

*Eesti NSV Ministrite Nõukogu
Riikliku Kõrgema ja Kesk-õhariduse Komitee
Teaduslik-metoodiline Kabinet*

J. NAEL, E. NERO

ELEKTRI- MÕÕTMISED

*Tallinn
1965*

Tagastage raamat õigeaegselt!

103176 Возвратите книгу вовремя!

12521				

NA

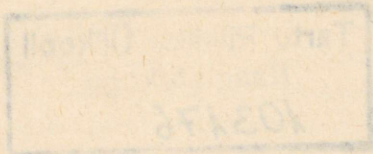
A-27600

Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riikliku
Kõrgema ja Keske-erihariduse Komitee
Teaduslik-metoodiline Kabinet

J. Nael, E. Nero

ELEKTRIMÕOTMISED

Konspekt



Tallinn 1966

Государственный комитет высшего
и среднего специального образования
Совета Министров ЭССР

Ю. Наел, Э. Неро
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Конспект
На эстонском языке

Eesti NSV Ministrite Nõukogu Riikliku
Kõrgema ja Kesk-erihariduse Komitee
Õppe-metoodilise Töö Valitsuse poolt
lubatud kasutada õppevahendina tehnikumides

N



Toimetaja L. Abo

Trükkimisele antud 18. XI 65. Paber 60x84, 1/16
Trükipg. 11,0. Tingpg. 10,23. Tiraaž 500
MB-10181. TPI rotaprint. 1966. Tell. nr. 486
Hind 36 kop.

E e s s õ n a

Käesolev konspekt on ette nähtud Tallinna Polütehnikumi kaugõppeosakonna õpilastele, kuid on kasutatav ka päevas ja õhtuses osakonnas. Konspekt vastab täielikult kõikide erialade elektrimõõtmiste programmi nõudeile, välja arvatud elektrimõõteriistade tootmise eriala. Konspekt on ka sellel erialal kasutatav, kuid mõningad peatükid ei käsitle kõiki probleeme ja paar vajalikku peatükki puuduvad.

Sissejuhatus

Elektrimõõtmistel on tehnikas ja teaduses suur tähtsus. Mõõtmisteta pole võimalik kontrollida elektriseadmete töörežiime ega arvestada toodetud või tarbitud elektrienergiat. Tehnoloogilisi protsesse iseloomustavaid parameetreid (temperatuur, niiskus, rõhk jt.) mõõdetakse tänapäeval sageli mitteelektriliste suuruste elektriliste mõõteriistadega. NLKP XXII kongressile järgnenud kommunismi materiaaltehnilise baasi loomise ajajärgul laieneb järjest tootmisprotsesside automatiseerimine. Automatiseerimisel rakendatakse ulatuslikult automaatjuhtimist teostavate kontaktidega elektrilisi mõõteriistu. Laialdaselt kasutatakse elektrimõõteriistu füüsikas, meditsiinis, kosmose- ja raketitehnikas. Elektrimõõteriistade osatähtsuse suurenemist rahvamajanduses iseloomustavad järgmised arvud, mis väljendavad NSV Liidus toodetavate elektrimõõteriistade tüüpide arvu suurenemist:

1943. aastal toodeti	33 tüüpi,
1950. " "	135 " ,
1960. " "	388 " ,
1962. " "	450 " ,
1965. " "	toodetakse üle 700 tüüpi.

1965. aastaks suurenes elektrimõõteriistade toodang 1960. aastaga võrreldes üle 3 korra. Uute tüüpide väljatöötamise eesmärgiks on suurendada riistade täpsust, tundlikkust ja töökindlust ning vähendada omatarvet. Tootmisse on juurutatud mitmeid rasketele eksploatatsiooni tingimustele (vibratsioon, halvad kliimatilised tingimused) kohandatud mõõteriistu. Valmistatakse arvnäiduga mõõteriistu, mis võimaldavad mõõta täpsusega 0,01% ja kiirusega üle 100 mõõtmise sekundis.

Selleks et mõõtmiste tulemused oleks usaldatavad, peab mõõteriistu perioodiliselt kontrollima. Kontrollimise sagedus ja läbiviimise kord on määratud NSVL Ministrite Nõukogu juures asuva Standardite, Mõõtude ja Mõõteriistade Komitee instruksiooniga 12- 58.

I. MÕOTMISMEETODID JA MÕOTEVEAD

1-1. Mõõtmismeetodid

Mõõtmiseks nimetatakse mingi suuruse võrdlemist ühikuks võetud sama liiki suurusega. Mõõtmise tulemusena saadakse arv, mis näitab, mitu korda mahub mõõtühik mõõdetavasse suurusesse. Mõõtühikuks võetud suuruse täpselt valmistatud mudelit nimetatakse mõõduks. Seadist, mille abil võrreldakse mõõdetavat suurust mõõtühikuga, nimetatakse mõõteriistaks.

