületamiseks ongi vaja kulutada jõudu.

Juhtmes indutseeritakse elektrivool järgmistel juhtudel:

- 1) Juhtme liikumisel paigalseisvas magnetväljas (joonis 80), mis on juba eelpool leidnud lähemat selgitust.
- 2) Paigalseisva juhtme lõikumisel liikuva magnetväljaga. Sel juhul indutseeritakse elektromotoorne jõud samade sea-



Joon. 83.

duste alusel nagu eelmiselgi juhul. Konkreetsema kujutluse saamiseks olgu toodud järgmine näide: Kui poolis a (joon. 83) liigutada magnetit M , siis tekitavad magnetit ümbritsevad tungjooned, lõikudes poolikeerdudega, poolis elektromotoorse jõu.

3) Paigalseisva juhtme lõikumisel **muutuva magnetväljaga**. Seda voolu indutseerimisviisi kasutatakse päämiselt transformaatoreis, millest lähemalt järgmises päätikis.

Indutseeritud elektromotoorse jõu suurus sõltub ühe sekundi kestel juhtmega lõikunud tungjoonte arvust. Mida rohkem tungjooni sekundi kestel juhtmega lõikub, seda suurem on juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud.

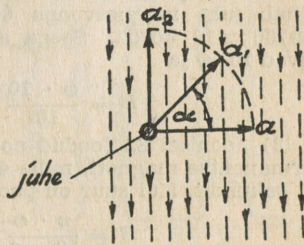
Konventsionaalse kokkuleppe kohaselt indutseeritakse juhtmes **elektromotoorne jõud 1 volt, kui juhe ühtlase kiirusega liikudes lõikub ühe sekundi kestel 100 000 000 (10^8) tungjoonega¹**. Sellest lähtudes näeme, et juhtmes indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse määravad:

1) juhtme liikumise **kiirus** paigalseisvas magnetväljas, või magnetvälja liikumise **kiirus** tungjoonte lõikumisel juhtmega, kui juhe seisab paigal.

2) **Magnetvoo tihedus**, milles juhe liigub. Mida suurem on magnetvoo tihedus, seda rohkem lõikab juhe sekundis ühel ja samal liikumiskiirusel tungjooni.

3) Juhtme ja tungjoonte **lõikumisnurk**. Kui juhe liigub ristloodselt tungjoontele, siis lõikab ta rohkem tungjooni ühe ja sama aja vältel kui liikudes mingisuguse nurga all (joonis 84). Jooniselt näeme, et tungjoontele ristloodses suunas α on lõigatud tungjoonte arv palju suurem kui nurga all lõigatud suunas α_1 . Kui juhe liigub tungjoontele rööbiti suunas α_2 , siis ta ei lõika üldse tungjooni ja temas ei teki ka elektromotoorset jõudu.

4) Magnetväljas liikuva juhtme **pikkus**. Mida pikem on juhe, seda rohkem lõikab ta sekundis ühel ja samal liikumiskiirusel tungjooni.



Joon. 84.

¹) 10^8 tungjoont sekundis = 1 pramaksvell = 1 volt-sekund.

Sirgjuhtmes indutseeritud elektromotoorse jõu suurust ar-
vutatakse järgmise valemiga:

$$E = \frac{\Phi}{10^8 \cdot t}, \text{ kust } \Phi = E \cdot t \cdot 10^8 \text{ ja } t = \frac{\Phi}{10^8 \cdot E}$$

Siinjuures tähistab E elektromotoorse jõu keskmist suurust
voltides, Φ juhtmega lõikunud magnetvoogu tungjoontes ja t
juhtme liikumise kestust magnetvoos sekundeis.

Kui magnetväljas liigub pool, siis poolis indutseeritud
elektromotoorne jõud on pooli keerdude arvu n korda suurem
kui ühes keerus. Seega poolis indutseeritud elektromotoorne
jõud $E = \Phi n / 10$

Näide: 1) Olgu joonisel 80 toodud magnetvoogu $8 \cdot 10^9$ tungjoont. Teda
lõikab sirgjuhe, tarvitades seks kaks sekundit. Kui suur on juhtmes
indutseeritud elektromotoorne jõud?

$$E = \frac{\Phi}{10^8 \cdot t} = \frac{8 \cdot 10^9}{10^8 \cdot 2} = 40 \text{ V.}$$

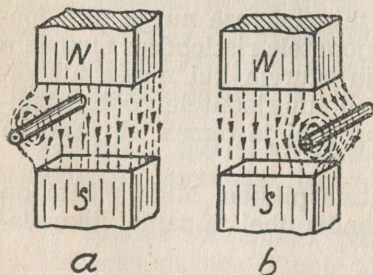
2) Juhe lõikub minuti jooksul sama magnetvooga 600 korda. Kui
suur on siis juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud? Kui minutis
lõikab juhe magnetvoogu 600 korda, siis sekundis lõikab ta seda
 $600/60 = 10$ korda. Seega sekundis lõigatud magnetungjooned võr-
duvad $10 \cdot \Phi$ ja

$$E = \frac{\Phi \cdot 10}{10^8} = \frac{8 \cdot 10^9 \cdot 10}{10^8} = 800 \text{ V.}$$

3) Joonisel 83 toodud pooli keerdude arv on 100. Lükkame pooli
permanentse magneti, mille $\Phi = 20\,000$. Magneti liikumine pooli kestis
0,1 sekundit. Kui suur on poolis indutseeritud elektromotoorne jõud?

$$E = \frac{n \cdot \Phi}{10^8 \cdot t} = \frac{100 \cdot 20000}{10^8 \cdot 0,1} = 0,2 \text{ V.}$$

Kui magnetvälja asetada juhe, mida läbib elektrivool, siis
hakkab see juhe liikuma (joon. 85a). Juhtme liikumine toi-



Joon. 85.

mub juhett ümbritsevate
magnetungjoonte ja mag-
neti tungjoonte vastastikuse
mõjutamise tagajärjel, nagu
käesolevas päätükis eelpool
juba seletatud. Nende vas-
tastikuse mõjustamise tuge-
vus sõltub magnetvoo tihe-
dusest, juhett läbiva voolu
tugevusest ja juhtme pikku-
susest (pooli keerdude arvust).

Kui juhtmes muutub
voolu suund, siis muutub ka
juhtme liikumise suund (vt.

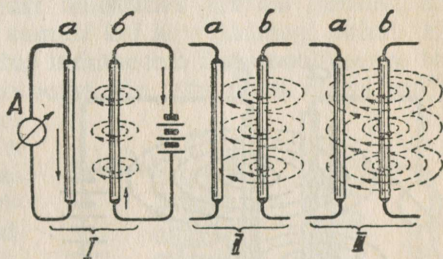
joon. 85, b). Voolust läbitava juhtme liikumissuuna kindlaksmääramiseks magnetvoos kasutatakse vasakukäereeglit järgmisel kujul: Kui vasak käsi asetada nii, et tungjooned tungivad peopessa ja harali hoitud põial näitab juhtmes voolu suunda, siis väljasirutatud sõrmed näitavad juhtme liikumissuunda¹⁾.

Elektrivoolu ja magnetvälja vastastikuse mõjustamise nähteid kasutatakse elektrimootoris.

XII. VASTASTIKUNE INDUKTSIOON.

Üheski elektrivoolu ahelas ei saavuta vool oma maksimaalset tugevust silmapilkselt päale vooluallika ahelasse lülimist, vaid voolutugevus kasvab teatava aja kestel järkjärgult oma lõpliku suuruseni²⁾. Ühes voolutugevuse kasvamisega vastavalt suureneb voolu poolt tekitatav magnetvälja tugevus.

Esimesel silmapilgul pärast vooluallika ahelasse lülimist on voolutugevus väike ja juhet b (joon. 86 I) ümbritseb õige nõrk kontsentriline magnetväli. Voolu kasvamisega suureneb magnetväljatugevus ja magnetväli paisub



Joon. 86.

ikka kaugemale ja kaugemale (joon. 86, II ja III). Näib, nagu tekitataks voolu kasvamisega üha uusi tungjooni, mis suruvad varemtekitatud tungjooned juhtmest eemale, sest juhtme ümber tekkivad tungjooned on kõik samasuunalised, mis omavahel tõukuvad.

Nii tekib voolutugevuse kasvades juhtme ümber liikuv või muutuv magnetväli. Liikudes löikab see magnetväli ka läheduses asetsevat juhet a (joon. 86, III) ja indutseerib selles elektrivoolu.

Uute tungjoonte tekitamine, s. o. magnetvälja tugevuse muutumine kestab seni, kuni vool juhtmes b kasvab ja saavu-

¹⁾ Konventsionaalsel voolusuuna tähistamisel kasutatakse paremakäereeglit samal kujul.

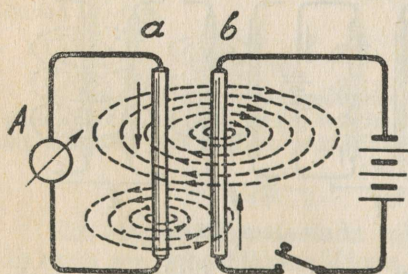
²⁾ Voolutugevuse kasvamist takistab juhtme endainduktsioon.

tab oomiseadusega määratud suuruse, jäädes siis püsivaks. Tugevuselt püsiv vool ei tekita enam uusi tungjooni ja selle tõttu ümbritseb juhtmeid ka paigalseisev magnetväli ning juhtmes a ei indutseeru enam elektrivoolu.

Kui katkestame vooluahela, siis voolutugevus ahelas kahaneb järk-järgult nullini ja jõud, mis magnet tungjooni juhtme ümber alal hoidis, hävib. Elektrivoolu tekitatud magnet tungjooned tõmbuvad juhtmesse kokku, kuid nüüd uuesti juhtmega a lõikudes liiguvad nad eelmisele vastupidises suunas. Selle tagajärjel juhtmes a tekkiv induktsioonvool peab olema ka endisele voolule vastassuunaline.

Siit nähtub, et vool nii kasvades kui ka kahanedes tekitab muutliku tugevusega magnetvoo. Magnetvoo muutused põhjustavad lähedalasetsevaid juhtmeis voolu tekkimise. Tekitatud vool püüab alati vastupidi mõjuda teda põhjustavale voolule.

Juhtmes a indutseeritud vool tekitab ka magnet tungjooni. Nende suund on aga vastupidine juhtmes b tekitatud tungjoon-



Joon. 87.

tele (joon. 87). Lõikudes juhtmega b, tekitavad juhet a ümbritsevad magnet tungjooned selles voolu. Seda nähet, kus juhtmed üksteisele vastastikku mõju avaldavad, nimetataksegi **vastastikuseks induktsiooniks**, mis ilmneb alati lähestikku asetsevate juhtmete vahel, kui neid vool läbib.

Indutseeritud voolu põhjustajaks on vastastikuse induktsiooni puhul elektromotoorne jõud. Et selle suurus sõltub juhtmega teatava aja kestes lõikunud tungjoonte arvust, siis on indutseeritud elektromotoorne jõud seda suurem, mida pikemad ja lähedamalasetsevad on üksteist mõjustavad juhtmed ja mida kiiremini muutub väljatugevus.

Väljatugevuse muutumiskiirus ei olene mitte voolutugevusest, vaid voolutugevuse muutumise kiirusest. Näiteks voolu kasvades sekundis 0 kuni 10 amprini, on voolutugevuse muutumiskiirus 10 amprit sekundis. Kui vool kasvab sekundis 55

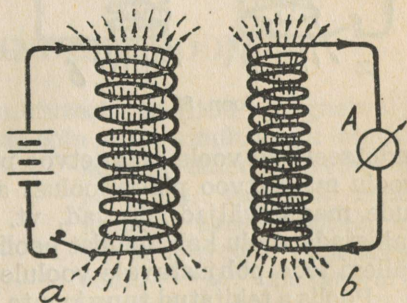
amprist kuni 60 amprini, siis on voolu tugevuse muutumiskiirus kõigest 5 amprit sekundis.

Igale voolutugevuse muutumiskiirusele vastab teatav magnetvälja muutumine ja selle mõjustusel ka vastav induksioon. Voolu sisselülimisel ja vooluahela katkestamisel võib voolutugevuse muutumiskiirus olla väga suur. Kui näiteks vooluahela katkestamisel 1-ampriline vool 0,01 sekundi kestes kaha-neb nullini, siis voolutugevuse muutumiskiirus on $1/0,01 = 100$ amprit sekundis. Tavaliselt tekivad voolu sisse- ja väljalülimisel kiired voolutugevuse muuted, mistõttu nende mõjustamisel ilmnevad ka väga tugevad induksioonvoolud.

Induksioonnähte intensiivsus sõltub ka veel juhtmete vastastikusel asetusest. Kui juhtmed asetsevad üksteise suhtes mingi nurga all, siis on neid lõikavate tungjoonte arv väiksem kui juhul, kui nad asetseksid rööbiti. Kui juhtmed asetsevad üksteise suhtes 90° nurga all, siis ei ilmne nende vahel üldse induksioonnähte, sest tungjooned libisevad mööda juhete ja ei löiku sellega üldse.

Poolis, asetledes voolust läbistatud juhtme lähedal, ilmnevad induksioonnähted samuti kui sirgjuhtmegi puhul. Kui antud väljatugevuse muutus indutseerib ühes poolikeerus teatava suurusega elektromotoorse jõu, siis pooli otstel mõjuv elektromotoorne jõud on pooli keerdude arvu n korda sellest suurem. Samuti on poolis indutseeritud elektromotoorne jõud, nagu see esines sirgjuhtmegi puhul, seda suurem, mida suuremad on voolu kandva juhtme väljatugevuse muuted.

Kahe pooli vahel ilmnevad induksiooni nähted on palju intensiivsemad kui eelkirjeldatud juhul. Kui ühendada üks poolidest vooluallikaga (joon. 88, a), siis tekivad vasakukäereegli kohaselt selle pooli otstel magnetpoolused, nagu ka joonisel on tähendatud. Vooluallika ahelasse lüümisel järgnevalt kasvav magnetvoog löikub teise pooliga b, tekitades selles ka voolu, mille suund on aga vastupidine voolu tekkimist põhjustavale voolule poolis a. Seetõttu tekib ka poolil b sel otsal lõunapoolus, kus poolil a põhjapoolus ja seal põhjapoolus, kus poolil

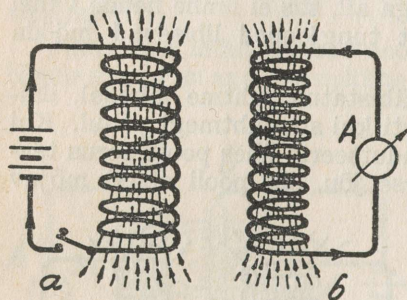


Joon. 88.

a lõunapoolus. Seega mõjub poolis b indutseeritud voolu magnetväli poolis a tekkinud magnetväljale vastu, püüdes seda hävitada. (Vastassuunaliste voolude tekitatud magnetväljad hävivad vt. joon. 66 b.)

Kui vool poolis kasvab oma maksimaalse tugevuseni ja jääb püsivaks, siis ei kasva enam poolis a väljatugevus ning jääb ka püsivaks, sest uusi tungjooni enam juurde ei tekitata. Nüüd asetsevad pooli b keerud paigalseisvas magnetväljas ja neis enam elektromotoorset jõudu ei indutseeru. Seetõttu hävib poolis b indutseeritud vool, mida määritleb Lenzi seadus: **Indutseeritud vool püüab takistada oma magnetväljaga induktsooni tekitavat põhjust.**

Kui pooli a vooluahel katkestada, siis vool poolis mõne hetke jooksul kahaneb nullini. Voolu kahanedes tõmbuvad



Joon. 89.

voolu poolt pooli a ümber tekitatud tungjooned koomale. Kontsentriselt koonduvad tungjooned lõikuvad jällegi pooliga b, kuid vastupidiselt esialgsele lõikumissuunale. Nüüd indutseeritakse poolis b jällegi elektromotoorne jõud (joonis 89). Poolis b indutseeritud elektromotoorne jõud ja voolu suund on sama, mis ergutusvoolul poolis a¹). Seega püüab poolis b

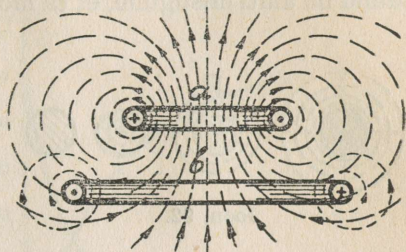
indutseeritud voolu magnetvoo põhjapoolus poolis a kahaneva voolu magnetvoo põhjapoolust alal hoida. (Ühesihiliste voolude magnetväljad liituvad, vt. joon. 66 a.) Niiviisi püüdes takistada voolu kahanemist poolis a, töötab indutseeritud vool jällegi teda põhjustavale voolule vastu.

Poolis a tekitatud tungjoonte lõikumist pooliga b võib kujutella järgmiselt: Asetame lähestikku kaks traadikeerdu a ja b (joon. 90). Kui keerdu a läbib muutliku tugevusega vool, siis selle tõttu tekitatud kasvav või kahanev magnetväli lõikub keeruga b, indutseerides selles voolu. Sama nähe ilmneks ka siis, kui keeru a ümber tekitatud magnetväli on püsiv ja keerd b liigub ristloodselt selle magnettungjoontele. Voolusuund

¹) Ergutusvooluks nimetatakse voolu, mis põhjustab juhtmes otsekohe või induktsooni teel magnetvoo tekkimist.

juhtmes b ühel kui ka teisel juhul tehakse kindlaks vasakukäereegli abil.

Kui näiteks poolis a (joon. 88) pidevalt voolutugevust muuta, siis indutseeritakse ka poolis b pidevalt muutuv elektromotoorne jõud ja vool. Seda pooli, milles asetseb mingi vooluallikas, nimetatakse **primaarpooliks**. Teist pooli, milles põhjustab primaarpool indutseeritud voolu, nimetatakse **sekundaarpooliks**. Niisugust voolu ülekandmise viisi kasutatakse transformatooris, induktsoonipooles jne. Tavaliselt ei koosne need mitte eraldatud poolest, vaid kahest või mitmest üksteisele asetatud mähisest, millest üks on primaar- ja teine (teised) sekundaarmähis.

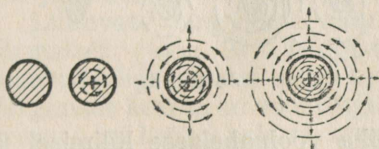


Joon. 90.

Juhtmete ja poolide vahel ilmnevate induktsooninähete intensiivsus määratakse kindlaks vastastikuse **induktsiooni koefitsiendiga**¹⁾.

XIII. ENDAINDUKTSIOON.

Elektrivoolu tugevuse muutusest tingitud magnetvälja muutused ei tekita induktsoonivoolu mitte ainult voolu kandva juhtme lähedal asetsevais juhtmes, vaid ka selles juhtmes eneses, millest induktsoonivoolu tekitavad voolu- ja magnetvälja muutused lähtuvad. Säärast induktiooni nähet nimetatakse **endainduktsiooniks**²⁾.



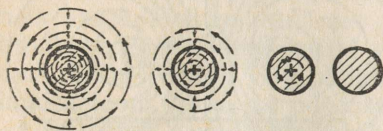
Joon. 91.

Sirgjuhtme ühendamisel vooluallikaga ei saavuta voolutugevus, nagu juba eelpool seletatud, oma maksimaalset suurust hetkeliselt. Voolu sisselülimise hetkel lõikavad kasvava

¹⁾ Vt. päätükk XIV.

²⁾ või eneseinduktsiooniks (ka omainduktsiooniks).

voolutugevuse mõjul tekitatud kontsentriliselt juhtme tsentrumist eemalduvad tungjooned ka juhete ennast (joon. 91). Selletõttu indutseeritakse juhtmes endas selles voolava voolu poolt elektromotoorne jõud, mille suund on aga vastupidine algvoolule. Ka siin kehtib Lenzi seadus, et induksioonvoolu suund on alati niisugune, et ta mõjub vastupidiselt induksiooni

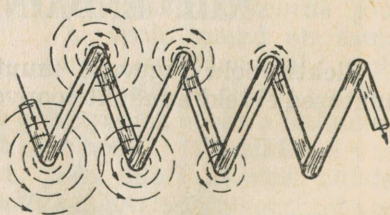


Joon. 92.

põhjustavale voolule. Seega mõjub juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud vastupidiselt vooluallika elektromotoorsele jõule, püüdes selle mõju vähendada, mispärast seda nimetatakse ka **vastuelektromotoorseks jõuks** (E_W).

Mida vähemaks jääb juhtmes voolu kasvamise kiirus, seda vähemaks jääb ka indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus. Voolutugevuse püsivaks jäädes, jääb voolu poolt tekitatud magnetväli püsivaks ja juhtmes eneses ei tekitata enam vastuelektromotoorset jõudu.

Voolu kahanemisel liiguvad juhtmesse tõmbuvad tungjooned vastupidises suunas eelmisele (joon. 92) ja lõikudes uuesti juhtmega indutseerivad selles jällegi elektromotoorse jõu, mille suund on ühtuv teda põhjustava voolu suunaga (resp. vooluallika elektromotoorse jõuga). Niiviisi indutseeritud elektromotoorne jõud püüab voolu juhtmes alal hoida, s. o. voolutugevuse kahanemist pidurdada.

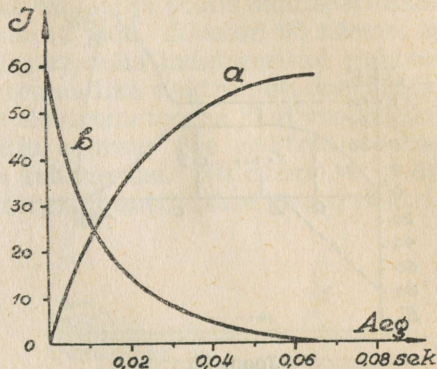


Joon. 93.

Endainduktsiooni elektromotoorne jõud ei teki juhtmes mitte üksnes vooluallika vooluahelasse lüümisel ja vooluallika katkestamisel, vaid ka siis, kui juhete läbib pidevalt muutuva tugevusega vool.

Kui valmistada pool, siis selles ilmnevad endainduktsiooni nähted on palju intensiivsemad, kui need olid pooliks kasutatud pikkusega sirgjuhtmes. Kasvava voolutugevuse tõttu tekib poolikeerdude ümber liikuv magnetväli (joon. 93), mis lõikub poolikeerde, tekitades neis vastuelektromotoorse jõu. See on poolis palju suurem kui sirgjuhtmes ning selletõttu

toimub poolis voolutugevuse kasvamine maksimaalväärtuseni võrdlemisi aeglaselt (joon. 94). Kõveral a on näidatud, et vool esimesel sajandiksekundil kasvab 20 amprini, järgmisel juba vähem ja veel järgmisel veel vähem jne. Seega näeme, et voolu sisselülimise hetke järele on poolis voolu muutumise kiirus väga suur ja sellele vastavalt ka indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus. See vastuelektromotoorne jõud pidurdab nüüd voolu kasvamist ning selle tagajärjel voolu muutumise kiirus jääb kord-korralt aeglasemaks, millega ühes ka indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus kahaneb.



Joon. 94.

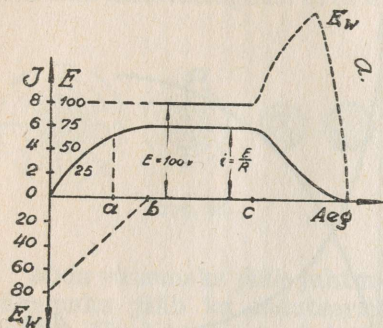
Samuti nagu sõltub elektromagnetilise induktiooni juures indutseeritud elektromotoorse jõu suurus juhtmega lõikunud tungjoonte arvust, nii sõltub ka enda-induktiooni elektromotoorse jõu suurus poolikeerdudega lõikunud tungjoonte arvust sekundis.

Mida suurem on pooli läbiva voolu tugevuse muutumise kiirus ja mida suurem on pooli keerdude arv, s. o. mida pikem on juhe, seda suurem on indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus, sest igas üksikus keerus tekitatud elektromotoorsed jõud summeeruvad.

Liikuvate tungjoonte lõikumine poolikeerdudega toimub järgmiselt (joon. 93). Voolu sisselülimise hetkel on voolutugevus kõige suurem selles keerus, kust elektronid sisenevad. Järgmises keerus on voolutugevus väiksem jne., kuna viimase keeruni tol hetkel pole elektronid veel üldse liikunud.

Voolutugevuse muutusele vastavalt tekitatakse ka iga keeru ümber muutuv magnetvälja tugevus. Seega lõikab esimese keeru magnetväli teist, kolmandat jne. poolikeerdu enim veel kui neid vool läbib. Paremakäereegli kohaselt indutseeritakse neis poolikeerdudes elektromotoorne jõud, mille suund on ilmselt vastupidine algelektromotoorse jõu suunale. Järgmisel hetkel on voolutugevuse muutus suurem pooli teises, siis kolmandas jne. keerus. Seega ümbritseb järje-

korras igat poolikeerdu muutuv magnetväli, mis põhjustab alguses poolis suure vastuelektromotoorse jõu, mis omakorda jälle aeglustab voolutugevuse kasvamist. Seega voolutugevuse muutumiskiirus väheneb kord-korralt; ühtlasi väheneb aga ka endainduktsiooni elektromotoorne jõud ning voolutugevus saavutab lõpuks



Joon. 95.

tugevus saavutab lõpuks oomiseadusega määratud suuruse (joon. 95). Joonisel on näidatud, et voolu sisselülamise hetkel poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud on maksimaalne ja pidurdab voolutugevuse kasvamist sisselülamise hetkel. Voolutugevuse muutmiskiiruse vähenemisega väheneb vastuelektromotoorse jõu suurus ja seetõttu suureneb aegami ka vooluallika elektromotoorse jõu mõju. Teatava aja jooksul jääb voolutugevus (punktis b) püsivaks, vastuelektromotoorset jõudu enam ei takistata ja ahelas mõjub ainult vooluallika elektromotoorne jõud. Püsiva tugevusega voolu tõttu ümbritseb nüüd pooli püsiva suurusega magnetväli, mille ehitamiseks kulutatigi ka vooluallika energiat. Olgu meil pooli oomiline takistus 15Ω . Siis hetkel a (joon. 95) on poolis kasutatud võimsus $N = I^2 R = 5^2 \cdot 15 = 375$ vatti, kuna kogu vooluahelas äratarvitatud võimsus võrdub tol hetkel $100 \cdot 5 = 500$ vatti. Seega $500 - 375 = 125$ vatti on võimsus, mida kasutati pooli ümber magnetvälja tekitamiseks ja mida hoitakse magnetväljana alal. Kui võimsus 125 vatti korrutada ajaga, mis kasutatigi magnetvälja tekitamiseks antud voolutugevusel (väga lühike aeg), siis saame kulutatud energia vattsekundis. Antud voolutugevust 5 amprit tarvitatakse vaid murdosa sekundist. Järgmisel hetkel on voolutugevus muutunud, seega ka kulutatud võimsus jne. Vastavate arvutuste abil on võimalik kindlaks määrata kogu elektrienergia hulka, mis muundati voolu kasvamisel magnetiliseks energiaks.

Kui voolutugevus on püsiv, siis on ka magnetväli püsiv ja selle alalhoidmiseks ei kulutata enam sugugi energiat.

Vooluahela katkestamisel väheneb ahelas voolutugevus, milletõttu tõmbuvad ka magnettingjooned koomale ja lõika-

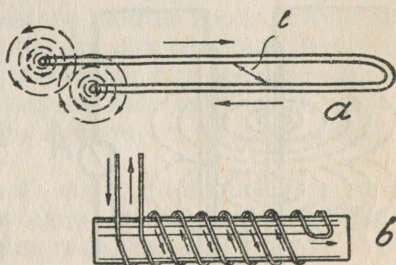
vad uuesti poolikeerde. Poolikeerdudes indutseeritakse nüüd samasihiline elektromotoorne jõud (resp. vool), mis takistab voolu kahanemist poolis. Algul on voolu kahanemine väga kiire (joon. 94, b). Näiteks esimesel sajandsekundil 35 amp-rit, seetõttu on poolis magnetvälja tugevuse muutus kiirem, kui sama aja kestel voolu kasvamisel ja poolis indutseeritakse võrdlemisi suur elektromotoorne jõud. Joonisel 95 näeme, et voolu katkestamise silmapilgul poolis indutseeritud elektromotoorne jõud (E_w) liitub vooluallika elektromotoorse jõuga, seega on vooluahelas mõjuv elektromotoorne jõud vooluallika elektromotoorsest jõust palju suurem. See elektromotoorne jõud püüab takistada voolu kahanemist. Nii näeme, et pooli ümbritsenud magnetvälja energia muundatakse uuesti elektriliseks energiaks.

Kui pooli asetada raudsüdamik, siis suureneb pooli induktiivsus südamikuga läbitavuse korda. Selletõttu indutseeritakse raudsüdamikuga poolis suurem vastuelektromotoorne jõud, kui samade dimensioonidega õhksüdamikuga poolis.

Võrreldes sirgjuhet ja sellest valmistatud õhk- ja raudsüdamikuga pooli, näeme, et igäühes indutseeritakse isesuguse suurusega endainduktsiooni elektromotoorne jõud. Ahela endainduktsiooni suuruse määravad ahela dimensioonid ja see avaldatakse endainduktsiooni koefitsiendiga ehk induktiivsusega.

Elektrotehnikas on endainduktsiooni nähted sageli ebasoovitavad, sest voolu kahanemisel võivad indutseeritud elektromotoorsed jõud väga suured olla ja põhjustada katkestamiskohis suuri sädemeteleeki. Seetõttu aja jooksul rikunduvad kontaktid ja vahel ka poolitraadi isolatsioon.

Induktsiooninähetest vabanemiseks mähitakse poolid, mis pole määratud magnetvälja tekitamiseks, **bifilaarselt** (joon. 96, b). Kahes kõrvuti asetsevas juhtmes (96, a) on vastasihiliste voolude puhul juhtmete ümber tekitatud magnettingjooned vastassuunalised ja selletõttu hävitavad nad üksteise mõju. Mida lähemal need üksteisele asetsevad (mida väiksem on l), seda rohkem hävivad tekitatud tingjooned ja juhtmeis

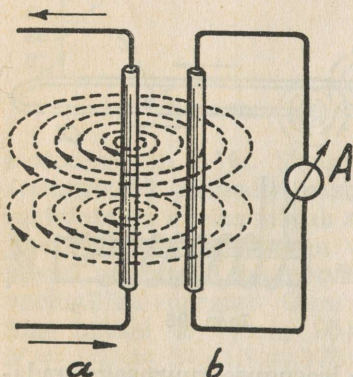


Joon. 96.

ei ilmne endainduktsiooni elektromotoorset jõudu. Sellisel printsiibil valmistatakse bifilaarmähised aasataoliselt kokkupandud juhtmest. Bifilaarmähisega poole kasutatakse päämiselt elektrivoolu mõõteriistades (lisatakistus).

XIV. INDUKTSIOONI MÕÖTÜHIKUD.

Vastuelektromotoorse jõu suuruse määrab, nagu elektromotoorse jõugi, juhtmega lõikunud magnettingjoonte arv sekundis. Elektromotoorse jõu tekitamise suhtes on ükskõik, kas liikuv juhe lõikab permanentse magneti tungjooni või voolu poolt tekitatud tungjooni, või jälle need liikudes lõikavad paigalseisvat juhet.



Joon. 97.

Kui näiteks juhet a (joon. 97) läbiva voolu tugevus kasvab kahekordseks, siis suureneb ka juhet ümbritseva magnetvälja tugevus kahekordseks ja juhet b lõikab vastavalt suurem arv tungjooni. Üldiselt on voolu poolt tekitatud magnetvälja tugevuse muutus alati võrdeline voolutugevuse muutusele.

Olgu juhtmete a ja b vaheline kaugus teineteisest niisugune, et juhtmes a voolutugevus muutudes ühe ampri võrra sekundis lõikab juhet b 10^8 (100 miljonit) tungjoont.

Eelpool aga nägime, et juhtme lõikumisel ühe sekundi kestes 10^8 tungjoonega indutseeritakse selles elektromotoorne jõud, mille suurus on 1 volt. Seega peab käesoleval juhul juhtmes b indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus võrduma ühele voldile. Kui juhtmes a on voolumuutus ühes sekundis suurem kui üks amper, siis on vastavalt suurem ka juhtmes b indutseeritud vastuelektromotoorne jõud.

Ühes sekundis ilmneva voolutugevuse muutuse ja selle tõttu tekitatud vastuelektromotoorse jõu suhe määratakse vooluahelas **induktsiooni koefitsiendiga**¹⁾ (L), mille prakti-

¹⁾ Tavaliselt räägitakse induktsioonikoefitsiendi asemel lihtsalt „induktiivsus“.

liseks ühikuks on henri (H). Seega on ahela induktiivsus siis 1 henri, kui üheampriline voolutugevuse muutus ühes sekundis tekitab selles vastuelektromotoorse jõu üks volt.

Henri on võrdlemisi suur induktiivsuseühik, sellepärast kasutatakse tegelikkuses väiksemaid induktiivsuseühikuid, nagu millihenri (mH), mikrohenri (μH) ja sentimeeter (cm). Sentimeeter on induktiivsuse ühikuks absoluutses elektromagnetiliste mõõtude süsteemis.

Induktiivühikud avaldatakse järgmiselt:

$$\begin{array}{ll} 1 H = 10^3 mH & 1 mH = 10^{-3} H^1) \\ 1 H = 10^6 \mu H & 1 mH = 10^6 cm \\ 1 H = 10^9 cm & 1 \mu H = 10^{-6} H^2) \\ & 1 \mu H = 10^3 cm \end{array}$$

Sirgjuhtmest valmistatud pooli ümber on voolu poolt tekitatud magnetvoo tihedus suurem kui sama voolutugevuse puhul sirgjuhtmes. Seega magnetvoo muutus poolis põhjustab suurema vastuelektromotoorse jõu kui sirgjuhtmes. Seetõttu on ka pooli induktiivsus sirgjuhtme omast suurem. Mida lähemal asetsevad pooli keerud üksteisele, seda tugevam magnetvoog löikab poolikeerde ja seda suurem on ka pooli induktiivsus.

Kui pooli asetada raudsüdamik, siis pooli induktiivsus suureneb veelgi raudsüdamiku läbitavuse korda, sest raudsüdamiku puhul on magnetvoo tihedus raua läbitavuse korda suurem kui õhksüdamikuga poolis.

Kui mitmesuguse kujuga juhtmeid või poole läbib ühe ja sama kiirusega muutuv vool, siis pole neist tekitatud vastuelektromotoorne jõud ühe ja sama suurusega, samuti pole siis võrdsed nende induktiivsused. Seega induktiivsus sõltub ahela dimensioonidest ja on vooluahelate üks omadusi.

XI päätükist mäletame, et magnetvoos liikumas poolis indutseeritakse elektromotoorne jõud, kus $E = \Phi \cdot n / 10^8 \cdot t$. Analoogiline nähe ilmneb ka poolis voolu poolt tekitatud magnetvooga, muidugi oletusel, et kõik tekitatud tungjooned löikuvad ka kõigi poolikeerdudega. Nii viisi poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud on võrdeline magnetvoole ja pooli keerdude arvule.

Raudsüdamikuga pooli induktiivsus arvutatakse valemiga:

$$L = \frac{1,25 \cdot n^2 \cdot \mu \cdot S}{10^8 \cdot l}$$

1) $10^{-3} = \frac{1}{1000}$

2) $10^{-6} = \frac{1}{1000000}$

kus L on pooli induktiivsus henrides, n pooli keerdude arv, μ südamikolluse läbitavus, S pooli põiklõikepind ruutsentimeetris ja l pooli südamiku pikkus sentimeetris: 1) kinnise raudsüdamikuga poolil südamiku pikkus; 2) lahtise raudsüdamikuga ja õhksüdamikuga poolil mähise pikkus.

Kui pool on õhksüdamikuga, siis $\mu = 1$ ja selle induktiivsus

$$L = \frac{1,25 \cdot n^2 \cdot S}{10^8 \cdot l}$$

Toodud valemeist näeme, et pooli induktiivsus sõltub pooli dimensioonest ja südamikuks kasutatud olluse läbitavusest.

Õhksüdamikuga pooli induktiivsuse suurusele ei avalda mingit mõju sellele rakendatud elektromotoorse jõu suurus ega voolutugevuse muutus. Et raudsüdamiku puhul pooli läbitavus sõltub teatud piires magnetiseerimisastmest, siis on ka raudsüdamikuga pooli induktiivsus võrdeline läbitavusele. Kui näiteks sellise pooli südamik on küllastunud ($\mu = 1$), siis selle pooli induktiivsus võrdub samase õhksüdamikuga pooli induktiivsusele.

Eelpool toodud valemid on umbkaudu kehtivad ühekihiliste silinderpoolide induktiivsuste arvutamiseks, kui pooli läbimõõt on pooli südamiku pikkusega võrreldes väike. Ka mitmekihilise raudsüdamikuga pooli praktiliseks arvutamiseks on eelmine valem küllaltki kohane.

Praktikas kasutatavad poolid on väga mitmesuguse kujuga ja mitmesuguseiks eriotstarbeiks. Nende induktiivsus arvutatakse vastavate valemite abil, mis on toodud erikirjanduses.

Näide: 1) Õhksüdamikuga pooli keerdude arv on 200. Pooli mähise pikkus on 10 sm ja pooli läbimõõt $d = 2$ sm. Kui suur on L ?

$$L = \frac{1,25 \cdot n^2 \cdot S}{10^8 \cdot l} = \frac{1,25 \cdot 200^2 \cdot 3,14}{10^8 \cdot 10} = 157 \cdot 10^{-6} H = \\ = 0,157 \text{ mH} = 157 \text{ 000 cm.}$$

2) Raudsüdamikuga pooli keerdude arv on 1000, südamiku pikkus 16 sm, põiklõikepind 8 sm² ja südamiku läbitavus 1000. Leida L .

$$L = \frac{1,25 \cdot n^2 \cdot \mu \cdot S}{10^8 \cdot l} = \frac{1,25 \cdot 1000^2 \cdot 1000 \cdot 8}{10^8 \cdot 16} = 6,25 H$$

3) Raudsüdamikuga pooli, mille induktiivsus $L = 8 H$, läbib vool, mille tugevuse muutmiskiirus on sekundis 100 amprit. Kui suur on poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud E_W ?

$$E_W = I \cdot L = 100 \cdot 8 = 800 \text{ volti.}$$

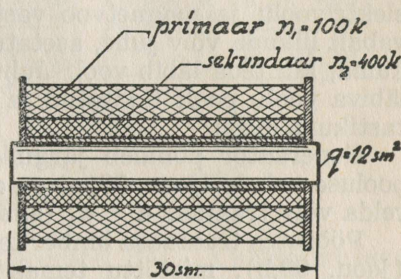
Vooluahelate vastastikune induktiivsuse suurus avaldatakse ka henrides. Kahe pooli vastastikune induktiivsus on

siis üks henri, kui primaarahelas üheampriline voolutugevus muutus sekundis indutseerib sekundaarpoolis vastuelektromotoorse jõu 1 volt.

Vastastikuse induktiivsuse nähted on sageli väga keerukad ja nende analüütiline arvutus võrdlemisi komplitseeritud, välja arvatud mõned lihtsamad juhud. Kui primaar- ja sekundaarpooli keerud asetsevad üksteise kõrval ja primaarpoolis iga keeru ümber tekkinud magnettingjooned kõiki sekundaarpooli keerde lõikavad, siis nende vastastikune induktiivsus

$$M = \frac{1,25 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \mu \cdot S}{10^8 \cdot l}$$

kusjuures n_1 on primaarpooli ja n_2 sekundaarpooli keerdude arv. Teiste tähtiste tähendused on samad, mis eelmiseis valemeis. Kui poolid on õhksüdamikuga, siis $\mu = 1$ ja jääb valemist välja.



Joon. 98.

Näide: 1) Leida poolide vastastikune induktiivsus, kui primaarpooli keerdude arv on 100 ja sekundaarpooli keerdude arv 400. Raudsüdamiku pikkus 30 sm, põiklõikepind 12 sm² ja $\mu = 1200$ (joon. 98).

$$M = \frac{1,25 \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \mu \cdot S}{10^8 \cdot l} = \frac{1,25 \cdot 100 \cdot 400 \cdot 1200 \cdot 12}{10^8 \cdot 30} = 0,24 \text{ H} = 240 \text{ mH}$$

2) Kui suur on eelmise näite kohaselt M , kui poolid on õhksüdamikuga?

$$M = \frac{1,25 \cdot 100 \cdot 400 \cdot 12}{10^8 \cdot 30} = 0,0002 \text{ H} = 0,2 \text{ mH}$$

3) Eeltoodud näites primaarmähises voolu katkestamisel kahaneb voolutugevus 0,02 sekundi kestes 5 amprilt 0-ni. Kui suur on raud- ja õhksüdamiku puhul sekundaarahelas indutseeritud elektromotoorne jõud?

Voolutugevuse muutus primaarpoolis on $5/0,02 = 250$ amprit sekundis.