Mõõtmismeetodeid võib liigitada kahte suurde rühma:

- 1) otsene mõõtmismeetod,
- 2) kaudne mõõtmismeetod.

Otsese mõõtmismeetodi puhul on mõõdetav suurus otse loetatav mõõteriista skaalalt või võrreldav tuntud suurusega.

Kaudse mõõtmismeetodi puhul määratakse otsitav suurus võrrandi abil. Võrrandi koostamiseks on vaja teha mitu mõõtmist. Näiteks võimsuse mõõtmiseks tuleb mõõta pinge ja vool ning võimsus arvutada võrrandiga $P = UI$.

Otsene mõõtmine võib omakorda toimuda hälbemeetodil või võrdlusmeetodil.

Hälbemeetodiks (nimetatakse otsese lugemi meetod) nimetatakse sellist meetodit, mille puhul mõõdetav suurus määratakse otseselt mõõteriista skaalalt lugemise teel, kusjuures mõõteriist on gradueeritud samades ühikutes kui mõõdetav suurus. Näiteks voolu mõõtmine ampermeetriga; võimsuse mõõtmine vattmeetriga jne.

Võrdlusmeetodiks nimetatakse meetodit, mille puhul mõõdetav suurus määratakse võrdlemise teel antud suuruse mõõtühikuga. Võrdlusmeetodi näiteks on pinge mõõtmine võrdlemise teel normaalelemendi elektromotoorse jõuga; takistuse mõõtmine mõõtesillaga jne.

Elektrotehnikas on kõige levinum hälbemeetod, sest see on kõige lihtsam ja vähem ajakulu nõudev, kuigi ei taga suurt täpsust. Vea suurus on tavaliselt 0,2...10%. Täpsemateks mõõtmisteks kasutatakse võrdlusmeetodit, mispuhul vea suu-

rus on kuni 0,001%. Kuid sel puhul nõuab mõõtmise rohkem aega ning on vaja palju keerulisemat ja kallimat aparatuuri.

1-2. Mõõtevigade liigitus

Mõõtmisel saadud mõõtarv väljendab mõõdetavat suurust ainult ligikaudselt. Mõõtmisel saadud vigadega peame paratamatult leppima, sest nad on mõõtmistehnikas lahutamatud kaaslased.

Kõiki mõõtmisel tekkivaid vigu võib liigitada kolme rühma:

- 1) süstemaatilised vead;
- 2) juhuslikud vead;
- 3) eksitused.

Süstemaatilised vead on sellised, mis mõjutavad mõõtmistulemusi kogu mõõtmiseeria vältel ühes kindlas suunas, s.t. saadavad tulemused on kõik kas suuremad või väiksemad tegelikust. Süstemaatiliste vigade hulka kuuluvad:

- a) ebatäpne mõõtühik - põhjustab viga ühes kindlas suunas;
- b) mõõteriistast olenevad vead, vale skaalajaotus, ebaõige ülesmonteerimine jne;
- c) meetodilised ehk teoreetilised vead;
- d) mõõtja isiku individuaalsetest omadustest tingitud vead.

Näide 1. Juhtme pikkuse mõõtmisel kasutati mõõdulinti, mille hilisem kontrollimine näitas, et ta on tegelikult veidi lühem. Sellise mõõdulindiga mõõtmisel saame alati tegelikust suurema tulemuse - järelikult on tegemist süstemaatilise veaga.

Näide 2. Kui mõõdame voolu ampermeetriga, millele skaalajaotused on kantud ebatäpselt, siis voolu mõõtmisel sellise ampermeetriga saame alati samamärgilise ja sama suure vea. Süstemaatilisi vigu on võimalik vältida, kui teostame mõõtmisi mitmesuguste mõõteriistadega ja kasutame erinevaid mõõtmismeetodeid.

Juhuslikeks vigadeks nimetatakse selliseid vigu, mis olenevad juhuslikest, täpselt mittearvestatavatest põhjustest, näiteks hõõrdumisest laagrites, mõõteriistade vibreerimisest jne. Kuna vigu tekitavad põhjused on muutlikud - siis on muutuv ka vigade suund ja suurus, s.t. mõõtmistulemus on suurem või väiksem tegelikust väärtusest. Juhuslikest vigadest on kergem vabaneda suurema arvu mõõtmiste puhul. Mõõtmisi tuleb sooritada 3 - 4 korda ja võtta tulemustest aritmeetiline keskmine, milline osutub kõige tõenäosemaks väärtuseks.

Eksitusteks on silmatorkavad, jämedad vead, näiteks vale lugem skaalalt, vale üleskirjutus jne. Eksitused tuleb mõõtmisseeriast välja jätta kui mitteusutavad.

1-3. Mõõtmistulemuse absoluutne viga

Kuna mõõtmine on ligikaudne, siis mõõdetava suuruse tegelik väärtus ei ühti mõõtmistulemusega.

Arvu, mis näitab, kui palju mõõtmistulemus erineb mõõdetava suuruse tegelikust väärtusest, nimetatakse absoluutseks veaks. Näiteks mõõtsime juhtme pikkust mõõdulindiga ja saime 126 cm. Hiljem mõõdeti see täpse mõõdulindiga ja saadi 126,5 cm. Seega tegime esialgsel mõõtmisel vea 0,5 cm. Tavaliselt me ei saa teada mõõdetava suuruse tegelikku väärtust, sest iga mõõtmine on ligikaudne, seetõttu jääb tundmatuks ka absoluutne viga. Küll aga võime leida absoluutse vea ülemmäära, s.o. arvu, millest absoluutne viga kindlasti ei ole suurem. Kui oleme kindlad, et mõõdulindiga ei eksi üle 0,5 cm, siis ütleme, et absoluutse vea ülemmäär on 0,5 cm. Kui palju me tegelikult eksime, seda me ei tea.

Absoluutse vea ülemmäära tähistatakse sümboliga, mis koosneb kreeka tähest Δ ja mõõdetava suuruse tähisest: $\Delta l = 0,5$ cm. Selle asemel, et öelda "mõõtmise absoluutse vea ülemmäär on 0,5 cm", öeldakse sageli "mõõdetud 0,5 cm täpsusega".

Juhtme pikkuse väikseim võimalik väärtus, kui $\Delta l = 0,5$ cm ja mõõtmisel saadud tulemus oli 126 cm, on 125,5 cm (ni-

metatakse alamtõkkeks) ning suurim võimalik väärtus 126,5 cm (nimetatakse ülemtõkkeks). Juhtme pikkuse tegelik väärtus on nende kahe tõkke vahel; seda väljendame järgmiselt:

$$\ell = 126 \pm 0,5 \text{ cm}$$

Absoluutne viga

$$\Delta A = A_1 - A.$$

kus A_1 - mõõteriista näit,

A - mõõdetava suuruse tegelik väärtus (määratakse lähtemõõduriistadega).

Paranduseks nimetatakse vastupidise märgiga absoluutset viga:

$$\delta A = -\Delta A = A - A_1.$$

Et saada tegelikku väärtust, tuleb mõõtmistulemusele liita parandus:

$$A = A_1 + \delta A.$$

Näide 3. Ampermeetri näit on $I_1 = 20$ A ja lähteampermeetri näit $I = 20,4$ A. Absoluutne viga ampermeetriga mõõtmisel

$$\Delta I_1 = I_1 - I = 20 - 20,4 = -0,4 \text{ A.}$$

Parandus $\delta I_1 = -\Delta I_1 = I - I_1 = 20,4 - 20 = 0,4$ A.

Mõõdetava voolu tegelik väärtus

$$I = I_1 + \delta I_1 = 20 + 0,4 = 20,4 \text{ A.}$$

1-4. Mõõtmistulemuse suhteline viga

Sageli tuleb erinevaid mõõtmistulemusi võrrelda mõõtmise täpsuse seisukohalt. Erinevate mõõtmiste täpsuse hindamisel kasutatakse suhtelise ehk relatiivse vea mõistet. Suhteliseks veaks nimetatakse absoluutse vea ja tegeliku väärtuse suhet (väljendatakse tavaliselt protsentides):

$$\delta = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100 = \frac{A_1 - A}{A} \cdot 100\%.$$

Suhteline viga iseloomustab mõõtmise täpsust.

Näide 4. Mõõdeti voolu $I_1 = 1,0$ A ja $I_2 = 10,0$ A, mõlemad absoluutse veaga $\Delta I_1 = \Delta I_2 = 0,1$ A. Kas mõõtmistäpsus on mõlemal juhul ühesuurune?

Arvutame suhtelised mõõtevead:

$$\delta_1 = \frac{\Delta I_1}{I_1} \cdot 100 = \frac{0,1}{1,0} \cdot 100 = 10\%;$$

$$\delta_2 = \frac{\Delta I_2}{I_2} \cdot 100 = \frac{0,1}{10,0} \cdot 100 = 1\%.$$

Näeme, et voolu I_2 mõõtmise tulemus on täpsem, sest suhteline viga on 10 korda väiksem.

Mõõtmisi veaga alla 0,1% sooritatakse teaduslikel uurimistöodel. Vead 0,1...0,5% esinevad tehniliste mõõteriistade kontrollimisel.

Vead suurusega 0,5...1,5% esinevad tavalistel laboratoorsetel mõõtmistel ja kontrollmõõtmistel. Vead suurusega 1,5...4,0% esinevad tavaliste tööstuslike mõõtmiste puhul.

1-5. Mõõteriista taandatud viga

Mõõteriista taandatud veaks nimetatakse absoluutse vea ja mõõteriista niminäidu suhet, väljendatult protsentides:

$$B = \frac{\Delta A}{A_n} \cdot 100\%,$$

kus A_n - mõõteriista niminäit (mõõteulatus).