Sekundaarpoolis indutseeritud elektromotoorne jõud:

1) raudsüdamiku puhul $E_W = I \cdot M = 250 \cdot 0,24 = 60 \text{ V};$

2) õhksüdamiku puhul $E_W = I \cdot M = 250 \cdot 0,0002 = 0,05 \text{ v.}$

XV. ELEKTRIMASINATE TÖÖTAMISE PÕHIMÕTE.

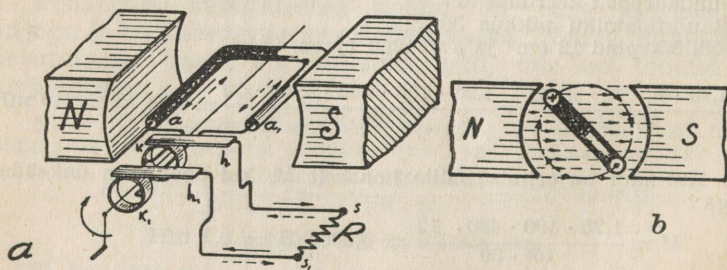
Seadised, mille abil muundatakse mehaaniline energia elektriliseks või ümberpöörduvalt, nimetatakse elektrimasinaiks. Need jaotuvad:

1) **Elektrigeneraatoreiks**, millede abil muundatakse mehaaniline energia elektriliseks energiaks. Nad põhinevad elektromagnetilise induktsiooni nähtel, kus juhtme lõikumisel magnetvooga indutseeritakse juhtmes elektromotoorne jõud ja suletud ahela puhul ka vool.

2) **Elektrimootoreiks**, millede abil elektriline energia muundatakse mehaaniliseks energiaks. Elektrimootorid põhinevad elektrivoolu ja magnetvoo vastastikusel mõjutusel, sest iga vabalt liikuda võiv juhe, asetatuna magnetvoosse, hakkab liikuma, kui teda läbib vool. Juhtme liikumist põhjustab juhet läbiva voolu poolt tekitatud ja permanentse magnetvoo vastastikune mõju.

Generaator põhineb järgmisel printsiibil: kahe magnetpooluse vahele (joon. 99, a) on asetatud ümber oma telje pöörleva traataasa $a - a_1$ (silmus).

Pöörates traataasa ümber telje, lõikab ta magnettingjooni (joon. 99, b), mistõttu temas indutseerub elektromotoorne



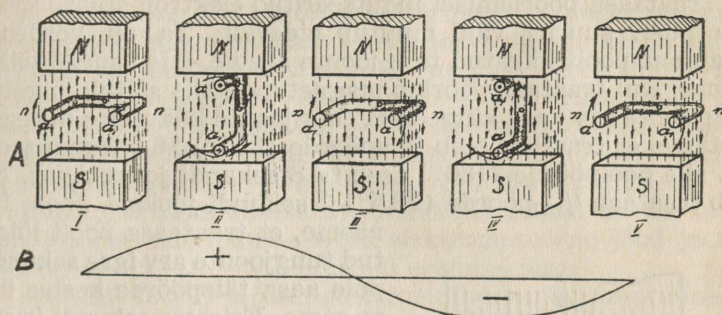
Joon. 99.

jõud. Traataasa otsad on kinnitatud metallrõngaste külge, mida nimetatakse kontaktrõngasteks $k - k_1$. Kontaktrõngastele on asetatud hõõruvad harjad $h - h_1$ (punutud vasktraadist või retortsöest), mis ühendatud välistakistusega R .

Traataasa ühes kontaktrõngastega nimetatakse siseahelaks ja kontaktharju ühes takistustega R välisahelaks. Kontaktrõngaste ja kontaktharjade abil on võimalik voolu juhtida

siseahelast välja. Voolu suuruse välisahelas määrab kogu ahela takistus.

Kui traataas (joon. 99, a ja b) teeb magnetvoos ümber oma telje täisringi (360°), siis põhjustab selle aja kestes traataasas indutseeritud elektromotoorne jõud välisahelas voolu, mis aasa esimese poolpöörde kestes (180°) läbib takistuse R ühes suunas, kuna teise poolpöörde kestes vastassuunas.



Joon. 100.

Alaku traataas pöörlemist joonisel 100 — I näidatud asendist $n - n$, mida nimetatakse neutraalasendiks, sest traataas asetseb neutraalvöös ja on oma külgedega $a - a_1$ rööbiti tungjoontele.

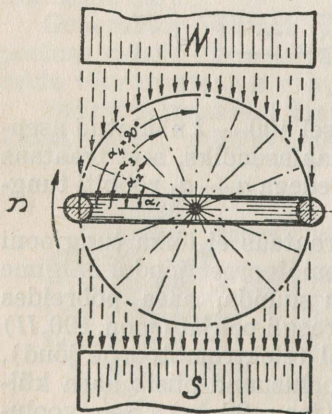
Läbides liikumisel selle koha, traataas ei löika tungjooni ning temas ei indutseeru ka elektromotoorset jõudu. Jälgime aasa küljes a^1 indutseeritud voolu suunda, aasa pööreldes noolega näidatud suunas. Paremkäereegli põhjal (joon. 100, II) indutseeritakse selles aasa osas vool (elektromotoorne jõud), mille suund on tagant ettepoole. Voolusuund püsib aasa küljes a kuni ta liigub N pooluse ees (joon. 99, a). See voolusuund on välisahelas täisjoonega näidatud. Kui traataas jõuab asendisse $n - n$ (joon. 100, III), siis ta libiseb mööda tungjooni ja temas ei indutseerita elektromotoorset jõudu. Aasa jatkuval liikumisel liigub külg a nüüd juba S pooluse ees (joon. 100, IV) lõigates tungjooni eelmisele vastupidises suunas, mistõttu temas indutseeritakse vool (elektromotoorne jõud), mis on vastupidine eelmise poolpöörde kestes indutseeritud voolusuunale (joon. 99, a välisahelas punktjoonega näi-

1) Aasakülg a on selguse mõttes kriipsutatud.

datud). Kui traataas jõuab asendisse $n - n$ (joon. V), siis on ta teinud täispöörde ja kirjeldatud protseduur algab algusest päale. Nii näeme, et traataasas indutseeritakse selle terve pöörde kestel elektromotoorne jõud, mis mõjub kord ühes, kord teises suunas.

Et aasa küljed a ja a_1 kumbki ühel ja samal ajal ise suunas tungjooni lõikavad, siis neis indutseeritud elektromotoorset jõud summeeruvad (on järjestikku).

Traataasa pöörlemisel indutseeritud elektromotoorne jõud pole püsiv suurus, vaid muutub pidevalt. Ta on võrdeline traataasa poolt lõigatud tungjoonte arvule, mis asuvad lõikepinnas. Kui traataas pöörleb magnetvoos, siis sõltub lõigatud tungjoonte arv aasa külgede ja tungjoonte lõikumise nurgast. Oletame, et traataas teeb täispöörde (360°) 16 sekundi jooksul, siis poolpöörde (180°) teeb ta 8 sekundi jooksul jne. Nii teeb traataas $1/16$ -pöörde ($22,5^\circ$) 1 sekundi jooksul. Joon. 101



Joon. 101.

näeme, et traataasa poolt lõigatud tungjoonte arv igas sekundis pole aasa täispöörde kestes üks ja sama. Esimese sekundi kestel aasa küljed libisevad mööda tungjooni ja lõigatud tungjoonte arv on väga väike. Jooniselt näeme aga, et ka aasa külgede ja tungjoonte lõikenurk α_1 on väga väike (käesoleval juhul $22,5^\circ$). Järgmise sekundi kestel on lõikenurk α_1 juba suurem, seega ka sekundi kestel lõigatud tungjoonte arv. Ühes lõikenurgas pideva suurenemisega suureneb ka sekundi kestel lõigatud tungjoonte arv. Kui lõikumise nurk võrdub 90° , või kui juhe on liikunud 4 sekundit, siis juhe liigub täiesti ristloodis tungjoonte. Seega on tol hetkel sekundis lõigatud tungjoonte arv kõige suurem ja vastavalt sellele ka traataasas indutseeritud elektromotoorne jõud (joonis 100, B). Traataasa edasisel pöördumisel muutub lõikenurk jälle, seega ka lõigatud tungjoonte arv ning aasas indutseeritud elektromotoorne jõud. Kui aas on pöördunud 180° , siis liigub ta tungjoontele rööbiti ning tas ei indutseeru elektromotoorset jõudu. Liikudes sellest asendist edasi, lõikavad traat-

aasa küljed tungjooni vastupidises suunas eelmisele poolpöördele. Seetõttu on ka aasa külgedes indutseeritud elektromotoorne jõud vastupidine (joon. 100, B) esimese poolpöörde kestes indutseeritud elektromotoorsele jõule. Traataasa teise poolpöörde ajal toimub tungjoonte arvuline löikumine traataasa külgedega nagu esimeselgi poolperioodil. Seetõttu on ka indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse muutused samad, mis eelmiselgi poolpöördel.

Kui traataas pöörleb ühtlase kiirusega homogeenses magnetvoos, siis indutseeritakse temas terve pöörde kestel suuruselt pidevalt muutuv elektromotoorne jõud (ühes suunas saavutab see väärtused 0 — maksimum — 0 ja vastupidises suunas samuti 0 — maksimum — 0). See kordub traataasa iga täispöörde ajal. Nii viisi tekkiv elektromotoorne jõud muudab oma suurust pöördnurga siinusega võrdeliselt¹⁾ (100 B).

Kõik praktikas kasutatavad elektrimasinad on nii konstrueeritud, et neis indutseeritud elektromotoorne jõud ja vool muudavad oma suurust sinusoidi seaduse järgi.

Joonisel 100, B toodud elektromotoorse jõu muutmise kõveral nimetatakse ülalpool horisontaaltele märgitud voolusuunda positiivseks ja allpool — negatiivseks voolusuunaks. Need on kokkuleppe suunad ja on võetud nii, et aasa külje *a* liikumisel *N* pooluse ees selles indutseeritud elektromotoorne jõud on kantud ülespoole telge. Kui aasa sama külg liigub *S* pooluse ees, siis selles indutseeritud elektromotoorne jõud on kantud allapoole telge. Teisiti öelduna see suundade tähistamine tähendab seda, et aasa esimese poolpöörde kestel läbib elektronide vool takistust *R* (joon. 99, a) suunas *s* — *s*₁, teise poolpöörde kestel suunas *s*₁ — *s*. Et neid elektronide liikumissuundi üksteisest eraldada, siis ongi valitud selline tähistamisviis.

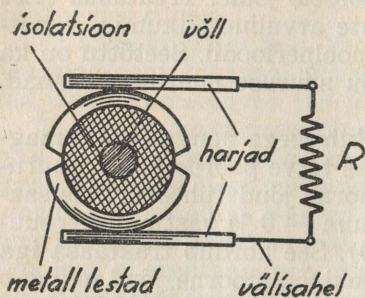
Kõik elektrimasinad tekitavad vahelduva elektromotoorse jõu, kui aasakujuline (ringikujuline) juhe pöörleb magnetvoos vastavalt eelnenud seletusele, s. o. pideva kiirusega ühes suunas ümber oma telje ja kui aasa otsad on kinnitatud üksteisest isoleeritud metallist **kontaktrõngastele**, millede abil on võimalik välisahelasse juhtida voolu.

Igast vahelduvvoolu masinast on võimalik võtta ka ühesuunalist elektrivoolu.

Selleks tuleb eelpool kirjeldatud seadisel kontaktrõngad asendada nn. **kommutaatoriga**, mis muudab välisahelasse juhi-

1) Vt. Vahelduv vool.

tava voolu iga traataasa poolpöörde kestel samasuunaliseks. Kõige lihtsam kommutaator koosneb kahest üksteisest isoleeritud metall-lestast (segmendist) (joon. 102), mille vastu



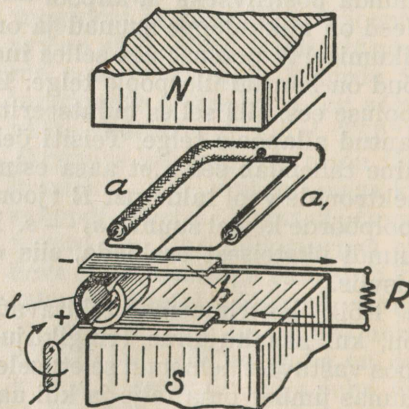
Joon. 102.

pandud elektronid siseahelast lahkuvad, märgitakse miinusega, teine, kust elektronid siseahelasse suubuvad — plussiga.

Joonisel 104 on näidatud, kuidas kommutaatori abil hoitakse välisahelas vool alati ühesuunaline, vaatamata sellele, et traataas pöörleb endiselt magnetvoos. Alates liikumist neutraalvööst noolega näidatud suunas (joonis 104, I), löikub traataas tungjoontega nagu eelpool juba seletatud. Indutseeritud elektromotoorse jõu siht on välisahelas läbi takistuse noolega näidatud suunas. Kui traataasa küljed läbistavad pärast poolpöoret neutraalvoo, siis ühendatakse traataas harjade abil lühidalt (joonis 104, III) ja sel hetkel toimub voolu kommuteerimine, s. o. voolu suuna muutmine aasas. Nüüd liigub N -pooluse ees aasa külge a_1 . Selles juhatakse nüüd vool jällegi endises suunas (harja kaudu) välisahelasse. Nii näeme, et aasade suhtes (siseahelas) voolu suund on küll vastupidine, kuid välisahelas jäi voolu suund endiseks. Seega on võimalik vahelduvvoolu masinast kommutaatori abil saada välisahelas

libisevad harjad. Kummagi lesta külge kinnitatakse üks traataasa otsest.

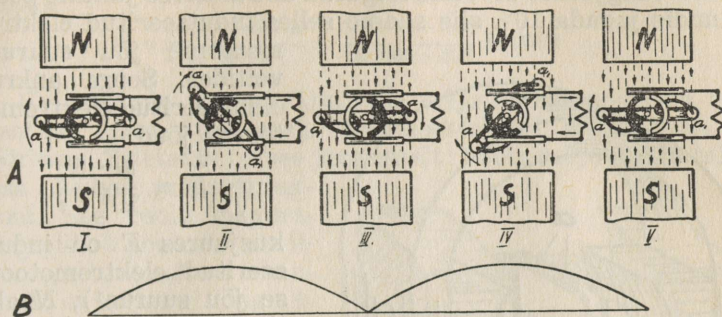
Joonisel 103 on näidatud alalisvoolu masina põhimõtteline lülitus. Kahe isenimelise magnetpooluse vahel asetseb traataas $a - a_1$, mille otsad on kinnitatud kommutaatori lestadega (l) külge. Harjad (h) on paigutatud lestadega sümmeetriliselt. Hari, mille kaudu traataasa pöörlemisel liikuma



Joon. 103.

lahkuvad, märgitakse miinusega, teine, kust elektronid siseahelasse suubuvad — plussiga.

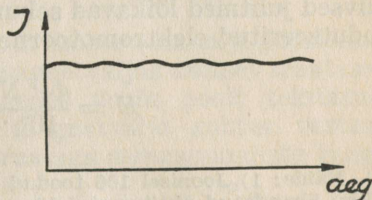
ihesuunalist voolu, mis oma tugevusest on muutus 0 — maksimum — 0. Säärast voolu nimetatakse pulseerivaks alalisvooluks (joon. 104, B). Kui ühe aasa asemele panna pöörlema



Joon. 104.

rohkem aasa, mis üksteise suhtes sümmeetriliselt asetatud ja sama arvu kommutaatori lestade külge kinnitatud, siis saame kommutaatorilt peaaegu ühes suuruses püsiva voolu. See vool pole küll alalisvool absoluutses mõttes, nagu seda saadakse elementid, vaid pisut oma tugevuses muutuv (joon. 105).

Praktikas kasutatavate alalisvoolu elektrimasinate pöörlev osa koosneb paljudest aasadest, (katsadest), mis asetatud dünamoplekist südä-



Joon. 105.

miku vastavatesse uretesse. Niisugust elektrimasina osa nimetatakse ankruks. Ankur pöörleb magnetite vahel. Need magnetid võivad olla kas permanenttsed või voolu poolt tekitatud, s. o. elektromagnetid.

Elektrimasinas indutseeritud elektromotoorse jõu suurus sõltub:

- 1) magnetvoo suuruselt, milles ankur pöörleb,
- 2) ankru keerdude arvust (juhtme pikkusest),
- 3) ühe ajaüksuse (sekundi) jooksul lõigatud tungjoonte arvust, s. o. kiirusest, millega juhe läbib magnetivoo.

Katsa¹⁾ külgedest lõikavad tungjooned ainult kaks, mistõttu neis indutseeritakse vool. Teised kaks külge libisevad

1) Katsa on mitmest traatkeerust koosnev aas.

mööda tungjooni, neid lõikamata. Tungjoontega lõikuvaid külgi nimetatakse aktiivseiks juhtmeiks a (joon. 106). Seega evib iga aas kaks aktiivset juhet (külge).

Kui tungjoonte arv, mis lõigatud ühe aktiivse juhtme poolt sekundis jagada 10^8 , siis saame selles indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse voltides. Seega ankrus indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E = \frac{\Phi \cdot N}{10^8 \cdot t}$$

kusjuures E on indutseeritud elektromotoorse jõu suurus¹⁾, N aktiivsete juhtmete arv ja t aeg sekundis.

Kui katsa teeb minutis n pööret, siis sekundis tehtud pöörete arv võrdub $n/60$. Seega aktiivsed juhtmed lõikavad sekundis magnetvoogu $n/60$ korda ja indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot n}{10^8 \cdot 60}$$

Näide: 1) Joonisel 106 toodud ankrü mähis koosneb neljast järjestikku ühendatud aktiivsest juhtmest. Mähis pöörleb magnetvoos, mille suurus on 10^6 tungjoont, kiirusega 1200 pööret minutis. Kui suur on mähises indutseeritud E ?

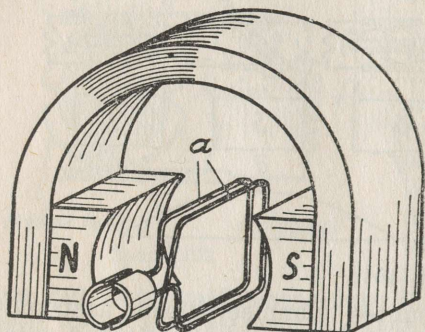
$$E = \frac{\Phi \cdot N \cdot n}{10^8 \cdot 60} = \frac{10^6 \cdot 4 \cdot 1200}{10^8 \cdot 60} = 0,8 \text{ volti}$$

2) Telefoniaparaadi induktoril koosneb ankrü mähis 5000-st keerust. Induktori ühtlasele ümberajamisel teeb ankrü 120 pööret minutis. Induktorist saadava pinge keskmine suurus on 60 volti. Leida magnetvoogu?

Iga keerd koosneb kahest aktiivsest juhtmest, seega $N = 5000 \times 2 = 10000$. Ja eelmisest valemist leiame, et

$$\Phi = \frac{10^8 \cdot 60 \cdot E}{N \cdot n} = \frac{10^8 \cdot 60 \cdot 60}{120 \cdot 10000} = 300000$$

1) Efektiivne suurus.



Joon. 106.

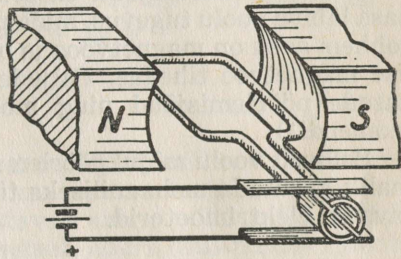
3) 200-st keerust koosnev ankrumähis pöörleb magnetvoos, mille suurus on 600000 tungjoont. Mitu pööret teeb ankur minutis, kui mähises indutseeritud elektromotoorne jõud on 100 volti?

Ankru aktiivsete juhtmete arv on $200 \times 2 = 400$. Pöörete arv minutis

$$n = \frac{10^8 \cdot 60 \cdot E}{\Phi \cdot N} = \frac{10^8 \cdot 60 \cdot 100}{600000 \cdot 400} = 2500$$

Kui asetada magnetvälja oma telje ümber pöörlema võiv traataas (joon. 107), mida läbib elektrivool, siis hakkab see pöörlema. Seletatav on see järgmiselt: voolu mõjul tekitatakse aasa ümber magnet-

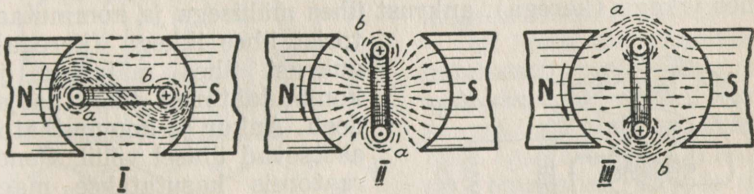
tungjooni. See voolu magnetvoog püüab poolustevahelise magnetvoo suhtes asetuda nii, et mõlemal magnetvool oleks ühes ja samas suunas võimalikult rohkem tungjooni. Et voolu magnetvoog on seotud traataasa läbiva vooluga, siis magnetvoogude vastastikusel mõjutusel peab ka



Joon. 107.

traataas oma asendit muutma, s. o. ümber oma telje pöörlema.

Joonisel 108 I on kujutatud magnetväljas asetsev traataas, mida läbib vool. Traataasa külgedes voolu poolt tekitatud tungjooned on poolustevahelise magnetvälja suhtes vastasuunalised. Selletõttu hakkab traataas samasuunaliste tung-



Joon. 108.

joonte külgrõhumise tõttu pöörlema joonisel 108 I noolega näidatud suunas. Traataas, jõudes pöörlemisel neutraalvöösse, peaks peatuma (joon. 108, II), sest magnetvoogude vastastikusel mõjustusel tõukuksid aasaküljed pooluste vahelt nagu välja. Tegelikult traataas neutraalvöös seisma aga ei jää, sest inertsitõttu paiskub ta sellest läbi, kusjuures kommutaator muudab aasa külgede suhtes voolu suuna ja aas jätkab pöörlemist endises suunas.

Kui vooluallika klemmid aasa suhtes ümber lüüda, siis pöörleb traataas vastupidises suunas joonisel 108, I näidatud suunale. Traataasa neutraalvöös asetsedes surutakse magnetungjoonte poolt aasa küljed nüüd kokku (joon. 108, III).

Et traataas ei jää neutraalvöös seisma, on ühe aasa puhul seletatav aasamassi inertsusega. Tegelikult koosneb ankru-mähis paljudest aasadest, kusjuures ühe aasa neutraalvöös olles liiguvad teised pooluste ees. Nii satub iga aas kord neutraalvöösse, kord pooluste ette ja ankur pöörleb, kuni teda läbib elektrivool.

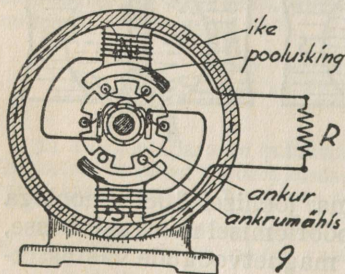
Ankru pöörlemisjõud on seda tugevam, mida suurem on aasa läbiva voolu tugevus, mida pikem on aktiivjuhe, s. o. mida rohkem aasu on magnetvoos ja mida suurem on poolustevahe-lise magnetvoo tihedus. Paljude aasade puhul summeeruvad aasade pöörlemisjõud ning moodustavad ankru pöörlemis-momendi¹⁾.

Sellisel voolu mõjul pöörlema pandud ankru jõudu on võimalik kasutada mehaaniliseks tööks. Toodud põhimõttel töötavadki elektrimootorid.

XVI. ALALISVOOLUMASINAD.

§ 1. Generaatorid.

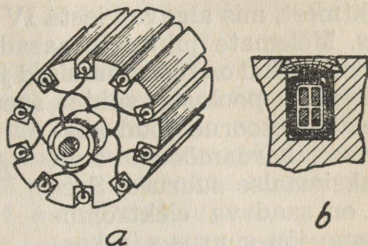
Alalisvoolugeneraator²⁾ (joon. 109) koosneb magneteist ühes ikkega (kerega), ankrust ühes mähisega ja kommutaatorist ühes ikkega (kerega), ankrust ühes mähisega ja kommutaatorist ühes harjadedega. Ankur ja kommutaator asetsevad ühisel võllil. Generaatoreis kasutatakse magnetvoo tekitamiseks permanentseid³⁾ või elektromagne- teid. Alalisvoolu masinais on need kinnitatud ikke külge ja on paigalseisvad. Elektromagne- tite südamikud valmistata-



Joon. 109.

1) Vt. alalisvoolumasinad, — 2) Nimetatakse ka dünamoks.
3) Väikeste generaatorite juures, kuid siiski harva.

takse peamiselt pehmest rauast¹⁾ mõnikord ka malmist. Südamike ankrupoolsed otsad on laiemad ja kumerad. Neid nimetatakse **pooluskingadeks**. Pooluskinga ülesanne on kinnitada elektromagneti mähiseid ja hõlbustada magnetvoo paremat üleminekut poolusest ankrusse. Poolused on ühendatud omavahel rauast või malmist ikkega. Poolustes tekitatud tungjoonte tee on põhjapoolusest läbi ankrulõunapoolusesse ja säält iket mööda tagasi. On olemas kahe ja suurema arvu poolustega masinaid. Poolused on alati paaris ja iga poolustepaar koosneb põhja- ja lõunapoolusest.

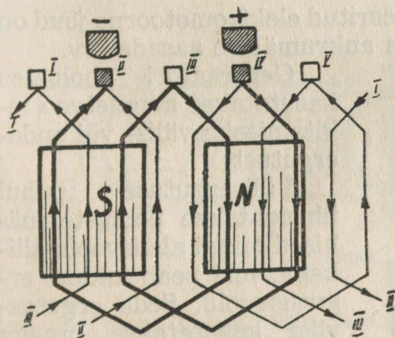


Joon. 110.

Ankur on valmistatud dünamoplekist, millesse on stantsitud **uurded**. Uurdeisse asetatakse teatava reegli kohaselt isoleeritud juhtmed, mis moodustavad ankrumähise. Kasutamisel on **trumm-mähis**²⁾, mis asetseb ankru välispinnal (joonis 110, a) vastavais uurdeis. Aasa külgede püsimiseks uurdes kinnitatakse need puust või fiibrist kiiluga (joon.110, b).

Ankruraudsüdamiku ülesandeks on vähendada magnetahela tõkestust pooluste vahel. Ta on ühtlasi aluseks ankrumähisele.

Et hoida ankrumähises indutseeritavat voolutugevust püsivana, valmistatakse mähis paljudest aasadest. Iga aasa algus ja lõpp on omavahel ühendatud ning vastava lesta külge kinnitatud. Joonisel 111 on



Joon. 111.

kujutatud kahe poolusega masina aasa- (silmuse-) kujuline ankrumähis lahtitõmmatuna. Kui mähis ankru uures, siis on aasade otsad I, II ja III vastamisi üksteisega ühendatud.

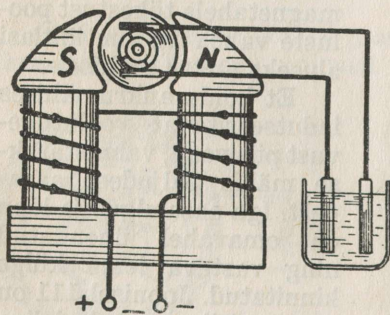
Ankrumähise mähkimisviisi on mitu. Levinum on aasa- ja lainekujuline mähkimisviis.

1) Dünamoplekist. — 2) Teisekujulisi praktikas praegu ei kasutata.

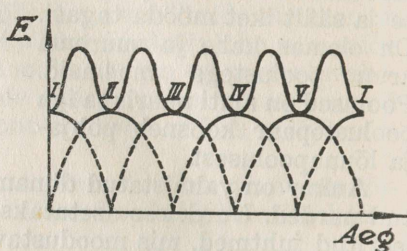
Jooniselt 111 näeme, et igast aasa küljest, kui need liiguvad lõunapooluse ees, väljuvad elektronid vastava lesta ja harja kaudu välisahelasse, kust nad uuesti sisenevad põhjapooluse ees liikuvatesse aasakülgedesse.

Jooniselt näeme, et mähis koosneb kahest rööbitiasetatud juhtmest, mis algavad lesta IV juurest ja lõpevad lesta II juures. Mõlemate juhtmete aasades indutseeritavad elektromotoorsed jõud on ühesuunalised ja liituvad. Ankrumähise aasade küljed on pooluste suhtes asetatud nii, et neis indutseeritud elektromotoorne jõud saavutab kordamööda oma maksimaalse suuruse. See-ga on saadava elektromotoorse jõu suurus aja kestel vastav joonisel 112 toodud poolperioodide tippudest moodustuvale kõverikule. Joonisel on täisjoo-nega kujutatud aasades I kuni V indutseeritud elektromotoorne jõud, mis mõjub välisahelasse aja kestel, mil vastavad aasad on harjadega ühenduses.

Niiviisi generaatoris indutseeritud elektromotoorne jõud on seda püsivam, mida suurem on ankrumähise aasade arv.



Joon. 113.



Joon. 112.

Generaatori poolustes kasutatakse magnetvoo tekitamiseks välis- või endaergutust.

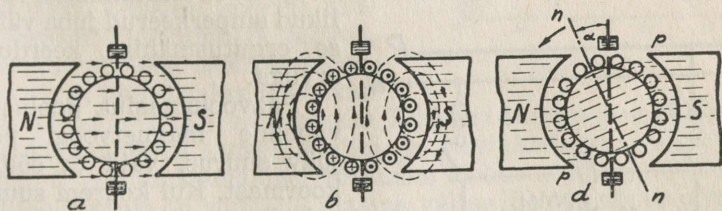
Välisergutuse puhul ühendatakse pooluste mähised mingi alalisvoolu allikaga, mis peab andma ergutusvoolu. Seda ergutusviisi kasutatakse praegu väga harva — päämiselt vaid galvanoplastikas (joonis 113).

Üldiselt on praegu magnetvoo tekitamiseks kasutamisel **endaergutus**, s. o. **dünamo-elektriline printsiip**. Endaergutuse puhul on ankrumähis ergutusmähisega rööbiti või järjestikku ühendatud. Tavaliselt jääb elektrimasina poolustesse remanentne ehk järelmagnetism. Ankrü pöörlemisel selles remanentses magnetvoos indutseeri-

takse ankrumähises väike elektromotoorne jõud. Ankrus indutseeritud vool, läbides pooluste mähiseid, suurendab neis magnetvälja tugevust. See omakorda indutseerib pöörlevas ankrumähises üha suurenevat elektromotoorset jõudu, see jällegi põhjustab suurenevat ergutusvoolu jne., kuni ankrumähises indutseeritav elektromotoorne jõud kasvab suuruseni, mille piiritlevad masina dimensioonid.

Generaatori koormamisel tekib ankrus selle mähist läbiva voolu mõjul nn. **ankru reaktsioon**. Ankrumähise ümber tekitatud magnetvoog, mida põhjustab mähist läbiv vool, ei ühtu suunaliselt pooluste poolt alalhoitava magnetvooga. Selletõttu nõrgendatakse ja moonutatakse poolustevaheline magnetvoog, mis normaalselt eviks joon. 114, a näidatud kuju.

Joonisel 114, b on näidatud ankrumähise ümber tekitatud magnetvoog. Joonisel 114, a ja 114, b toodud magnetvood summeerudes moodustavad resulteeriva magnetvoog, nagu kujutatud joon. 114, d. See resulteeriv magnetvoog on oma normaalsest teest kallutatud kõrvale, mille tõttu ka neutraalvöö nihkub nurga α võrra ühele või teisele poole, olenedes ankrupöörlemis-suunast. Samuti pole poolustevaheline magnetvoog enam homogeenne, vaid on ankrupöörlemis-suunas oleval kinga otstel



Joon. 114.

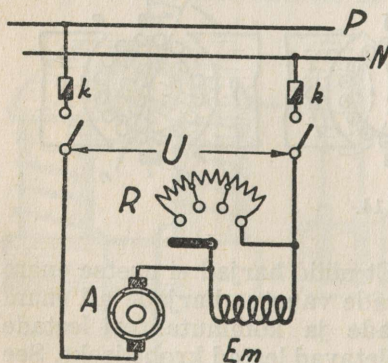
$p - p$ (joon. 114, d) tihedam. Et nüüd harjad ei asetse enam neutraalvöös, siis ei teostu lestad vahetus harjade all enam voolutus seisukorras ning harjade ja kommutaatori lestad vahel ilmnevad sädemed, mis põletavad lestad krobeliseks. See omakorda põhjustab kommuteerimise halvenemise. Selle vältimiseks paigutatakse masina harjad pöörlemis-suunas nurga α võrra neutraalvööst edasi, joon. 114, d näidatud asendisse $n - n$. Tavaliselt leitakse harjadele õiged asendid masina töötamise ajal, kohal kus ei teki harjade ja lestad vahel sädemeid ega leeki.

Suuremad generaatorid varustatakse lisapoolustega (joonis 115), mida ergutatakse ankrust saadava vooluga. Nende abil kõrvaldatakse ankrureaktsiooni mõju. Lisapoolused *LP* asetsevad pääpooluste *PP* vahel.

Ergutus- ja ankrumähise lülitusviisilt jaotuvad alalisvoolu masinad kolme tüüpi: päävoolu-, haruvoolu- ja kompaund-masinad.

Päävoolumasinail on ankrumähise ja ergutusmähise järjestikku ühendatud (joonised 109 ja 116). Ankrumähises indutseeritud vool läbib ergutusmähise *Em* (joon. 116), lülitati, voolukaitsed *k* — *k*, kogumislattide *P* ja *N* kaudu tarvita ja suubub siis ankrusse tagasi.

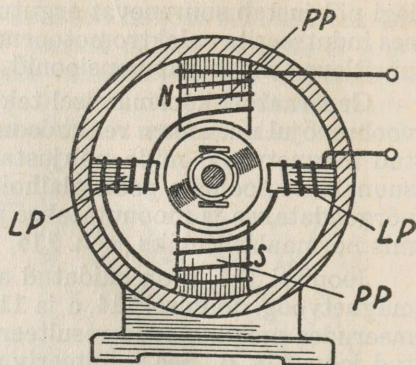
Päävoolu masina ergutusmähis on jämedast isoleeritud vasktraadist, sest seda läbib kõik vool, mida masin annab, seega saadakse poolustevahelise magnetvoo tekitamiseks vajalikud amperkeerud juba vähesel ergutusmähise keerdude arvuga.



Joon. 116.

Kui välisahel on avatud, siis päävoolumasinas indutseeritud elektromotoorne jõud on väga väike, sest poolustevahelise magnetvoo põhjustab ainult remanentne magnetism.

Sama nähe ilmneks ka välisahela suure koormustakistuse puhul, sest ankrus remanentse magnetismi mõjul indutseeri-



Joon. 115.

Kui välisahel on avatud, siis päävoolumasinas indutseeritud elektromotoorne jõud on väga väike, sest poolustevahelise magnetvoo põhjustab ainult remanentne magnetism. Sama nähe ilmneks ka välisahela suure koormustakistuse puhul, sest ankrus remanentse magnetismi mõjul indutseeri-

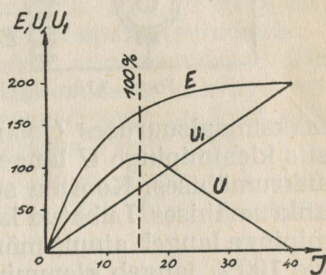
tud väike elektromotoorne jõud ei põhjusta selles takistuses kuigi tugevat voolu ja nii jääb poolustevaheline magnetvoog nõrgaks. Alles koormustakistuse vähenedes tõuseb masina elektromotoorne jõud. Koormuse suurenemisega suureneb ka poolustevaheline magnetvoog ja ühtlasi ankrus indutseeritud elektromotoorne jõud. Välisahela takistuse muutudes lõpmata väikeseks (lühiühendus), tõuseb masinas voolutugevus liiga suureks, mis võib rikkuda masinat.

Päävoolumasina klemmpinge

$$U = E - U_1,$$

kusjuures E on masina elektromotoorne jõud voltides ja U_1 pingelangus ergutus- ja ankrumähises ($U_1 = I \cdot (R_{ank} + R_{erg})$).

Päävoolumasina karakteristikuist nähtub (joon. 117), et koorma kasvades kuni teatava piirini suureneb klemmpinge. Näiteks kui voolutugevus on masinas kasvanud 15 amprini, siis masin töötab veel lubatud koormatusega (100%) ja klemmpinge U evib maksimaalväärtuse 110 volti. Edasisel koorma suurenemisel klemmpinge langeb, sest suurem osa elektromotoorsest jõust tarvitatakse sisetakistuse ($R_{ank} + R_{erg}$) ületamiseks.



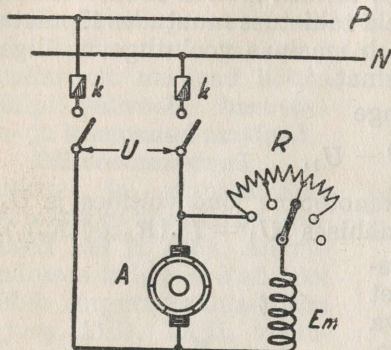
Joon. 117.

Koorma suurenedes 40 amp-rile klemmpinge langeb nullini ja sisetakistuses kulutatud pinge U_1 on maksimaalne, võrdudes elektromotoorsele jõule. Selline juhtum on võimalik masina välise lühiühenduse puhul. E kõveralt näeme, et ankrumähises indutseeritud elektromotoorne jõud kasvab korma suurenedes.

Päävoolumasina klemmpinget reguleeritakse nn. regulaartakistusega R (joon. 116), mis on rööbitilülitatav ergutusmähisele. Selle takistusega muudetakse ergutusmähist läbiva voolu tugevust, seega ka poolustevahelist magnetvoo tugevust. Kui regulaartakistus R on ühendatud lühidalt, siis ergutusmähist ei läbi peaaegu üldse vool ja ankrus indutseeritakse elektromotoorne jõud ainult remanentse magnetismi mõjul.

Üldiselt peab ütlema, et päävoolugeneraatoreid kasutatakse praegu võrdlemisi harva.

Haruvoolumasinal on ergutus- ja ankrumähis rööbitilülituses (joon. 118). Ergutusmähis koosneb arvukast keerdude hulgast, mis valmistatud peenemast traadist kui päävoolumasinal. Seetõttu läbib haruvoolumasina ergutusmähist palju nõrgem vool kui päävoolumasina ergutusmähist.

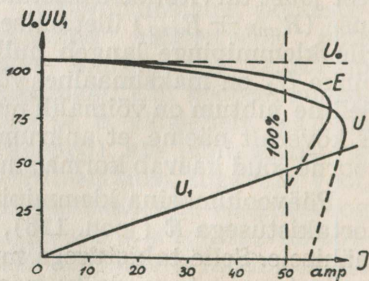


Joon. 118.

Ergutusmähisega järjestikku on regulaatortakistus R , millega reguleeritakse ergutusvoolu tugevust. Et ergutusmähis on rööbiti ankrumähisega, siis pole ergutusvoolu tugevus teatava piirini sõltuv väliskoormusest.

Tühja käigu puhul on masinal olemas sisemine vooluahel (ankru- ja ergutusmähis) ja seetõttu võib klemmpinge U_0 esineda

maksimaalsuuruses (joon. 119). Kui generaatorit koormata, siis klemmpinge U langeb, mille põhjustab pingelangus U_1 ankrumähises. Koorma suurenedes suureneb ka pingelangus ankrumähises. Lubatud koorma puhul haruvoolumasina klemmpinge langeb ainult mõne % võrra. Koormuse suurenemisel üle 100% langeb klemmpinge kiiresti. Väga väikese koormustakistuse puhul ilmneb tuntav pingelangus ankrumähises, mille tõttu väheneb ergutusvoolu tugevus ja ühtlasi poolustevahelise magnetvoo tugevus. See omakorda põhjustab indutseeritava elektromotoorse jõu ja klemmpinge vähenemise. Remanentse magnetismi tõttu elektromotoorne jõud millalgi nulliks ei muutu, küll aga klemmpinge.



Joon. 119.

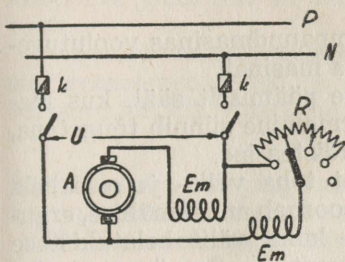
Kui haruvoolumasin järsku lühiühendada¹⁾, siis kaob klemmpinge U ning voolutugevus ei tõuse niivõrd suureks kui päävoolumasinal, vaid jääb peaaegu normaalse koormuse piiresse (joon. 119 — 55 amp

¹⁾ Kui haruvoolumasinas voolutugevus tõuseb aegamööda üle lubatud piiri, siis võib masin rikki minna.

rit). Seejuures tekib harjade ja lestade vahel, kui lühiühendust kohe ei kõrvaldata, tugev sädelemine.

Kui masina käimalaskmisel välisahel on lühiühendatud, või kui koormus on liiga suur, siis masina klemmpinge ei tõuse, sest ankrus indutseeritud vool hargneb suuremalt osalt välisahelasse (selle takistus on palju väiksem ergutusmähise takistusest) ja pooluste vahel mõjub ainult remanentne magnetism.

Üldiselt kasutatakse haruvoolumasinaid säääl, kus tarvitusel ühtlane koormus. Eriti kohane on ta akumulaatorite laadimiseks. Praegu on ta alalisvoolumasinaist levinenuim.