Näide 5. Ampermeetri näit $I_1 = 20$ A. Ampermeetri mõõteulatus ehk ampermeetri nimivool $I_n = 50$ A. Lähteampermeetri näit $I = 20,5$ A.

Mõõtmise suhteline viga

$$\delta_1 = \frac{I_1 - I}{I} \cdot 100 = \frac{20 - 20,5}{20,5} \cdot 100 = -2,5\%.$$

Ampermeetri taandatud viga

$$\beta = \frac{I_1 - I}{I_n} \cdot 100 = \frac{20 - 20,5}{50} \cdot 100 = -1\%$$

Elektriliste mõõteriistade skaalal on märgitud mõõteriista täpsusklass. Arv, millega tähistatakse täpsusklassi, näitab mõõteriista suurimat lubatavat taandatud viga:

$$\beta_n = \frac{A_{\max}}{A_n} \cdot 100\%$$

Mõõteriista täpsusklass näitab mõõteriista põhivea suurst normaalsetes töötingimustes, s.o. kui mõõteriist on normaalasendis, ümbruskonna temperatuur on $20 \pm 5^\circ\text{C}$, puuduvad välised magnet- ja elektriväljad (välja arvatud Maa magnetväli) jne.

Mõõtmistel normaalsetest erinevates tingimustes viga muutub.

1-6. Mõõtevea määramine otsese mõõtmismeetodi korral

Vaatleme, kuidas leida mõõtmise suhtelist viga, kui on teada mõõteriista näit, mõõteriista niminäit ja täpsusklass.

Mõõteriista täpsusklassi põhjal leiame maksimaalse absoluutse vea:

$$\Delta A_{\max} = \pm \frac{\beta_n A_n}{100}$$

Edasi arvutame suhtelise mõõtevea:

$$\gamma = \frac{\Delta A_{\max}}{A} \cdot 100 = \pm \frac{\beta_n A_n}{100} \frac{100}{A} = \pm \beta_n \frac{A_n}{A} \%$$

Näide 6. Ampermeetriga, mille nimivool $I_n = 30 \text{ A}$ ja täpsusklass 1,5, mõõdeti voole $I_1 = 30 \text{ A}$, $I_2 = 20 \text{ A}$ ja $I_3 = 10 \text{ A}$. Leida suhtelised vead.

Voolu $I_1 = 30$ A mõõtmisel suhteline viga

$$\gamma_1 = \pm B_n \cdot \frac{I_n}{I_1} = \pm 1,5 \frac{30}{30} = \pm 1,5\%.$$

Voolu $I_2 = 20$ A mõõtmisel suhteline viga

$$\gamma_2 = \pm B_n \cdot \frac{I_n}{I_2} = \pm 1,5 \frac{30}{20} = \pm 2,25\%.$$

Voolu $I_3 = 10$ A mõõtmisel suhteline viga

$$\gamma_3 = \pm B_n \cdot \frac{I_n}{I_3} = \pm 1,5 \frac{30}{10} = \pm 4,5\%.$$

Nagu toodud näitest selgub, on mõõtmise suhteline viga seda suurem, mida väiksem on mõõteriista hälve. Selleks et mõõtmine oleks võimalikult täpne, tuleb alati valida sobiva mõõtepiirkonnaga mõõteriist.

1-7. Mõõtevea määramine kaudse mõõtmismeetodi korral

Kõiki elektrilisi suurusi ei saa mõõta otseselt. Paljudel juhtudel tuleb otsitav suurus arvutada otseselt mõõdetud suuruste kaudu, s.t. kasutada kaudset mõõtmismeetodit. Olgu meil näiteks tarvis määrata elektri ahju võimsus. Selleks mõõdame pinget ahju klemmidel ja ahju läbiva voolu, ning arvutame nende suuruste kaudu võimsuse. Pinget ja voolu mõõdame otseselt - nende näidud loeme vahetult mõõteriistadelt. Võimsuse mõõdame aga kaudselt, s.o. arvutame pinget ja voolu kaudu.

Kui mõõtmisel saadud väärtustega sooritame arvutusi, siis on selge, et vead kanduvad edasi ka arvutustulemustesse.

Vea määramine alam- ja ülemtõkke meetodil. Tutvume selle meetodiga konkreetse näite abil.

Näide 7. Elektri ahju võimsust mõõdeti voltmeetri-ampermeetri meetodil. Voltmeetri mõõteulatus oli 250 V, täpsusklass 1,5 ja näit 197 V. Ampermeetri mõõteulatus 10 A, täpsusklass 2,5 ja näit 5 A. Leiame võimsuse keskmise vää-

vea ja absoluutse ning relatiivse vea ülemmäärad.

Pinge mõõtmise suhteline viga

$$\delta U = \pm B_n \frac{U_n}{U} = \pm 1,5 \frac{250}{197} = \pm 1,9\%$$

Pinge absoluutne viga

$$\Delta U = \pm \frac{1,9 \cdot 197}{100} = \pm 3,75 \text{ V.}$$

Pinge väärtus $U = 197 \pm 3,75 \text{ V.}$

Voolu mõõtmise suhteline viga

$$\delta I = \pm B_n \frac{I_n}{I} = \pm 2,5 \frac{10}{5} = \pm 5\%$$

Voolu absoluutne viga

$$\Delta I = \pm \frac{5 \cdot 5}{100} = \pm 0,25 \text{ A.}$$

Voolu väärtus $I = 5 \pm 0,25 \text{ A.}$

Nüüd, kus meil üksikmõõtmiste tulemused on leitud, arvume võimsuse alam- ja ülemtõkke. Võimsuse alamtõkke leidmiseks korrutame pinget ja voolu minimaalsed väärtused ning ülemtõkke leidmiseks maksimaalsed väärtused:

$$P_1 = 193,25 \cdot 4,75 = 918 \text{ W,}$$

$$P_2 = 200,75 \cdot 5,25 = 1054 \text{ W.}$$

Võimsuse ligikaudseks väärtuseks P loeme nende tõkete aritmeetilise keskmise:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{918 + 1054}{2} = 986 \text{ W.}$$

Absoluutse vea ülemmäär on pool tõkete vahest:

$$\Delta P = \frac{P_2 - P_1}{2} = \frac{1054 - 918}{2} = 68 \text{ W.}$$

Seega relatiivse vea ülemmäär

$$\delta P = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100 = \frac{68}{986} \cdot 100 = 6,9\%$$

Mõõtmistulemuse võime kirjutada järgmiselt:

$$P = 986 \pm 6,9\% = 986 \pm 68 \text{ W.}$$

Veä määramine funktsiooni veä valemi rakendamisega. Kaudsel mõõtmisel on otsitav suurus mõõdetud suuruste funktsioon. Otsitava suuruse veä leidmiseks on vaja teada summa, vahe, korrutise, jagatise ja teiste lihtsamate funktsioonide vigade valemid. Toome tähtsamad valemid (ilma tõestamiseta)

Tabel 1

Funktsioon	Relatiivne viga	Funktsioon	Relatiivne viga
$A + B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{A + B}$	A^2	$2 \frac{\Delta A}{A}$
$A - B$	$\frac{\Delta A + \Delta B}{A - B}$	A^n	$n \frac{\Delta A}{A}$
$A \cdot B$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$	\sqrt{A}	$\frac{1}{2} \frac{\Delta A}{A}$
$\frac{A}{B}$	$\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta B}{B}$	$\sqrt[n]{A}$	$\frac{1}{n} \frac{\Delta A}{A}$

Seega arvutamisel on vaja meeles pidada järgmisi juhi-seid:

- 1) liitmisel ja lahutamisel tuleb absoluutsed vead liita;
- 2) korrutamisel ja jagamisel tuleb suhtelised vead liita;
- 3) astendamisel ja juurimisel tuleb suhteline viga kor-rutada astmenäitajaga.

Näide 8. Üldpinge leidmiseks mõõdeti osapinged $U_1 = 5,8 \pm 0,2 \text{ V}$ ja $U_2 = 9,6 \pm 0,3 \text{ V}$. Leida üldpinge ja maksimaalne võimalik viga.

Summa ligikaudne väärtus

$$U = U_1 + U_2 = 5,8 + 9,6 = 15,4 \text{ V.}$$

Summa absoluutne viga

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0,2 + 0,3 = 0,5 \text{ V.}$$

Seega saame:

$$U = U_1 + U_2 = 15,4 \pm 0,5 \text{ V,}$$

s.t. üldpinge võib olla piirides 14,9 V kuni 15,9 V.

Näide 9. Hargnevas vooluringis mõõdeti üldvool $I = 30 \pm 2\%$ A ja vool esimeses harus $I_1 = 20 \pm 2\%$ A. Leida vool teises harus I_2 ja tema maksimaalne relatiivne viga. Vool teises harus

$$I_2 = I - I_1 = 30 - 20 = 10 \text{ A.}$$

Leiame voolude absoluutsed vead, sest on antud suhtelised vead:

$$\Delta I = \frac{2 \cdot 30}{100} = 0,6 \text{ A,}$$

$$\Delta I_1 = \frac{2 \cdot 20}{100} = 0,4 \text{ A.}$$

Lahutamise suhtelise vea valemi põhjal võime kirjutada:

$$\gamma_{I_2} = \frac{\Delta I + \Delta I_1}{I - I_1} = \frac{0,6 + 0,4}{30 - 20} = \frac{1}{10} = 0,1 = 10\%.$$

$$\text{Seega saame: } I_2 = 10 \pm 10\% = 10 \pm 1 \text{ A.}$$

Nagu toodud näitest selgub, võib viga lahutamistehete puhul minna väga suureks. Mõõtmistehnikas tuleb hoiduda sellistest skeemidest, kus on vaja kasutada lahutamistehet.