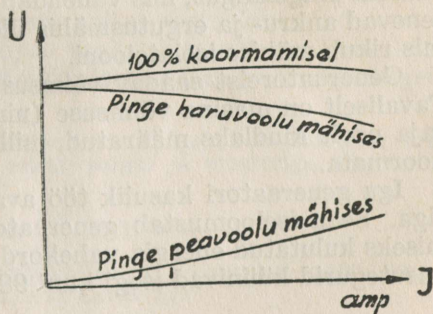
Joon. 120.

Kompaundmasinal on kaks erinevat ergutusmähist. Üks neist on järjestikku-, teine rööbitiühenduses ankruga või ankru- ja päävoolumähisega. Kompaundmasin on õieti päävoolu- ja haruvoolumasina kombinatsioon (joon. 120).

Teame ju, et päävoolumasinal koormuse suurenedes klemmpinge tõuseb, haruvoolumasinal aga langeb. Need omadused

on kompaundmasina juures ergutusmähiste keerdude arvu valiku abil nii ära kasutatud, et lubatud koormuse piirides masina klemmpinge püsib konstantsena. Koormuse muutumisel reguleerib kompaundmasin ise klemmpinget. Ergutusmähiste keerdude vahekorral valikuga võib klemmpinget isegi nii reguleerida, et masina tühjal käigul klemmpinge on väiksem kui masina koormamisel. On see pinge lisaväärtus koormamisel just nii suur, kui pingelangus juhtmetes masina juurest kuni tarvitajani, siis püsib tarvitaja pinge alati konstantsena.

Kompaundmasin, mille klemmpinge on tühjal käigul väik-



Joon. 121.

tatud erinevate kohaselt, nagu tõstetstarbeks, kaevandustes jne.

Kui alalisvoolu generaator panna käima mootorina, siis indutseeritakse ankrus, selle magnetvoos pöörlemisel elektromotoorne jõud, mis on suunatud võrgu või käivituspingele vastu.

Mootori voolutarvitus on alati niisugune, et indutseeritud elektromotoorne jõud, s. o. vastuelektromotoorne jõud on väiksem kui käivituspinge U ja

$$U = E_W + U_A$$

kusjuures U_A on pingelangus masina oomilisel takistusel ja E_W on ankrumähise indutseeritud vastuelektromotoorne jõud.

Et $U_A = I_A R_A$, siis mootoris kasutatud voolutugevus

$$I_A = \frac{U - E_W}{R_A}$$

kusjuures I_A tähistab ankrut läbiva voolu tugevust, R_A ankrumähise takistust ning U ja E_W eelpool toodud suurusi.

Ankru pöörlemisel indutseeritud vastuelektromotoorne jõud E_W piirab võrgupinge U mõju ja selle tõttu ankrumähise otstel mõjub voolutekitavalt nende pingete vahe U_A . See suurus on võrdlemisi väike ja põhjustab ankrus normaalse voolutugevuse.

Kui ankur seisab paigal, siis selles vastuelektromotoorset jõudu ei teki ja ankrule mõjub voolutekitavalt otsekohe käivituspinge. Selletõttu läbib paigalseisvat ankrut väga tugev vool.

Näide: 1) Mootori ankrumähise takistus on $0,2 \Omega$. Kui suur vool läbib ankrumähist, kui ankur seisab paigal ja mootoriga ühendatud võrgupinge on 220 V ?

$$I_A = \frac{U}{R_A} = \frac{220}{0,2} = 1100 \text{ A.}$$

2) Samas mootoris indutseeritakse ankrumähise pöörlemisel vastuelektromotoorne jõud, mille suurus on 210 V . Leida I_A !

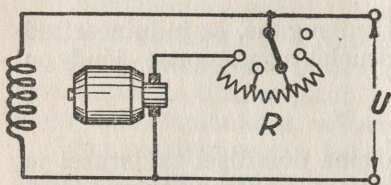
$$I_A = \frac{U - E_W}{R_A} = \frac{220 - 210}{0,2} = 50 \text{ A.}$$

Nii näeme, et seisvat mootorit ei tohi järsku ühendada maksimaalse võrgupingega, sest seda läbiv voolutugevus osutuks liiga suureks.

Ankrut läbiva voolu tugevuse reguleerimiseks kasutatakse käivitamistakistust R (joon. 122), mis on lülitatud käesoleval juhul järjestikku ankruga. Käivitamist alates lülitatakse kogu takistus sisse. Juba käivitatud mootoril vähendatakse takis-

tust sedamööda, kuidas suureneb mootori ankrü pöõrete (tiirude) arv ja seega ka vastuelektromotoorne jõud. Nii toimides hoitakse voolutugevus ankrümähises ettenähtud piires.

Koormuseta on mootori pöõrete arv suur ja seetõttu on ka ankrus indutseeritud vastuelektromotoorne jõud suur, mis



Joon. 122.

osutub peaaegu võrdseks käivitamispingele (võrgupingele). Seejuures on aga ankrümähises kulutatud võimsus ($I_A^2 R_A$) väga väike. Koormuse suurenemisel mootori pöõrete arv väheneb, kuid ankrus kulutatud võimsus suureneb, s. o. suureneb ankrü pöõrdemoment.

Pöõrdemomendi suurus (joon. 123) arvestatakse valemiga:

$$M = P \cdot r_A$$

kusjuures M tähistab ankrü pöõrlevat tõmbejõudu kilogramm-meetris, P tõmbejõudu kilogrammides ja r_A ankrü raadiust meetris.

Et elektrimootor peab tegema mehaanilist tööd, siis koormuse suurus, s. o. koormamoment peab vastama mootori pöõrdemomendile. Mootori poolt sekundi kestel tehtud töö, s. o. võimsus

$$N_m = P \cdot v$$

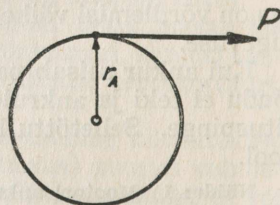
kusjuures N_m tähistab mootori võimet kilogramm-meetris, P tõmbejõudu kilogrammides ja v ankrü pöõrlemise kiirust m/sek.¹⁾

Mootori poolt võrgust tarvitatud võime $N = U \cdot I$, kuid mootorilt saadud võime (kasulik võime)

$$N_m = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{9,81}$$

kusjuures N_m tähistab mootori töövõimet kilogramm-meetrites, U võrgupinget voltides, I ankrü mähisist läbiva voolu tugevust ampriks, η mootori kasulikkusetegurit ja arv 9,81 elektrivoolu mehaanilist ekvivalenti.

Valemist $N_m = P \cdot v$ on võimalik arvutada mootori tõmbe-



Joon. 123.

¹⁾ meetreid sekundis.

jõu suurust, kui N_m asendada eelmises valemis saadud väärtusega:

$$P = \frac{U \cdot I \cdot \eta}{9,81 \cdot v}$$

Saadud valemist näeme, et koorma kasvamisel käivitamispinge U konstantseks jäädes peab suurenema mootori voolutarvitus, s. o. ankrumähist läbiva voolu tugevus.

Voolutugevuse kasvamine ankrumähises on võimalik siis, kui selles indutseeritud vastuelektromotoorne jõud väheneb. Vastuelektromotoorne jõud võib väheneda ainult ankrupöorete arvu vähenemisel. Seega koorma suurenedes, mis paratamatult tingib mootori pöorete arvu vähenemise, väheneb vastuelektromotoorse jõu suurus.

Sääraselt ankrut läbiva voolu tugevus sõltub nõuetavast tõmbejõust, või teisiti öeldult, mitmesuguste koormuste puhul tarvitab mootor voolu koormusele vastavas tugevuses.

Kui mootori koorem muutub liiga suureks, siis väheneb mootori pöorete arv, langeb indutseeritud vastuelektromotoorse jõu suurus ja ankrumähist läbib liiga tugev vool.

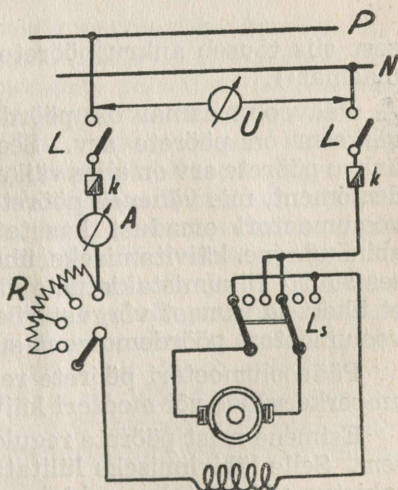
Seepärast ei tohi mootorit koormata üle lubatud piiri. Lubatud koormuse piirides toimub pöorete reguleerimine (konstantne hoidmine) regulaartakistuse abil, millega reguleeritakse käivituspinge suurus.

Nagu generaatorid, jaotuvad ka alalisvoolumootorid:

- 1) päävoolumootorid,
- 2) haruvoolumootorid,
- 3) kompaundmootorid.

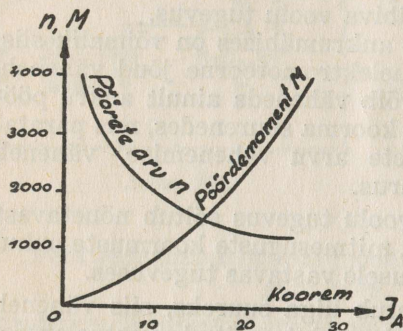
Päävoolumootori lülitus on toodud joon. 124. Joonisel on võrgu plussjuhe (kogumislatt) märgitud tähega P ja miinusjuhe N .

Võrgupinge kontrollimiseks võrgujuhtmetega rööbiti lülitatakse voltmeeter. Mootori ühendamiseks võrgupingega kasutatakse kahekordset lülitit L . Mõlemasse voolujuhtmesse on



Joon. 124.

asetatud voolukaitsed $k-k$, mis koorma liigsel suurenemisel läbi põlevad ja nii vooluahela katkestavad. Voolutugevuse kontrollimiseks on mähistega järjestikku ühendatud ampermeeter A . Ankrut läbiva voolu tugevuse reguleerimine toimub käivitusregulaatoriga R . Mootori ankru pöörlemis-suuna muutmiseks on lüliti L_s , mis muudab ankru mähises voolu



Joon. 125.

suuna ümber. Ankru pöörlemisel suuna muutmiseks muudetakse voolusuund kas ankrumähises või päävoolumähises üksikult, kuid mitte kunagi mõlemas korraga.

Päävoolumootori pöörlemise kiirus (pöörde arv minutis) sõltub otsekohe koormusest. Koorma suurenedes pöörde arv langeb, vähenedes tõuseb (joon. 125). Päävoolumootorit ei tohi koormusega käivitada,

sest siis tõuseb ankru pöörde arv liiga suureks, mis rikub masinat¹⁾.

Päävoolumasinal on pöördemoment seda suurem, mida väiksem on pöörde arv. Seega mootori käivitamisel, kui ankru pöörde arv on alles väike, on võimalik saada suur pöördemoment, mis väheneb pöörde arvu suurenedes. Seda päävoolumootori omadust kasutatakse elektriraudteede, tõsteabinõude jne. käivitamiseks, ühesõnaga sääli, kus vajalik alguses suurte liikumistakistuste ületamine. Üldiselt tuleb öelda, et ühest ja samast võrgust võetava võimsuse puhul on päävoolumootori pöördemoment suurem kui haruvoolumootoril.

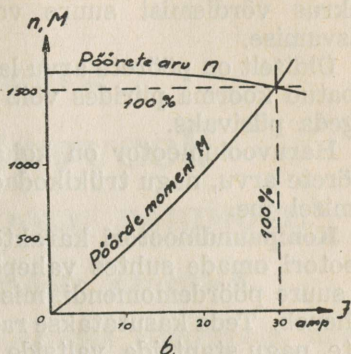
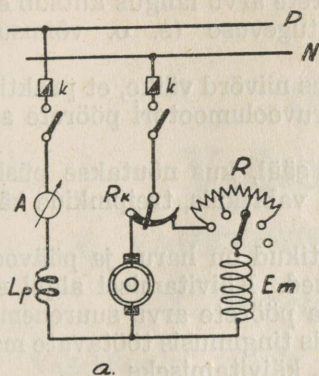
Päävoolumootori pöörde reguleerimine toimub ergutus-amperkeerdude või mootori käivituspinge muutmise teel.

Esimene neist pöörde reguleerimisviisidest on ratsionaalsem. Selle läbiviimiseks lülitatakse ergutusmähisega rööbiti takistus või võetakse sektsioonide kaupa lülitatav ergutusmähis. Teine viis pole kuigi otstarbekohane, sest regulaator-takistuses läheb palju energiat kaotsi soojuse näol. Näiteks,

¹⁾ Igal masinal on lubatava koormuse juures ette nähtud kindel pöörde arv minutis.

mootori töötamisel poole tiirude arvuga kulub regulaator-takistuses sama palju energiat kui kasutatakse mootoriski.

Haruvoolumootori päävooruseks on tema pöörete arvu vähene muutus.



Joon. 126.

Joon. 126, a on toodud haruvoolumasina põhimõtteline lülitus. Joonisel näeme, et lisapooluste mähis L_p on lülitatud järjestikku ankrumähisega. Lisapooluste polariteet peab olema sama, mis temale pöörlemisihis järgneva peapooluse oma, et vähendada ankrureaktsiooni mõju. Samuti nende keerdude arv on kohandatud nii, et lisapoolustes tekitatud magnetvoo tugevus on alati võrdeline ankrumähistes tekitatud magnetvootugevusele. Nii jääb püsima ainult poolustevaheline ergutismagnetvoog, selletõttu ka neutraalvöö ei nihku paigast.

Mootoril on kaks regulaator-takistust: R_{lc} ja R . Regulaatorit R_k kasutatakse käivitamiseks, kuna R -ga reguleeritakse mootori pöörete arvu. Muidugi on võimalik ka R_{lc} abil mootori pöörete arvu reguleerida, kuid siis läheb regulaatoris palju energiat kaotsi. Otstarbekam on pöörete reguleerimine regulaatori R abil. Kui nõrgendada R abil voolutugevust ergutismähises, siis nõrgeneb poolustevaheline magnetvoo tugevus ja mootori pöörete arv tõuseb.

Haruvoolumootori karakteristikult (joon. 126, b) näeme, et pöörete arv n on väga vähe sõltuv koormast, s. o. pöörde-momendist ja 100% koormusel langeb pöörete arv kõigest mõne % võrra.

Tühja käigu puhul on mootoris tarvitatud võimsus väga väike, mistõttu ankrus indutseeritud vastuelektromotoorne

jõud võrdub peaaegu klemmipingele. Et koorma suurenedes pöörete arv veidi langeb, siis väheneb ankrus indutseeritud vastuelektromotoorne jõud ja ankrut läbiva voolu tugevus kasvab.

Haruvoolumootoris väike pöörete arvu langus kutsub esile ankrus võrdlemisi suure voolutugevuse (s. o. võimsuse) kasvamise.

Üldiselt on pöörete arvu langus niivõrd väike, et praktikas lubatud koorma piirides võib haruvoolumootori pöörete arvu lugeda püsivaks.

Haruvoolumootor on kohane sääl, kus nõutakse püsivat pöörete arvu, nagu trükikodades, vabrikuis, treipinkide käivitamisel jne.

Kompaundmootori karakteristikud on haru- ja päävoolumootori omade suhtes vahepeälsed. Käivitamisel algul evib ta suure pöördemomendi, mis aga pöörete arvu suurenemisel väheneb. Teda kasutatakse raskeis tingimuis töötavate masinate, nagu stantside, valtside jne. käivitamiseks.

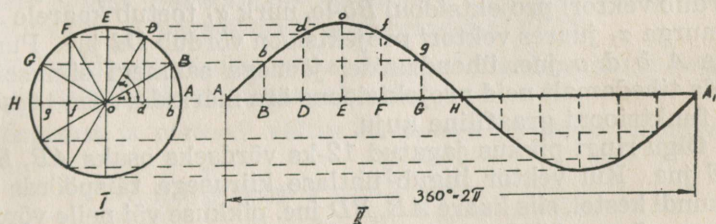
Vahelduvvool.

I. VAHELDUVVOOLU PÕHIMÕTE.

§ 1. Vahelduvvoolu suurused.

Vahelduvaks vooluks nimetatakse elektrivoolu, mis aja kestel perioodiliselt muudab oma tugevust ja suunda. Et elektrivool on elektronide liikumine, siis järelikult vahelduvvool on elektronide mitteühtlane liikumine.

Praktikas kasutatav vahelduvvool muutub oma tugevusest ja suunalt reeglipäraselt. Elektrimasinad on konstrueeritud nii, et neis indutseeritud elektromotoorne jõud ja voolutugevus muutub siinusoidi järele (joon. 127). Siinusoid kujutab endast



Joon. 127.

siinuse funktsiooni graafilist kujutist, mis saadakse järgmiselt: Pöörame vektorit AO^1 (ringi raadiust r) ühtlase kiirusega ajanäitaja osutile vastupidises suunas, siis kulub vektoril OA pöörlemiseks kaare AB võrra sama palju aega kui kaare BD , ED jne. võrra, kui need on võrdse pikkusega. Et nendele kaar-

1) Vektori all mõeldakse joonlõiku, mille pikkus on võrdeline mõne vahelduvvoolu suurusega, näit. 10 voldile vastab joonlõik 10 mm jne.

tele toetuvad nurgad on võrdsed, siis näeme, et vektori OA pöörlemine nurga AOB võrra toimub sama aja kestel, kui nurga BOD ja DOE jne. võrra. Vektori täispöördeks (360° ehk 2π radiaani) kuluv aeg sõltub pöörlemise kiirusest, mida nimetatakse **nurkkiiruseks** (ω).

Vektori OA pöörlemisel näeme, et tema projektsiooni suurus vertikaalteljele on muutuv. Pöörlemise algul nurk α on null, seega ka vektori OA projektsioon vertikaalteljele on null. Pöörlemisnurga suurenedes suureneb pidevalt vektori OA projektsiooni suurus (O kuni OE suuruseni) ja on maksimaalne, kui vektor OA on 90° pöördunud. Edasisel pöördumisel OA projektsiooni suurus väheneb ja on null, kui vektor on asendis OH . Edasi pööreldes vektor evib uuesti suureneva projektsiooni suuruse, kuid eelmisele poolpöördele vastupidises suunas. Läbistades nurga 270° , on vektori OA projektsiooni suurus jälle maksimaalne. Kui vektor on jõudnud tagasi asendisse OA , siis on ta teinud ühe täispöörde ning edasisel vektori pöörlemisel kirjeldatu kordub.

Nii näeme, et vektor vastavalt pöörlemisnurgale α , α_1 jne., evib erineva projektsiooni suuruse, näiteks pöördenurgale α vastab joonlõik bB , α_1 joonlõik dD jne. Nende koordinaatide abil võime siinuse funktsiooni graafilise kuju tasapinnal üles joonestada (127 II). Joonlõik AA_1 kujutab siin vektori pöörlemistee pikkust ühe täispöörde kestes (antud ringi pikkus). AB on kaare pikkus, millele toetub nurk α ja nurga α juures võrdub vektori projektsiooni Bb -le, nurk α_1 toetub kaarele AD ja nurga α_1 juures vektori projektsioon võrdub Dd jne. Punktide $A b d o$ jne. ühendamisel joonega saamegi siinusoidi. Mida tihedamalt neid projektsioone ära märkida, seda täpsam on funktsiooni graafiline kuju.

Olgu ringi pikkus jagatud 12-ks võrdseks osaks AB , BD , DE jne. Kui vektor liigub ühtlase kiirusega täispöörde 12 sekundi kestel, siis kaare AB , BD jne. pikkuse või neile võrdse nurga võrra pöördumiseks kulub tal 1 sekund. Nii näiteks nurga α võrra pöördumiseks kulub 1 sekund, α_1 võrra, mis on kaks korda suurem, 2 sekundit jne. Nii võib vektori pööreldud teed ka ajaga ära märkida.

Kui traataas pöörleb ühtlase kiirusega homogeenses magnetvoos, siis selles indutseeritud elektromotoorse jõu suurus ja volutugevus on muutuv siinusoidi järele (vt. pt. XV). Näiteks neutraalvöö läbistamisel traataasas elektromotoorset jõudu ei indutseeru (vektor on horisontaalteljega ühtuv). Edasisel aasa pöörlemisel lõigatud tungjoonte arv sõltub

pöördenurgast α . Kui aas on pöördunud neutraalvöö suhtes 90° , siis on lõigatud tungjoonte arv kõige suurem, vastavalt sellele ka indutseeritud elektromotoorne jõud (vektori OA projektsioon on siis OE). Edasisel aasa pöördumisel lõigatud tungjoonte arv väheneb ja ühtlasi väheneb ka aasas indutseeritud elektromotoorse jõu suurus. Neutraalvöö läbimisel aasas elektromotoorset jõudu jällegi ei indutseeru (vektor asendis OH). Edasisel aasta pöördumisel indutseeritakse aasa külgede suhtes eelmisele vastupidi suunatud elektromotoorne jõud, suuruselt samuti muutuv nagu eelmisel vektori poolpöördel.

Joonisel 128 on toodud vahelduvvoolu suuna ja tugevuse muutumist kujutav kõverjoon. Vahelduvvoolu suurusi igal üksikul hetkel nagu t_1 , t_2 jne. nimetatakse **hetksuurusteks** ja kõige suuremat neist **maksimaalamplituudiks** (\bar{I})¹⁾. Seega on joonisel 128 i_1 i_2 jne. hetksuurused ning \bar{I}_1 \bar{I}_2 maksimaalsed amplituudid. Ajavältust T , mille kestel vool muudab oma suurust nullist + maksimumini ja uuesti nullini ja sealt - maksimumini ja uuesti nullini, nimetatakse **perioodiks**. Iga periood koosneb positiivsest ja negatiivsest poolperioodist ($T/2$).

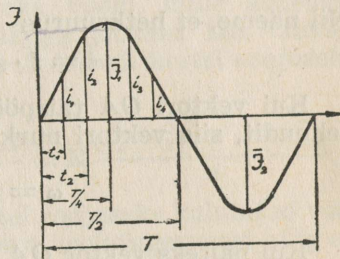
Vahelduvvoolu iseloomustatakse veel **sagedusega** (f). Sagedus on perioodide arv ühes sekundis.

Sagedus ja perioodi vältus on seoses järgmise valemiga:

$$f = \frac{1}{T}, \text{ kust } T = \frac{1}{f} \text{ ja } f \cdot T = 1$$

Praktikas kasutatakse mitmesuguse sagedusega voole. Valgustusvoolu sagedus on näiteks 50 perioodi sekundis. Kuid raadiotehnikas kasutatavate voolude sagedus küünib miljoonaisse perioodidesse sekundis. Selliste voolude perioodivälde on väga lühike.

Joonisel 127 näeme, et iga hetksuurus sõltub pöördenur-



Joon. 128.

1) Käesolevas teoses maksimaalsuurused tähistatakse kriipsuga pealpool suuri tähti ja hetksuurused väikeste tähtedega.

gast. Nii on võimalik igat hetksuurust avaldada nurga siinuse ja maksimaalamplituudi abil:

$$i_1 = \bar{I} \cdot \sin\alpha_1, i_2 = \bar{I} \cdot \sin\alpha_2 \text{ jne.}$$

Seega nurk α iseloomustab hetksuursi. On α null, siis on ka hetksuurus null; on $\alpha = 90^\circ$, siis on hetksuurus maksimaalne. Tegelikelt arvutatakse avaldatakse pöördumisnurk **nurkkiirusega** ω . Kui vektor OA pöörleb ühtlase kiirusega nurga α võrra t sekundi kestes, siis ühes sekundis pöörduv ta nurga α/t võrra. Seega vektori pöörlemiskiirus (nurkkiirus)

$$\omega = \frac{\alpha}{t} \text{ ja } \alpha = \omega t$$

Nii näeme, et hetksuurus

$$i = \bar{I} \cdot \sin\alpha = \bar{I} \cdot \sin\omega t$$

Kui vektori OA täispöörde vâlde (perioodi vâlde) on T sekundit, siis vektori nurkkiirus

$$\omega = \frac{\alpha}{T} = \frac{360}{T}$$

Kui näiteks vektor OA teeb täispöörde 12 sekundi kestes ($T = 12$), siis nurkkiirus on $360/12 = 30^\circ$ sekundis.

Tegelikelt arvutatakse avaldatakse nurk radiaanides¹⁾ ja nurkkiirus

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Asendades saadud valemis T tema väärtusega sagedusvalemis, saame, et

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

Sellest näeme, et nurkkiirus on võrdeline sagedusele, mis pärast tavaliselt $\omega = 2\pi \cdot f$ nimetatakse **riingsageduseks**. Ring-sagedus näitab perioodide arvu 2π sekundi kestes.

Kui asendame valemis $i = \bar{I} \sin\omega t$ nurkkiiruse sagedusega, siis

$$i = \bar{I} \cdot \sin\omega t = \bar{I} \cdot \sin\frac{2\pi}{T} \cdot t = \bar{I} \cdot \sin 2\pi \cdot f \cdot t,$$

kus i on voolu hetksuurus, \bar{I} voolu maksimaalsuurus, f perioodide arv sekundis ja t on aeg vaadeldaval hetkel.

1) 1 radiaan = $\frac{360}{2\pi} = 57,3^\circ$

Niiviisi on võimalik kindlaks määrata soovitavaid voolu hetksuurusi, kui teada on voolu maksimaalne amplituud ja sagedus. Sama valem on maksev ka elektromotoorse jõu kohta, kui voolu väärtused asendada vastavate elektromotoorse jõu väärtustega.

Võimsus, mis kulutatakse soojuste tekitamiseks mingis takistuses R , avaldatakse valemiga $I^2 \cdot R$, vahet tegemata, kas seda läbib alalis- või vahelduvvool. Kui takistust läbib alalisvool, siis tekitatakse iga hetk võrdne soojusehulk. Vahelduvvoolu hetksuurused on muutuvad, seega on muutuv ka soojuseks kulutatud võime $I^2 R$. Seetõttu võrdub ühe perioodi kestel tekitatud soojusehulk hetkeliste voolutugevuste poolt tekitatud soojushulkade summale. Näiteks voolu, mille suuruste muutumine iseloomustatud graafikuga joonisel 128, läbides mingit takistust R , kulutatakse poolperioodi kestel soojuseks võimsus

$$N = \frac{i_1^2 \cdot R + i_2^2 \cdot R \dots + i_n^2 \cdot R}{n} = R \frac{(i_1^2 + i_2^2 \dots + i_n^2)}{n}$$

Nii näeme, et poolperioodi kestel soojuseks kulutatud voolutugevus on väiksem maksimaalsest voolutugevusest ning on hetksuuruste ruutude summa keskmine.

Vahelduvvoolu hetksuurustega arvutamine pole hõlpsasti teostatav, sellepärast praktikas vahelduvvoolu mõõtmise aluseks on võetud selle soojust tekitav mõju võrreldes alalisvooluga. Kui näiteks vahelduvvool tekitab antud aja kestel sama soojushulga kui üheamprilise tugevusega alalisvool, siis selle vahelduvvoolu mõju on võrdne üheamprilise alalisvoolu mõjule, või vahelduvvoolu tegev nn. efektiivne tugevus on 1 amper.

Matemaatiline arvutus näitab, et **efektiivne voolutugevus** (I)¹⁾ on $\sqrt{2}$ korda väiksem maksimaalsest voolutugevusest.

$$I = \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}} = \bar{I} \cdot 0,707$$

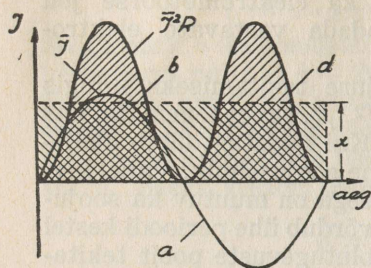
ja vastavalt sellele ka **efektiivne elektromotoorne jõud**:

$$E = \frac{\bar{E}}{\sqrt{2}} = \bar{E} \cdot 0,707$$

Graafiliselt on võimalik efektiivse ja maksimaalse voolu-

1) Efektiivsuurused tähistatakse tavaliste suurte tähtedega.

tugevuse vahekorda seletada järgmiselt: Joonisel 129 näitavad kriipsutatud pinnad soojusehulka, mis tekib teatavas



Joon. 129.

takistuses R , kui seda läbib kõvera a kujuliselt muutuv vahelduvvool ühe perioodi kestel. Toodud kõverailt näeme, et vahelduvvoolu töövõime on iga hetk muutuv. Kui kõvera b ja d alused pinnad koondada püstküliku pinnaks (joonisel ruuduliselt kriipsutatud), mille alus võrdub perioodi vältel, siis näeme, et selle püstküliku kõrgus

$x = \frac{1}{2} \bar{I}^2 R$. Püstküliku kõrgus x annab meile pideva töö suuruse, mida võib alalisvoolu töövõimega võrrelda. Seega $x = I^2 R$, kus I on efektiivne voolutugevus. Et

$$x = \frac{1}{2} \bar{I}^2 R \text{ ja } x = I^2 R,$$

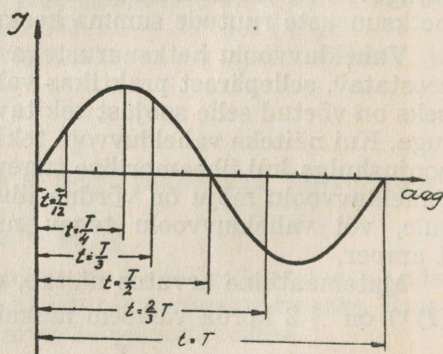
siis sellest

$$\frac{1}{2} \bar{I}^2 R = I^2 R$$

$$I^2 = \frac{1}{2} \bar{I}^2 \text{ ja } I = \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}}$$

mida oligi vaja tõestada.

Et vahelduvvool oma suunda ja tugevust kiirelt muudab, siis mõõteriista osuti oma inertsitõttu neid muutusi ei suuda täpselt jälgida. Seepärast vahelduvvoolu tehnikas kasutatakse mõõteriistad on nii konstrueeritud, et nad näitavad otsekohe efektiivseid suurusi.



Joon. 130.

Et vahelduvvool oma suurusi pidevalt muudab, siis võib igat hetksuurust vaadelda kui voolusuuste järjekordset arenemisastet. Üksikuid hetkelisi voolu ja pinget arenemisastmeid nimetatakse voolufaasideks (joon. 130). Seega näitab voolufaas, missuguses vahekorras on vaadeldav hetkvoolutugevus maksimaalamplituudiga. Järgnev tabel näitab voolu hetk-

suurusi väljendatud aja ja voolu maksimaalsuuruse abil vastavalt joonisele 130.

t	0	$\frac{T}{12}$	$\frac{T}{4}$	$\frac{T}{3}$	$\frac{T}{2}$	$\frac{2}{3}T$	T
\bar{i}	0	$0,51 \cdot \bar{i}$	\bar{i}	$0,87 \cdot \bar{i}$	0	$-0,87 \cdot \bar{i}$	0

Tabelist näeme, et igale toodud hetkele vastab kindel voolusuurus. Valemi $\bar{i} \sin \omega t$ abil on võimalik igale soovitava hetkele leida vastavad voolu hetktugevused, samuti ka pingele, kui teada on E . Voolu ja pinge faase määratakse kraadides. Näiteks faas ajal

$$\frac{T}{12} = \frac{360}{12} = 30^\circ, \quad \frac{T}{4} = \frac{360}{4} = 90^\circ, \quad \frac{T}{2} = \frac{360}{2} = 180^\circ \text{ jne.}$$

Ajalt on väga lihtne üle minna kraadidele või vastupidi, kui teada on voolu sagedus. Olgu vaadeldava voolu sagedus 50 perioodi sekundis. Siis ühe perioodi tekitamiseks kulub aega $\frac{1}{50}$ sekundit. Et üks periood vastav 360° , siis ühele kraa-

dile vastab aeg $\frac{1}{50} \cdot \frac{1}{360} = \frac{1}{18000}$ sekundit.

Näide: 25-protsendilise voolu vaadeldav faas on 30° . Millele vastab see aeg?

Ühele kraadile vastab aeg

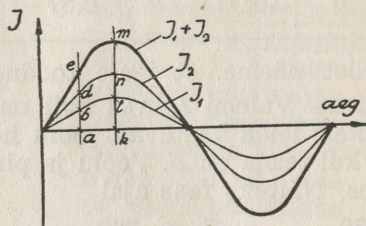
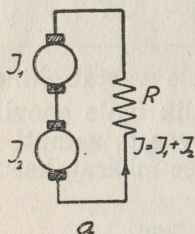
$$\frac{1}{25} \cdot \frac{1}{360} = \frac{1}{9000} \text{ ja } 30 \text{ vastav aeg } t = \frac{30 \cdot 1}{9000} = \frac{1}{300} \text{ sekundit.}$$

§ 2. Vahelduvvoolu liitmine.

Kui juhime ahelasse kahe või enam vahelduvvooluallika voolu, siis nende voolude mõju ei summeeru mitte igakord algebraliselt. Siin evib suure tähtsuse voolufaas. On voolud faasis, siis mõjuvad nad alati üheaegselt ühes suunas ning nende mõjude summa on maksimaalne. Näiteks olgu ühendatud kaks võrdse sagedusega vahelduvvoolugeneraatorit järjestikku ja mõlemad saadavad voolu läbi tarvitaja R (joonis 131, a). Voolutugevus I_1 , mida annab esimene, ja voolutugevus I_2 , mida annab teine generaator, liituvad oma mõjult üheks resulteerivaks voolutugevuseks.

Vahelduvvoolude graafiline liitmine toimub kas siinusoidaalsete kõverjoonte või vektorite abil.

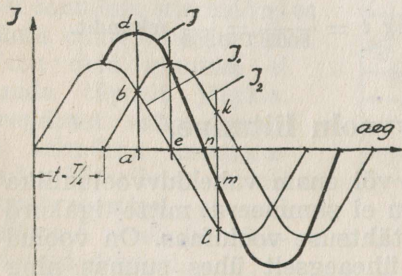
Sinusoidaalsel liitmisel arvatakse voolude hetkväärtused kokku ja saadud resultaate abil ehitatakse uus, nn. resulteeriv kõverjoon. Näiteks joonisel 131, b hetkel a resulteeriv



Joon. 131.

$ae = ab + ad$, hetkel k resulteeriv $km = kl + kn$ jne. Niiviisi voolude I_1 ja I_2 hetkväärtusi liites saame resulteeriva kõverjoone $I_1 + I_2$, mis iseloomustabki nende voolude kogumõju. Käesolevas näites tekitavad mõlemad generaatorid voolu ühes suunas samal ajal 0 — maksimum — 0, seega nad on faasis ja nagu joonisel 131, b näha, on nende resulteeriv alati nende summa.

Kui eelmises näites toodud generaatoris indutseeritud voolude perioodi algused ei ühtu, siis nad pole faasis; seega nende perioodiline arenemine ei ühtu aja mõttes ja nende resulteeriva mõju on võimalikust maksimaalsest mõjust väiksem. Joon. 132 näidatud voolude perioodi algused ei ühtu, vaid on faasis 90° nihutatud. Nii näeme, et esimeses generaatoris tekitatud voolu tugevus on maksimaalne, kuid teises alles null. Seega hetkel $T/4$ mõjub ahe-



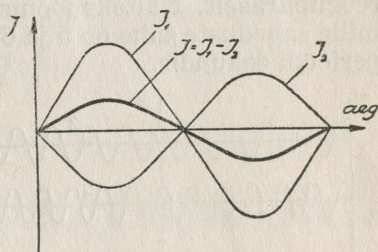
Joon. 132.

las ainult esimeses generaatoris indutseeritud voolutugevus I_1 . Järgmisel hetkel I_1 väheneb, kuid teises generaatoris indutseeritud voolu tugevus I_2 kasvab. Ahelas mõjuvad nüüd mõlemad voolud ühes suunas. Näiteks hetkel a resulteeriv $ad = 2ab$.

Hetkel e mõjub ahelas ainult I_2 , kuna I_1 on null. Nüüd muutub esimeses generaatoris voolusuund ja voolud töötavad üksteisele vastu. Seega võrdub resulteeriv voolutugevus masinais indutseeritud voolutugevuste vahele. Näiteks hetkel n resulteeriv $nm = kn + (-nl)$. Resulteeriva voolu suuna määrab alati suurem voolutugevus.

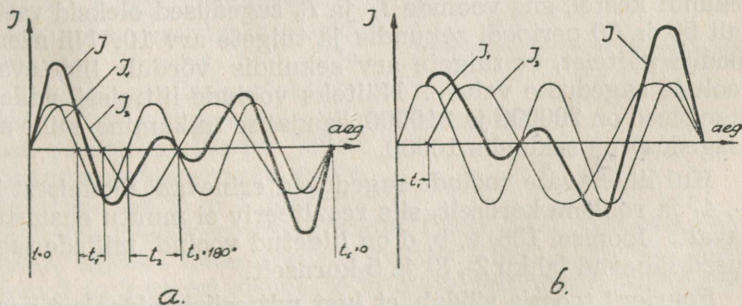
Kui voolutugevused I_1 ja I_2 on faasis 180° nihutatud, siis nad mõjuvad alati vastupidiselt ja resulteeriv I võrdub samuti algebralisele summale (joon. 133). Kui voolutugevused I_1 ja I_2 on võrdsed, siis hävitavad nad täielikult üksteise mõju ja ahelas mingit voolu ei teki.

Nii näeme, et võrdsete sagedustega voolude liitumisel saadakse resulteeriv vool, mis on sama sagedusega ja muutuv siinusoidiseaduse järele. Nende voolude resulteeriv suurus sõltub faaside nihkenurgast. On see null, siis liituvad voolude amplituudid maksimaalselt. Nihkenurga suurenedes voolude resulteeriv mõju väheneb ja 180° nihkenurga juures on ta kõige väiksem.



Joon. 133.

Kui liita erineva sagedusega voole, siis nende resulteeriv ei muutu enam sinusoidaalselt. Joonisel 134, a on liidetud kaks voolu, mille sageduste suhe on 2 ja 3¹⁾, kusjuures nende perioodide tekkimise algused ühtuvad.



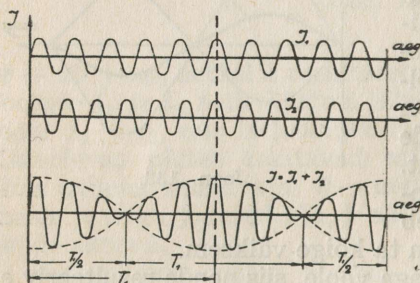
Joon. 134.

1) 2 ja 3, 20 ja 30, 2000—3000 jne. perioodi sekundis.

Joonisel 134, b on liidetud samad voolud, kuid nad on üks-teisest faasis nihutatud. Toodud jooniselt näeme, et voolude faaside nihkumine t on muutuv. Algul on t null, siit edasi ta suureneb, t_3 juures on ta maksimaalne, kust edasi faaside nihkenurk väheneb ja t_6 juures on jälle null.

Seetõttu muutub resulteeriva voolu tugevuse amplituud olenevalt faaside nihkenurgast. Suureneb nihkenurk, siis väheneb resulteeriv I ; väheneb nihkenurk — suureneb resulteeriv.

Kui liidetavate voolude sagedused on vähe lahkuminevad, siis nende resulteeriva amplituudid kasvavad ja kahanevad reeglipäraselt. Näiteks joonisel 135 on liidetud voolud I_1 ja I_2 , mille sageduste suhe on 5 ja 6, näit. 50 ja 60, 5000 ja 6000 jne. perioodi sekundis.



Joon. 135.

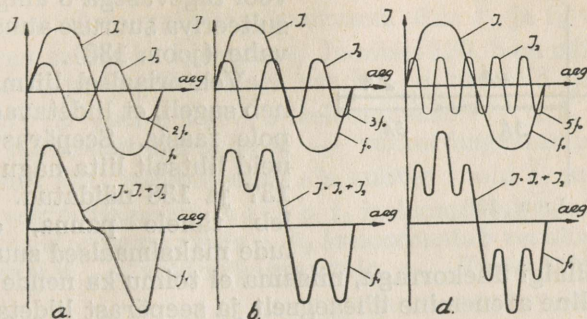
Jooniselt 134 ja 135 näeme, et saadud resulteerivail on teatav sarnasus, mis ilmneb resulteeriva amplituudide kasvamisest ja kahaneemisest. Ajavältust T_1 , mille kestel resulteeriva amplituudid kasvavad nullist maksimumini ja vähenevad nullini, nimetatakse **tuikeks** ja kogu seda nähet **tuikamiseks**.

Kui joonisel 135 näidatud voolude liitmine toimuks 0,1 sekundi kestel, siis voolude I_1 ja I_2 sagedused oleksid vastavalt 50 ja 60 perioodi sekundis ja tuigete arv 10. Nii näeme toodud näiteist, et tuigete arv sekundis võrdub liidetavate voolude sageduste vahele. Näiteks voolude liitmisel, millede sagedused on 200000 ja 210000, saadakse tuikamine, mille arv (sagedus) on sekundis 10000.

Kui liidetavate voolude sagedused erinevad üksteisest 2-, 3-, 4- ja rohkem kordselt, siis resulteeriv ei muutu enam tui-kavalt. Joonisel 136, a, b, d on liidetud voolud, millede sagedused lähevad lahku 2-, 3- ja 5-kordselt.

Fourier'i teooria väidab, et **igat mittesiinusoidaalset voolu on võimalik lahutada reaks lihtsaiks siinusoidaalseiks vooludeks**, mis evivad mitmesuguseid sagedusi, amplituudi suurusi ja faaside nihkumisi.