Näide 10. Elektrienergia mõõtmisel olid mõõtmistulemused järgmised: $U = 100 \pm 10\%$ V, $R = 20 \pm 0,5\%$ ja $t = 5 \pm 1,5\%$ s. Leida energia ja tema maksimaalne viga.

Energia ligikaudne väärtus

$$A = \frac{U^2}{R} \cdot t = \frac{100^2}{20} \cdot 5 = 2500 \text{ Ws.}$$

Energia väärtuse suhteline viga

$$A = 2\gamma_U + \gamma_R + \gamma_t = 2 \cdot 1 + 0,5 + 1,5 = \pm 4\%.$$

Seega saame:

$$\Delta A = 2500 \cdot 0,04 = 100 \text{ Ws,}$$

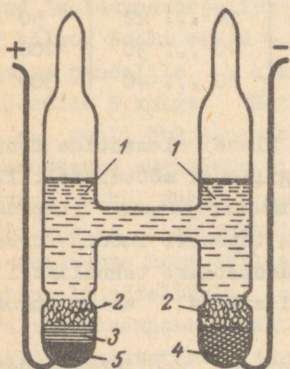
$$A = 2500 \pm 100 \text{ Ws.}$$

II. ELEKTRILISTE SUURUSTE MÕÕDUD

2-1. Elektrimotoorse jõu mõõdud

Elektrimotoorse jõu mõõduks (etalooniks) on rahvusvaheline Westoni normaalelement. See on galvaanielement, mille emj. püsival temperatuuril on konstantne. Temperatuuri muutumisel muutub emj. kindla seaduse järgi. Elemendi ehitus on näidatud joonisel 2-1. Anumaks on H-kujuline klaaskolb. Positiivseks elektrodiks 5 on

elavhõbe (Hg). Negatiivseks elektrodiks 4 on kaadmium-amalgaam (Cd - 12%, Hg - 88%). Depolarisaatoriks on positiivse elektroodi peal asuv pasta 3, mis koosneb elavhõbesulfaadist (HgSO_4) ja kaadmiumsulfaadist (CdSO_4). Ülejäänud ruum anumas on täidetud kaadmiumsulfaadi vesilahusega 1 (elektrolüüt). Kuna elektrolüüt normaaltemperatuuril on küllastunud, siis esinevad kaadmiumsulfaadi kristallid 2.



Joon. 2-1.

Sellise elemendi emj. ole-
neb temperatuurist väga vähe.

Seda sõltuvust võib väljendada võrrandiga:

$$E_t = E_{20} - 0,0000406 (t - 20) [V],$$

kus E_t - emj. temperatuuril t °C;

E_{20} - emj. temperatuuril 20°C.

Elemendi sisetakistus on 500 ... 1000Ω. Täpsuse järgi liigitatakse normaalelemendid kolme klassi (ГОСТ 1954-55). I ja II klassi elementidel on elektrolüüt küllastatud. III klassi elemendil on elektrolüüt küllastamata, s.o. kaadmiumsulfaadi kristallid puuduvad. Emj. muutumine olenevalt temperatuurist on neil märgatavalt väiksem kui II klassi elementidel. Tabelis 2 on toodud normaalelementide emj.-d temperatuuril 20°C, suurim lubatav vool, temperatuurivahemik, milles nad on kasutatavad ja lubatav emj. muutumine aasta jooksul.

Tabel 2

Elemendi klass	Elektromotoorne jõud temperatuuril 20°C; V	Suurim lubatav voolutugevus A	Kasutatav temperatuuril °C	Lubatud emj. muutumine aasta jooksul V.
I	1,01850 ... 1,01870	10^{-6}	18 ... 22	50
II	1,01850 ... 1,01870	10^{-6}	10 ... 30	100
III	1,0185 ... 1,0195	10^{-5}	10 ... 40	300

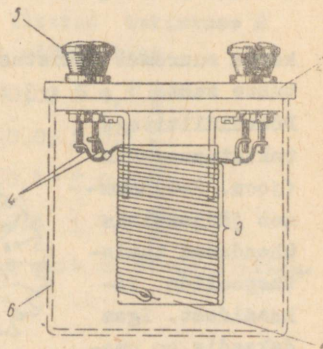
I klassi elemente kasutatakse II klassi elementide kontrollimisel ja eriti täpsetel metrooloogilistel mõõtmistel. II klassi elemente kasutatakse täpsete mõõteriistade (täpsusklassiga 0,1 ja 0,2) kontrollimisel ja täpsetel laboratoorsestel mõõtmistel. III klassi elemente kasutatakse tehnilistel mõõtmistel, näiteks kantavates mõõteriistades, automaatkompensaatorites jne.

Valmistatakse juba ka stabiliseeritud pooljuhtalaldeid (ränistabilitronidega), mida on võimalik kasutada tugipinge allikana III klassi normaalelementide asemel.

Normaalelemente tuleb hoida põrutuste eest ja mitte ümber pöörata. Ei tohi koormata tugevama vooluga, kui elemendile on lubatud. Hoida tuleb neid kohas, kus temperatuurikõikumine on väike.

2-2. Elektrilise takistuse mõõdud

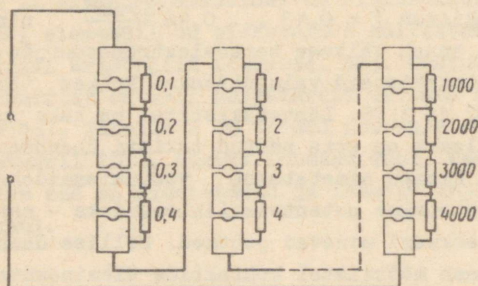
Elektrilise takistuse mõõtudeks on lähtetakistid. Valmistatakse manganiintraadist (Cu - 84%; Ni - 3%; Mn - 13%). Manganiinitakistuse temperatuuritegur on väike $\alpha = 0,00001 \frac{1}{\text{deg}}$, eritakistus $\rho = 0,43 \dots 0,46 \frac{\Omega \text{ mm}}{\text{m}}$ ning mangaanin koos vasega annab väikese termoelektromotoorjõu ca 2 V 1 deg kohta. Lähtetakisteid valmistatakse kolmes täpsusklassis: 0,01; 0,02 ja 0,05. Lähtetakistitel on kaks paari klemme. Üks paar klemme on ette nähtud takisti ühendamiseks vooluringi; neid klemme nimetatakse vooluklemmideks. Teist klemmipaari nimetatakse potentsiaaliklemmideks - nendega ühendatakse mõõteskeemi minevad juhtmed. Sellise ühendamisviisi puhul väheneb mõõtmistel kontaktide üleminekutakistuste mõju. Lähtetakisti ehitus on toodud joonisel 2-2. Metall- või portselankarkassil 1 asetseb bifilaarselt keritud pool 3. Karkass 1 on kinnitatud isoleermaterjalist paneeli 2 külge. Pooli otsad 4 joodeatakse paneelile kinnitatud klemmide 5 külge. Metallkest 6 on pooli õhkjahutuse puhul varustatud augukestega; õlijahutuse puhul augud puuduvad. Mõningates konstruktsioonides kasutatakse hermeetilisi kesti, et pooli täielikult eraldada väliskeskkonnast. Lähtetakisteid valmistatakse järgmistes suurustes: 0,00001; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1,0; 10; 100; 1000; 10000 ja 100000 Ω . Igaletakistile on märgitud lubatud maksimaalne vool.



Joon. 2-2.

Tehnikas kasutatakse rohkelt takistusmagasine, mis kujutavad endast ühisesse kesta paigutatud takistuspoolide kogumikku. Takistus on muudetav erikonstruktsiooniga lülitite või pistikute abil. Takistusmagasine võib kasutada lähtetakistitena neil juhtudel, kui mõõtmistel ei nõuta eriti suurt

täpsust ja kui on vaja takistust reguleerida. Takistusmagasine liigitatakse kahte põhigruppi: pistikutega takistusmagasinid ja pöördlülititega takistusmagasinid.

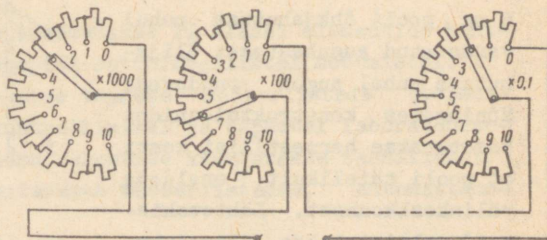


Joon. 2-3.

Pistikutega takistusmagasini (joon. 2-3) on takistuspoolid (4 tk) ühendatud järjestikku üheks gruppiks. Grupi takistust on võimalik pistikute abil muuta. Grupid omakorda on ühendatud järjestikku, kusjuures iga järgmise grupi takistuspoolid omavad eelmistest 10

korda suuremat takistust. Grupis võib takistuspoolide takistuste suhte 1 : 2 : 3 : 4 asemel olla ka suhe 1 : 2 : 2 : 5.