Nii näeme, et mittesiinusoidaalne vool koosneb vooludest, mille sagedused on erinevad. Näiteks joonisel 136, a toodud resulteerivat on võimalik lahutada vooludeks I_1 ja I_2 , mille



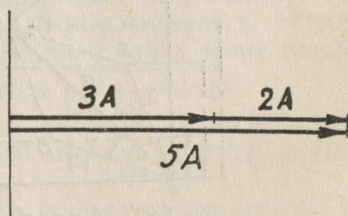
Joon. 136.

sagedused on siis vastavalt 1 ja 2 (50 ja 100, 100 ja 200 jne. per/sek.).

Voolude lahutamisel või liitmisel kõige väiksema sagedusega siinusoidaalse voolu f_0 sagedust nimetatakse **põhisageduseks** või **esimeseks harmooniliseks**. Sellest suuremaid sagedusi nimetatakse 2-ks, 3-ks, 4-ks jne. **harmooniliseks sageduseks**¹⁾, mis on ka vastavalt 2, 3, 4 jne. korda põhisagedusest suuremad. Harmoonilised sagedused evivad erilise tähtsuse kõrgesagedustehnikas.

Praktikas kasutatakse vektoriaalset liitmist sääli, kus liidetakse tavaliselt efektiivseid ja maksimaalseid suursusi. Näiteks läbigu juhett ühes suunas kaks voolu, mille tugevused on 2 ja 3 amprit.

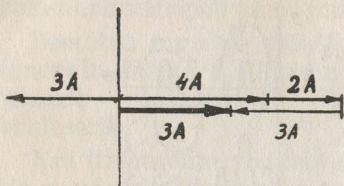
Kanname need vektordiagrammi (joon. 137) vastavas mõõt-kavas, näiteks ühele amprile vastab 1 mm, 1 sm jne. Liites nüüd 2 ja 3 ampri asemel 2 ja 3 sm, mis annab nende resulteeriva suuruse.



Joon. 137.

¹⁾ Ka obertoniks.

Kui voolud läbivad juhet vastassuunaliselt, siis kantakse ühesuunalised voolud ühele poole ja vastassuunalised voolud teisele poole vertikaaltelge. Läbigu juhet ühes suunas voolud, mille tugevused on 4 ja 2 amprit ja neile vastupidises suunas vool tugevusega 3 amprit. Resulteeriva suuruse annab nende vahe (joon. 138).

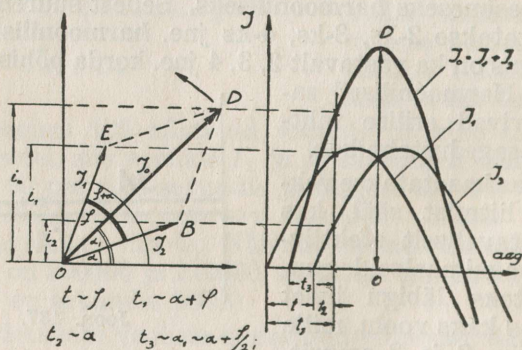


Joon. 138.

Vektoriaalsel liitmisel ilmneb sageli, et liidetavad voolud pole faasis. Seepärast ei saa neid lihtsalt liita nagu joonisel 137 ja 138 näidatud. Siin tuleb tähele panna, et voolude maksimaalsed suurused ei

mõju millalgi ühekorraga, niisama ei toimu ka nende voolude perioodiline arenemine üheaegselt ja seepärast liidetakse nad geomeetriliselt.

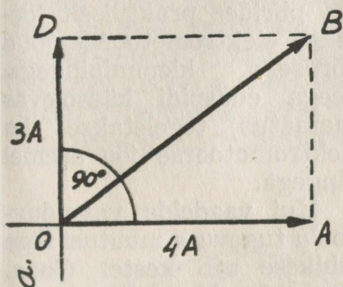
Läbigu juhet voolud \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 , mis faasis nihutatud nurga φ võrra. Nende voolude maksimaalväärtusi iseloomustavad vektorid OB ja OE (joon. 139, a). Nende voolude hetkväärtused võrduvad vaadeldaval hetkel \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 projektsioonidele (vt. joon. 127). Neid liidetakse aritmeetiliselt ja seega nende resulteeriv $i_0 = i_1 + i_2$. Üksteisest nurga φ võrra nihutatud



Joon. 139.

vektorite pööreldes nende projektsioonid i_1 ja i_2 on muutuvad. Nende abil joonistatakse \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 siinusoidid (joon. 139 b), mis nurga φ võrra teineteisest nihutatud. Et i_0 on joonlõigu OD projektsioon, siis resulteeriva siinusoidi annavad OD pöör-

lemisel selle projektsiooni i_0 muutused. Nii näeme, et voolude liitmisel nende resulteeriv saadakse parallelogrammiseaduse järele, ja resulteeriva maksimaalne suurus \bar{I}_0 võrdub parallelogrammi diagonaalile, mille külgedeks on nurga φ võrra nihutatud voolude maksimaalsuurused. Siis \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 vastavas mõõtkavas, saame ka \bar{I}_0 suuruse. Joonisel 139, b on näidatud¹⁾ vektorite I_1 ja I_2 pöörlemisel saadud siinusoidid ja nende resulteeriv I_0 . Joonisel 139, b iseloomustab $t\bar{I}_1$ ja \bar{I}_2 faasidevahelist nihkumist aja suhtes, — vektordiagrammis vastab sellele nurk φ , t_1 iseloomustab aja suhtes voolu \bar{I}_1 arenemise astet — vektordiagrammis $\alpha + \varphi$, t_2 iseloomustab \bar{I}_2 arenemisastet — vektordiagrammis α , t_3 iseloomustab resulteeriva I_0 arenemisastet — vektordiagrammis α_1 . Et vahelduvvoolu



Joon. 140.

tugevus on muutuv, siis \bar{I}_1 , \bar{I}_2 ja \bar{I}_0 arenemisastmed t_1 , t_2 ja t_3 on muutuvad. Kui voolude \bar{I}_1 ja \bar{I}_2 faasidevaheline nihknurk φ jääb püsivaks, siis toimub i_1 , i_2 ja i_0 perioodiline arenemine võrdeliselt.

Kui voolud on faasis nihutatud 90° , siis koostades parallelogrammi näeme, et resulteeriv (joon. 140) OB , olles püstküliku $OABD$ diagonaaliks, on

ühtlasi ka täisnurkse kolmnurga AOB hüpotenuusiks. Hüpotenuusi ruut võrdub katetide ruutude summale, seega resulteeriv $OB^2 = OA^2 + AD^2$, kust $OB = \sqrt{OA^2 + AD^2}$.

Neid suurusi, mille abil leitakse resulteeriv, nimetatakse komponendiks. Näiteks joonisel 140 on joonlõigud OA ja OD vastavad voolukomponendid.

Teades resulteeriva ja faaside nihkenurga, on võimalik leida komponendid.

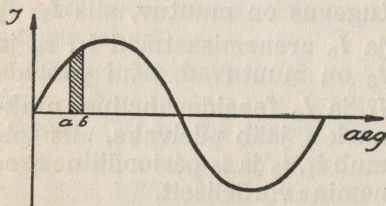
1) Vt. ka joon. 132 ja 133.

II. OOMILINE JA INDUKTIIVNE TAKISTUS VAHELDUVVOOLU AHELAS.

§ 1. Oomiline takistus vahelduvvoolu ahelas.

Vahelduvvooluahelas, nagu alalisvoolugi juures, sõltub voolutugevus pingest ja takistusest. Alalisvoolu ahelas piirab voolutugevust ainult oomiline takistus, kuid vahelduvvoolu ahelas esinevad veel päälle selle induktiivsed¹⁾ ja mahtuvuselised²⁾ takistused.

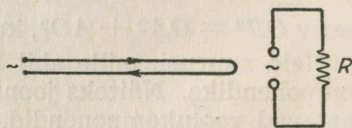
Samuti eristatakse vahelduvvoolu ahelas sise- ja välisahela takistusi. Elektrimasinate sisetakistused on võrdlemisi väikesed, seepärast lubatud koorma piirides praktiliselt loetakse elektromotoorne jõud võrdseks klemmpingega. Seega edaspidi käesolevas raamatus tegeletakse ka elektromotoorse jõu asemel pingega.



Joon. 141.

141), siis võib vahelduvvoolu selles osas võrrelda alalisvooluga. Mida väiksem on see ajavahemik (joonlõik ab), seda õigem on võrdlus. Seetõttu alluvad vahelduvvoolu hetkelised suurused täielikult alalisvoolu seadustele. Kuid praktikas ei arvestata mitte hetkväärtustega, vaid voolu efektiivsusega, seepärast tuleb alalisvoolu seaduse vastavalt vahelduvvoolu iseärasustele kohandada.

Kui vahelduvvool läbib bifilaarjuhet (joon. 142), siis selle juhtme ümber tekkivad magnetvood hävitavad üksteise mõju. Säärases vooluahelas induksiooni nähteid ei ilmne ja voolu suurust piirab ainult juhtme oomiline takistus. Vahelduvvoolu juures oomilise



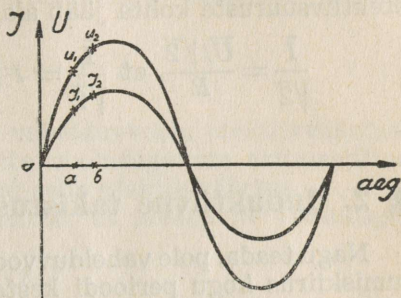
Joon. 142.

1) ja 2) vt. järgmised peatükid.

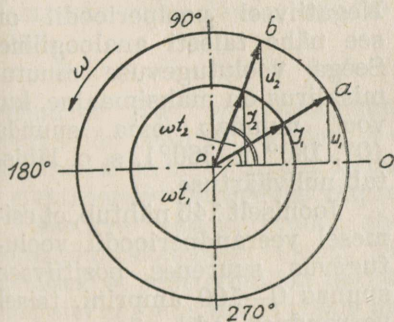
takistusena mõeldakse sellist takistust, mille määravad juhtme dimensioonid, s. o. pikkus ja läbilõikepind¹⁾.

Oomilise takistuse puhul ei ilmne vahelduvvoolu ahelas nähteid, mida määritleb Lenzi seadus, s. o. et muutuva tugevusega voolu magnetväli püüab takistada teda tekitavat põhjust. Seega allub oomilise takistusega vahelduvvoolu ahel oomiseadusele, nagu seda kasutatakse alalisvoolu ahelas.

Kui oomilise takistusega ahelas pinge muutub nullist \rightarrow maksimumini, uuesti nullini jne., siis muutub pingele vastavalt ka voolutugevus (joon. 143). Näiteks hetkel a voolutugevus $i_1 = u_1/R$ jne. Seega pinge ja voolu tekkimise algused ühtuvad ning nende suurused muutuvad üheaegselt ja ühtlaselt.



Joon. 143.



Joon. 144.

algusest on möödunud veerand perioodi (90°), siis evivad nad mõlemad maksimaalväärtused jne. Niiviisi on vahelduvvoolu ahelas pinge ja vool faasis, seega nende vaheline nihknurk võrdub nullile.

1) Ka temperatuur.

Joonisel 144 on näidatud pinge U ja voolutugevuse I vektorid, mis üheaegselt ühtlase nurkkiirusega liiguvad kella osutile vastassuunaliselt. Kui pinge projektsioon on null, siis on ka voolu oma null. Pingevektori pöördumisel nurga ωt_1 võrra, pöördub ka vooluvektor sama nurga võrra; on pingevektor pöördunud nurga ωt_2 võrra, siis on samal arenemisastmel ka vooluvektor. Kui pinge ja voolu tekkimise

Sääraselt ahela maksimaalne voolutugevus

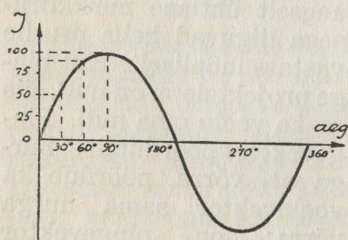
$$\bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$$

Kui maksimaalsed suurused jagada $\sqrt{2}$ -ga, siis saadud efektiivsuuruste kohta jääb alale sama võrdsus:

$$\frac{\bar{I}}{\sqrt{2}} = \frac{\bar{U}/\sqrt{2}}{R}, \text{ et } \frac{\bar{I}}{\sqrt{2}} = I \text{ ja } \frac{\bar{U}}{\sqrt{2}} = U, \text{ siis } I = \frac{U}{R}$$

§ 2. Induktiivne takistus vahelduvvoolu ahelas.

Nagu teada, pole vahelduvvoolu ahelas voolutugevuse muutumiskiirus kogu perioodi kestel ühtlane. Näiteks jooniselt 145 näeme, et perioodi esimese 30° kestel vool kasvab 50 amprit, teise 30° kestel 37,5 amprit ja kolmanda 30° kestel vaid kõigest 12,5 amprit. Nii on voolutugevuse muutumiskiirus perioodi algusel väga suur ja maksimaalsuuruse saavutamisel kõige väiksem. Sellest hetkest voolutugevuse muutumiskiirus uuesti suureneb ja on maksimaalne, kui voolutugevuse muutumiskõver läbib horisontaaljoone (180°).



Joon. 145.

Negatiivsel poolperioodil on see nähe täiesti analoogiline. Seega voolutugevuse muutumiskiirus on maksimaalne, kui vool muudab oma suunda (0° , 180° ja 360°), s. o. läbib nullväärtuse.

Jooniselt 145 nähtub, et esimesel veerandperioodil voolutugevus suurenes positiivses suunas 0—100 amprini, teisel veerandperioodil nõrgenes samas suunas 100—0 amprini, kolmandal veerandperioodil kasvab negatiivses suunas 0—100 amprini ja viimasel veerandperioodil kahaneb samas suunas nullini. Nii muudab voolutugevus ühe perioodi kestes oma suurust nullist kuni maksimaalse tugevuseni neli korda. Seega on voolutugevuse muutumiskiirus ühe perioodi kestes $4\bar{I}$.

Voolutugevuse muutumiskiirus arvutatakse ajaga, mille kestes voolutugevus kasvab nullist kuni maksimaalse suuru-

seni. Kui voolu sagedus on f perioodi sekundis, siis ühe perioodi tekitamiseks kulub aega $T = \frac{1}{f}$ ja veerandperioodi tekitamiseks kulub aega neli korda vähem, seega $t = 1/4 \cdot f$. Sellekohaselt voolutugevuse aritmeetiline keskmine muutumiskiirus sekundis

$$I_K = \bar{I} : \frac{1}{4f} = 4 \cdot f \cdot \bar{I}$$

Et praktiliselt tegeletakse vahelduvvoolu efektiivväärtustega, siis ei huvita meid mitte voolutugevuse aritmeetiline keskmine muutumiskiirus, vaid selle efektiivväärtus.

Matemaatiline arvestus näitab, et efektiivne voolutugevuse muutumiskiirus võrdub

$$2\pi \cdot f \cdot I$$

kus I on efektiivne voolutugevus ja f on voolusagedus.

Vahelduvvoolu juures evib suure tähtsuse voolu muutumise tõttu indutseeritud vastuelektromotoorne jõud. Selle suurus voolu efektiivse väärtuse puhul arvutatakse ka efektiivväärtusega.

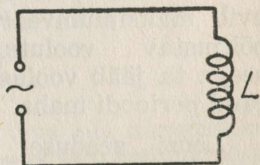
Teades vahelduvvoolu efektiivse tugevuse ja vahelduvvoolu ahela induktiivsuse, arvutatakse selles indutseeritud vastuelektromotoorne jõud järgmise valemiga:

$$E_W = \omega L \cdot I = 2\pi \cdot f \cdot L \cdot I,$$

kusjuures E_W on vastuelektromotoorse jõu suurus voltides, f voolusagedus, L on induktiivsus henrides ja I efektiivne voolutugevus ampreis.

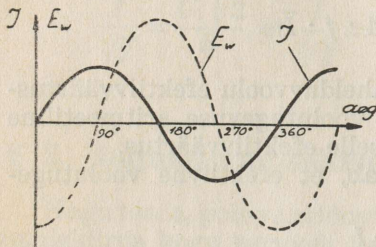
Asetame vahelduvvoolu ahelasse endainduktsioonpooli (joon. 146) L oletades, et selle oomiline takistus on null, siis ei ilmne selles poolis mingeid oomilisi kadusid (I^2R).

Vahelduvvoolu tugevuse muutuva iseloomu tõttu tekitatakse poolis muutuva suurusega magnetvoog, mis lõigates pooli keerde indutseerib neis vastuelektromotoorse jõu. See mõjub alati vastupidiselt vooluallika elektromotoorsele jõule. Et voolu kasvamisel nullist positiivses suunas on alguses voolu muutumiskiirus väga suur, siis selle tõttu ka poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud on suur (joon. 147). Mida lähemale jõuab voolutugevus oma maksimaalsuurusele, seda väiksemaks jääb indutseeritud vastuelektromotoorne



Joon. 146.

jõud. Kui volutugevus on maksimaalne, siis ta muutumiskiirus on null ja tol hetkel ümbritseb pooli paigalseisev magnetväli ning poolis vastuelektromotoorse jõudu ei indutseerita ($t = 90^\circ$). Edasi volutugevus väheneb samas suunas ja voolu muutumiskiirus suureneb seda enam, mida rohkem volutugevus oma nullväärtusele ligineb. Seetõttu indutseeritakse ka poolis üha suurenev vastuelektromotoorne jõud. Kui vool oma nullväärtuse läbib, siis on ta muutumiskiirus suurim, mille tõttu on suurim ka poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud ($t = 180^\circ$). Nüüd muudab vool oma suunda ja kasvab negatiiv-

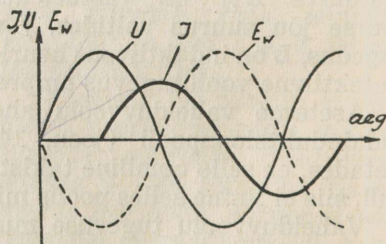


Joon. 147.

ses suunas. Seetõttu kahaneb ka vastuelektromotoorse jõu suurus ja muutub nulliks, kui volutugevus on saavutanud negatiivse maksimumi. Tollest hetkest voolu kahanedes vastuelektromotoorne jõud kasvab negatiivses suunas ja on maksimaalne, kui volutugevus evib nullväärtuse ($t = 360^\circ$). Järgmisel perioodil muutub vool täpsalt samuti, jne.

Nii näeme, et indutseeritud vastuelektromotoorne jõud evib maksimumväärtused veerandperioodi hiljem kui teda põhjustav volutugevus, seega ta jääb voolust veerandperioodi maha.

Lenzi seaduse järele vastuelektromotoorne jõud püüab takistada teda tekitavat põhjust, seega ta mõjub vastassuunaliselt vooluallika elektromotoorsele jõule (joon. 148).



Joon. 148.

Kui oletada, et poolis mingeid oomilisi kasusid pole, siis kulutatakse kõik vooluallika energia magnetväljade ehitamiseks. Samuti oleks siis poolis voolu muutumiskiirus täpsalt nii suur, et indutseeritud vastuelektromotoorne jõud võrduks vooluallika pingele. Nii näeme joonisel 148, et volutugevuse perioodiline arenemine jääb veerandperioodi vooluallika pingest maha. Sellest reegel:

induktiivsuse olles vahelduvvoolu ahelas, jääb vool pingest 90° maha.

Eelnenud nähe seletub veel järgmiselt: Vooluallika pinge kasvamisel maksimaalse suuruseni, kulutatakse vool poolis magnetvälja ehitamiseks. Kui vooluallika pinge hakkab kahane-
nema, siis kahanev pinge ei põhjusta enam küllaldaselt voolu tekitatud magnetvälja alalhoidmiseks ja magnetväli tõmbub pinge kahanedes üha koomale, lõigates nüüd pooli keerde ning põhjustades endises suunas voolu kasvamist. Niiviisi tekitatud voolu tugevus on maksimaalne, kui vooluallika pinge on null.

Nii muundatakse vooluallika elektromotoorse jõu poolt igal kasvaval veerandperioodil põhjustatud vool magnetiliseks energiaks, kust see igal elektromotoorse jõu kahaneval veerandperioodil muundatakse uuesti elektriliseks energiaks (elektrivooluks).

Seda voolu, mis kulutatakse magnetväljade ehitamiseks, nimetatakse **vattvaba vooluks** (sageli ka pimevooluks), s. t. magnetiliseks energiaks muundatud voolu juures puuduvad vattkaod $I^2 \cdot R$, mis ilmnevad igas oomilise takistusega ahelas.

Et poolis indutseeritud vastuelektromotoorne jõud võrdub igal hetkel vooluallika pingele, siis eelpool toodud vastuelektromotoorse jõu valem on kehtiv ka vooluallika pinge kohta:

$$U = E_w = \omega L \cdot I.$$

Andes valemile $U = \omega L \cdot I$ teise kuju, saame

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

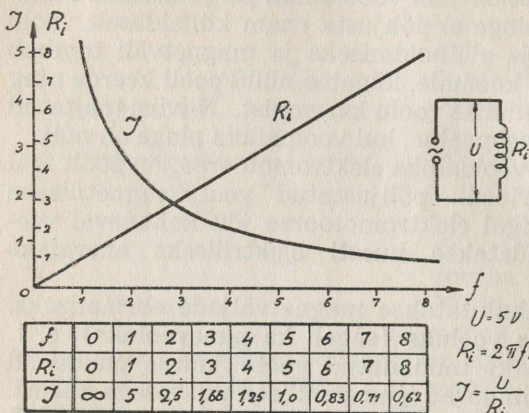
Saadud valem meenutab oomiseadust, kus ωL nimetatakse pooli **induktiivseks takistuseks** (R_i). Seega induktiivne takistus R_i määrab voolutugevuse, mis pooli läbides põhjustab antud vooluallika pingele võrdse vastuelektromotoorse jõu.

Induktiivne takistus $R = \omega L = 2\pi \cdot f \cdot L$ avaldatakse oomides. Nagu valemist näeme, ei sõltu induktiivne takistus mitte juhtme oomilisest takistusest, vaid juhtme endainduktsioonitegurist ja vahelduvvoolu iseloomust (sagedusest). Seega omadusilt induktiivne takistus erineb oomilisest takistusest. Ta piirab küll vastavalt oomilisele takistusele voolutugevust ahelas, kuid temas ei teki mingeid energiakadusid Joule'i soojuste näol. Induktiivset takistust nimetatakse sageli induktantsiks.

Vaatleme lähemalt, kuidas muutub pooli induktiivne takistus ja pooli läbiva voolu tugevus, kui poolile mõjuv pinge ja

pooli endainduktsioonitegur on püsiv, kuid muutuv on sagedus. Olgu vooluallika pinge 5 volti, vooluahelas asetseva pooli induktiivsus 1 H ja voolusagedust muudame 1—8 perioodini.

Vastavalt sageduse muutmisele arvutame ahela induktiivse



Joon. 149.

takistuse ja voolutugevuse, mille kanname tabelisse joon. 149. Lihtsuse mõttes on $2\pi L$ kui jääv suurus arvutusest välja jäetud.

Tabelisse kanname saadud tagajärjed vastavalt sageduse muutumisele; näiteks sageduse olles 2 per/sek. $R_i = 2$ ja $I = 2,5$ amp. jne.

Saadud andmete abil joonistatakse ahela induktiivse takistuse ja voolutugevuse muutmise kõverad, sõltuvalt sagedusest. Jooniselt näeme, et võrdeliselt voolusageduse suurenemisega kasvab induktiivne takistus, kuna voolutugevus väheneb. Sageduse vähenemisel toimub see nähe vastupidiselt.

Induktiivseid takistusi liidetakse samuti nagu oomilisi takistusi, aga ainult siis, kui nad vooluahelas üksteisele induktiivselt ei mõju, s. o. kui nende vastastikune induktsiooni-koefitsient on null.

Säärasel juhul võrdub järjestikku lülitatud induktiivsete takistuste resulteeriv üksikute takistuste summale, seega

$$R_i = R_i' + R_i'' \cdot \cdot \cdot + R_i^n$$

Rööbitilülituses liituvad induktiivsete takistuste juhtivused ja üldjuhtivus

$$\frac{1}{R_i} = \frac{1}{R_i'} + \frac{1}{R_i''} \cdot \cdot \cdot + \frac{1}{R_i^n}$$

kust leitakse ka üldtakistus R_i .

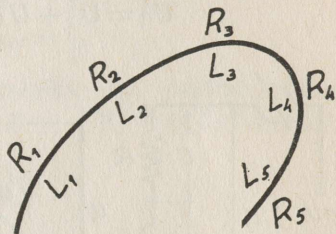
Kui induktiivsed takistused üksteist vastastikku mõjus-

tavad, siis nende üldtakistuste leidmine on võrdlemisi komplitseeritud toiming.

Säärasel kujul on eelpoolseletatu kehtiv vaid siis, kui pool evib ainult induktiivse takistuse. Tegelikult pole võimalik ühegi juhtme oomilist takistust nullini vähendada, nagu mehaanilist hõõrumistki pole võimalik hoopis kõrvaldada.

Iga juhtmeosake evib oomilise takistuse R ja induktiiv-

suse L . Et juhe koosneb neist üksikuist osakesist (joon. 150), siis nende osakeste oomiliste ja induktiivsete takistuste summa moodustabki ahela üldtakistuse. Sellepärast puhtinduktiivseid takistusi praktikas ei leidu, vaid need esinevad koos oomilise takistusega. Oomiliste ja induktiivsete takistuste suhe võib olla mitmesugune. Näiteks võib pool evida küllalt suure induktiivse takistuse, kuid väikese oomilise takistuse, või vastupidi jne.



Joon. 150.

§ 3. Oomiline ja induktiivne takistus vahelduvvoolu ahelas.

Igas poolis¹⁾ esineb oomiline takistus R koos induktiivse takistusega R_i . Praktiliselt vaadeldakse neid mõlemaid, nagu oleksid nad vooluahelasse järjestikku ühendatud.

Esinegu vahelduvvoolu ahelas takistused R ja R_i (joon. 151, a) järjestikku ühendatult. Nende resulteeriv takistus määrab voolutugevuse, mis on igas ahela punktis üks ja sama. Selliselt neil takistusil tekkivad pingelangused moodustavad ahelas punktide m ja n vahel mõjuva resulteeriva pinge U_0 . U ja U_i algebraalne liitmine ei anna õiget resultaati, sest vooluallika pinge mõju oomilisel takistusel on vooluga faasis, kuna induktiivsel takistusel on ta voolust 90° võrra faasis nihutatud. Nii ei lange pingelanguste mõjud aja suhtes ühte.

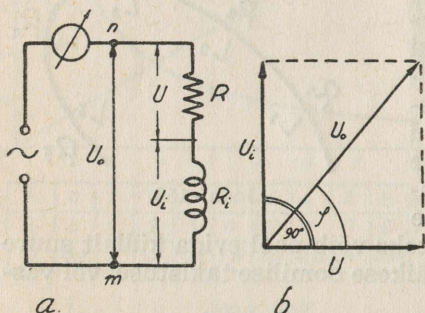
Vektordiagrammis kantakse horisontaalteljele vastavas mõõtkavas (joon. 151, b) pingelangus oomilisel takistusel ja

¹⁾ Ka sirgjuhtmes.

vertikaalteljele pingelangus induktiivsel takistusel. Nii on nende mõjud vektordiagrammis ka 90° võrra nihutatud. Pingete resulteeriva leiame parallelogrammiseaduse järele. Et U ja U_i on kujundatud ühes ja samas mõõtkavas, siis saame ka resulteeriva pinge U_0 samas mõõtkavas.

Samast võib resulteeriva U_0 leida ka analüütiliselt. Et U_0 moodustab täisnurkse kolmnurga hüpotenuusi, siis

$$U_0^2 = U^2 + U_i^2, \text{ kust } U_0 = \sqrt{U^2 + U_i^2}$$



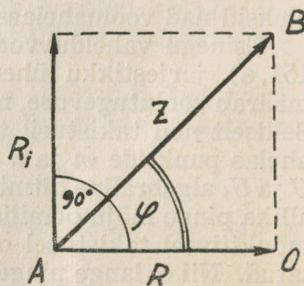
Joon. 151.

Pingelangus induktiivsel takistusel U_i on alati pingelangusest oomilisel takistusel U 90° võrra nihutatud, kuid nende resulteeriva U_0 ja U vaheline nihkenurk φ võib evida suurus 0 ja 90° vahel. On induktiivne takistus võrreldes oomilise takistusega väga suur, siis on φ väga suur (peaaegu 90°), vastasel korral on

φ väga väike (peaaegu null); on nad mõlemad võrdsed, siis $\varphi = 45^\circ$ jne. Säärase viisi järgi liidetakse nii maksimaalkui efektiivväärtusi.

Teades ahelat läbiva voolu tugevuse ja pingelangused üksikute takistustel, leiame üksikute takistuste suurused. Sääraselt oomiline takistus $R = U/I$ ja induktiivne takistus $R_i = U_i/I$. Üldine ahela takistus¹⁾ n. n. näivtakistus $Z = U_0/I$.

Nii näeme, et ahela näivtakistuse Z moodustavad oomiline takistus (tegevtakistus) R ja induktiivne takistus R_i . Nende takistuste mõju liitub samuti geometriliselt nagu pingedki, sest takistuste mõju vastavalt nende iseloomule on ka faasis 90° nihi-



Joon. 152.

1) nimetatakse sageli impetantsiks.

tatud (joon. 152). Takistuste diagrammis kantakse induktiivne takistus vertikaal- ja oomiline takistus R horisontaal- teljele.

Täisnurksest kolmnurgast AOB leiame, et näivtakistus $Z = \sqrt{R^2 + R_i^2}$. Et aga $R_i = \omega L$, siis $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

Teades U_0 ja U või Z ja R suurused, võime alati leida nurga φ , tema tangensi või koosinuse abil, sest

$$\tan \varphi = \frac{R_i}{R} = \frac{U_i}{U} \text{ ja } \cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{U}{U_0}$$

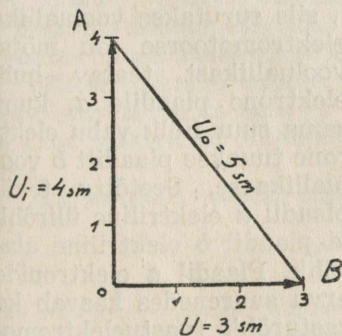
Takistusekolmnurga abil määratakse ka juhtme enda- indukttsioonikoefitsient L . Valemist $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ leiame, et indukttsioonikoefitsient

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega}$$

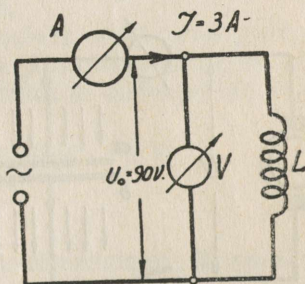
kusjuures L on henrides, Z ja R oomides ja $\omega = 2\pi f$.

Näide: 1) Oomilisel takistusel pingelangus $U = 30$ V ja induktiivsel takistusel $U_i = 40$ V. Leida resulteeriv pingeline U_0 .

$$U_0 = \sqrt{U^2 + U_i^2} = \sqrt{30^2 + 40^2} = 50 \text{ volti.}$$



Joon. 153.



Joon. 154.

Ehitame vektordiagrammis U ja U_i abil täisnurkse kolmnurga. Selle horisontaal- teljele (joon. 153) kanname U ja vertikaal- teljele U_i kasutades üht ja sama mõõtkava. Näiteks ühele sentimeetrile vastaku 10 volti. Ühendades kolmnurga tipud A ja B , saamegi otsitava U_0 suuruse, mis võrgub 5-le sentimeetrile ja vastab $10 \cdot 5 = 50$ voldile.

2) Antud pooli oomiline takistus $R = 100 \Omega$ ja induktiivsus on 0,8 H. Leida pooli näivtakistus vahelduvvoolule, mille sagedus on 50 per/sek. ja $\cos \varphi$.

Ringsagedus $\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314$ rad/sek. ja $R_i = \omega L = 314 \cdot 0,8 = 251 \Omega$

$$\text{Näivtakistus } Z = \sqrt{R^2 + R_i^2} = \sqrt{100^2 + 251^2} = 270 \Omega.$$

Voolutugevuse ja pingevaheline nihkenurk

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{100}{270} = 0,37 \text{ ja nurk } \varphi = 68^\circ 15'.$$

3) Vooluahelas asetseva pooli oomiline takistus on 20Ω . Ampermeeter A (joon. 154) näitab 3 amprit ja voltmeeter näitab pinget $U_0 = 90 \text{ V}$. Leida pooli induktiivsus L , kui voolu sagedus on 50 per/sek.

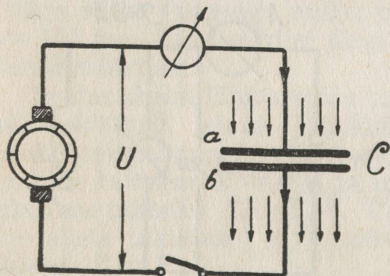
$$\text{Näivtakistus } Z = \frac{U_0}{I} = \frac{90}{3} = 30 \Omega$$

$$\text{Induktiivsus } L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{30^2 - 20^2}}{6,28 \cdot 50} = 0,071 \text{ H.}$$

III. MAHTUVUS. MAHTUVUSELINE JA OOMILINE TAKISTUS VAHELDUVVOOLU AHELAS.

§ 1. Mahtuvus ja selle mõõtühikud.

Ühendame mingi alalisvoolu allika, näiteks alalisvoolu generaatori, klemmid kahe teineteisest kitsa õhuvahega eraldatud metallplaadiga (joon. 155), siis surutakse vooluallika



Joon. 155.

elektromotoorse jõu mõjul vooluallikast teatav hulk elektrone plaadile a , kuna sama suur hulk vabu elektrone tuuakse plaadilt b vooluallikasse. Seetõttu tekib plaadil a elektriline ülirohk ja plaadil b elektriline alarohk. Plaadil a elektronide arvu suurenedes kasvab ka vasturohk (vastuelektromotoorne jõud), mis mõjub vooluallika elektromotoor-

sele jõule vastupidiselt. Ühes sellega suureneb ka plaatide a ja b potentsiaalide vahe ehk nende vaheline pinevus.

Kui plaatide a ja b vaheline potentsiaal on juba niivõrd suureks kasvanud, et võrdub vooluallika elektromotoorsele jõule, siis lakkab elektronide vool plaadile a . Seda nähet võib jälgida vooluahelasse lülitatud ampermeetriga A . Voolu sisselülitamise hetkel näitab see suurt voolutugevust, mis lühikese aja kestel väheneb nullini.

Niiviisi registreerib ampermeeter A plaadile a surutavat elektronide arvu Q^1). Q on seda suurem, mida suurem on vooluallika elektromotoorne jõud, sest siis on vaja plaatile a arvuliselt rohkem elektrone viia sääl vooluallika elektromotoorsele jõule võrduva vastuelektromotoorse jõu tekitamiseks. Q arvuline suurus sõltub ka plaatide a ja b suurusest. Suurema pinnaga plaatide puhul on vajalik elektronide arv suurem kui väiksema pinnaga plaatide puhul. Näiteks kui plaadile a , mille pindala S olgu 1 sm^2 , on vaja ühevoldilise vastuelektromotoorse jõu tekitamiseks 10 elektroni, siis plaadile pindalaga 10 sm^2 on vaja sama vasturõhu tekitamiseks ka 10 korda rohkem elektrone, s. o. $10 \cdot 10 = 100$ elektroni.

Pääle eelpool toodute on veel teisi asjaolusid, mis määravad antud vastuelektromotoorse jõu tekitamiseks vajaliku elektronide arvu. Selleks on plaatide kaugus teineteisest ja plaatidevaheline aine, nn. **dielektrik**.

E ja Q on omavahel seoses järgmises valemis,

$$E = Q \cdot \frac{d}{S \cdot \epsilon}$$

kusjuures E tähistab plaatidel tekitatud vastuelektromotoorset jõudu²), Q selle tekitamiseks vajalist elektronide arvu, d plaatidevahelist kaugust, S plaatide pindala ja ϵ plaatidevahelise olluse **dielektrilist konstanti**.

Sellest valemist näeme, et vastuelektromotoorne jõud on seda suurem, mida suurem on Q ja plaatidevaheline kaugus ja mida väiksemad on plaatide pindalad ja dielektriline konstant.

Kui saadud valemit ümber kujundada, nii et

$$Q = E \frac{S \cdot \epsilon}{d}$$

siis selles $\frac{S \cdot \epsilon}{d}$ iseloomustab plaatide dimensioone ja omadusi.

Seda avaldust nimetatakse **mahtuvuseks**, sest ta näitab, kui palju antud elektromotoorse jõu juures plaadile a koguneb elektrone, s. o. kui palju plaat a neid mahutab. Avaldus $S \cdot \epsilon/d$ tühistatakse C -ga, seega

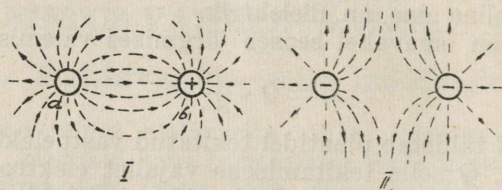
$$Q = E \cdot C, \text{ kust } E = \frac{Q}{C} \text{ ja } C = \frac{Q}{E}$$

¹) Iseloomustab ju 1 sek. kestel läbi juhtme põiklõike voolanud elektronide arv voolutugevust (vt. elektrivool).

²) Käesoleval juhul ka vooluallika elektromotoorset jõudu, sest $E = E_W$.

Tavaliselt nimetatakse plaadile a mahtuvat elektronide hulka **laenguks**. Nii näeme, et püsiva pinge juures mahtuvuse suurenedes suureneb ka laeng.

Elektrilaenguga kehad mõjuvad üksteisele tõmbe- ja tõuketungi tekitavalt. Kui näiteks kahe kõrvuti asetseva keha vahel on olemas potentsiaalide vahe, siis püüab elektrilise tasakaalu saavutamiseks keha a (joon. 156, I) oma ülearuseid elektrone ära anda, kuna keha b püüab puuduvaid elektrone juurde saada. Kui kehade vahel on mingi dielektrik, siis elektronide üleminek ühelt kehalt teisele on takistatud ja kehade vahele jääb alale potentsiaalivahe. Nii mõjuvad need kehad üksteisele tõmbetungi tekitavalt. Kui kehad evivad mõlemad elektrilise ülarõhu või alarõhu, siin nad mõjuvad üksteisele tõuketungi tekitavalt (joonis 156, II).



Joon. 156.

Kujutletavaid jooni, mis suunas elektrilised tõmbe- ja tõuketungid mõjuvad, nimetatakse **elektritungjoonteks**. Nagu magnettingjooned, nii ka elektrilised tungjooned olles isenimelised tõmbuvad ja olles samanimelised tõukuvad.

Ruumi, milles laetud keha veel mõju avaldab, nimetatakse **elektriväljaks**.

Dielektrikuks nimetatakse ollust või keskkonda, milles ei leidu vabu elektrone. Vabade elektronide puudumise tõttu nad ei juhi elektrivoolu. Dielektriku omadusi evivad tühi ruum, õhk ja kõik isoleerained.

Neis on elektronid oma asukohtadega elastselt seotud. Seepärast on võimalik dielektriku abil kahe plaadi vahel tekitada potentsiaalivahet ja elektrilist välja. Elektrivälja mõjul paigutatakse ümber, s. o. neid nihutatakse nende normaalseist asukohast välja. Vastand dielektrikule on elektrijuhe, milles elektronid oma asukohtadega pole seotud. Seetõttu ei saa juhtmes tekitada elektrivälja, sest potentsiaalivahe tõttu hakkavad elektronid kohe liikuma, tekitades elektrivoolu ja elektriväli neutraliseerub.

Dielektriku olluses elektronide nihke suurus sõltub dielektrikule rakendatud väljatugevusest ja dielektriku ollusest. Nihke suurust iga dielektriku kohta näitab **dielektriline konstant** (ϵ), mis osutab, mitu korda on dielektriline nihkumine teatavas dielektrikus suurem kui õhutühjas ruumis, praktiliselt ka õhus.

Allpool on toodud mõnede tarvitatavamate ainete dielektrilised konstandid¹⁾:

Õhk	— 1	Kvarts	— 4,3
Parafiin	— 2	Portselan	— 6
Eboniit	— 2—3	Kaliit	— 6,5
Trolituul	— 2,1—2,5	Vilgukivi	— 6—8
Klaas	— 2—10	Piiritus	— 26

Vesi — 81

Kui joonisel 155 näidatud seade C vooluahelast välja lülida, siis jääb sellele laeng alale. Kui nüüd plaat a ühendada juhtme abil plaadiga b , siis ühendamise hetkel ilmneb säde. Seadiseid, mis võivad endasse mahutada elektrit ja seda alal hoida, nimetatakse **kondensaatoreiks**. Kondensaatori elektrimahtuvuslikke omadusi nimetatakse mahtuvuseks ja tähistatakse C -ga.

Mahtuvuse põhimõõtühikuks on faraad (F). Praktikas kasutatakse sellest miljon korda väiksemat mõõtühikut — **mikrofaraadi** (μF) ja mikrofaraadist miljon korda väiksemat mõõtühikut **mikromikrofaraadi** ($\mu\mu F$). Sageli kasutatakse ka veel **sentimeetrit** (cm), mis on mikromikrofaraadist veidi suu-
rem.

Mahtuvuse mõõtühikud on omavahel järgmises seoses:

1 $F = 10^6 \mu F$	1 $\mu F = 10^{-6} F$
1 $F = 10^{12} \mu\mu F$	1 $\mu\mu F = 10^{-12} F$
1 $F = 9 \cdot 10^{11} cm$	1 $cm = 9 \cdot 10^{-12} F$
1 $\mu\mu F = 10^{-12} F$	1 $cm = 0,9 cm$

Tavaliselt ei koosne kondensaatorid kahest plaadist, vaid need ehitatakse ruumi säästmise mõttes mitmeplaadilistena. Säärasel juhul koosneb kumbki plaat reast üksikutest plaatidest (joon. 157), mis on omavahel isoleeritud (joon. 157).

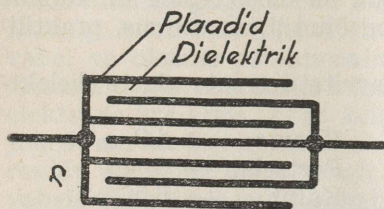
Kondensaatori mahtuvus määratakse kindlaks järgmise valemiga:

$$C = \frac{S \cdot (n-1) \cdot \epsilon^2}{0,9 \cdot 4\pi \cdot d} = \frac{0,088 \cdot S \cdot (n-1) \cdot \epsilon}{d}$$

1) nimetatakse ka dielektriliseks jäävaks.

2) Jättes 0,9 ära, saame mahtuvuse sentimeetreis.

kusjuures C on kondensaatori mahtuvus $\mu\mu\text{F}$ -des, S ühe plaadi pind ruutsentimeetreis, n plaatide arv, ϵ dielektriline konstant ja d plaatide kaugus üksteisest sentimeetreis.



Joon. 157.

Praktikas kasutatakse mitmesuguse välise kujuga kondensaatoreid. Nende ehitamisel püütakse saavutada võrdlemisi suurt mahtuvust väikese kogu juures. Väikese kogu saamiseks kasutatakse õhukest dielektrikut suure dielektrilise konstandiga.

Dielektriku paksus on piiratud kondensaatori tööpingega, sest iga dielektriku paksus kannatab välja teatava pinge. Sellest suuremate pingete juures lööb plaatide vahelt säde läbi.

Järgnevas on toodud mõnede olluste lubatavad tööpinged kilovoltides ühe sentimeetri paksuse dielektriku kohta:

Õhk	— 7,8—9	Parafiin	— 400
Klaas	— 100—300	Troliit	— 450
Portselan	— 340—380	Trolituul	— 500
Kaliit	— 400—450	Vilgukivi	— 1500

Seega dielektriku paksus ja vastupidavus peab vastama tööpingele, milleks kondensaator määratud. Läbilöögi pinged on tooduist 3—4 korda suuremad. Igal kondensaatoril on valmistaja poolt tööpinged antud, millest kõrgemaga ei tohi kondensaatorit ühendada.

Valemist $Q = EC$ nähtub, et kondensaatori laengu suurus sõltub plaatidele rakendatud pingest ja kondensaatori mahtuvusest. Nii mahutab suurema mahtuvusega kondensaator ühe ja sama pinge juures rohkem elektrone kui väiksem kondensaator. Säärast tegevust, kus kondensaatorile surutakse vooluallika mõjul elektrone, nimetatakse kondensaatori laadimiseks.

Kui kondensaatori plaadid ühendada, siis toimub elektronide üleminek ülirõhuga plaadilt alarõhuga plaadile. Seega plaadid tasakaalustuvad elektriliselt, mida nimetatakse kondensaatori lahenduseks. Kondensaatori lahendamisel tekkiiv säde on seda tugevam¹⁾, mida suurema pingega kondensaator on laetud ja mida suurem on kondensaatori mahtuvus.

1) Laetud kondensaatori puudutamine on hädaohtlik.

Dielektrikute puhul, nagu õhk, õlid jne. neutraliseerub kondensaatori laeng hetkeliselt, kõva dielektrikuga kondensaatorite juures ilmnevad veel järellaengute nähted, s. o. pärast esimest lahendust dielektriku ainst vabanevad veel osa selle pingestamiseks (nihutamiseks) kulutatud elektronidest, mis kogunevad kondensaatori plaatidele. Nii võib kondensaatorit lahendada mitu korda. Suure pingega laetud kondensaatorite juures võib ette tulla, et teine ja kolmas lahendus on veel võrdlemisi tugev¹⁾. Laaditud kondensaator tühjeneb aja- jooksul iseenesest, dielektriku juhtivuse²⁾ tõttu. Suurema mahtuvuse saamiseks ühendatakse kondensaatoreid rööbiti (joon. 158). Rööbiti ühenduse puhul üldine plaatide pind suureneb, sellele võrdeliselt

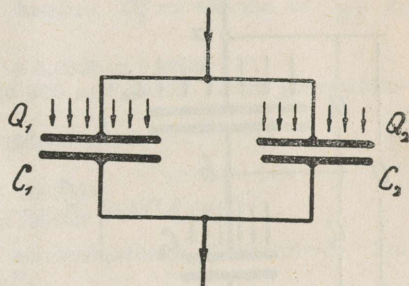
suureneb ka kondensaatorite üldmahtuvus, sest kõik kondensaatorid evivad ühe ja sama tööpinge. Rööbiti ühendatud kondensaatorite üldmahtuvus C võrdub üksikute kondensaatorite mahtuvuste summale, seega $C = C_1 + C_2 \dots + C_n$. Kui kõik rööbiti ühendatud kondensaatorid on võrdmahulised, siis võrdub üldmahtuvus üksiku kondensaatori mahtuvusele korrutatud kondensaatorite arvuga n

$$C = C_1 \cdot n$$

Kondensaatorite järjestikkuühenduses ei tööta kõik kondensaatorid ühe ja sama pingega, pinge jaotub vastavalt üksikute kondensaatorite mahtuvustele (joon. 159).

Seega kondensaatoritele mõjuv üldpinge $U = U_1 + U_2$. Kui kondensaatorile C_1 viiakse Q elektroni, siis C_2 -lt toodakse neid sama palju ära. Äravõetud elektronide arvu Q võrra seob nüüd kondensaator C_2 kondensaatori C_1 b-poolsel plaadil olevaid elektrone. Nii evivad mõlemad kondensaatorid võrdse laengu Q . Ja seetõttu

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \text{ ja } U_2 = \frac{Q}{C_2}$$



Joon. 158.

1) Ka järellaenguga kondensaatori puudutamine on hädaohtlik.

2) Elektrivoolu absoluutseid takistusi pole teada.

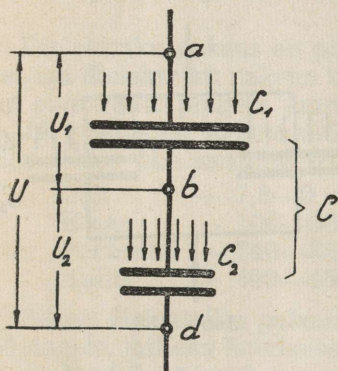
Et üldpinge U võrdub osapingete U_1 ja U_2 summale, siis $U = \frac{Q}{C}$ ¹⁾. Asendades pinged Q ja C kaudu, saame:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}, \text{ kust } \frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

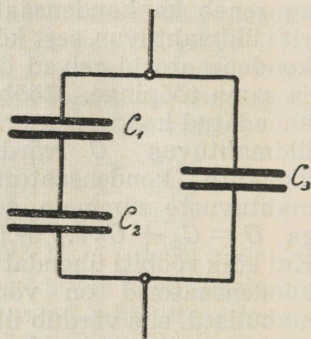
Saadud avaldusest leiame, et üldmahtuvus

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot C_2$$

Saadud valemist selgub, et kahe järjestikku ühendatud kondensaatori üldmahtuvus on väiksem kui kõige väiksem



Joon. 159.



Joon. 160.

mahtuvus selles ühenduses. See on kehtiv ka n kondensaatori puhul. Kui on mitu kondensaatorit järjestikku ühendatud, siis

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

Kui n järjestikku ühendatud kondensaatorit on võrdmahtuvuselised, siis on üldmahtuvus n korda väiksem üksiku kondensaatori mahtuvusest

$$C = \frac{C_1}{n}$$

Päale rööbiti- ja järjestikkuühenduste kasutatakse kondensaatoreid ka segaühenduses (joon. 160. Sel puhul toimub üldmahtuvuse leidmine toodud reeglite kohaselt.

¹⁾ U on üldpinge ja C on üldmahtuvus.

Näide: 1) Õhkdielektrikuga kondensaator koosneb 9-st plaadist. Ühe plaadi pindala S on 20 cm^2 ja plaatide vahe $d = 1 \text{ mm}$. Kui suur on C ?

$$C = \frac{0,088 \cdot S \cdot (n-1) \cdot \varepsilon}{d} = \frac{0,088 \cdot 20 \cdot (9-1) \cdot 1}{0,1} = 140,8 \mu\text{F}$$

Kui säärane kondensaator eviks õhu asemel vilgukivist dielektriku, siis selle mahtuvus suureneks vilgukivi dielektrilise konstandi korda ja $C = 140,8 \cdot 8 = 1126 \mu\text{F}$. Destilleeritud vette asetatuna eviks see kondensaator mahtuvuse $C = 140,8 \cdot 81 = 11400 \mu\text{F}$.

Õhkdielektriku puhul on selle kondensaatori lubatud tööpinge 9 kV/sm . Antud juhul dielektriku paksus $d = 1 \text{ mm}$, siis lubatud tööpinge $U = 9 \cdot 0,1 = 0,9 \text{ kV} = 900 \text{ V}$. Vilgukivist dielektriku puhul lubatud tööpinge $U = 1500 \cdot 0,1 = 150 \text{ kV} = 150000 \text{ V}$.

2) Rööbitiühenduses on kaks kondensaatorit mahtuvustega $C_1 = 0,2 \mu\text{F}$ ja $C_2 = 450 \text{ cm}$. Leida C ?

$$\text{Avaldame } C_2 \text{ mikrofaraadide kaudu: } C_2 = 450 \text{ cm} = \frac{450}{0,9} = 500 \mu\text{F} = 0,0005 \mu\text{F}.$$

$$\text{Üldmahtuvus } C = C_1 + C_2 = 0,2 + 0,0005 = 0,2005 \mu\text{F}.$$

3) Kondensaatorid mahtuvusega $500 \mu\text{F}$ ja $0,1 \mu\text{F}$ on järjestikkuühenduses. Kui suur on C ?

$$0,1 \mu\text{F} = 100000 \mu\text{F}.$$

Üldmahtuvus

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = \frac{500 \cdot 100000}{500 + 100000} = 497,5 \mu\text{F}.$$

4) Leida joonisel 160 toodud kondensaatorite üldmahtuvus, kui $C_1 = 8 \mu\text{F}$, $C_2 = 8 \mu\text{F}$ ja $C_3 = 2 \mu\text{F}$.

Esmalt leiame järjestikku olevate C_1 ja C_2 üldmahtuvuse. Et $C_1 = C_2$, siis nende üldmahtuvus

$$C_1 = \frac{C_1}{n} = \frac{8}{2} = 4 \mu\text{F}.$$

Nüüd leiame rööbiti olevate mahtuvuste abil üldmahtuvuse

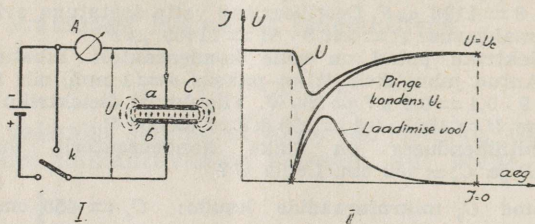
$$C = C_1 + C_2 = 4 + 2 = 6 \mu\text{F}.$$

§ 2. Mahtuvus vahelduvvoolu ahelas.

Vaatleme lähemalt nähtusi, mis ilmnevad, kui kondensaator on alalisvoolu ahelas. Ühendades kondensaatori elemendiga, põhjustab selle pinge U elektronide voolu plaadile a , samuti nende äravoolu plaadilt b .

Sisselülitamise hetkel on laadimise voolu tugevus, mida näitab ampermeeter A (joon. 161, I), suur, mille tõttu vooluallika klemmpinge U (joon. 161, II) langeb. Plaatidel tekitatud vastuelektromotoorne jõud U_c üha kasvades pidurdab plaadile a elektronide juurdevoolu ja vooluallika klemmpinge tõuseb. Kui kondensaator on laetud, siis $U = U_c$ ja

elektronide vool ahelas lakkab ($I = 0$). Et ahelas voolu enam pole, siis järeltame, et kondensaator on alalisvoolule lõpmata suureks takistuseks. Kui vooluahel lülitati k abil (joon. 161, I) katkestada ja kondensaator lühiühendada, siis näitab amper-



Joon. 161.

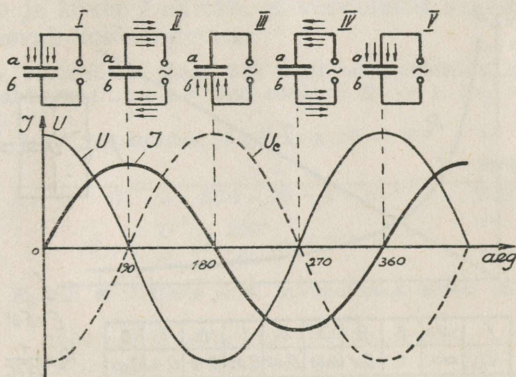
meeter jälle voolu, mille suund on vastupidine laadimisvoolule. Nii ampermeeter näitab kondensaatori laadimise ja lahendamise voolutugevust.

Asetame kondensaatori vahelduvvoolu ahelasse oletusel, et selles puudub oomiline takistus. Siis on ilmnevad nähted võrdlemisi analoogilised eelpool kirjeldatud nähetele.

Iga hetk, mil generaatoris indutseeritud pinge saavutab maksimaalsed suurused, on kondensaator laetud: vooluallikast kondensaatorile elektrone enam juurde ei viida ning ahelas elektrivoolu ei ole (joon. 162, I). Sel hetkel on ka U_c maksimaalne, sest ka siin kehtiv Lenzi seadus, et iga voolumuutus püüab tekitada võrdse vastuelektromotoorse jõu teda põhjustavale elektromotoorsele jõule. Generaatori pinge U kahane misega väheneb jõud, mis surus elektrone plaadile a ja elektronid voolavad generaatorisse tagasi. Generaatorist voolab samal ajal sama palju elektrone plaadile b , et saavutada plaatide a ja b vahel tasakaalu. Mida rohkem pinge U langeb, seda rohkem voolab elektrone plaadilt a ära ja plaadile b juurde. Kui pinge U läbib nullväärtuse (joon. 162, II), siis on kondensaatori laengut põhjustav jõud null ja kondensaator lahendub ning ahelas on vool kõige tugevam (joon. 162, II). Nüüd muutub pinge U suund ja kondensaator laetakse kasvava pinge poolt teises suunas. Pinge U suurenedes, suureneb ka kondensaatori laeng. Kui pinge on saavutanud negatiivse maksimumi, siis on kondensaator laetud teises suunas (joonis 162, III) ja ahelas voolu pole. Pinge amplituudi kahanedes

algab jällegi kondensaatori lahendumine ja endises suunas laadumine (joon. 162,IV) jne.

Nii laadub kondensaator vahelduvvoolu allika pinge iga poolperioodi esimesel poolel, kord üht-, kord teistpidi. Igal pinge poolperioodi teisel poolel lahendub kondensaator. On vooluallika pinge maksimaalne, siis on kondensaator laetud ja ahelas voolu pole; kui vooluallika pinge on null, siis vool on ahelas maksimaalne. Nii toimub kondensaatori laadimine ja tühjendamine vahelduvvoolu poolt pidevalt. Et laadimise



Joon. 162.

ja tühjendamise pinge muutub sinusoidaalselt, siis muutub selliselt ka laadimise voolu tugevus.

Nii näeme, et mahtuvuse vahelduvvoolu ahelas olles ruttab voolu tugevus pingest veerand perioodi (90°) võrra ette. See on kehtiv ainult siis, kui ahelas puudub oomiline takistus. Säärasel juhul on kondensaatoril tekkiv pingeline U_c alati 180° nihutatud vooluallika pingest ja viimasele võrdne.

Vooluahelasse lülitatud ampermeeter näitab kondensaatori laadimise ja tühjendamise voolu. Näidatud voolutugevus on seda suurem, mida sagedam on voolu suuna muutumine, s. o. voolusagedus f .

Kui valemi $Q = EC$ vasakut osa jagada ajale t ja parempoolset korrutada sagedusega f , siis saadud

$$\frac{Q}{t} \approx E \cdot C \cdot f$$

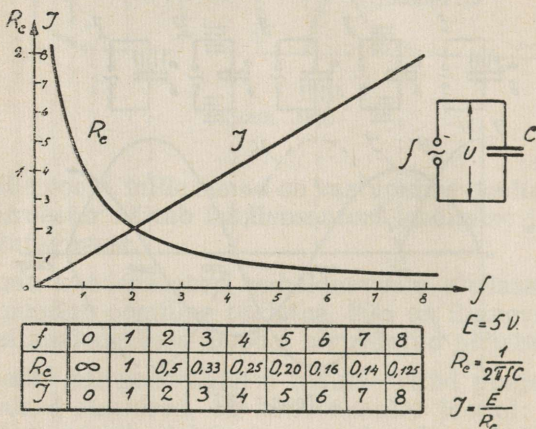
näitab elektronide arvu, mis sekundis mõõteriista läbivad¹⁾.
Seega ahela voolutugevus

$$I \approx E \cdot C \cdot f$$

Et on tegemist sinussoidaalse vooluga, siis tuleb täiendada saadud valemit parempoolses osas 2π -ga. Seega kondensaatorit laadiva vahelduvvoolu tugevus

$$I = E \cdot C \cdot 2\pi \cdot f = E \cdot \omega C$$

kusjuures I on voolutugevus ampreis, E pingelt voltides, C mahtuvus faraadides ja f voolusagedus.



Joon. 163.

Kondensaator kujutab vahelduvvoolu ahelas takistust, mida nimetatakse **mahtuvuseliseks takistuseks** (ka kapatsiitantsiks R_c ja oomiseaduse järele

$$R_c = \frac{E}{I} = \frac{E}{E \cdot \omega C} = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

kusjuures R_c on näivtakistus oomides, ω on ringsagedus ja C mahtuvus faraadides.

Saadud avaldis $\frac{1}{\omega C}$ annab mahtuvuselise takistuse suuruse, millest nähtub, et mahtuvuseline takistus väheneb voolusageduse ja mahtuvuse suurenedes.

1) $\frac{Q}{t}$ on sekundis juhtme põiklõiget läbivate elektronide arv. Sellest saadakse voolutugevus ampreis (vt. „Elektrivool“).

Vaatleme mahtvuseline takistuse muutusi olenevalt sagedusest, kui vooluallika elektromotoorse jõu ja mahtvuse suurus jääb püsivaks. Olgu vooluallika elektromotoorne jõud 5 volti ning vooluallika sagedus muudetav 1—8 per/sek. Lihtsuse mõttes jääb $2\pi C$ kui jääv suurus arvestusest välja. Nüüd, vastavalt sageduste muutusele, leiame R_c ja I suurused. Saadud tagajärjed kanname tabelisse joon. 163 kohaselt ja nende põhjal joonistame mahtvuseline takistuse ja voolutugevuse muutumiskõverad sõltuvalt sageduse muutmisest. Saadud kõver R_c näitab, et sageduse suurenedes mahtvuseline takistus väheneb ja kõver I näitab, et võrdeliselt sageduse suurenemisele kasvab voolutugevus.

Näide: 1) Vooluallika pinge 220 volti on ühendatud kondensaatoriga, mille mahtvus $C = 4 \mu F$. Kui suur on R_c ja I , kui voolusagedus on 50 per/sek.?

Avaldame $4 \mu F$ faraadides: $4 \mu F = 4 \cdot 10^{-6} F$.

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4 \cdot 10^{-6}} = \frac{1 \cdot 1000000}{1256} = 795 \Omega$$

$$I = \frac{U}{R_c} = \frac{220}{795} = 0,276 A.$$

2) Leida R_c kui $C = 1000 \mu\mu F$ ja voolusagedused on 10^2 , 10^4 ja 10^6 per/sek.

$$1000 \mu\mu F = 1000 \cdot 10^{-12} F = 10^{-9} F.$$

$$f = 10^2, \text{ siis } R_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = \frac{10^9}{628} = 1592000 \Omega$$

$$f = 10^4, \text{ siis } R_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{10^9}{62800} = 15920 \Omega$$

$$f = 10^6, \text{ siis } R_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{10^9}{6280000} = 159,2 \Omega$$

3) Vooluahelas on kondensaator $500 \mu\mu F$, mida läbib 2-milliampriline vool ja voolusagedus $f = 10^6$ per/sek. Leida U_c ?

$$500 \mu\mu F = 500 \cdot 10^{-12} F = 5 \cdot 10^{-10} F.$$

$$U_c = \frac{I}{\omega C} = \frac{I}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{2}{2 \cdot 3,14 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^{-10} \cdot 1000} = 0,636 V$$

§ 3. Mahtvuseline ja oomiline takistus vahelduvvoolu ahelas.

Kui pääle mahtvuseline takistuse R_c on vahelduvvoolu ahelas oomiline takistus R (joon. 164, a), siis nende takistused ei summeeru algebraliselt, sest nende mõjud on faasis 90° nihutatud. Näiteks oomilisel takistusel on pinge ja voolutuge-

vus faasis, kuid mahtuvuselisel takistusel jääb pinge voolust veerand perioodi (90°) maha.

Vektordiagrammis kantakse pingelangus mahtuvustakistusel U_c ja mahtuvustakistus R_c vertikaalteljele negatiivses suunas (joon. 164, b).

Resulteeruva takistuse Z leidmine toimub samuti nagu induktiivse ja oomilise takistuse puhul ja

$$Z = \sqrt{R^2 + R_c^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

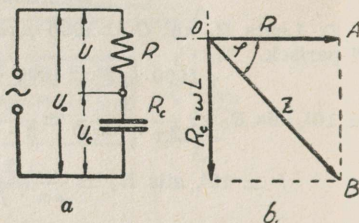
Saadud resulteeruvat nimetatakse impetantsiks.

Pingelanguste liitmine oomilisel takistusel U ja mahtuvuselisel takistusel U_c toimub geomeetriliselt ja nende resulteeruv pinge

$$U_0 = \sqrt{U^2 + U_c^2}$$

Joonise 164, a kohaselt resulteeruvaks on vooluallika pinge ja see jääb voolust nurga φ võrra maha. Nurk φ võib evida kõik suurused 0° ja 90° vahel, sõltuvalt mahtuvuselise ja oomilise takistuse vahetusest. On R_c võrreldes R -ga väike, siis on nihkenurk φ väike; on R_c suur, siis on ka nihkenurk φ suur.

Nihkenurga suurus arvutatakse selle tangensi või koosinuse abil.



Joon. 164.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_c}{R} \text{ ja } \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Praktiliselt võib kondensaatorit käsitada kui puhtmahtuvuselist takistust, sest temal puudub oomiline takistus, nagu see iga pooli juures paratamatult esineb.

Kondensaatori mahtuvus faraadides leitakse, kui on teada pingelangus kondensaatoril ja seda läbiva voolu tugevus ja sagedus. Kuna

$$R_c = \frac{U_c}{I} \text{ ja } R_c = \frac{1}{\omega C}, \text{ siis mahtuvus } C = \frac{1}{\omega R_c}$$

Samuti võib mahtuvuse suuruse leida valemist:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \text{ kust } C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R^2}}$$

Näide: 1) Kondensaatoril on pingelangus $U_c = 200$ V ja oomilisel takistusel 100 volti (joon. 164, a). Leida vooluallika pinge ja nihkenurk!

Joon. 165 kohaselt kanname U_c ja U vastavas mõõtkavas vektordiagrammi. Pinge kolmnurgast OAB leiame, et

$$U_0 = \sqrt{U^2 + U_c^2} = \sqrt{200^2 + 100^2} = 224 \text{ V}$$

$$\text{ja } \cos\varphi = \frac{U}{U_0} = \frac{100}{224} = 0,446.$$

Sellele vastavalt nurk $\varphi = 63^\circ 35'$.

2) Vahelduvvoolu ahelas (joon. 164, a) on oomiline takistus 10Ω ja kondensaator mahtuvusega $2 \mu\text{F}$. Leida voolutugevus ahelas, kui võrgupinge on 220 V ja voolusagedus on 50 per/sek.!

Esmalt leiame mahtuvuselise takistuse R_c

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 10^6} = 1592 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + R_c^2} = \sqrt{10^2 + 1592^2} = 1592 \Omega$$

Voolutugevus

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{1592} = 0,138 \text{ A.}$$

3) Elektrilampi, mille tööpinge on 60 volti ja voolutarvitus 0,4 ampri, tahetakse lülitada 220-voldilisse vahelduvvoolu võrku. Kui suur peab olema lambiga järjestikku lülitatud kondensaator, et lamp põleks normaalselt?

Lambi oomiline takistus

$$R = \frac{U}{I} = \frac{60}{0,4} = 150 \Omega$$

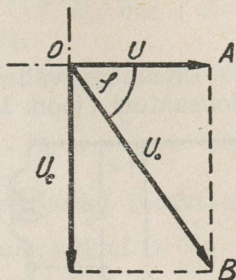
Nüüd leiame ahela üldise takistuse 220-voldilise pinge puhul 0,4-ampri voolu saamiseks.

$$Z = \frac{U_0}{I} = \frac{220}{0,4} = 550 \Omega$$

Vajaliku kondensaatori mahtuvus

$$C = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R^2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \sqrt{550^2 - 150^2}} =$$

$$= 0,00000592 \text{ F} = 0,00000592 \cdot 10^6 \mu\text{F} = 5,92 \sim 6 \mu\text{F}.$$



Joon. 165.

$$Z^2 = \sqrt{R^2 + R_c^2}$$

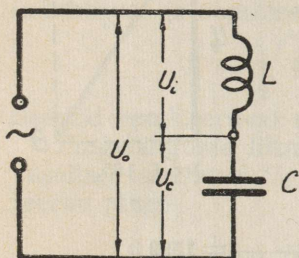
$$R_c = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega \sqrt{Z^2 - R^2}}$$

1) Et käesoleval juhul R võrreldes R_c -ga on väga väike, siis võib selle arvutusest välja jätta.

IV. OOMILINE, INDUKTIIVNE JA MAHTUVU- SELINE TAKISTUS VAHELDUVVOOLU AHELAS.

Ühendame vahelduvvoolu ahelasse järjestikku pooli ja kondensaatori (joon. 166) oletusel, et need ei evi oomilist takistust:

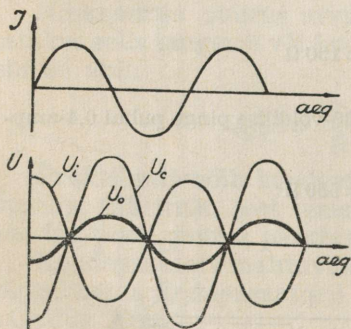


Joon. 166.

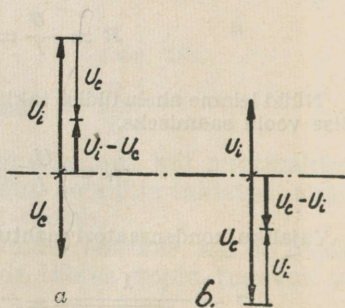
Nii kujutaksid need vaid induktiivset ja mahtvuselise takistust. Kummaski takistuses tekib pingelangus, mille suurus sõltub ahelat läbiva voolu tugevusest I ja antud takistusest. Seega pingelangus induktiivsel takistusel $U_i = R_i \cdot I$ ja mahtvuselisel takistusel $U_c = R_c \cdot I$ ning resulteeruv pinge, käesoleval juhul vooluallika pinge $U^0 = Z \cdot I$, kus Z on R_i ja R_c resulteeruv.

Et pinge induktiivsel takistusel ruttab voolust 90° ette ja mahtvuselisel takistusel jääb 90° voolust maha, siis R_i ja R_c tekitatud pinged on üksteisele vastupidised. Nad on faasis 180° nihutatud (joon. 167) ja nende resulteeruv pinge U_0 võrdub U_c ja U_i algebralisele vahele.

Et U_c ja U_i on 180° nihutatud, siis kantakse vektordiagrammis U_c vertikaalteljele allapoole horisontaaltelge. Sõltu-



Joon. 167.



Joon. 168.

valt R_c -st ja R_i -st, võib neist üks kui teine suurem olla. Resulteeriva saamiseks arvatakse suuremast väiksem maha (joon. 168, a ja b).

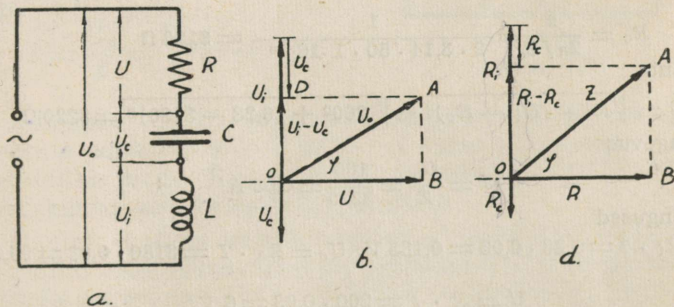
Näiteks joon. 168, a on U_i suurem kui U_c ja resulteeriv $U_0 = U_i - U_c$. Joonisel 168, b on näidatud vastupidine võimalus. Et $U_0 = I \cdot Z$, $U_i = I \cdot R_i$ ja $U_c = I \cdot R_c$, siis $I \cdot Z = I \cdot R_i - I \cdot R_c$ või $I \cdot Z = I \cdot R_c - I \cdot R_i$.

Kui koondada saadud valemis mõlemad poolega I -ga, siis saame

$$Z = R_i - R_c = \omega L - \frac{1}{\omega C} \quad \text{või} \quad Z = R_c - R_i = \frac{1}{\omega C} - \omega L.$$

Saadud resulteerivat nimetatakse ebatakistuseks (reaktantsiks), millel on induktiivse takistuse iseloom, kui $\omega L > \frac{1}{\omega C}$ ja mahtvuseline takistuse iseloom, kui $\frac{1}{\omega C} > \omega L$. Nii pääseb ahelas mõjule see, missugune neist suurem.

Et mahtvuselise takistuse mõju on induktiivse takistuse mõjule vastupidine, siis märgitakse see miinusemärgiga. Sellisel juhul resulteeriv, olles miinusemärgiga, näitab, et ahel evib mahtvuselise takistuse iseloomu R_i ja R_c liidetakse vektoridiagrammis analoogiliselt U_i ja U_c -le.



Joon. 169.

Kui vahelduvvoolu ahelas on järjestikku ühendatud R , L ja C (joon. 169, a), siis nende takistused ja neis tekkivad pingelangused liidetakse samuti geomeetriliselt.

Pingete vektoridiagrammis kantakse horisontaalteljele pingelangus oomilisel takistusel U (joon. 169, b), vertikaalteljele positiivses suunas pingelangus induktiivsel takistusel U_i ja negatiivses suunas pingelangus mahtvuselisel takistusel U_c . Nüüd arvame U_c U_i -st, mis on oma mõjult suurem,

maha. Saadud resultaadi $U_i - U_c$ ja U abil ehitame parallelogrammi $OBAD$, mille diagonaal OA on otsitav resulteeriv U_0 . Täisnursest kolmnurgast OBA leiame, et

$$U_0 = \sqrt{U^2 + (U_i - U_c)^2}$$

Takistused kantakse vektordiagrammi analoogiliselt pingetele (joon. 169, d). Kolmnurgast OBA leiame, et

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_i - R_c)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

Faaside nihkenurk φ leitakse selle tangensi või koosinuse abil, kusjuures

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R_i - R_c}{R} = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} \quad \text{ning} \quad \cos \varphi = \frac{R}{Z}$$

Näide: Vahelduvvoolu ahelas on järjestikkuühenduses kondensaatormahutuvusega $1 \mu\text{F}$, poolinduktiivsusega 2 mH ja oomiline takistus 200Ω . Vooluallika pinge on 100 volti. Leida voolutugevus ahelas ja pingelangused R_i ja R_c , kui vooluallika sagedus on 50 per/sek.

Esmalt leiame R_i ja R_c

$$R_i = 2\pi f \cdot L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 6,28 \text{ oomi,}$$

$$R_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 3180 \Omega$$

Impedants

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_i - R_c)^2} = \sqrt{200^2 + (6,28 - 3180)^2} = 3220 \Omega$$

Voolutugevus

$$J = \frac{U_0}{Z} = \frac{100}{3220} = 0,03 \text{ A}$$

Pingelangused

$$U_i = R_i \cdot I = 6,28 \cdot 0,03 = 0,185 \text{ V, } U_c = R_c \cdot I = 3180 \cdot 0,03 = 95,6 \text{ V}$$

ja

$$U = R \cdot I = 200 \cdot 0,03 = 6 \text{ V.}$$

V. VAHELDUVVOOLU RESONANTSNAHTED.

Kui vahelduvvoolu ahelasse järjestikkuühendatud induktiivsed ja mahtuvuselised takistused on võrdsed, siis ilmnevad nähted, mis erinevad eelpool kirjeldatust.

Olgu vahelduvvoolu ahelas kondensaatori ja pooli suurused valitud nii, et $R_i = R_c$. Kui oletada, et ahela oomiline takistus on väga väike, siis moodustavad resulteeriva takis-

tuse R_i ja R_c (joon. 170). Et neid takistusi läbiv vool on üks ja sama, siis pingelangus

$$U_i = I \cdot R_i \text{ ja } U_c = I \cdot R_c$$

kust

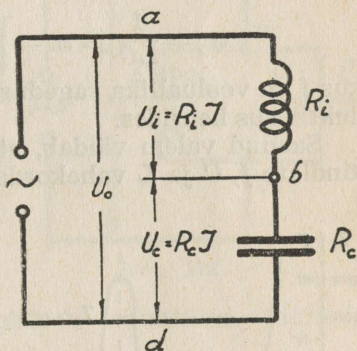
$$U_i = U_c \text{ kui } R_i = R_c$$

Et pingelangused kondensaatoris ja poolis on voolu suhtes 180° nihutatud, siis mõjuvad nad vastupidiselt ja nende mõjude summa on null ($U_i - U_c = 0$). Samuti takistuste mõjud on vastupidised ja resulteeriv takistus

$$Z = R_i - R_c = 0$$

Et pingelangused U_i ja U_c üksteise mõju hävitavad, siis punktide a ja d vahel ei ilmne mingit vastuelektromotoorset jõudu. Seega mõjub ahelas ainult oomiline takistus. Resulteeriva takistuse Z võrdudes nullile, on ahelas voolutugevus lõpmata suur

$$I = \frac{U_0}{Z} = \frac{U_0}{0} = \infty$$



Joon. 170.

Ehk kui U_i ja U_c resulteeriv mõju on null, on need pinged üksikute punktide $a - b$ ja $b - d$ vahel palju suuremad kui vooluallika pinge. Kui sel puhul puuduks ahelas tõesti oomiline takistus, siis ilmneks lühiühendus.

Olgugi, et ahela oomilist takistust praktiliselt pole võimalik nullini vähendada, kuid R_i võrdudes R_c võib ahelas siiski ilmned normaalset mitmekordselt tugevamaid voole. Selle tõttu poolis ja kondensaatoris tekkivad pinged U_i ja U_c on võrdlemisi suured, mis võivad rikkuda pooli ja kondensaatori isolatsiooni.

Et säärane ahel evib alati oomilise takistuse, siis impedants

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_i - R_c)^2}$$

Kui avaldus $R_i - R_c = 0$, siis $Z = R$. See on ahela impedantsi kõige väiksem väärtus, sest avaldus $(R_i - R_c)^2$ on alati positiivne suurus. Seega Z võib alati suurem olla kui R , kuid

ei millalgi väiksem. Käesoleval juhul ahelat läbiva voolu tugevus

$$I = \frac{U_0}{R}$$

Sellest järgneb, et voolu tugevus ahelas ei saa olla millalgi lõpmata suur, vaid seda piirab ahela oomiline takistus.

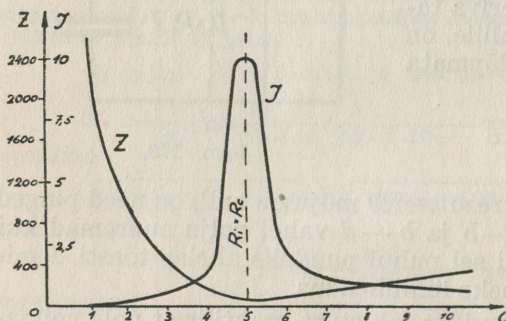
Säärast nähet, kui $R_i = R_c$ ja ahelas mõjub ainult oomiline takistus, nimetatakse **pinge resonantsiks**.

Lahendades valemi $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ ω suhtes, siis saame, et

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \text{ ja } \omega = \sqrt{\frac{1}{CL}}, \text{ kust } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{CL}}$$

kus f on vooluallika sagedus, C mahtuvus faraadides ja L induktiivsus henrides.

Saadud valem väidab, et resonantsjuhtum võib esineda kindlate f , C ja L vahekordade juures. Kui L ja C on vabalt



C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z	2528	948	421	159	22	108	184	238	280	316
I	0,03	0,2	0,5	1,4	10	2,1	1,2	0,9	0,8	0,7

Joon 171.

voollalka ping 220 volti ja ringisagedus $\omega = 2\pi f = 316^1$) Vooluahelas on oomiline takistus 22 oomi, pool induktiivsusega $2H$ ja muutuva mahtuvusega kondensaator 1—10 μF .

Valemi $Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ abil leiame, et kondensaa-

¹⁾ Arvutuse lihtsustamiseks on valitud f veidi suurem kui 50.

valitud, siis esineb resonantsjuhtum ainult neist sõltuval sagedusel f . Seda sagedust, mida määravad L ja C suurused, nimetatakse ahela **enesesageduseks**.

Kui antud pool ja kondensaator ühendada voollalkaga, mille sagedus võrdub C ja L enesesagedusele, siis ilmneb resonantsjuhtum.

Olgu näiteks joon. 170 näidatud

tori mahtuvuse C muutudes muutub ka ahela impedants Z ja sellele vastavalt voolutugevus I . Arvutame impedantsi ja ahela voolutugevuse, muutuva C ($1-10 \mu\text{F}$) suhtes. Saadud andmed kanname tabelisse (joon. 171) ja nende abil ehitame Z ja I muutumise kõverad.

Arvutamisel leiame, et mahtuvuse väikese suuruse juures ahela takistus on väga suur. Mahtuvuse suurenedes ahela takistus väheneb, milletõttu voolutugevus kasvab. Mahtuvuse olles $5 \mu\text{F}$, on R_i ja R_c võrdsed ja ahelas mõjub ainult oomiline takistus R ning selletõttu on ka voolutugevus I maksimaalne. Samuti on tol hetkel pooli otstel pinge U_i ja kondensaatori plaatidel pinge U_c maksimaalsed ning võrdsed.

Käesoleval juhul evis Z mahtuvuselise takistuse iseloomu kuni resonantsi ilmnemiseni. Edasisel mahtuvuse suurenemisel R_c üha väheneb ja mõjule pääseb induktiivne takistus,

seega $\omega L - \frac{1}{\omega C}$ suurus läheneb ωL -le.

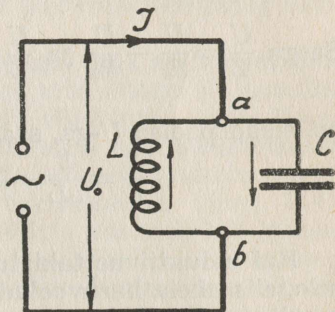
Asetame vooluahelasse C ja L rööbiti (joon. 172). Kui oletada, et ahelas puudub oomiline takistus, siis mõjub pinge U_0 , mida vooluallikas annab, ühtlaselt C ja L -le. Seega pooli läbiva voolu tugevus

$$I_i = \frac{U_0}{R_i}$$

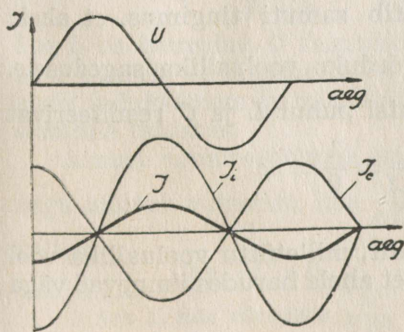
ja kondensaatorit läbiva voolu tugevus

$$I_c = \frac{U_0}{R_c}$$

Et vool jääb poolis pingest U_0 veerand perioodi maha ja kondensaatoril tõttab veerand perioodi ette, siis on voolud I_i ja I_c üksteisest 180° faasis nihu-



Joon. 172.



Joon. 173.

tatud ja nad mõjuvad vastupidiselt. Selletõttu $I_0 = I_i - I_c$. Nii on C ja L rööbitilülituses haruvoolude tugevused palju suuremad kui resulteeriv voolutugevus (joon. 173), mida käesoleval juhul vooluallikas annab.

Kui rööbitiühendatud pooli ja kondensaatori resulteeriva takistuse tähistame Z -ga, siis resulteeriv voolutugevus

$$I_0 = \frac{U}{Z} = I_i - I_c = \frac{U}{R_i} - \frac{U}{R_c}$$

Seega $\frac{U}{Z} = \frac{U}{R_i} - \frac{U}{R_c}$ ja $\frac{U}{Z} = \frac{U}{\omega L} - \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}$, kust jagades

mõlemad pooled U -ga, saame:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{\omega L} - \omega C \text{ ja } Z = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}}$$

Kui induktiivne takistus võrdub mahtuvuselisele takistusele, siis ahela haruvoolude tugevused on võrdsed ja nende resulteeriva voolu tugevus on null:

$$I_0 = \frac{U}{R_i} - \frac{U}{R_c} = U \cdot \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right) = 0$$

Niiviisi laadub ja lahendub kondensaator vooluallika pinge U mõjul, ilma et vooluallikast voolu võetakse. Seda nähet nimetatakse **vooluresonantsiks**.

Resonantsi puhul

$$\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0, \text{ kust } \omega L = \frac{1}{\omega C}$$

Sellest valemist selgub, et vooluresonantsi juures analoogiliselt pingeresonantsile kehtib samuti tingimus, et ahela

enesesagedus $f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{CL}}$ võrduks vooluallika sagedusele.

Kui vaadelda vooluresonantsi puhul L ja C resulteerivat takistust, kus

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{\omega L} - \omega C} = \frac{1}{0} = \infty$$

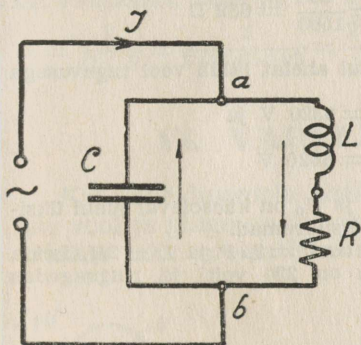
siis näeme, et Z on lõpmatu suur, mille tõttu vooluallika vool üldse ahelasse ei pääse, olgugi, et ahela harudes ilmnevad väga

1) $\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0$

tugevad voolud. Et resonantsi puhul L ja C rööbitilülituses vahelduvvoolule lõpmata suureks takistuseks on, seletub järgmiselt:

Vooluallika pinge mõjul laetakse kondensaator läbi pooli kord üht- kord teistpidi. Seega tekib sisemine vooluahel, mida läbib kondensaatori laadimise vool vooluallika sagedusega f . See vool tekitab punktide a ja b vahel (joonis 172) pinge, mis on võrdne ja vastupidine vooluallika pingele. Seetõttu tõkestatakse vooluallika voolu pääsemist läbi rööbitilülitatud mahutavuse C ja induktiivsuse L .

Praktikas säärast ideaalset juhtumit, kus ahelas oomiline takistus puudub, ei esine, vaid ahel evib ikkagi ka oomilise takistuse, mille suurus võib olla küll võrdlemisi väike. Seega kulutatakse osa kondensaatori laadimise voolust ahela oomilisel takistusel R (joon. 174), mille tõttu väheneb kondensaatori laadimisvool. Et kondensaatori laadimise voolu tugevus oleks alati püsiv, siis peab vooluallikas takistuses R kulutatud energia hulga alati juurde andma. Nii paistab, et säärane ahel, evides oomilise takistuse, pole vooluallika voolule enam lõpmata suureks takistuseks. Resonantsi puhul ahela impedants



Jo n. 174.

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 + \frac{L}{CR^2} \right)} \text{ ja } Z = \frac{L}{C \cdot R} \quad 1)$$

kus L on henrides, C faraadides ja R oomides. Sellest valemist nähtub, et impedants on seda suurem, mida suurem on ahela induktiivsus ja mida väiksemad on ahela mahutavus ja oomiline takistus.

Samuti vooluresonants esineb ainult siis, kui $R_i = R_c$, nagu nähtub valemist, kus $\frac{1}{\omega L} - \omega C = 0$.

$$\text{Sellest } f = \frac{1}{2\pi \sqrt{C \cdot L}}$$

1) Arv 1, mis võrreldes $\frac{L}{CR^2}$ on väga väike, jäetakse avaldusest $1 + \frac{L}{CR^2}$ lihtsuse mõttes välja.

Nii selgub, et resonantsjuhtumid võivad esineda siis, kui L ja C suurused on voolusagedusele kohandatud.

Valgustuse ja muudes töövoolu ahelates on resonantsnähted ebasoovitavad ja neist tuleb hoiduda. Kuid raadiotehnika seevastu neile nähtele põhinebki, mistõttu nende nähete täpsem analüüs selle raamatu kompetensi ei kuulu.

Näide: 1) Joonis 171 juurde kuuluva näite lahenduse kohaselt leida resonantsi puhul kondensaatoril ja poolil ilmnevad pingelangused U_i ja U_c .

Resonants ilmnes, kui $C = 5 \mu F$ ja $L = 2 H$. Leiame nende abil R_i ja R_c , kui antud ringsagedus $\omega = 316$.

$$R_i = \omega L = 316 \cdot 2 = 632 \Omega$$

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{316 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{1580} = 632 \Omega$$

Seega $R_i = R_c$. Et resonantsi puhul ahelat läbib vool tugevusega 10 amprit, siis

$$U_i = I R_i = 10 \cdot 632 = 6320 \text{ V ja}$$

$$U_c = I R_c = 10 \cdot 632 = 6320 \text{ V}$$

Sellest nähtub, et pingelangused U_i ja U_c on käesoleval juhul üksikult umbes 29 korda vooluallika pingest suuremad.

2) Joonis 172 kohaselt on vooluahelas $C = 3 \mu F$ ja $L = 2 H$. Leida I_i , I_c , I_0 ja Z , kui vooluallika pinge on 220 volti ja ringsagedus $\omega = 316$.

$$R_i = \omega L = 316 \cdot 2 = 632 \Omega.$$

$$R_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{316 \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{948} = 1050 \Omega$$

$$I_i = \frac{U}{R_i} = \frac{220}{632} = 0,348 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{U}{R_c} = \frac{220}{1050} = 0,209 \text{ A}$$

$$I_0 = I_i - I_c = 0,388 - 0,209 = 0,139 \text{ A}$$

$$Z = \frac{1^1)}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} = \frac{R_c \cdot R_i}{R_c - R_i} = \frac{1050 \cdot 632}{1050 - 632} = 1590 \Omega$$

3) Joonis 172 kohaselt on vooluahelas $C = 5 \mu F$ ja $L = 2 H$.

$$1) \omega C = \frac{1}{R_c}$$

Leida I_i , I_c , I ja Z kui vooluallika pingel on 220 V ja ringsagedus $\omega = 316$.

Esimese näite kohaselt R_i ja R_c võrduvad kumbki 632 oomile. Seega kondensaatoris ja poolis ilmnevad voolud

$$I_i = I_c = \frac{U}{R_i} = \frac{220}{632} = 0,348 \text{ A}$$

Ahela impedants

$$Z = \frac{1}{\omega C - \frac{1}{\omega L}} = \frac{1}{\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_c}} = \frac{1}{\frac{1}{632} - \frac{1}{632}} = \frac{1}{0} = \infty$$

Resulteeriv voolutugevus

$$I_0 = I_i - I_c = 0,348 - 0,348 = 0$$

Seega ei võeta vooluallikast üldse voolu.

4) Joonis 174 kohaselt $C = 5 \mu F$, $L = 2 H$ ja $R = 100 \Omega$. Leida I , kui vooluallika pingel on 220 V ja ringsagedus $\omega = 316$.

$$Z = \frac{L}{C \cdot R} = \frac{2}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 100} = \frac{2 \cdot 10^6}{500} = 4000 \Omega; I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{4000} = 0,055 \text{ A}$$

VI. VAHELDUVVOOLU TÖÖ.

Kui vahelduvvoolu ahelas esineb ainult oomiline takistus, siis vool ja pingel on faasis (joon. 175). Säärasel juhul kulutatakse kõik vooluallikast võetud võimsus täielikult ära ja efektiivsete suurustega arvutades oomilisel takistusel kulutatud võimsus

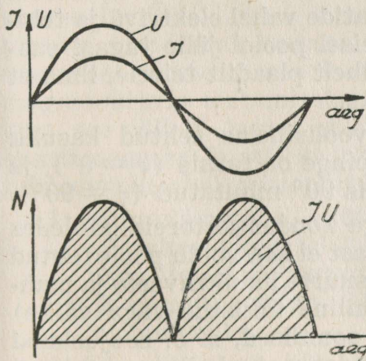
$$N = I \cdot U = I^2 \cdot R.$$

Jooniselt 175 näeme, et pingel ja voolutugevuste hetksuuruste korrutis on positiivne ja seega ka saadud tööpinnad, sest pole ju kujuteldav, et töö oleks negatiivne, s. o. et selleks ei kulutata energiat.

Asetame vahelduvvoolu ahelasse pooli. Kui oletada, et see ei evi oomilist takistust, siis pooli induktiivse takistuse tõttu oleks vool ja pingel

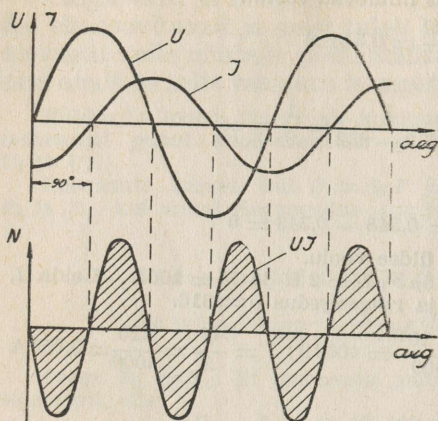
faasis 90° nihutatud. Pingel ja voolu korrutis annab tööpinn-

$$1) \omega C - \frac{1}{\omega L} = 0, \text{ kust } \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$$



Joon. 175.

nad, nagu joonisel 176 näidatud. Joonisel nähtub, et kõverjoone IU all on tööpinnad korduvalt positiivsed ja negatiivsed, olles seejuures võrdsed. Seega on saadud töö null. Siin ei muutu elektrienergia kasulikuks tööks, vaid muudetakse pinge iga poolperioodi esimesel poolel magnetiliseks energiaks, kust ta poolperioodi teisel poolel elektrienergia näol jälle tagasi saadakse. Seega kulutatakse vooluallika elektromotoorne jõud kõik poolis induitseeritava vastuelektromotoorse jõu ületamiseks ja kasulikuks



Joor 176.

tööks ei kasutata üldse energiat.

Niiviisi võngub¹⁾ vool vooluallika ja pooli vahel.

Analoogiline nähe ilmneks ka puhtmahtuvuselise takistuse vahelduvvoolu ahelas olles. Siin kasutatakse vool poolperioodi esimesel poolel kondensaatori plaatide vahel elektrivälja tekitamiseks, kust ta poolperioodi teisel poolel jälle tagasi saadakse. Nii võngub laadimisvool ühelt plaadilt teisele, ilma et selle juures kasulikku tööd tehtaks.

Eelpool toodust järeldub, et vooluahelas tehtud kasulik töö on maksimaalne, kui vool ja pinge on faasis ($\varphi = 0^\circ$), ja on null, kui vool ja pinge on faasis 90° nihutatud ($\varphi = 90^\circ$).

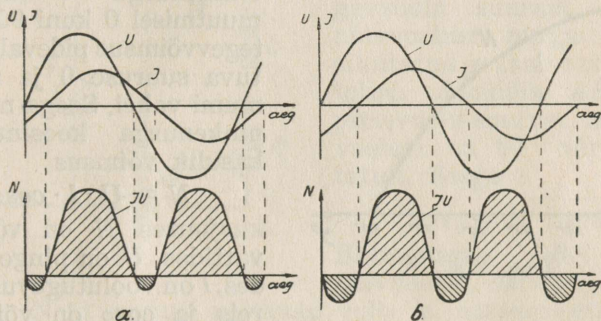
Praktiliselt ei leidu ei poole ega kondensaatoreid, milledes ei esine oomilisi kadusid ja seepärast ei saa voolu poolt tehtud töö olla millalgi null. Küll võib ta suurte induktiivsete ja mahtuvuseliste takistuste puhul (oomiline takistus väga väike) olla väga väike. Poolis tekivad oomilised, s. o. soojuskaod pooli oomilisel takistusel, kuna kondensaatoris ilmnevad kaod dielektrilise nihke tõttu, sest osa vooluallika voolust kulutatakse järellaengu nähete neutraliseerimiseks.

Et koos induktiivsete ja mahtuvuseliste takistustega esinevad alati oomilised takistused, siis ei saa faaside nihkumine

¹⁾ Liigub edasi-tagasi.

millalgi olla 90° , vaid see on 0° ja 90° vahel. Osa elektromotoorsest jõust kulutatakse alati oomilisel takistusel ja seetõttu ei saa poolis või kondensaatoris tekitatud vastuelektromotoorne jõud millalgi kasvada võrdseks vooluallika elektromotoorse jõuga.

Vaatleme näiteks, kuidas muutub võimsus, kui pinge ja vool on 30° ja 60° (joon. 177, a ja b) faasis nihutatud. Jooniselt nähtub, et faaside nihke puhul ilmneb negatiivne töö, mis



Joon. 177.

suureneb nihkenurga φ suurenedes. See negatiivne osa tööpinnast moodustab teatava protsendi üldisest vooluallikast võetavast võimest, mis kasutatakse induktiivseis takistuses magnetväljade ehitamiseks või kondensaatorite laadimiseks, kust see jällegi tagasi saadakse. Seda võimet nimetatakse ebavõimsuseks ja selleks kasutatud voolu pimevooluks. Vahelduvvoolu ahelas kasutatav võimsus jaotub:

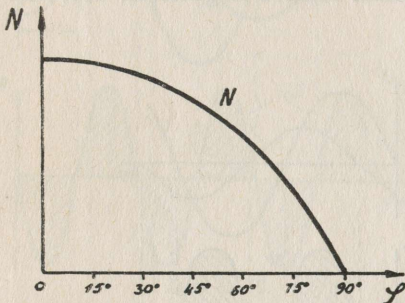
- 1) näiv-võimsus, s. o. üldine võimsus, mida vooluallikast võetakse (joonisel 177 kujutavad seda positiivsed ja negatiivsed tööpinnad). Näivvõimsust mõõdetakse volt- ja ampermeetriga. Mõõtühikuks on voltamper¹ (kilovoltamper).
- 2) Kasulik võimsus²), mis kulutatakse vooluahelas tööks, näit. soojuseks (joonisel 177 — positiivsed tööpinnad). Mõõdetakse vattmeetriga ja mõõtühikuks on vatt (kilovatt).

¹) Volt korda amper ($U \cdot I$).

²) Kasulikvõimsust nimetatakse tegev võimsuseks ($U \cdot I \cdot \cos\varphi$).

- 3) **Ebavõimsus**, mis kasutatakse induktiivseis ja mahtuvuselisis takistusis (joonisel 177 negatiivsed tööpin-nad). Ebavõimsuse annab näivvõimsuse ja kasulik-võimsuse vahe.

Kui graafiliselt leida kasulik võimsuse sõltuvus faaside nihkenurgast φ , siis nähtub, et võimsus muutub siinusoidaal-selt (joon. 178). Võimsus on maksimaalne siis, kui faaside



Joon. 178.

nihkenurk $\varphi = 0$ ja mini-maalne siis, kui $\varphi = 90^\circ$. Nihkenurga φ suuruse muutmisel 0 kuni 90° evib tegev võimsus pidevalt muutuva suuruse 0 ja maksimumi vahel. Seega määrab nihkenurga koosinus ja kasulik võimsus

$$N = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

kusjuures N on võimsus vattides, U on pinge voltides, I on voolutugevus ampereis ja $\cos\varphi$ on võimsuse

tegur, mis näitab mitu % näivvõimsust kulutatakse kasulikuks tööks.

Tavaliselt kasutatakse $\cos\varphi$ arvutuses arvuna. Ta suurus võib olla 0—1 piirides. $\cos\varphi$ väärtus leitakse pinge või takistuse kolmnurkade abil, nagu eelpool seletatud.

Praktiliselt leitakse $\cos\varphi$ sageli voltmeetri, ampermeetri ja **vattmeetri**¹⁾ abil (joon. 179). Joonise kohaselt ühendatud ampermeeter A näitab kogu voolu hulka, mida vooluallikas ahelasse annab ja mis nimetatakse näivaks voolutugevuseks (I_0). See koosneb pimevoolust (i_0) ja tegev voolust (I), mis kulutatakse kasulikuks tööks. Voltmeeter näitab efektiivset pinget ja vattmeeter näitab võimsust, mis tegelikult ära kulutatakse, s. o. tegev võimsust. Tegev- ja näivvõimsuse suhe annabki $\cos\varphi$, seega

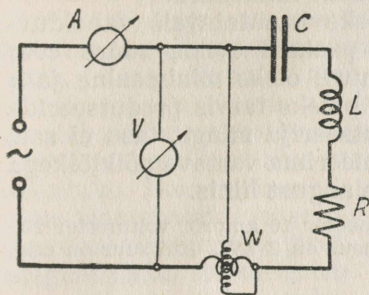
$$\cos\varphi = \frac{N}{N_0}$$

¹⁾ Vattmeeter on võimsuse-mõõtja, mis näitab kulutatava voolu võimsust vattides (kilovattides). On olemas ka $\cos\varphi$ mõõtjaid, neid kasutatakse peamiselt ainult laboratooriumes ja suuremates elektrijaamades.

kus N on tegevvoimsus wattides, N_0 on näivvoimsus volt-ampreis.

Teades pinget ja voolu nihkenurka φ , on võimalik näiva voolutugevuse abil leida I ja i_0 (joon. 178). Nurga φ ja I_0 abil ehitame horisontaaltele täisnurkse kolmnurga OBA (joon. 180), mille hüpotenuus

$$AO = \sqrt{OB^2 + BA^2}$$



Joon 179.

Saadud kolmnurgas (joon. 180) näitab joonlõik OB tegevvoolu suurust, mis on näivvoolust nurga φ võrra nihutatud ja asub horisontaaltele. Joonlõik AB näitab pimevoolu suurust, mis tegevvoolust on 90° võrra nihutatud. Seega

$$I_0 = \sqrt{I^2 + i_0^2}$$

Kolmnurgas OBA langeb näivvool I_0 näivpingega U_0 ¹⁾

kokku. Neid suurusi näitavad volt- ja ampermeetrid (joon. 179). Nende korrutis annabki näivvoimsuse

$$N_0 = I_0 \cdot U_0$$

Samuti langeb tegevpinge U tegevvooluga I kokku ja nende korrutis annab tegevvoimsuse N . Seega

$$N = I \cdot U$$

Et pimevool langeb kokku pingelangusega ebatakistusel (R_c või R_L), siis ebavõimsus

$$N_e = i_0 \cdot U_e$$

Nii saame, et näivvoimsus

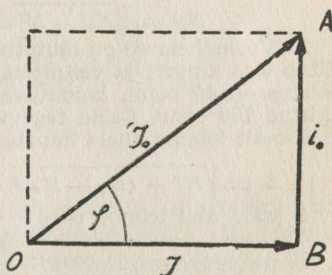
$$N_0 = \sqrt{N^2 + N_e^2}$$

Saadust nähtub, et tegevvoimsus on alati väiksem näivvoimsusest ja kui ebavõime on null, siis $N_0 = N$.

Kolmnurgast OBA võib leida N ja N_e veel järgmiselt:

$$\text{kus } N = U_0 \cdot I_0 \cos \varphi \text{ ja}$$

$$N_e = U_0 \cdot I_0 \sin \varphi$$



Joon. 180.

1) U_0 on kas U , U_c , U_i või nende resulteeriv.

Niiviisi võetakse vahelduvvoolu generaatorist suurem võimsus, kui seda kasuliku võimsusena ära kulutatakse. Seega resulteeriv vool läbib küll juhtmestikku, kuid tarvitajat läbib temast osa pimevooluna. Et pimevool kasulikku tööd ei tee, siis seda tarvitaja vattmeeter ka ei näita.

Juhtmestiku soojenemine sõltub voolutugevusest, mida generaator annab. Need peavad seda suurema põiklõike evima, mida suurem on ahelas faaside nihkenurk.

Valgustus- ja tööstusotstarbeks kasutatavais vahelduvvoolu võrkudes voolutarvitajad peaksid evima suure $\cos\varphi$ (peaaegu 1), siis faaside nihkenurk oleks minimaalne ja φ võrduks peaaegu 0-le. Sääraselt poleks tarvis produtseerida pimevoolu, mille eest vooluprodutseerija mingit tasu ei saa, kuid mille jaoks ta peab dimensioneerima vastava põiklõikega juhtmed, et ära hoida suurt pingelangust liinis.

Näide: 1) Joon. 179 näitab ampermeeter 10 amprit, voltmeeter 220 volti ja vattmeetri näidatud tegev võimsus on 2 kW. Kui suur on $\cos\varphi$ ja ebavõimsus?

Näivvõimsus

$$\tilde{N}_0 = I_0 U_0 = 10 \cdot 220 = 2200 \text{ VA} = 2,2 \text{ KVA}$$

Tegev võimsuse tegur

$$\cos\varphi = \frac{N}{\tilde{N}_0} = \frac{2}{2,2} = 0,9.$$

Ebavõimsus

$$N_e = \sqrt{\tilde{N}_0^2 - N^2} = \sqrt{2,2^2 - 2^2} = 0,29 \text{ KW}$$

2) Vooluahelasse on lülitatud joon. 179 kohaselt ampermeeter, mis näitab 0,44 amprit ja voltmeeter, mis näitab 220 volti. Ahela oomiline takistus on 40 oomi, induktiivne takistus 820 oomi ja mahtuvuseline takistus 790 oomi. Leida tegev võimsus.

Esmalt leiame ahela impetantsi

$$Z = \sqrt{R^2 + (R_i - R_c)^2} = \sqrt{40^2 + (820 - 790)^2} = 50 \Omega$$

Z ja R abil leiame $\cos\varphi$

$$\text{ja } \cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8$$

Tegev võimsus

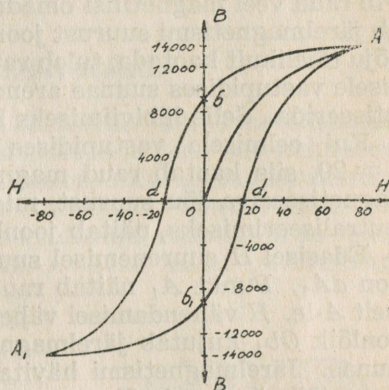
$$N = N_0 \cos\varphi = I_0 U_0 \cos\varphi = 0,44 \cdot 220 \cdot 0,8 = 77,4 \text{ vatti.}$$

VII. HÜSTEREES JA PÖÖRISVOOLUD.

§ 1. Hüsterrees.

Kehade, näiteks raua ja terase magnetiseerimisel kulutakse teatav hulk energiat nende sisemuses magnetiseerivale jõule vastutöötava koertsitiivjõu ületamiseks¹⁾). See jõud takistab ka juba magnetiseeritud keha muutumist neutraalseks. Teras evib tugevama koertsitiivjõu kui raud, seepärast kulutatakse tema magnetiseerimisel vastavalt rohkem energiat kui raua juures. Samuti hoiab teras selle jõu tõttu magnetilisi omadusi palju pikema aja kestel alal kui raud. Pehme raud kaotab päälle magnetiseeriva jõu eemaldamist suure osa tekkinud magnetilisist omadusist ja jääb üsna nõrgalt magnetiseerituks. Neid rauasse püsima jäänud nõrku magneti omadusi nimetatakse **järelmagnetismiks** (remanentne magnetism), millest vabanemiseks tuleb kulutada jällegi energiat.

Kehade omadusi ümbermagnetiseerimisel kulutada energiat, nimetatakse **magnetiliseks hüsterreesiks**. Graafiliselt kujutatakse hüsterreesi nähteid magnetiseerimise kõverjoonte abil (joon. 181), mis saadakse järgmiselt:



Joon. 181.

Asetame mingisse pooli magnetiseerimata raudpulga. Kui pooli läbib vool, siis muutub raudpulk magnetiks. Raudpulga magnetilised omadused suurenevad ühes magnetiseeriva jõu H kasvamisega, s. o. amperkeerdude arvu suurenemisega. Vastavate arvutuste abil on võimalik igale magnetiseeriva jõu suurusele H leida vastav magnetvootihedus B . Saadud andmete abil ehitatakse graafik, mida nimetatakse hüsterreesi silmuseks.

Graafiku horisontaalteljele kantakse magnetiseeriva jõu H muutused kas amperkeerdudes või tungjoontes ruutsenti-

1) Vt. ka magnetiline induksioon.

meetriks. Vertikaalteljele kantakse magnetvootihedus B sõltuvalt magnetiseerivast jõust H .

Magnetiseerimise algul, kui magneetiv jõud H on 0, ei evi raud magnetilisi omadusi. Suurendades amperkeerde, suureneb vastavalt ka magnetvootihedus. Näiteks kui $H = 20$, siis $B = 7600$; kui $H = 50$, siis $B = 12000$ jne. Igale metallisordile vastab teatav küllastuspiir, millest edasi magnetvootihedus B enam ei suurene, vaatamata magnetiseeriva jõu suurenemisele. Käesoleval juhul on raud küllastatud, kui $H = 80$. Saadud kõverjoon OA näitab antud raua esialgset magnetiseerimise käiku ja punkt A raua magnetilise külluse piiri.

Magnetiseeriva jõu vähendamisel ei ühtu magnetvootiheduse muutumise kõverjoon enam kõverjoone OA -ga, vaid muutub kõverjoone Ad järele. Kui H on vähendatud nullini, siis evib raud veel magnetilisi omadusi ja $B = 9500$. Seega kujutab järelmagnetismi suurust joonlõik Ob . Et järelmagnetismi mõju täielikult kaotada, tuleb raua magnetiseerivat jõudu eelmisele vastupidises suunas arendada, s. o. raua ümber magnetiseerida. Selle läbiviimiseks lülitatakse vool poolis ümber.

Kui eelmisele vastupidises suunas magnetiseeriv jõud $H = 20$, siis kaotab raud magnetilised omadused ja $B = 0$. Magnetiseeriva jõu suurust, mis on vajalik järelmagnetismi neutraliseerimiseks, näitab joonlõik Od .

Edasisel H suurenemisel suureneb B , mida näitab kõverjoon dA_1 . Punkt A_1 näitab raua küllastuspiiri vastassuunaliselt A -le. H vähendamisel väheneb B ja H muutudes nulliks, joonlõik Ob_1 kujutab järelmagnetismi suurust Ob -le vastassuunas. Järelmagnetismi hävitamiseks lülime poolis voolu suuna jälle ümber ja H suurenemisel B muutub kõverjoone b_1A järele.

Edasisel raua ümbermagnetiseerimisel muutub magnetvootihedus kõverjoone $AbdA_1b_1d_1A$ järele. Saadud kõverjoont nimetataksegi hüstereesi silmuseks ja kõverjoont OA neitsilikuks kaareks. Hüstereesi silmuse pind on võrdeline ümbermagnetiseerimiseks kulutatud energiaga.

Hüstereesi silmusest nähtub, et rauas tekitatav magnetvootihedus sõltub pääle väljatugevuse veel sellest, missuguses olekus raud teatava magnetvootiheduse on omandanud. Näiteks H võrdues 20-le võib rauas magnetvootihedus olla 0, 7000 või 12000. Seega pole μ muutliku väljatugevuse puhul konstantne suurus ja on isesugune suureneva ja kahaneva väljatugevusega.

Hüstereesi põhjustatud kaod sõltuvad suurel määral mag-

netiseeriva voolu sagedusest, sest voolu iga poolperioodi kes-
tes toimub ümbermagnetiseerimine. Sageduse suurenemisega
suurenevad võrdeliselt ka kaod. Need kaod arvutatakse järg-
mise empiirilise valemiga:

$$N = \eta \cdot f \cdot QB^{1,6} \cdot 10^{-7}$$

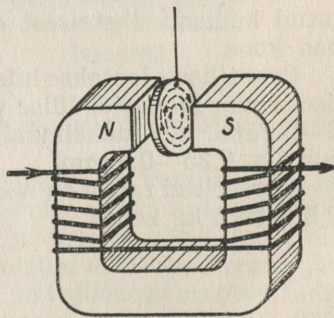
Kusjuures N on vattides, η on koefitsient, mis sõltub raua-
sordist¹⁾ ja kõigub 0,001—0,005 piirides, f magnetiseeriva
voolu sagedus, Q raudsüdamikute maht kantsentimeetris ja B
raua maksimaalne magnetvootihedus.

Väikeste sageduste puhul on rauas magnetilise hüsterese
tõttu ilmnevad kaod väga väikesed; suuremad on nad malmis
ja terases. Kui hüsterese kaod on väga suured, siis magneti-
seeritavad südamikud kuumenevad.

§ 2. Pöörivoolud.

Kui muutuv magnetvoos asetsevad suured metallmassid,
nagu elektrimasinain, transformaatoris jne., siis indutseeri-
tud voolud ei ilmne ainult mähistes, vaid ka raudsüdamikus
või magnetvoos asetsevais metallesemeis. Need voolud teki-
tavad metallmassis paljusid vooluahelaid, mille mõju on vastu-
pidine, teda põhjustavale jõule²⁾. Seda nähet iseloomustab

järgmine katse: Niidi otsas rip-
nev vaskketas võib vabalt õõt-
suda tugeva elektromagneti pool-
luste vahel (joon. 182) seni, kuni
elektromagneti mähises voolu
pole. Kui pooluste vahel teki-
tada magnetvoog, siis jääb ketas
mõne õõtse järele seisma. Pais-
tab nagu takistaks magnetvoog
ketta liikumist. Nagu igas elekt-
rijuhtmes, nii ka kettas indut-
seerub selle lõikumisel magnet-
tungjoontega elektrivool. See
vool liigub matellis, tekitades
vooluahelat. Selle voolu magnetvoog takistabki ketta liiku-
mist läbi poolustevahelise magnetvoo.



Joon. 182.

¹⁾ Määrab raua magnetilisi omadusi.

²⁾ Lenzi seadus.

Sääraseid metallmassides esinevaid voole nimetatakse **pöörivooludeks**.

Läbides metallmasse, pöörivoolud mingit kasulikku tööd ei tee, kuid põhjustavad metalli kuumenemise, s. o. soojuskaod, milleks kulutatakse teatav hulk energiat.

Pöörivoolude tekkimise takistamiseks valmistatakse muutlikus¹⁾ magnetvoos asetsevad raudmassid õhukestest paberi või lakiga üksteisest isoleeritud raudplekkidest. Pöörivoolud ei pääse läbi üksikuid plekke eraldavast isolatsioonikihist ja on seetõttu nõrgad.

Pöörivoolude kaod arvutatakse valemiga:

$$N = C \cdot f^2 \cdot d^2 \cdot Q \cdot B^2 \cdot 10^{-13}$$

kusjuures N on pöörivoolude tõttu esinevad kaod vattides, C on arv, mis sõltub rauasordist²⁾ ja kõigub 0,3—2 piirides, f on voolusagedus, d südamikku koostavate üksikute raudlehtede paksus, Q raudsüdamiku maht kantsentimeetreis ja B maksimaalne magnetvootihedus.

Pöörivoolud tekitavad nagu hüstereesi soojust. Sage-duse suurenedes pöörivoolude tõttu esinevad kaod suurenevad ruudus. Seega on suure sageduselise magnetiseeriva voolu puhul need kaod väga suured.

Pöörivoolud vähenevad tunduvalt legeeritud³⁾ raua kasutamisel. Sel puhul asetseb C 0,3—0,4 piirides.

Tavaliselt on raske pöörivoolude ja hüstereesi põhjustatud kadusid üksteisest eraldada ja seepärast arvutatakse nad koos.

Praktiliselt loetakse hüstereesi ja pöörivoolude kaod tavalises rauas 50-perioodilise voolu juures 1 kg kohta keskmiselt 3—5 vatti, kui maksimaalne $B = 10000$ ja raudlehtede paksus $d = 0,25—0,5$ mm.

Legeeritud rauas on need kaod samadel tingimustel umbes 2,5 vatti 1 kg kohta.

1) Ka liikuvus.

2) Iseloomustab raua eritakistuslikke omadusi.

3) Legeeritud rauaks nimetatakse rauda, mis sisaldab lisandeid, peamiselt ränikivi. Selletõttu raua elektrijuhtivus väheneb umbes 5 korda.

VIII. VAHELDUVVOOLU LIIGITELU JA VAHELDUVVOOLU MASINATE PÕHIMÕTTED.

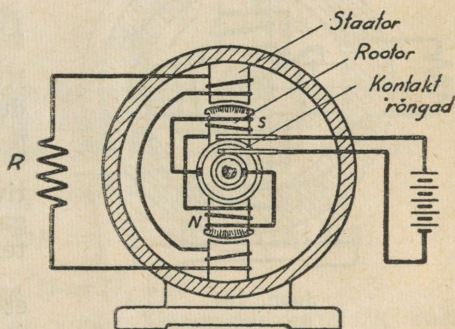
§ 1. Ühefaasiline vool.

Vahelduvvoolu tekitamiseks kasutatakse vahelduvvoolu generaatoreid, ehk n. n. alternaatoreid. See koosneb nagu alalisvoolu generaatorgi kahest pääosast — ankrust ja elektromagnetist. Peaaegu kõik kasutatavad alternaatorid on ehitatud nii, et elektromagnetid pöörlevad (joonis 183). Tavaliselt nimetatakse alternaatori pöörlevat osa **rootoriks** ja paigalseisvat osa **staatoriks**.

Alternaatoreid on **ühe- ja enamfaasilisi**. Levinenumad neist on **kolmefaasilised**.

Joonisel 183 on toodud ühefaasilise alternaatori põhimõtteline lülitus. Magnetite saamiseks juhitakse rootori mähiseisse kontakttrõngaste kaudu mingist välisest alalisvoolu allikast nn. ergutusvoolu. Tavaliselt kasutatakse ergutusvoolu allikana alternaatoriga ühel võllil asetsevat alalisvoolu generaatorit.

Rootori pöörlemisel liigub sellega kaasa magnetvoog, mis lõigates staatori mähist, indutseerib selles vahelduvvoolu. Staatori mähise keerud asetsevad staatori uurdeis (joon. 184) ja on nii jaotatud, et neis indutseeritud elektromotoorne jõud muutub siinussoidaalselt. Joonisel 183 näidatud masinas indutseeritakse terve periood, kui rootor on pöördunud 360° . On rootor ainult kahe poolusega, siis vastab täispöörde 360° magnetilisele¹⁾ kraadile. Et iga täispöörde kestes indutseeritakse sellises alternaatoris üks periood voolu, siis on

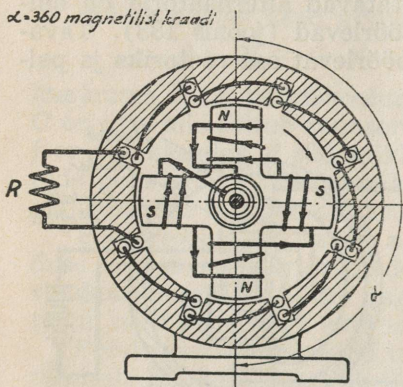


Joon. 183.

1) Kui üht ja samat mähise keerdu on lõigatud magnettingjoonte poolt kord põhja-, kord lõunapooluse möödudes, siis nimetatakse seda 360 magnetiliseks kraadiks.

50-perioodilise voolu tekitamiseks vajalik pöörete arv minutis $50 \cdot 60 = 3000$.

Kui rootor on nelja poolusega, siis ühe täispöörde ajal teeb ta 2 korda 360 magnetilist kraadi, s. o. kaks magnetilist täispööret. Seega ühe rootori täispöörde ajal lõigatakse igat staatori mähise gruppi tungjoontega kaks korda põhjapooluse ja kaks korda lõunapooluse möödumisel. Nii indutseeritakse staatori mähises ühe rootori täispöörde ajal kaks perioodi vahelduvat voolu (joon. 184).



Joon. 184.

pöörete arvu vähendada. Näiteks 50-perioodilise voolu tekitamiseks kahe pooluspaari puhul oleks vajalik rootori pöörete arv minutis 1500.

Siiani kirjeldatu kujutab endast ühefaasilise alternaatori põhimõtet. Ühefaasilisi alternaatoreid kasutatakse võrdlemisi vähe, sest nad võrreldes 2- ja 3-faasiliste alternaatoritega on elektrienergia tootlemisel vähem tasuvad.

§ 2. Kahefaasiline vool.

Kui ühefaasilise alternaatori staator varustada kahe iseseisva mähisega (joon. 185), siis rootori pöörlemisel indutseeritakse neis kummaski iseseisev elektromotoorne jõud. Kui rootor asetseb pöörlemisel mähiste $M - M$ vastas, siis on selles indutseeritud elektromotoorne jõud kõige suurem ja mähistes $M_1 - M_1$ kõige väiksem. Rotori edasisel pöörlemisel

Vahelduvvoolu alternaatori pöörete arv ja voolu sagedus on seoses järgmise valemiga:

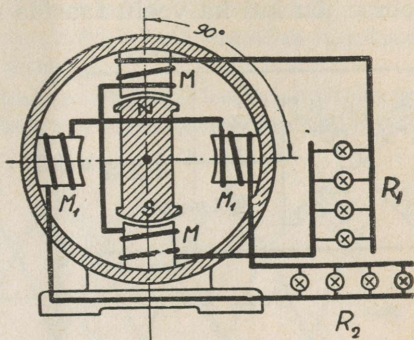
$$f = \frac{p \cdot n}{60}, \text{ kust } n = \frac{60 \cdot f}{p}$$

Kusjuures f on volusagedus, p pooluspaaride arv ja n pöörete arv minutis.

Toodud valem on kehtiv pöörlevate kui ka paigalseisvate magnetitega alternaatoritele.

Toodud valemist selgub, et pooluspaaride arvu suurenemisega on võimalik

väheneb mähiste $M - M$ indutseeritud elektromotoorne jõud, kuna mähistes $M_1 - M_1$ see kasvab. Kui rootor asetseb mähiste $M_1 - M_1$ ees, siis on neis indutseeritud elektromotoorne jõud kõige suurem ja mähistes $M - M$ kõige väiksem. Sääraselt indutseeritakse ühes alternaatoris kaks ühefaasilist voolu, mis on teineteisest 90° võrra nihutatud (joon. 186). Säärast masinat nimetatakse kahefaasiliseks alternaatoriks.



Joon. 185.

Alternaatoris on staatori mõlemad mähispaarid üksteisest 90° nurga alla asetatud ja võrdse keerdude arvuga. Neis indutseeritud elektromotoorsed jõud on võrdsed ja ühesageduselised.

Vektordiagrammist (joon. 186, b) leiame, et resulteeriv

$$OB = \sqrt{OA^2 + AB^2}$$

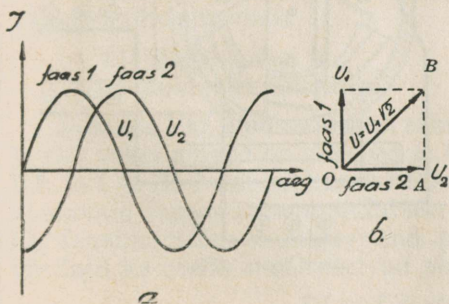
$$\text{Et } OA = AB, \text{ siis } OB = \sqrt{2 \cdot OA^2} = OA \cdot \sqrt{2};$$

$$\text{seega } U = U_1 \sqrt{2}.$$

Joonise 185 kohaselt on voolu kasutamiseks vaja kaks paari juhtmeid. Juhtmete säästmiseks kasutatakse aheldatud kahefaasilist voolu (joonis 187). Selleks ühendatakse esimese faasi mähise algus teise lõpuga. Niiviisi jääb neljas juhe ära ja keskmist juhet nimetatakse nulljuhtmeks.

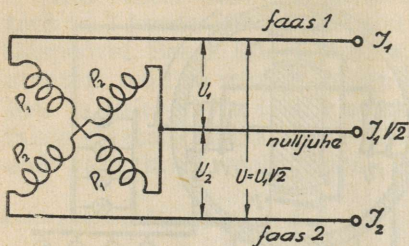
Nulljuhtme ja faasi juhtmete (äärnised juhtmed) vahel on pinged võrdsed, sest neid võib paarikaupa vaadelda kui omaette faase.

Kuid faasi juhtmete vahel mõjub üksikute faasipingete geometriline keskmine (joon. 186, b).



Joon. 186.

Mõlemal faasijuhtmel on nulljuhe ühine ja seda läbivad mõlemas faasimähises indutseeritud voolud. Et elektromotoorse jõu kui ka voolu faaside nihkenurk on 90° , siis nulljuhet läbiva voolu tugevus on üksikute voolude geomeetriline keskmine, seega



Joon. 187.

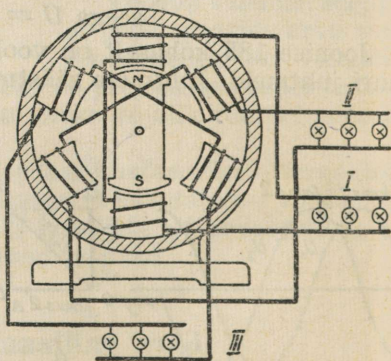
$I = I_1 \sqrt{2}$. Faasijuhtmeid läbib mõlemate faaside vool eraldi. Ühes juhtmes faasi võimsus $N_1 = I_1 U_1 \cos \varphi$ ja kahes juhtmes on faasi võimsus kaks korda suurem, seega

$$N = 2 \cdot I_1 \cdot U_1 \cdot \cos \varphi$$

Kahefaasilise voolu puhul on võimalik alternaatorite ehitusmaterjalides ja dimensioonides kokkuhoidu teostada.

§ 3. Kolmefaasiline vool.

Kui alternaatori staatori iseseisvate mähiste arv on kolm korda suurem rootori pooluspaaride arvust, siis saadakse sellest masinast kolmefaasilist voolu (joon. 188). Rootori pöörlemisel indutseeritakse igas mähises omaette vahelduvvool. Need mähisepaarid on üksteise suhtes nii asetatud, et neis indutseeritud elektromotoorsed jõud ja voolud on faasis 120° nihutatud. Kui näiteks staatori I-ses mähises indutseeritud elektromotoorne jõud on positiivses suunas (joonis 189, aa) maksimaalne, siis II-ses vool kahaneb ja III-das mähises kasvab negatiivses suunas. On elektromotoorne jõud maksimaalne II-ses mähises, siis on ta III-s mähises kahanev ja I-s mähises kasvav negatiivses suunas jne. Niiviisi on rootori pöörlemisel igas mähises indutseeritud elektromotoorsed jõud kordamööda positiivses ja negatiivses suunas maksimaalsed.

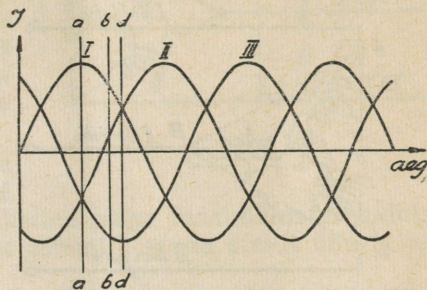


Joon. 188.

Mähised I, II ja III on võrdsete keerdude arvuga, seepärast on neis indutseeritud elektromotoorsed jõud võrdsed. Et rootor on kõigile mähistele ühine, siis on ka kõigis faasides indutseeritud voolude sagedus üks ja sama.

Jooniselt 189 nähtub, et igal vaadeldaval hetkel, näiteks aa , bb , dd , voolude faasid on niisugusel arenemisastmel, et liitmi-

sel nende summa võrdub nullile. See tähendab, et nende kolme juhtme kaudu on masina vooluahel alati suletud ja et igal hetkel ühest juhtmest voolab sama palju voolu tarvitajasse kui teist kahte mööda sealt tagasi. Sel põhjusel on võimalik kolme juhet kuue asemel, ja iga juhtme paari vahel on võimalik saada vastavalt lülitusele kas liht- või liitpinget.



Joon. 189.

Tavaliselt ei kasutata kolme faasilise voolu üksikuid faase iseseisvalt, sest siis oleks vajalik igale faasile omaette juhtmed, seega kokku 6 juhet. Juhtmete säästmiseks ühendatakse staatori mähiste algused või lõpud masinas kokku. Välisvõrk töötab siis kolmejuhtmeline, ilma et põhimõtteliselt voolu indutseerimises midagi muutuks.

Praktilist kasutamist leiavad kaks staatorimähiste omavahelist ühendusviisi:

- 1) tähtühendus ja
- 2) kolmnurkühendus.

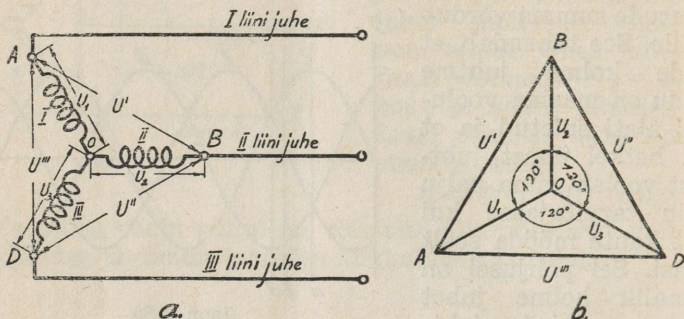
Joonisel 190, a on näidatud tähtühendus. Punktide OA , OB ja OD vahel pinged on võrdsed ja $U_1 = U_2 = U_3$. I ja II, II ja III, ja I ja III faasi juhtmevahelised pinged U^I , U^{II} ja U^{III} on vastavais faasimähiseis indutseeritud pingete resulteerivad. Et faasimähistes indutseeritud pinged on võrdsed, siis on võrdsed ka nende resulteerivad pinged ja

$$U^I = U^{II} = U^{III}$$

Resulteerivate pingete suurused leitakse võrdkülgsest kolmnurgast (joon. 190, b), kus üksikutes faasimähistes indutseeritud pinged on U_1 , U_2 ja U_3 ning nende resulteerivad pinged on U^I , U^{II} ja U^{III} . Joonisel 190, b toodud kolmnurgast

leiaime, et faasidevahelised pinged on suuremad ühes faasimähises tekitatud pingest ja

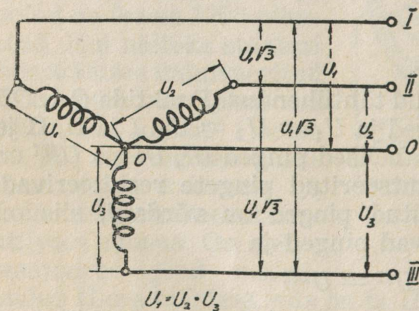
$$U^I = U^{II} = U^{III} = U_1 \sqrt{3} = U_2 \sqrt{3} = U_3 \sqrt{3}$$



Joon. 190.

Seega on faasidevaheline pinge $\sqrt{3} = 1,73$ korda suurem faasimähise pingest, kuid voolutugevused on faasimähiseis ja välisjuhtmeis võrdsed.

Tähtühenduse puhul kasutatakse sageli neljandat liini-juhet, s. o. nulljuhet. Nulljuhe ühendatakse faasimähiste ühenduskohaga (joon. 191). Säärase ühendusviisi juures saadakse



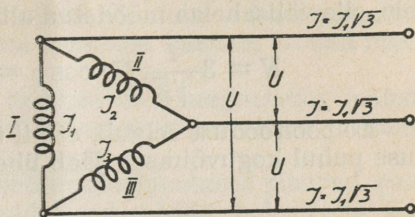
Joon. 191.

liinijuhtmete vahel kahe-suguseid pingeid. Nulljuhtme ja I, nulljuhtme ja II, nulljuhtme ja III liinijuhtme vahel mõjub vastavas faasimähises indutseeritud pinge. Kuid faasijuhtmete endi vahel mõjub kahes faasimähises indutseeritud pingete resulteeriv $U_1 \sqrt{3}$.

Tavaliselt kasutatakse nulljuhtme vahelist pinget valgustamiseks, kuid faasijuhtmete vahelist pinget, mis on suurem, elektromootorite käivitamiseks. Kui nulljuhtme

ja faasijuhtmete vaheline pinge on näiteks 220 volti, siis faasi-juhtmete vahelised pinged on $220 \cdot \sqrt{3} = 380$ V.

Kolmefaasilise voolu faasimähiste kolmnurkühendus on toodud joonisel 192. Säärases lülituses on esimese faasimähise lõpp ühendatud teise algusega, teise lõpp kolmanda algusega ja kolmanda lõpp esimese faasimähise algusega.



Joon. 192.

Kolmefaasilise voolu kolmnurka aheldamisel võrduv välisjuhtmete vaheline pinge faasimähistes indutseeritud pingetele. Seega on võimalik saada ainult ühe ja sama suurusega pingeid.

Voolutugevused on aga välisjuhtmeis suuremad kui faasimähiseis, sest iga juhet läbib kahes faasimähises indutseeritud vool. Arvutus näitab, et igas välisjuhtmes on voolutugevus $\sqrt{3}$ korda suurem faasimähises indutseeritud voolutugevusest. Et $I_1 = I_2 = I_3$, siis $I = I_1 \sqrt{3}$.

Kolmnurkühenduses puudub nulljuhe, kuid üksikute juhtmete põiklõikepinnad on $\sqrt{3}$ korda suuremad võrreldes tähtühendusega. Kolmnurkühendust kasutatakse valgustamisel ja mootorite käivitamisel.

Tähtühenduse puhul ühe faasimähise võimsus

$$N = U_1 \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Kolme faasimähise koguvõimsus on kolm korda suurem. Seega alternaatori koguvõimsus

$$N = 3 \cdot I \cdot U_1 \cdot \cos \varphi$$

Et välisjuhtmete vahelised pinged on $\sqrt{3}$ suuremad faasimähistes indutseeritud pingetest, siis tuleb saadud valemis

U_1 asendada $\frac{U}{\sqrt{3}}$ -ga.

Sääraselt saaksime:

$$N = 3 \cdot I \cdot \frac{U}{\sqrt{3}} \cos \varphi = 1,73 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

kusjuures N on võimsus vattides, I välisjuhtmeis mõõdetud voolutugevus ja U välisjuhtmete vaheline pinge.

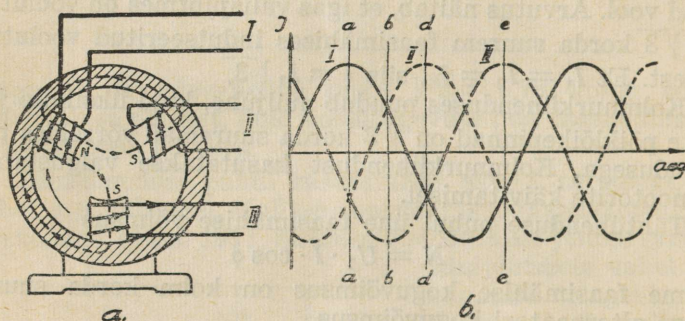
Et kolmnurkühenduse puhul on faasimähiseis indutseeritud pinged võrdsed välisjuhtmete vaheliste pingetele ja voolutugevused välisjuhtmeis $\sqrt{3}$ korda suuremad kui faasimähiseis, siis välisahelas mõõdetud alternaatori koguvõimsus

$$N = 3 \frac{I}{\sqrt{3}} U \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

Eelpooltoodust selgub, et nii täht- kui ka kolmnurkühenduse puhul koguvõimsus jääb üheks ja samaks.

§ 4. Keerlev magnetiline voog.

Kahe- ja enamfaasiliste voolude abil on võimalik tekitada keerlevat magnetvoogu. Kui juhtida alternaatori staatori mähistes kolmefaasilist voolu (joon. 193 a), siis hetkel *aa* (joon. 193, b) oleks staatori mähistes tekitatud magnetpoolu-



Joon. 193.

sed järgmiselt: I-s faasimähises on vool positiivses suunas maksimaalne, seega on selles ka magnetvoog maksimaalne. Vasakukäereegli järele moodustaks see põhjapooluse. Teises faasimähises vool samal ajal kahaneb ja kolmandas faasimähises kasvab negatiivses suunas. Nendes tekitatud magnetpoolused moodustavad esimeses faasimähises tekitatud magnetvoole lõunapooluse.

Hetkel *bb* esimeses faasimähises magnetvoog kahaneb ja teises kasvab, mõlemad moodustavad N-pooluse. Kolmandas

faasimähises on samal ajal S -poolus ja magnetvoog on maksimaalne.

Hetkel dd on teises faasimähises magnetvoog maksimaalne ja ühtlasi moodustab see põhjapooluse. Kolmandas faasimähises magnevoog kahaneb, kuna esimeses kasvab, — nad moodustavad lõunapooluse.

Hetkel ee on kolmandas faasimähises magnetvoog maksimaalne ja ta moodustab põhjapooluse, kuna teised mähised moodustavad lõunapoolused.

Sääraselt pole faasimähiseis magnetpoolused püsivad, vaid keerlevad, s. o. nad muudavad kordamööda polariteeti. Kui pooluste vahele asetada magnetnõel, siis pöörleks see magnetvooga kaasa.

Keerleva magnetvoo omadusi kasutatakse vahelduvvoolu-mootorite ehitamisel.

Kui näiteks joon. 193 a, toodud masina tsentrumi asetada metallist rootor, siis indutseeritakse faasimähistes muutuva magnetvoo poolt rootori metallis pöörisvoolud. Lenzi seaduse alusel püüavad pöörisvoolud takistada neid tekitavat põhjust, s. o. magnetvoomuutusi faasimähiseis. Seetõttu hakkab rootor pöörlema. Tõhusama tagajärje saamiseks asetatakse rootorile mähis, mis on lühiühendatud. Nimetatud mähises keerlev magnetvoog indutseerib voolu, mis oma magnetväljaga töötab vastu teda põhjustavale magnetväljale ja seetõttu põhjustabki rootori pöörlemise. Sel põhimõttel on ehitatud **asünkroonmootorid**. Säärasel mootoril puuduvad kontaktrõngad või kommutaator ja harjad, mistõttu ta käsitlemine on väga lihtis. Need mootorid esinevad väikestes ja keskmistes võimsustes ja on väga levinenud.

Vahelduvvoolu mootorid on palju mitmekesisemad võrreldes generaatoritega. Nad on nagu generaatoridki ehitatud nii, et faasimähiste ümberlülitamise teel võib neid kasutada kas täht- või kolmnurkühendustes.

*in mähis, m. kasutatakse suu-
kõrge sageduse arv. valla d?*

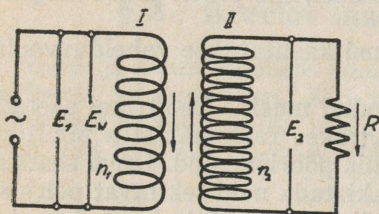
IX. TRANSFORMAATORID JA VOOLU- MUUNDAJAD.

§ 1. Transformaatorid.

Kui asetada üksteise lähedale kaks pooli, nii et esimeses poolis tekitatud magnetvoog lõikab teise pooli keerde, siis teises poolis indutseeritakse elektromotoorne jõud. Kui esimeses

poolis magnetvoo muutused toimuvad pidevalt, siis teises poolis indutseeritakse samuti pidevalt muutuv elektromotoorne jõud. Sääraseid üksteisega induktiivselt sidestatud poole (joonis 194) nimetatakse **transformaatoriks**. Selle esimest pooli nimetatakse primaar- ja teist sekundaarmähiseks.

Primaarmähise ühendamisel vahelduvvoolu allikaga tekitatakse selles muutuva suurusega magnetvoo. Kui oletada, et mähise oomilisi kadusid (J^2R) pole, siis selles indutseeritud vastuelektromotoorne jõud E_W on võrdne ja vastupidine vooluallika pingele, s. o. $E_1 = E_W$.



Joon. 194.

Eelpool tuletatud valemi kohaselt primaarpoolis muutuva magnetvoo põhjustatud vastuelektromotoorne jõud

$$E_1 = \frac{\Phi \cdot n_1}{10^8}$$

kusjuures Φ on primaarmähises tekitatud magnetvoo ja n_1 primaarmähise keerdude arv.

Kui oletada, et primaarmähises tekitatud magnetvoo lõikab kõiki sekundaarmähise keerde, siis selles indutseeritud

elektromotoorne jõud $E_2 = \frac{\Phi \cdot n_2}{10^8}$

kusjuures n_2 on sekundaarmähise keerdude arv.

Jagades nende valemite mõlemad pooled teineteisele, saame

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi \cdot n_2 \cdot 10^8}{10^8 \cdot \Phi \cdot n_1} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ kust } E_2 = \frac{n_2 \cdot E_1}{n_1}$$

Sellest selgub, et sekundaarmähises indutseeritud elektromotoorne jõud sõltub primaar- ja sekundaarmähise keerdude vahekorrast. Seda vahetegurit nimetatakse ülekandetegu-

riks (\ddot{u}) ja $\ddot{u} = \frac{n_2}{n_1}$

Sellekohaselt sekundaarmähises indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E_2 = \ddot{u} \cdot E_1$$

Nii on transformaatori abil võimalik vahelduvat pinget muuta igasugusesse soovitavasse suurusse. Kui näiteks soovitakse vahelduvat pinget 220 voldilt tõsta 880 voldile, siis

$$\ddot{u} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{880}{220} = 4$$

Kui primaarmähise keerdude arv on 1000, 2000 jne., siis peaks sekundaarmähise keerdude arv olema sellest 4 korda suurem, seega 4000, 8000 jne.

Transformaatori sekundaarmähise ühendamisel takistusega R ilmneb sekundaarmähises vool. See kantakse primaarmähises magnetilise energia näol sekundaarmähisesse. Kui oletada, et ülekandmisel mingeid energiakadusid pole, siis kantakse kõik energia primaarmähisest sekundaarmähisesse. Energia säilivusseaduse põhjal peab siis primaarmähise võimsus $E_1 I_1$ võrduma sekundaarmähises tekitatud võimsusele

$$E_2 \cdot I_2. \text{ Nõnda siis } E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2, \text{ kust } \frac{E_2}{E_1} = \frac{I_1}{I_2}$$

$$\text{Et } \frac{E_2}{E_1} = \frac{n_2}{n_1}, \text{ siis } \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ ja } I_2 = \frac{n_1 \cdot I_1}{n_2}$$

$$\text{Avaldusest } \frac{n_2}{n_1} = \ddot{u} \text{ leiame, et } \frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{\ddot{u}} \text{ ja seetõttu } I_2 = \frac{I_1}{\ddot{u}}$$

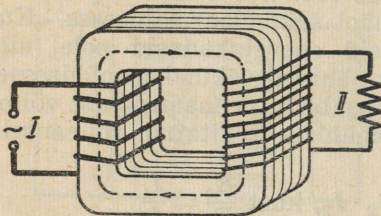
Saadust nähtub, et voolutugevus on sekundaarmähises pöördvõrdeline ülekandetegurile. Kui sekundaarmähises on pinge \ddot{u} korda suurendatud, siis on voolutugevus selles \ddot{u} korda väiksem kui primaarahelas.

Õhus, selle suure magnetilise tõkestuse tõttu, on magnet-tungjoonte hajumine väga suur, mistõttu energia ülekandmine ühest mähisest teise pole kuigi täielik. Hajumise vältimiseks asetatakse mõlemad mähised ühisele raudsüdamikule. Südamik valmistatakse magnetilise hüstereesi ja pöörisvoolude kadude vähendamiseks üksikuist raudlehtedest. Selleks kasutatakse legeeritud raudplekki, nn. transformaatori-plekki. Südamikud võivad olla, sõltuvalt transformaatori otstarbest, mitmesuguse kujuga.

Täielikuma energia ülekande saamiseks kasutatakse suletud raudsüdamikke (joon. 195), mille puhul saadakse ka sule-

tud magnetahel. Tõkestuse vähendamiseks valitakse südamikü keskmine pikkus võimalikult lühike ja põiklõikepind suur. Lubatud magnetvootihedus B on keskmiselt 10 000 tungjoont ühele ruutsentimeetrile. Kui südamikud vastavad enam-vähem toodud tingimustele, siis praktiliselt hajumisega ei arvestata.

Kui transformaatorit kasutatakse pingetõstmiseks, siis on primaarmähise keerdude arv väiksem ja jämedast isoleeritud vasktraadist. Sekundaarmähis on vastavalt suurema arvu keerdudega ja peenemast traadist, sest selles on voolutugevus nõrgem. Pingetõstmiseks valitakse mähised vastupidiselt.



Joon. 195.

Tuleb hoolitseda, et transformaatormähiseis ei tekiks isolatsioonirikkeid, sest lühühendatud keerdudes võivad ilmnedä väga tugevad voolud ja transformaatorkuueneks.

Kui transformaatori sekundaarmähis on koormuseta, siis primaarmähis moodustab endast raudsüdamikuga induktsoon-

pooli¹⁾. Sel puhul primaarmähise induktiivne takistus ωL piirab mähist läbiva voolu tugevuse ja

$$I_1 = \frac{E_1}{\omega L}$$

See voolutugevus on väga nõrk, sest E_W võrdub peaaegu E_1 -le. Seda voolu nimetatakse tühjakäigu vooluks.

Et transformaatori primaarmähise oomiline takistus on väga väike, siis tühja käigu voolu modustab pääasjalikult pimevool.

Primaar- ja sekundaarmähises indutseeritud elektromotoorsed jõud, s. o. E_W ja E_2 on vastupidise mõjuga vooluallika elektromotoorsele jõule. Selletõttu E_2 põhjustab transformaatorkoormamisel ka sekundaarahelas vastupidise voolu primaarvoolule. Nii on südamikus primaar- ja sekundaarvoolude magnetvood Φ_1 ja Φ_2 vastassuunalised, mis osalt üksteise mõju neutraliseerivad.

Südamikku jääb mõjule nende resulteeriv magnetvoo Φ_0 ja

$$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$$

¹⁾ nimetatakse ka paispooliks.

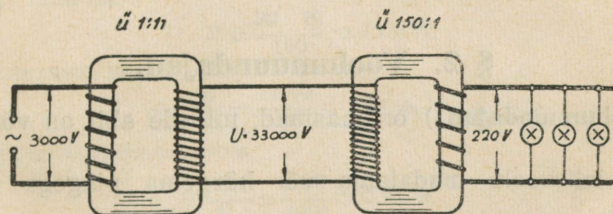
mis põhjustab primaarahelas E_W ja sekundaarahelas E_2 . Koormuse suurenedes suureneb sekundaarmähises voolutugevus, mille tõttu sekundaarmähises magnetvoog kasvab, kuid resulteeriv magnetvoog Φ_0 väheneb. Selle vähenemisega omakorda väheneb mähiste induktiivsus, seega ka primaarmähises indutseeritud vastuelektromotoorne jõud ja nüüd pääseb vooluallika pinge üha enam voolu tekitavalt mõjule. Nii suureneb primaarmähises voolutugevus vastavalt sekundaarahela koormuse suurenemisele. Seega transformaatoreid reguleerib automaatselt sekundaarahelas tarvitatavale võimsusele vastavalt primaarahela võimsust.

Täiskoormuse juures on primaarmähise induktiivsus väga väike, seega ka induktiivne takistus ωL . Nüüd mõjuvad transformaatoreid mõlemas mähises ainult oomilised takistused, seega vool ja pinge on faasis ja $\cos\varphi$ on 1.

Transformaatoreid mähiste oomilised takistused on võimalikult väikesed. Samuti on vastava südamikuga materjali puhul hüstereesi ja pöörivoolukaod minimaalsed. Transformaatoreid lubatavad kaod kõiguvad umbes 2—6% piirides.

Transformaatoreid kasutatakse sääl, kus elektriline seadise nõuab pinge kõrgendamist või alandamist. Eriti suure tähtsuse evivad nad energia ülekandmisel pikkade liinide kaudu.

Nagu teada, suurenevad juhtme oomilisel takistusel võimsuskadod võrdeliselt voolutugevuse ruuduga (I^2R) ja seepärast on juhtmeid kaudu otstarbekam edasi kanda kõrgepingelist nõrka voolu. Transformaatoreid abil muudetakse voolu trans-

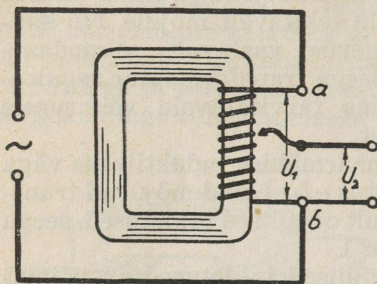


Joon. 196.

formeerimise lähtekohas (joon. 196) madalpingeline vool kõrgepingeliseks vooluks. Seejuures nõrgeneb ülekantav voolutugevus ülekandeteguri u korda. Nii vähenevad voolukaod juhtmeis. Ühtlasi on nõrga voolu puhul võimalik kasutada väiksema põiklõikega juhtmeid.

Sihtkohas muudetakse kõrgepingeline vool madalpingeliseks, vastavalt tarvitajate tööpingele.

Praktiliselt on kasutamisel ühe- ja kolmefaasilised transformatorid. Siiani kirjeldatu kujutab ühefaasilise transformatori põhimõtet. Kolmefaasiline transformator koosneb põhimõtteliselt kolmest ühefaasilisest transformatorist, mis asetsevad ühel raudsüdamikul ja on kohandatud kas täht- või kolmnurkühendustele.



Joon. 197.

langus mähises on võrdeline keerdude arvuga. Sääraselt on pinge U_2 suurus valitav pinge U_1 ja 0 vahel.

Tavaliselt kasutatakse autotransformaatorit pinge vähendamiseks. Eriti otstarbekas on ta siis, kui ülekandetegur μ on väike.

Pinge vähendamiseks kasutatakse ka transformatoreid vahelduvvoolu mõõteriistade ja signalisatsiooni seadiste juures.

§ 2. Voolumuundajad.

Voolumuundajad¹⁾ on masinad, millede abil on võimalik muuta:

- 1) alalisvoolu madalama või kõrgema pingega alalisvooluks,
- 2) alalisvoolu vahelduvvooluks ja vastupidi.
- 3) vahelduvvoolu teisesagedusliseks vahelduvvooluks.

Punkt 1-sse ja 2-sse võivad kuuluda nn. üheankur-voolumuundajad. Nende ankrule on asetatud kaks iseseisvat mähist — üks neist on mootori-, teine generaatorimähis. Kui

1) Tavaliselt nimetatakse umformeriks.

näiteks mootorimähisest voolu läbi lasta, siis ankrupöörlemisel indutseeritakse generaatorimähises kõrgem või madalam pinget.

Vastava konstruktsiooni puhul (evib kommutaatori ja kollektorringad) võib üheankur-voolumuundaja abil alalisvoolu muuta vahelduvvooluks või vastupidi.

Voolumuundajana kasutatakse veel generaatorit ja mootorit, mis on sidurdatud ühisele võllile. Sellist seadist nimetatakse mootorgeneraatoriks. Mootorgeneraatori kasutegur on võrreldes üheankur-voolumuundajaga väiksem.

Näide: 1) Soovitakse 220-voldilist vahelduvat pinget tõsta 440 voldile. Kasutada on transformaator, mille primaarmähise keerdude arv on 1600. Leida sekundaarmähise keerdude arv ja voolutugevus sekundaarahelas, kui primaarahela võimsus on 660 vatti.

$$\text{Ülekandetegur } \ddot{u} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{440}{220} = 2$$

Sekundaarmähise keerdude arv $n_2 = n_1 \cdot \ddot{u} = 1600 \cdot 2 = 3200$ keerdu.
Voolutugevus primaarahelas

$$I_1 = \frac{N_1}{E_1} = \frac{660}{220} = 3 \text{ A.}$$

Voolutugevus sekundaarmähises

$$I_2 = \frac{I_1}{\ddot{u}} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ A}$$

2) Leida juhtmete põiklõikepinnad voolu ülekandmisel 5 km kaugusele, kui liinis lubatavad kaod on 10%.

a) Kui ülekantav võimsus on 220-voldilise pingepuhul 22 kW.

b) Kui sama võimsus üle kanda 4400-voldilise pingepuhul.

a) Liini kaod

$$I^2 \cdot R = \frac{22 \cdot 10}{100} = 2,2 \text{ kW}$$

Voolutugevus liinis

$$I = \frac{N}{E_1} = \frac{22000}{220} = 100 \text{ A}$$

Seega lubatud liinitakistus

$$R = \frac{2200}{I^2} = \frac{2200}{100^2} = 0,22 \text{ } \Omega$$

Liini pikkus on 5 km. Tuleb arvestada kahe juhtme pikkusega, seega $l = 10$ km.

Et liini takistus

$$R = \frac{l \cdot c}{q}, \text{ siis } q = \frac{l \cdot c}{R} = \frac{10000 \cdot 0,018}{0,22} = 82 \text{ mm}^2$$

$$\text{Juhtme diameeter } d = \sqrt{\frac{4 \cdot 82}{3,14}} = 10,2 \text{ mm.}$$

b) Voolutugevus liinis

$$I = \frac{N}{E_2} = \frac{22000}{4400} = 5 \text{ A}$$

Olgu kaod kahes transformaatoris kokku 8%, seega liinis lubatud kaod on $10 - 8 = 2\%$. Seega kaod liinis

$$I^2 \cdot R = \frac{22 \cdot 2}{100} = 0,44 \text{ kW}$$

kust

$$R = \frac{0,44}{I^2} = \frac{440}{25} = 17,6 \ \Omega$$

$$q = \frac{l \cdot c}{R} = \frac{100000 \cdot 0,018}{17,6} = 10,2 \text{ mm}^2$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 10,2}{3,14}} = 3,5 \text{ mm.}$$

Käesoleva näite kohaselt vähenes transformaatorite kasutamisel juhtmete läbimõõt umbes 3,5 korda, kuid juhtmete kogukaal umbes 10 korda. Seega transformaatorite kasutamisega on võimalik liini ehituse ja korrashoiu kuludes teataval juhitudel suuremat säästu saavutada kui transformatorid ise maksavad.

Elektrimõõteriistad.

I. ELEKTRIMÕÕTERIISTADE PÕHIMÕTTED.

§ 1. Elektrimõõteriistade liigitelu.

Elektrimõõtmiste abil on võimalik ligemalt tuvuda elektriliste suurustega ja nende alluvusega vastavaile seadusile. Praktiliselt kohandatakse elektrimõõteriistade abil voolutarvijaile vastavad vooluallikad, kontrollitakse elektriseadiste töökorrasolekut jne.

Elektrotehnikas kasutatakse elektrilisteks mõõtmisteks mitmesuguseid mõõteriistu. Järgnevas kuuluvad vaatlusele igapäevases elektrotehnikas vajalisemad mõõteriistad, need on:

- 1) Voolutugevuse mõõtjad.
- 2) Pingemõõtjad.
- 3) Takistusemõõtjad.
- 4) Võimsuse-mõõtjad.
- 5) Voolu töö arvestajad.

Voolu tugevuse mõõtjaid nimetatakse **ampermeetriks**. Nad on normitud rahvusvahelisis mõõtühikuis — ampreis. Mõõteriistu, mis näitavad voolutugevust milli- või mikroampreis, nimetatakse vastavalt **milli-** ja **mikroampermeetriks**.

Pingemõõtjaks kasutatakse tavaliselt voolumõõtjat, mis on normitud praktilisis mõõtühikuis — voltides. Seda mõõteriista nimetatakse **voltmeetriks**. Pingemõõtjat, mis näitab pinget millivoltides, nimetatakse millivoltmeetriks.

Elektri takistuste mõõtmine sooritatakse:

- 1) **volt-** ja **ampermeetri abil**, kus saadud resultaatidega oomiseaduse abil arvutatakse elektritakistuse suurus.
- 2) **asendamise meetodiga**, kus vastava voolumõõtja ja tuntud takistuse abil leitakse mõõdetava takistuse suurus.

3) **Wheatstone'i silla meetodiga.** Täpsemad takistusmõõtjad on ehitatud sel põhimõttel.

Takistusmõõtjaid, mis näitavad takistuse suurust oomides, nimetatakse **oommeetriks**. Suuremate takistuste mõõtmiseks kasutatakse nn. megerit, mis näitab takistuse suurusi oomides või megoomides.

Mõõteriista, mis näitab elektrivõimsust vattides, nimetatakse **vattmeetriks**. Võimsusemõõtjat, mis on normitud kilovattides, nimetatakse **kilovattmeetriks**, ja mis millivattides — **millivattmeetriks**.

Alalisvoolu võimsust on võimalik mõõta lihtsalt voltmeetri ja ampermeetri abil, sest pinge ja voolutugevuse korrutis annab võimsuse vattides. Vahelduvvoolu juures tuleb saadud vattid korrutada veel $\cos\varphi$ -ga. Kui elektrivool muundatakse täielikult soojuseks, siis on võimalik leida võimsus voolutugevuse ja antud takistuse suuruse abil, kusjuures võimsus $N = I^2 \cdot R$.

Mõõteriista, mis näitab aja kestes kasutatud võimsust, s. o. registreerib elektritöö hulga, nimetatakse **arvestajaks**, tavaliselt voolulugejaks¹⁾). Normaalselt on arvestajad normitud kilovatt-tundides.

Vooluliikide järele mõõteriistad jaotuvad:

- 1) alalisvoolu mõõteriistad;
- 2) alalis- ja vahelduvvoolu mõõteriistad.

Esimest liiki mõõteriistad kõlbavad ainult alalisvoolu mõõtmiseks. Neis on kasutatud:

- a) voolu tõmbe- või tõukemõju liikuvale magnetnõelale,
- b) magneti tõmbe- või tõukemõju voolust läbitavale poolile.

Mõlemal juhul sõltub tõmbe- või tõukejõud voolusuunast.

Teise liiki kuuluvate mõõteriistadega on võimalik sooritada nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmist. Neis on kasutatud:

- a) voolu mõju pehmele rauale,
- b) voolu mõju voolule,
- d) voolu soojusttekitavat mõju metalles (metallide pikenemist soojuse mõjul).

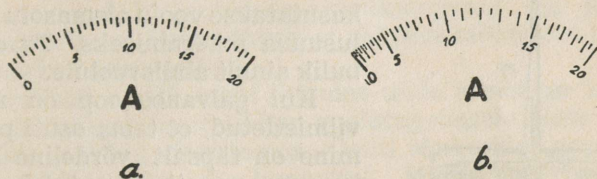
Selle liigi mõõteriistade juures voolusuund mingit tähtsust ei evi.

Tavaliselt viiakse elektrisuuruste mõõtmine üle pikkuse või nurga mõõtmisele. Selleks on mõõteriistad varustatud liikuvate või pöörlevate osadega, milledele mõjub liikuma- või

1) Elektrimõõtjaks.

pöörlemapanevalt voolu poolt tekitatud tõmbe- või tõuketung. Iga mõõteriist on varustatud seadeldisega, mis annab vastujõu elektri liikuma- või pöörlemapanevale jõule ja milleks kõige enam kasutatakse raskustungi ja vedrupainet.

Enamiku mõõteriistade liikuvad osad on pöörlevad. Need on varustatud osutiga. Osuti on selleks, et näidata elektritungi suurust. Elektrivoolu mõjul hakkab osuti oma algasendist



Joon. 198.

(nullasendist) nihkuma ja peatub säääl, kus pöörlemapanev jõud võrdub vastujõuga.

Iga mõõteriist on varustatud mõõdetavate suuruste astmikuga, millel on vastavate mõõtühikute numbrid. Sõltuvalt mõõteriista ehitusest on astmikud kaheksugused:

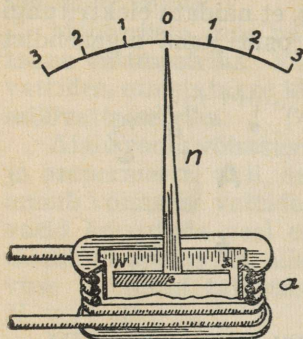
- 1) voolutugevuse jaotused võrdsete pikkustega (joon. 198, a),
- 2) voolutugevuse jaotused ebavõrdsete pikkustega (joon. 198, b).

Joonisel 198, a ja b näidatud astmikud on kradueeritud ehk normitud ampreis. Esimeselt nähtub, et jaotused on kõik võrdsed, seega on näitamise täpsus kogu astmiku ulatuses ühtlane. Teiselt näeme, et astmiku alguses on jaotused väga tihedad, seetõttu on näitamise täpsus esimeses kolmandik-astmikus väike.

§ 2. Voolutugevuse mõõtjad.

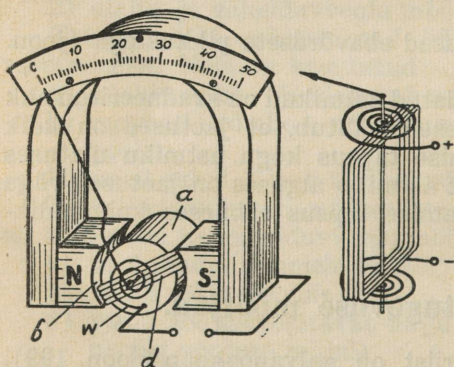
Lihtsaim elektrimõõteriist on galvanoskoop (joon. 199), mille ehitus on järgmine. Pooli *a* sees asetseb väike magnetnõel N—S, mis võib ümber oma telje pöörelda. Magnetnõela külge on kinnitatud osuti *n*. Poolist voolu läbimisel tekib pooli ühel otsal põhja-, teisel lõunapoolus. Seetõttu kallutatakse nõela üks ots alla ja teine üles. Et pooli otstel ilmnevad magnetpoolused sõltuvad pooli läbiva voolu suunast, siis kalle võib olla kord ühele kord teisele poole. Kalde suurus sõltub

voolutugevusest. On pooli läbiva voolu tugevus suur, siis on ka kalle suur, nõrgema voolu puhul on see vastavalt väiksem jne. Ühes magnetnõela pöördumisega pöörduv ka osuti nullasendist paremale või vasakule.



Joon. 199.

poolmõõteriist. Selles on kasutatud magneti mõju voolu kandvale juhtmele¹⁾. Tugeva permanentse magneti pooluskingade vahele on asetatud raudsilinder *a* (joon. 200). Silindri ja pooluskingade vahel on ühtlane kitsas õhupilu *b*.



Joon. 200.

Õhupilus asetseb ümber oma telje pöörelda võib alumiiniumraam *d*, millel on isoleeritud vasktraadist mähis. Mähise otsad on toodud kahe spiraalvedru külge. Üks neist asetseb eespool silindrit. Spiraalvedrud arendavad mähise pöördumisjõule vastujõu. Ühtlasi juhitakse nende kaudu vool mähisesse.

Mähis pöörduv, kui vool teda läbib, kusjuures ta pöördumine on võrdeline seda läbiva voolutugevusega, mistõttu pöördpoolmõõteriista astmik on ühtlase jaotusega.

1) vt. Maksvelli II seadus.

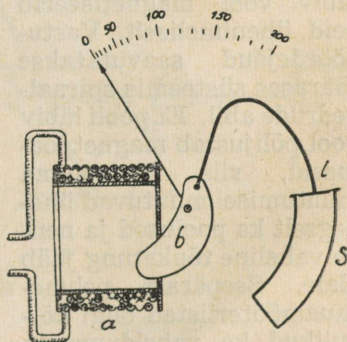
Selle mõõteriista oma voolutarvitus on väga väike, mistõttu ta evib suure tundelikkuse. Tundelikkus määratakse voolutugevusega, mis vajalik, et osuti pöörduks nullasendist maksimaalse lubatud pöördenurga võrra. Käesoleval juhul nullist paremale kuni 50 jaotuseni. Sellel kohal osuti näitaks mõõteriistaga mõõtalubatud maksimaalset voolutugevust. Keskmise hädusega mõõteriistadel on oma voolutarvitus 2—3 mA. Näiteks 2-milliamprilise oma voolutarvitusega mõõteriistal vastab 50 jaotusega astmiku puhul iga jaotus 40 mikroamprile. Sellest nähtub, et säärane mõõteriist reageerib väga nõrkadele vooludele.

Tavaliselt ei jää osuti liikudes uude asendisse kohe peatuma, vaid liigub inertsi tõttu voolutugevusele vastavas asendis mõned korrad edasi-tagasi. Osuti võnkumine osutub segavaks mõõdutagajärgede lugemisel. Mõõteriista osuti kiiremaks peatamiseks kasutatakse summutust. Selleks ehitatakse pöördpooli raam alumiiniumist või vasest. Sellise raami liikumisel magnetvoos ilmnevad raamimassis pöörivoolud. Need pidurdavad raami võnkumise ja osuti liikumise uude asendisse on aperiodiline¹⁾). Niisugust summutusviisi nimetatakse elektriliseks.

Pöördpoolmõõteriist on väga tundelik ülekoormuse vastu. Ülekoormusel võib tekkida liiga suure pöördjõu tõttu liikuva süsteemi või mõne muu selle osa mehaaniline vigastus, näiteks osuti võib kõveraks painduda. Tugev vool võib põhjustada ka mähiste ja spiraalvedrude liigset kuumenemist, isegi sulamist. Kuumenemise tagajärjel vedrude vastupöördjõud väheneb ja mõõteriist ei osutu enam küllalt täpsaks.

Kirjeldatud pöördpoolmõõteriist kõlbab ainult alalisvoolu mõõtmiseks. Vastava lisaseadeldisega (vooluõgvendajaga) varustatult on ta aga kõlbulik ka vahelduvvoolu mõõtmiseks.

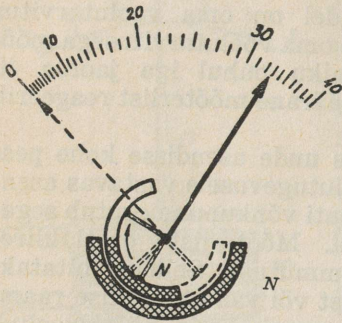
Pehmeraudmõõteriist on kõlbulik nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks. Ta koosneb paigalseisvast poolist α



Joon. 201.

1) Mitte võnkuv.

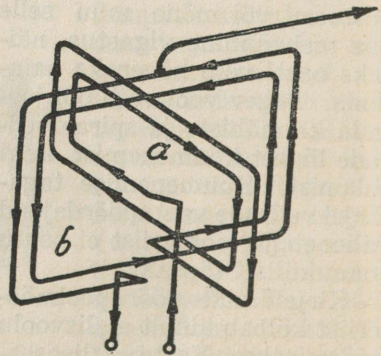
(joon. 201), mille ees asetseb liikuv pehmest rauast leheke *b*. Poolist voolu läbimisel muutub raudleheke magnetiks. Voolu ja raudlehekese magnetväljade vastastikusel mõjutusel tõmbub rauast leheke pooli sisse. Mida suurem on voolutugevus, seda sügavamale tõmbub raudleheke. Sellega on ühendatud



Joon. 202.

kinnitatud raudplekkleheke, mis asetseb teise samase, poolisisemusse kinnitatud lehekese vastas. Need lehekeseid tõukavad (joonis 202) teineteist radiaalselt eemale, kui pooli läbiv vool magnetiseerib neid ühenimeliselt. Vastupõrdejõud saavutatakse säärases süsteemis spiraalvedrude abil. Et pooli läbiv vool põhjustab magnetpooluseid, siis voolusuuna muutumisel muutuvad üheaegselt ka poolused ja nende vaheline tõuketung jääb alale. Seepärast pehme rauamõõteriistad ongi kõlbulikud ka vahelduvvoolu mõõtmiseks.

Säärase mõõteriista astmik pole võrdeline voolutugevusega. Astmiku alguses on jaotused väiksemad, mis raskendab lugemist. Jaotuse iseloom sõltub raudplekklehekese kujust. Nende vastava valiku puhul on võimalik saavutada ühtlast jaotust astmiku suurema osa ulatuses.



Joon. 203.

osuti. Nii näitab osuti lehekese pöördumisel voolutugevust. Et osuti liikumine toimuks aperiiodiliselt, siis varustatakse see (vanemais konstruktsioonides) mehaanilise summutajaga *S*. See koosneb kaarekujulisest metalltorust, milles vabalt liigub liikuva süsteemiga ühendes olev alumiiniumleheke (*l*), mille liikumist pidurdab õhk.

Uuemates pehme raudmõõteriistades kasutatakse pöörlevat süsteemi, mille telje külge on

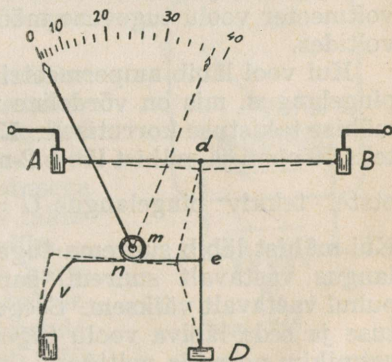
Mõõteriista astmiku jaotustes esineb lahkuminekuid alalise ja vahelduvvoolu mõotmisel. Seepärast kasutatakse teda vooluliigi mõotmiseks, millele ta on normitud. Universaal-mõõteriistad varustatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolule normitud astmikuga.

Pehmeraudmõõteriista voolu omatarvitus on võrdlemisi suur, kuid seevastu evib ta hää mehaanilise vastupidavuse. Teda kasutatakse seal, kus pole nõutav kuigi suur täpsus.

Voolude vastastikkusel mõjul põhinevad nn. **elektrodünaamilised** mõõteriistad. Need koosnevad kahest poolist (joon. 203), milledest üks on paigalseisev (*a*) ja teine liikuv (*b*). Mõlemad poolid on ühendatud järjestikku, nii et pooli keerudes on voolu suund rööpne. Nagu teada, mõjuvad ühesuunalised voolud teineteisele tõmbetungi tekitavalt, mistõttu ka liikuv pool hakkab pöörlema. Pooli pöördumisele vastujõu annavad spiraalvedrud. Pooli liikuva süsteemi külge on kinnitatud osuti. Astmiku jaotused pole ühtlased, vaid võrdelised voolutugevuse ruudule. Seepärast on ka sellel mõõteriistal astmiku esimeses osas täppis voolutugevuse lugemine raskendatud. Voolusuuna muutmisel jäävad voolusuunad poolides samuti rööpseks, seega mõjuvad nad endiselt teineteisele tõmbetungi tekitavalt. Seetõttu kõlbavad nad nii alalis- kui vahelduvvoolu mõotmiseks.

Voolu soojust tekitaval mõjul põhjaneb **kuumus-traatmõõteriist** (joon. 204). Kahe aluse *A* ja *B* vahele on kinnitatud sirgutõmmatud plaatina-iriidiumist peen traat *d*. Selle traadi keskele on kinnitatud teine traat *e*, mis teise otsaga on aluse *D* küljes. Traat *e* on kinnitatud siidniidi *n* abil terasvedru *v* külge. Nii hoiab terasvedru traadi *e* alati pingul.

Kui voolu juhtida läbi traadi *d*, siis soojeneb see. Soojenedes traat *d* pikeneb, mille tagajärjel ümber rulli *m* juhitud niit tõmmatakse vasakule. Seejuures pöörduv ka rulliga ühele völli kinnitatud osuti paremale. Summutamine teostatakse pöörisvoolule abil. Et traadis tekkiv soo-



Joon. 204.

juse hulk on võrdeline voolutugevuse ruuduga, siis pole traadi d pikenemine ühtlane, seepärast pole ka astmikujaotused võrdsed. Astmiku esimeses osas on näidatud suuruste lugemine raskendatud.

Et soojendamise ei sõltu voolu suunast, siis on kuumustraatumõõteriist kasutatav nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks. Kuumustraatumõõteriist ei allu ka mingile väli- sele magnetilisele mõjule, nagu see teiste eelpool kirjeldatud mõõteriistadega võib juhtuda.

Et kuumustraadi induktiivsus on lõpmata väike, siis näidatud voolutugevus ei sõltu sagedusest, nagu see pöördpooliga ja pehmeraudmõõteriista juures ilmneb. Seepärast on kuumustraatumõõteriist kohane ka kõrgesagedusliste voolude mõõtmiseks.

Kuumustraatumõõteriistad on täpsamad ja tundelikumad pehmeraudmõõteriistadest.

§ 3. Pingemõõtjad.

Pingemõõtjat nimetatakse **voltmeetriks**. Iseenesest on voltmeeter voolu tugevuse mõõtja, mille astmik on normitud voltides.

Kui vool läbib ampermeetri mähist, siis tekitatakse selles pingelangus, mis on võrdeline voolutugevuse ja mõõteriista mähise takistuse korrutisele. Kui mõõteriista takistus on näiteks 50 oomi ja mähist läbib 2-milliampriline vool, siis mähiste otstel tekkiv pingelangus $U = I \cdot R = \frac{2 \cdot 50}{1000} = 0,1$ volti.

Kui mähist läbib suurema tugevusega vool, siis on ka pingelangus vastavalt suurem, samuti väiksema voolutugevuse puhul vastavalt väiksem. Seega, teades mõõteriista sisetakistuse ja seda läbiva voolu tugevuse, on võimalik mõõteriista astmikku normida voltides.

Tavaliselt on kasutatavad voltmeetrid normitud otsekohe voltidesse. Suurte pingete mõõtmiseks peab voltmeeter olema suure sisetakistusega. Kuid sellise mõõteriista pöörlevate süsteemide ehitamine pole kergesti läbiviidav. Seepärast ehitatakse voltmeetrid väikese sisetakistusega ja suuremate pingete mõõtmiseks ühendatakse pöörleva süsteemi mähisega järjestikku nn. eeltakistused.

Voltmeetri astmiku jaotuste suurus sõltub, nagu ampermeetrilgi, kasutatud süsteemist, näiteks pöördpooliga volt-

meetril on kõik jaotused ühesuurused, kuna elektrodünaamilisel voltmeetril jaotused muutuvad voolutugevuse ruuduga jne.

Voltmeetrid on analoogiliselt ampermeetritele kas alalis- või alalis- ja vahelduvvoolu mõõteriistad.

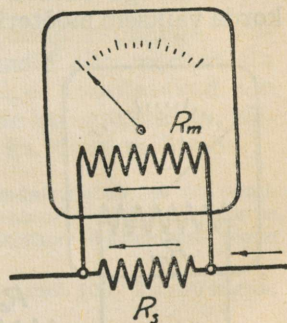
§ 4. Mõõteriistade mõõdupiirkonna laiendamine.

Konstruktiivsete omaduste tõttu on enamik mõõteriistu kõlbulikud nõrkade voolude ja väikeste pingete mõõtmiseks. Igale mõõteriistale vastab kindel mõõdupiirkond, s. o. teda ei tohi ettenähtust suurema voolutugevusega koormata ega kõrgema pingega ühendada. Kui näiteks mõõteriista maksimaalne hälve¹⁾ on 1-amprilise voolutugevuse juures, siis ei tohi teda koormata suurema voolutugevusega. Kui mõõteriista sisetakistus oleks käesoleval juhul 1 oom, siis maksimaalse hälbe saaksime ühevoldilise pingega. Nii kõlbaks säärane mõõteriist ka pingete mõõtmiseks suurusega kuni üks volt. Seega selle mõõteriista mõõdupiirkond on üks amper ja üks volt.

Mõõteriistade mõõdupiirkondi on võimalik suurendada. Kui tahetakse mõõta suuremat voolutugevust, kui lubab olemasolev ampermeeter, siis ühendatakse selle endatakestusega R_m (joon. 205) rööbiti vastav takistus R_s , mida nimetatakse **šundiks**.

Kirchhoffi seaduse järele hargneb vool harutakistustes pöördvõrdeliselt nende takistuste suurustele. Seega takistus R_s suurus tuleb mõõdetava voolu puhul valida niisugune, et mõõteriista läbiks ainult lubatud voolutugevus. Juhul, kui mõõdupiirkonda tahetakse n korda laiendada, siis mõõteriista tohib läbida voolutugevus $I_m = \frac{I}{n}$.

Kuid šunti peab läbima vool $I_s = I - \frac{I}{n} = I \cdot \frac{n-1}{n}$



Joon. 205.

1) Nurk, mille võrra osuti pöördub nullasendist kõrvale.

Kui näiteks soovitakse 2-milliamprilise mõõdupiirkonnaga mõõteriista mõõteulatust 1000 korda laiendada, siis mõõdetav vool võiks olla maksimaalselt 2 amprit. Sellest võiks 2 milliamprit läbida mõõteriista, kuna 1998 milliamprit peaks šunti läbima.

Kirchhoffi seaduse põhjal harutakistused ja haruvoolutugevused on järgmises valemilises seoses:

$$\frac{I_m}{I_s} = \frac{R_s}{R_m}, \text{ kust } I_m \cdot R_m = I_s \cdot R_s.$$

Asendades selles valemis I_m ja I_s mõõdetava voolutugevuse I kaudu, siis

$$\frac{I}{n} \cdot R_m = I \cdot \frac{n-1}{n} R_s$$

Koondades mõlemad pooled I -ga, saame:

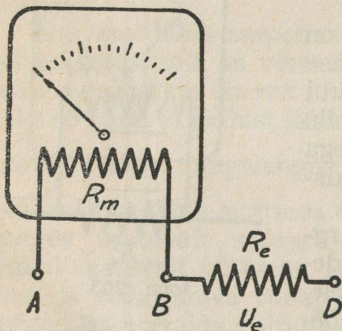
$$\frac{R_m}{n} = R_s \cdot \frac{n-1}{n}, \text{ kust } R_s = \frac{R_m}{n-1}$$

Seega tuleb ampermeetri mõõdupiirkonna laiendamiseks n korda sellega rööbiti lülitada šunt, mille takistus on $n-1$ korda väiksem mõõteriista endatakidusest. Näiteks, kui tahtakse mõõdupiirkonda laiendada 50, 100, 1000 jne. korda, siis peab šundi takistus olema vastavalt 49, 99, 999 jne. korda väiksem mõõteriista endatakidusest.

Kui tahtakse suuremaid pingeid mõõta, kui seda võimaldab olemasolev mõõteriist, siis ühendatakse selle endatakidusega järjestikku eel-**takistus** R_e (joon. 206). Olgu näiteks mõõteriista endatakidus 50 oomi ja lubatud voolu omatarvitus 2 mA, siis

mõõteriista klemmide A ja B vaheline pinge U_m võib olla $\frac{50 \cdot 2}{1000} = 0,1$ volti.

Kui sama mõõteriistaga tahtakse mõõta pinget $U = 10$ volti, siis tuleb takistusel R_e pinge $U - U_e = 10 - 0,1 = 9,9$ volti hävitada. Mõõteriista mähises jääb mõjuma vooluteki-



Joon. 206.

tavalt vaid lubatav 0,1 volti, mille juures osuti näitab terve hälve. Kui A ja D vahel mõjub väiksem pinge kui 10 volti, siis on ka takistusi R_m ja R_e läbiva voolu tugevus vastavalt väiksem. Võrdeliselt voolutugevusele väheneb ka osuti hälve ja see näitab vastava pinge suuruse.

Kui mõõdupiirkonda laiendada n korda, siis mõõdetav pinge võib olla kuni $n \cdot U_m$. Seega eeltakistusele langev pinge

$$U_e = n \cdot U_m - U_m = U_m (n - 1)$$

Asendades saadud pinge suurused voolutugevuse ja takistuste kaudu, saame:

$$I \cdot R_e = I \cdot R_m (n - 1)$$

Jagades mõlemad pooled I -ga, saame, et eeltakistus

$$R_e = R_m (n - 1)$$

Seega peab eeltakistus, mõõteriista mõõdupiirkonna laiendamisel n korda, olema $n - 1$ korda suurem mõõteriista endatakistusest.

Näiteks mõõdupiirkonna laiendamisel 50, 100, 1000 jne. korda, peab eeltakistus olema mõõteriista endatakistusest vastavalt 49, 99, 999 jne. korda suurem.

Mõõteriistu on kas ühe või mitme mõõdupiirkonnaga. Viimase juhul võivad eeltakistused ja šundid olla mõõteriista sisse ehitatud või eraldi väljaspoolt külge kinnitatavad. On olemas universaalseid mõõteriistu, millede konstruktsioon võimaldab nii alalis- ja vahelduvvoolu kui ka pinge mõõtmisi.

Näide: 1) On olemas mõõteriist, mille endatakistus on 50 oomi. Selle voolu omatarvitus on 2 mA. Kui suur peab olema šundi takistus 100-milliamprilise voolu mõõtmiseks ja eeltakistus 100-voldilise pinge mõõtmiseks.

Voolutugevuse mõõtmisel mõõdu piirkond laieneb $100 : 2 = 50$ korda. Šundi takistus

$$R_s = \frac{R_m}{n - 1} = \frac{50}{50 - 1} = 1,0204 \Omega.$$

Ilma eeltakistusega on mõõteriista pingelangus sisetakistusel $I \cdot R_m = 0,02 \cdot 50 = 0,1$ V. Antud pinge mõõtmiseks tuleb mõõteulatust laiendada $100 : 0,1 = 1000$ korda.

Seega eeltakistus

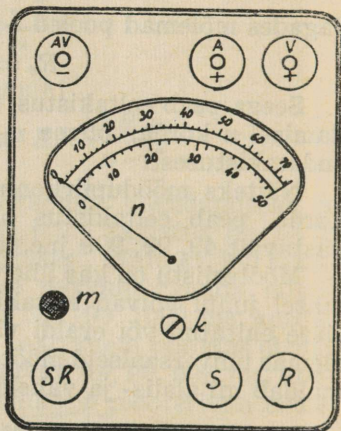
$$R_e = R_m (n - 1) = 50 \cdot (1000 - 1) = 49450 \Omega.$$

Tavaliselt valmistatakse eeltakistused suure eritakistusega traadist, nagu manganiin-, konstantaan- jne. Induktsioonmõjudest vabanemiseks mähitakse takistused bifilaarselt.

§ 5. Voolutugevuse ja pinge mõõtmine.

Mõõteriistad on varustatud vastavate klemmidega, millede külge kinnitatakse vooluallika juhtmed ja šunt või eeltakistused. Vooluallikaga ühendamiseks on klemmid tavaliselt tähistatud + ja - märgiga. Vooluallika plussjuhe ühendatakse mõõteriista + klemmiga, ja miinusjuhe - klemmiga. Alalisvoolu mõõteriistad annavad vastupidisel ühendamisel väljalöögi ka vastupidises suunas. Universaalmõõteriistadel on sageli eraldi klemmid pinge ja voolutugevuse mõõtmiseks. Tavaliselt on neil siis üks klemmidest, kas + või - klemm ühine.

Joonisel 207 on näitena toodud ühe universaalmõõteriista esiplaat. Sellel on voolutugevuse ja pinge mõõtmiseks miinus-klemm ühine, mis märgitud AV-ga. Sellega ühendatakse voolutugevuse kui ka pinge mõõtmisel miinusjuhe. Voolutugevuse mõõtmisel ühendatakse plussjuhe A-ga märgitud klemmiga, ühtlasi kinnitatakse vastav šunt klemmide SR ja S alla. Pinge mõõtmisel kinnitatakse vastav eeltakistus klemmide SR ja R alla ja plussjuhe V-ga märgitud klemmiga.



Joon. 207.

Kruvi *K* abil reguleeritakse vajaduse korral osuti *n* nullasendisse. Nupu *m* abil ühendatakse mõõteriista pöörlev süsteem vooluahelasse.

Näidatud mõõteriista astmik on ühine voolutugevusele ja pingele.

Vastavalt šuntidele ja lisatakistustele on astmik kahes osas. Ülemine koosneb 75-st ja alumine 50-st võrdsest osast.

Igale jaotusele vastav pinge või voolutugevuse suurus leitakse lisatakistuse või šundi suurusi määrava arvu jagamisel kasutatava astmiku osa jaotuste arvule. Kui näiteks kasutatakse 75-voldilist eeltakistust, siis hälbe lugemise hõlbustamiseks on otstarbekas kasutada astmiku ülemist osa. Iga jao-

tus vastaks sel juhul $\frac{75}{75} = 1$ voldile.

Viieamprilise šundi puhul tuleks kasutada astmiku alumist osa, siis ühele jaotusele vastaks 5 : 50 – 0,1 amprit.

Üldiselt on mõõteriistu väga mitmetüübilisi. Igakord tuleb enne nende kasutamist põhjalikult tutvuda mõõteriista omaduste ja käsitsemisega.

Voolutugevuse mõõtmisel ühendatakse ampermeeter (või universaalmõõteriist ampermeetrina) vooluallikaga järjestikku (joon. 208, a). Siis läbib mõõteriista kõik ahelas olev vool. Millalgi ei tohi ampermeetri vooluallikaga rööbiti ühendada, sest siis võib mõõteriista läbida palju kordi lubatust tugevam vool, mis rikub mõõteriista.

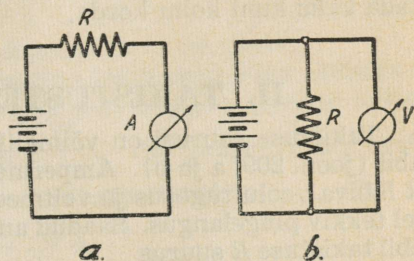
Pinge mõõtmiseks ühendatakse voltmeeter (või universaalmõõteriist voltmeetrina) vooluallikaga (joon. 208, b) rööbiti. Üldiselt ühendatakse voltmeeter nende kahe punktiga, millede vahelist pinget tahetakse mõõta.

Enne mõõtma asumist tuleb umbkaudu selgusele jõuda mõõdetava pinge suuruses või voolutugevuses. Vastavalt neile suurusile valitakse kas šunt või eeltakistus. Näiteks kui mõõdetava voolu suurus võiks olla umbes 3 amprit, siis valitakse vähemalt 5-ampriline šunt. Kui nüüd selgub juba enamvähem täppis voolutugevus, siis valitakse suurema täpsuse saavutamiseks vastavalt väiksem šunt. Soovitav on alati mõõtmist alata suuremate šuntidega või eeltakistusega ja alles mõõduandmete ligikaudsel selgumisel neid vastavalt vähendada.

Mõõtmisel tuleb võimalikult vältida mõõtmise vigu, sest sellest oleneb mõõtmisresultaadi täpsus.

Enne mõõtmist tuleb mõõteriista kontrollida ja leitud vead mõõteriista vead kõrvaldada. Tavaliselt esineb kõige enam nullpunkti vigu, mille kõrvaldamiseks tuleb enne mõõtmisi vastava kruvi abil osuti nullpunktile reguleerida.

Individaalsed vead esinevad peaaesjalikult šuntide ja eeltakistuste kasutamisel¹⁾ ning hälbe lugemisel. Eriti kergesti



Joon. 208.

¹⁾ Šundid ja eeltakistused tulevad valida vastavalt mõõdupiirkonnale; näiteks 4-milliamprilise voolutugevuse mõõtmiseks pole otstarbne kasutada 500-milliamprilist šunti, vaid šunti 5–10 mA. Suuremate šuntide puhul pole täpne mõõduresultaadi hinne võimalik.

võib eksida jaotuse murdosa hinnangul. Üldiselt tuleb jaotusi lugeda ülalt osutile otse vaadates. Paremad mõõteriistad on lugemise hõlbustamiseks varustatud peegliga. Peegliga mõõteriistalt jaotuste lugemisel vaadatakse samuti otse ülalt nii, et osuti katab oma peegelpildi.

Mõõtmiskogemusi omandades individuaalvead vähenevad. Tavaliselt tuleb algajail seepärast üht ja sama mõõtmist sooritada kaks kuni kolm korda.

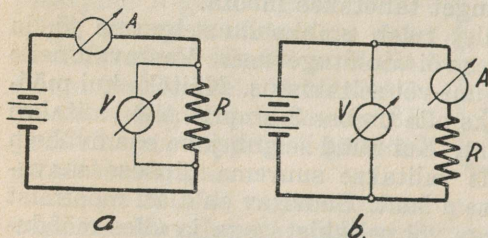
II. TAKISTUSTE MÕÖTMINE.

Takistuse suurusi on võimalik leida volt- ja ampermeetri abil (joon. 209, a ja b). Ampermeetriga mõõdetakse takistust R läbiva voolu tugevus ja voltmeetriga leitakse takistuse otstel tekkiv pingelangus. Saadud andmeist leitakse oomiseaduse abil takistuse R suurus

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

Säärasel viisil läbiviidud takistuse mõõtmine pole eriti täppis. Näiteks, joonisel 209, a näitab ampermeeter ka voolutugevuse, mis läbib voltmeetri. Seepärast tuleb arvestada voltmeetri läbiva voolu tugevusega; ja siis

$$R = \frac{U}{I - I_V}$$



Joon. 209.

kusjuures U on voltmeetri näidatud pingelangus takistusel R , I ampermeetri näidatud voolutugevus ja I_V voltmeetri läbiv voolutugevus.

Joonisel 209, b toodud ühendusviisil näitab voltmeeter ka pingelanguse ampermeetri sisetakistuses. Seepärast takistuse R otstel mõjuv pinge on voltmeetri näidatud pingest väiksem ja nõnda siis

$$R = \frac{U - U_A}{I}$$

Kusjuures U on voltmeetri näidatud pinge, U_A pingelangus ampermeetris ja I takistust R läbiva voolu tugevus.

I_V ja U_A suurused leitakse järgmiselt:

I_V leidmiseks peab teada olema voltmeetri omavoolutarvitus I_m . Kui voltmeetri astmiku jaotuste arv on n , siis iga jaotuse näitamiseks peab läbima voltmeetrit vool tugevusega $\frac{I_m}{n}$. Näidaku voltmeetri osuti n_1 jaotust, siis voltmeetri voolutarvitus

$$I_V = \frac{I_m}{n} \cdot n_1$$

U_A leidmiseks talitatakse analoogiliselt eelmisele.

Kui ampermeetri sisetakistuses tekib osuti kogu astmiku n jaotuse näitamiseks pingelangus U_m , siis ühe jaotuse näitamiseks on vajalik pingelangus $\frac{U_m}{n}$. Kui ampermeetri osuti näitab n_1 jaotust, siis pingelangus ampermeetris

$$U_A = \frac{U_m}{n} n_1$$

Näide: 1) Voltmeetri astmik on 50 jaotusega ja mõõteriista omavoolutarvitus on 2 mA. Mõõtmisel osuti näitab 20 jaotust. Leida voltmeetri voolutarvitus.

$$I_V = \frac{I_m}{n} \cdot n_1 = \frac{2}{50} \cdot 20 = 0,8 \text{ mA.}$$

2) Ampermeetri takistuses tekkiv pingelangus täishälbe puhul on 0,1 V. Osuti näitab 25 jaotust. Leida pingelangus ampermeetris, kui astmik on 75 jaotusega.

$$U_A = \frac{0,1}{75} \cdot 25 = 0,033 \text{ volti.}$$

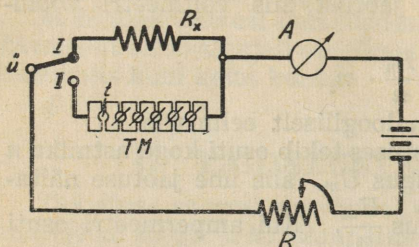
Kui mõõtmiseks kasutatavad mõõteriistad on kõrgeväärtuslikud, siis suurused I_V ja U_A on väga väikesed võrreldes U ja I -ga. Nii viisi saab takistuse arvutamisel enam-vähem rahuldava tulemuse ka avalduse abil

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

Tavaliselt arvestatakse I_V ja U_A -ga ainult siis, kui on vajalik suur täpsus.

Täpsamaid tagajärgi takistuse mõõtmisel saavutatakse asendamise meetodiga (joon. 210). Mõõtmise algusel ühendatakse ümberlüüja \ddot{u} tundmatu takistusega R_x . Seejärel reguleeritakse muudetava takistuse R -ga voolutugevust aelas niikaua, kuni ampermeeter A mingi selgesti loetava voolutugevuse suuruse näitab; näiteks 50 mA, 400 mA, 1 A jne. Seejärel ühendatakse \ddot{u} takistusmagasiniga TM , millest mingit suurema takistuse topits t (näiteks 2000 oomi) on välja võetud. Siis vähendatakse või suurendatakse topitsate

abil takistusmagasini takistust seni, kuni ampermeeter näitab sama voolutugevust, mis esimeseski asendis. Mõõduresultaadi täpsuse kontrollimiseks ühendatakse lüliti veel R_x -ga. Ampermeeter peab mõlemas asendis üht ja sama voolutugevust näitama. Nüüd loetakse takistusmagasini selle takistuse suurus ja see võrdub R_x -le.



Joon. 210.

Takistusmagasini ei tohi koormata suurema koormusega kui sellel märgitud. Olgu selle lubatud koormus näiteks 3 vatti, siis

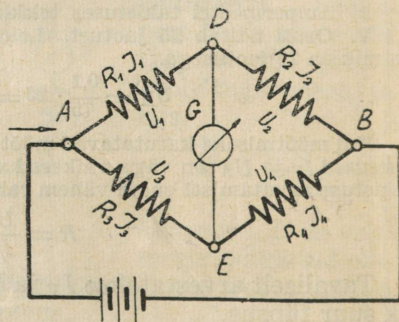
$$I^2 \cdot R_{TM} \leq 3$$

Koormuse vähendamiseks tuleb valida võrdlus-voolutugevusele vastavalt väiksem suurus.

Takistusmagasini asemel võib sama edukalt kasutada mõnd teist tuntud takistuste kombinatsiooni.

Takistuste täpsamaks mõõtmiseks kasutatakse nelja takistuse süsteemi, n. n. **Wheatstone'i silla meetodit** (joon. 211).

Jooniselt näeme, et vool hargneb punktis A kaheks. Üks osa voolust läbib takistuse R_1 ja R_2 ja teine osa takistuse R_3 ja R_4 . Punktis B need voolud ühinevad uuesti. Harutakistusi läbib vool tekitab neis pingelangused. Oletame, et harutakistustes tekitatud pingelangused on punktis D ja E võrdsed, siis nende vahele ühendatud galvanomeeter ka mingit voolu ei näita.



Joon. 211.

On D ja E vaheline potentsiaal erinev, siis ilmneb läbi mõõteriista vool kõrgema potentsiaaliga punktist madalama potentsiaaliga punkti.

Võtame aluseks, et D ja E evivad võrdse potentsiaali ning selgitame, missuguses vahekorras harutakistused siis üksteisega on. Sel puhul läbib takistust R_1 ja R_2 ühe ja sama tugevusega vool ja $I_1 = I_2$. Samuti takistusi R_3 ja R_4 läbib

vool on samatugevuseline ja $I_3 = I_4$. Et punktide D ja E potentsiaalid on võrdsed, siis peab U_1 võrduma U_3 -le ja U_2 võrduma U_4 -le. Selle arutluse kohaselt leiame, et

$$U_1 = I_1 \cdot R_1, \text{ et } U_1 = U_3, \text{ siis } U_1 = I_3 \cdot R_3$$

$$U_2 = I_1 \cdot R_2, \text{ et } U_2 = U_4, \text{ siis } U_2 = I_3 \cdot R_4$$

Nii saame kaks võrrandit, kus

$$I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3$$

$$\text{ja } I_1 \cdot R_2 = I_3 \cdot R_4$$

Jagades valemite mõlemad pooled üksteisega, saame:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \text{ kust } R_3 = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2}$$

Saadust selgub, et kolme tuntud takistuse abil on võimalik leida neljas tundmata takistus.

Mõõtmisel seatakse kokku vastavalt joonisele 211 silia lülitus, milles näitena R_3 oleks tundmata takistus, kuid R_1 , R_2 ja R_4 oleksid tuntud takistused. Reguleeritakse tuntud takistuste suurusi seni, kuni sillas saavutatakse tasakaal, s. o. kui galvanomeeter voolu enam ei näita, siis võime kirjutada, et

$$R_x = \frac{R_1 \cdot R_4}{R_2}$$

Tavaliselt valitakse R_1 ja R_2 suurused nii, et nende suhe

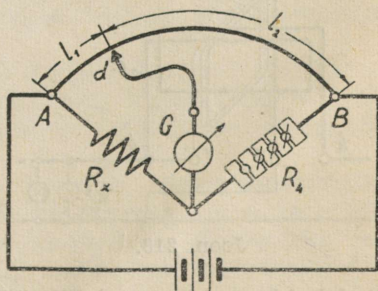
$\frac{R_1}{R_2} = k$ on võrdne ühega või mõne detsimaalse arvuga, näit.

0,1, 1, 10 jne. Siis muudetakse ainult takistuse R_4 suurust mõne tuntud takistuse (TM) abil seni, kuni saavutatakse sillas tasakaal. Kui R_3 esineb tundmata takistusena, siis sel juhul

$$R_x = R_4 \cdot k$$

Kirjeldatud meetod on kohane suuremate takistuste mõõtmiseks — umbes 30 oomist alates.

Takistusi kuni 30 oomi leitakse lihtsamalt. Siis kasutatakse R_1 ja R_2 asemel ühtlase jämedusega takistustraati, millel libiseb kontakt d (joon. 212). Kontakti d



Joon. 212.

asendit ja R_4 suurust muutes leitakse olukord, kus galvanomeeter voolu ei näita. Siis selles lülituses suhtuvad tundmata takistus ja R_4 nii nagu silla traadi õlgade l_1 ja l_2 pikkused, ja

$$R_x = \frac{l_1 \cdot R_4}{l_2}$$

Üldiselt on silla tundelikkus võrdeline galvanomeetri tundelikkusega, kuid täpsus on seda parem, mida rohkem takistuste R_1 , R_2 , R_3 ja R_4 suurused üksteisele lähenevad.

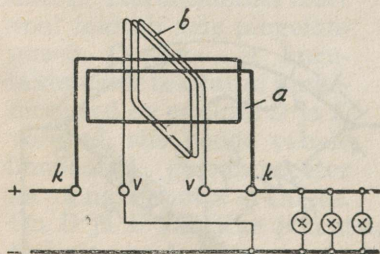
Mõõtmisvigade vältimiseks tuleb reguleeritavate takistuste suurusi niikaua muuta, kuni mõõteriist mingit voolu ei näita. Eriti väikeste takistuste puhul (alla 0,1 oomi) Wheatstone'i sild enam ei kõlba, sest mõõtmisvigade põhjustajaks kergesti võivad olla ebahühtlased ja pikad ühendusjuhtmed.

Wheatstone'i silla meetodit kasutatakse veel induktiivsuse, mahtuvuse jne. mõõtmiseks.

Takistuse mõõtmiseks kasutatakse ka sageli veel volt- või ampermeetreid, mis on normitud oomides, voltide või amprite asemel. Nende mõõtmistäpsus pole kuigi suur.

III. VÕIMSUSEMÕÖTJAD JA VOOLUTÖÖ ARVESTAJAD.

Võimsuse mõõtmine sooritatakse vattmeetriga, mis kujundab endast elektrodünaamilist mõõteriista (joon. 213). Ta koosneb kahest iseseisvast üksteisega induktiivselt sidestatud mähisest. Mähis a on paigalseisev ja mähis b võib pöörelda ümber oma telje.



Joon. 213.

Paigalseisev mähis on jämedast vasktraadist ja ühendatakse klemmidega $k-k$ vooluahelasse järjestikku. Teda läbib kogu ahela vool¹⁾.

Liikuv mähis²⁾ on valmistatud peenikesest traadist ja lülitatakse voolutarvitajale klemmide $v-v$ abil rööbiti. Selle mähise külge kinni-

1) Kujutab endast ampermeetri mähist.

2) Kujutab endast voltmeetri mähist.

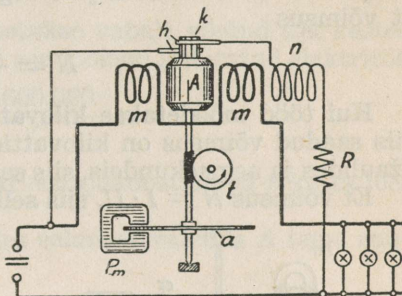
tatakse ka mõõteriista osuti. Pöördejõule vastujõud tekita- takse vedrupainde abil.

Vattmeetri lülimisel vooluahelasse on mähiste vahel mõjuv jõud võrdeline mähiseid läbiva voolu tugevuste korrutisele, seega ka võimsusele $N = I \cdot U$.

Vattmeetrid on normitud kas vattides või kilovattides. Alalisvoolu puhul vattmeeter näitab otsekohe võimsuse, kuna vahelduvvoolu puhul tuleb arvestada ka $\cos\varphi$ -ga.

Voolutöö arvestajad on alalis- ja vahelduvvoolude jaoks erinevad. Alalisvoolu arvestaja kujutab endast väikest mootorit (joon. 214). Siin on tegevuses samuti nagu vattmeetri- gi juures kaks iseseisvat mä-

hist. Mähis m — m on ühen- datud vooluahelasse jär- jestikku. Seda läbib kogu tarvitatud vool. See mähis tekitab ergutusmagnetvoo. Ankrumähis A on kommu- taatori k , harjade h , lisa- mähise¹⁾ n ja eeltakistuse R kaudu tarvitajale rööbiti ühendatud. Ankur pöörleb mähiseid m — m ja ankrumähist A läbivate voolude vastastikusel mõjutusel.



Joon. 214.

Ankrumähiseid m — m ja ankrumähist A läbivate voolude vastastikusel mõjutusel. Ankru pöörlemiskiirus on võrdeline mähiseid läbiva voolu tugevuste korrutisele nagu vattmeetriski.

Ankrumähiseid m — m ja ankrumähist A läbivate voolude vastastikusel mõjutusel. Ankru pöörlemiskiiruse reguleerimiseks on selle völli ase- tatud alumiiniumist ketas a , mis liigub permanentse magneti Pm pooluste vahel. Pidurdamine toimub kettas ilmnevate pöörisevoolude tõttu.

Ankrumähiseid m — m ja ankrumähist A läbivate voolude vastastikusel mõjutusel. Ankru pöörlemiskiiruse reguleerimiseks on selle völli ase- tatud alumiiniumist ketas a , mis liigub permanentse magneti Pm pooluste vahel. Pidurdamine toimub kettas ilmnevate pöörisevoolude tõttu.

Vahelduvvoolu arvestaja koosneb alumiiniumkettast a (joon. 215), mis pöörleb kahe elektromagneti m ja n vahel. Elektromagneti m mähis on vooluahelas järjestikku ja n -mähis rööbiti lülitatud. Nende mähiste magnetväljade mõju- tusel ilmnevad kettas pöörisevoolud, mistõttu ketas pöörleb.

1) Lisamähise ülesanne on liikuvate osade hõõrumiskadude kom- penseerimine.

Muus osas sarnleb ta alalisvoolu arvestajale. Kirjeldatud vahelduvvoolu arvestajat nimetatakse induktsioonarvestajaks. Pääle eelpool kirjeldatute on veel olemas mitmeid teisi vähem tarvitataavaid arvestajatüüpe.

Elektrivoolu arvestajaid on võimalik kasutada võimsuse, voolutugevuse ja elektrilise takistuse mõõtmiseks, ilma et seejuures oleks tarvis watt-, amper-, voltmeetrit jne. Me teame, et elektri tööühikud on wattsekund (džaul) ja kilovatt-tund (3.600.000 džauli) ja et elektri töö hulk

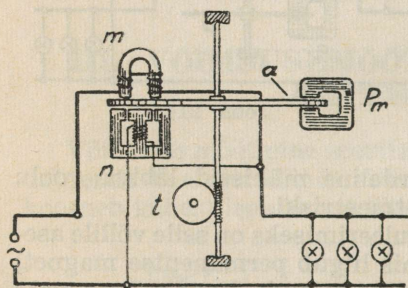
$$A = N \cdot t$$

kusjuures N on võimsus ja t aeg sekundeis. Sellest järeldub, et võimsus

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

Kui tööd mõõdetakse kilovatt-tundides ja aega tundides, siis saadud võimsus on kilovattides, kui aga töö mõõdetakse džaulides ja aeg sekundeis, siis saame võimsuse ka vattides.

Et võimsus $N = I \cdot U$, siis sellest leiame I , kui teada on U .



Joon. 215.

kohe elektritöö abil, siis

$$I = \frac{A}{U \cdot t}$$

kusjuures A on džaulides, I ampreis, U voltides ja aeg sekundeis.

Takistuse suuruse leiame nüüd oomiseaduse abil $R = \frac{U^2}{I}$

1) Vahelduva voolu puhul J ja U on efektiivsed suurused. Voolutugevuse arvutamiseks tuleb valemit täiendada $\cos\varphi$ -ga.

2) Vahelduva voolu puhul saame impetantsi.

Tavaliselt kasutatakse arvestajat elektrivõrkudes, mille pinge U on teada ja mille suurus praktiliseks otstarbeks on küllalt püsiv. Siis voolutugevus

$$I = \frac{N^1}{U}$$

Selles valemis esineb võimsus N vattides, I ampreis ja U voltides. Sama võib leida ka otse-

Arvestajal on peaosaks pöörlev ketas a või ankur. Mõõdetud elektri tööhulk on võrdeline ketta või ankru tiirude arvuga. Niiviisi iga džaulile, vatt-tunnile ja kilovatt-tunnile vastab kindel ketta tiirude arv C . Tavaliselt nimetatakse C -d arvestajakonstandiks ja antakse ühe kilovatt-tunni kohta. Nii näitab C ketta tiirude arvu, mida teeb ketas ühe kilovatt-tunnilise elektritöö kestes.

Seega ketta C tiirude arvule vastab 1 kWt ehk 3 600 000 džauli, kuid ketta ühele tiirule vastab siis

$$\frac{1}{C} \text{ kWt või } \frac{3.600.000}{C} \text{ džauli}$$

Võimsuse määramiseks loetakse vabalt võetud aja kestes ketta tiirude¹⁾ arv n . Siis selle aja jooksul kulutatud elektritöö

$$A = \frac{3.600.000}{C} \cdot n$$

kusjuures A on džaulides, C arvestajakonstant ja n ketta loetud tiirude arv.

Et $A = N \cdot t$, siis asendades eelmises valemis A tema suuruste kaudu, saame:

$$N \cdot t = \frac{3.600.000 \cdot n}{C}, \text{ kust } N = \frac{3.600.000 \cdot n}{C \cdot t}$$

kusjuures N on võimsus vattides ja t aeg sekundeis, teiste tähtede tähendused on samad, mis eelpool antud.

Viimast valemit võib veel lihtsustada vastavalt igale arvestajale, kui teada on selle konstant.

Olgu näiteks meil arvestaja, mille konstant $C = 2400$, siis võimsus

$$N = \frac{3.600.000 \cdot n}{C \cdot t} = \frac{3.600.000 \cdot n}{2400 \cdot t} = \frac{1500 \cdot n}{t}$$

Niiviisi saame antud arvestajale võimsuse arvestamise valemi, kus N on vattides, n on loetud tiirude arv ja t aeg sekundeis, mille kestel ketas tegi loetud n tiiru.

Näide: 1) Triikraua kasutamisel tegi arvestaja ketas 30 tiiru ühe minuti jooksul. Leida triikrauas kulutatud võimsus, seda läbiv voolu-

1) Ketta tiirlemine on arvestaja esiplaadil olevast väikesest aknakesest näha.

tugevus ja triikraua takistus, kui võrgupinge on 220 volti ja arvestaja-konstant 3600.

$$\text{Võimsus } N = \frac{3.600.000 \cdot n}{C \cdot t} = \frac{3.600.000 \cdot 30}{3600 \cdot 60} = 500 \text{ vatti.}$$

$$\text{Valemist } N = I \cdot U \text{ leiame, et } I = \frac{N}{U} = \frac{500}{220} = 2,27 \text{ amprit.}$$

$$\text{Triikraua takistus } R = \frac{U}{I} = \frac{220}{2,27} = 96,9 \Omega$$

2) Vooluarvestaja abil leitud võimsus on 600 vatti. Vahelduvvoolu allika pinge on 220 volti ja voolutugevus ahelas on 3 amprit. Leida $\cos \varphi$?

$$\text{Võimsus } N = I \cdot U \cdot \cos \varphi$$

$$\text{ja } \cos \varphi = \frac{N}{I \cdot U} = \frac{600}{220 \cdot 3} = 0,91$$

*kollektor mootorid.
repulsi mootorid
ahel ühe mootori ja
uniform.*

Hind kr. 3.50