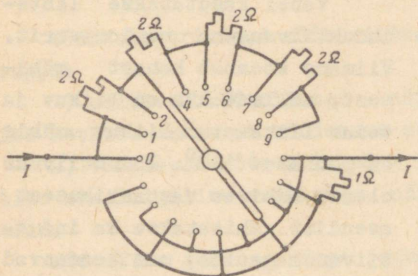
Pöördlülititega takistusmagasin (joon. 2-4) koosneb järjestikku ühendatud takistuspoolide dekaadidest. Igas dekaadis on omakorda järjestikku 9 - 10 ühesugust takistuspooli. Iga järgmise dekaadi ta-



Joon. 2-4.

kistuspoolide takistused on 10 korda suuremad eelmistest. Dekaaide on tavaliselt 4 ... 6. Et vähendada takistusmagasini gabariite ja maksumust, kasutatakse vähendatud takistuspoolide dekaade (joon. 2-5). Võrreldes eelmisega on nendes dekaadides takistuspoolide arv kaks korda väiksem.

Takistusmagasinide kasutamisel ei tohi takistuspoole koormata tugevama vooluga, kui magasinil on märgitud üksikute dekaadide kohta. Takistusmagasinid liigitatakse täpsuse



Joon. 2-5.

järgi nelja klassi: 0,02; 0,05; 0,1 ja 0,2. Ühede-kaadilise takistusmagasini puhul määrab täpsusklass lubatava põhivea suuruse. Näiteks magasinil täpsusklassiga 0,02 ei tohi põhiviga ületada $\pm 0,02\%$ jne.

Mitmedekaadiliste takistusmagasinide puhul ei tohi põhiviga, väljendatult protsentides lülitatud takistuse R

väärtusest, olla suurem järgmistest väärtustest:

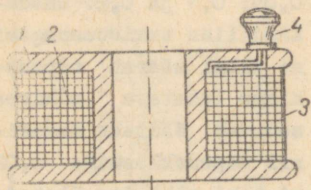
klass 0,02 puhul	$\pm [0,02 \pm 0,1 \frac{m}{R}]$
klass 0,05 puhul	$\pm [0,05 \pm 0,1 \frac{m}{R}]$
klass 0,1 puhul	$\pm [0,1 \pm 0,2 \frac{m}{R}]$
klass 0,2 puhul	$\pm [0,2 \pm 0,5 \frac{m}{R}]$

kus m - magasinide dekaadide arv, mille näit ei võrdu nulliga.

2-3. Lähteinduktiivsused

Lähteinduktiivsused (lähtepoolid) peavad olema konstantse induktiivsusega ja väikese aktiivtakistusega. Lähteinduktiivsus on kujutatud joonisel 2-6. Portselan- või marmoralu-sele 1 on mähitud kiulisest vasktraadist mähis 2. Väljastpoolt on mähise pind kaetud isolatsiooniga 3. Mähise algus ja lõpp on ühendatud klemmidega 4. Vastastikuse induktiivsuse lähtepoolil on kaks eraldi mähist. Mähised on immutatud parafiiniga. Kuna mähised ja alused on valmistatud mittemagnetilistest materjalidest, siis induktiivsus ei olene üldse mähist läbiva

voolu tugevusest. Mähiseid ei tohi koormata tugevama vooluga kui peale märgitud. Lähteinduktiivsusi valmistatakse järgmiste induktiivsustega: 0,0001; 0,001; 0,01 ja 1 H.



Joon. 2-6.

Vahel kasutatakse lähteinduktiivsuseks variomeetrit. Viimane koosneb kahest mähisest, millest üks on liikuv ja teine liikumatu. Liikuv mähis on pööratav 180° . Induktiivsus oleneb mähiste vastastikusest asendist. Ehitatakse ka induktiivsusemagasine, mis koosneb induktiivpoolidest ja variomeetrist.

2-4. Lähtemahtuvused

Mahtuvused (lähtekondensaatorid) peavad omama konstantset mahtuvust, väikest dielektrilist kadu ja suurt isolatsioonitakistust. Mahtuvuse sõltuvus temperatuurist ja sadusest peab olema minimaalne. Kasutatakse peamiselt õhk- ja vilgukividielektrikuga kondensaatoreid. Parimateks on õhk-dielektrikuga kondensaatorid, millel kaonurk on alla ühe nurgaminuti. Õhk-dielektrikuga kondensaatorid omavad väikest mahtuvust, kuni 0,001 μ F. Valmistatakse silindriliste kui ka tasapinnaliste elektroodidega.

Vilgukividielektrikuga kondensaatorid on omadustelt veidi halvemad õhk-dielektrikuga kondensaatorist. Kaonurk on 2 ... 5 minutit. Neid kasutatakse suuremate mahtuvuste saamiseks. Mahtuvusmagasin kujutab ühte kasti asetatud kondensaatorite kogumikku. Mahtuvust saab muuta pistikute või pöördlülitite abil.

III. ÜLDTEATMED ELEKTRIMÕÕTERIISTADEST

3-1. Mõõteriistade klassifikatsioon

Kõik elektrilised mõõteriistad võib liigitada kahte gruppi:

1) näitavad mõõteriistad - näitavad skaalal otseselt mõõtmise hetkele vastavat mõõdetava suuruse väärtust;

2) võrdlevad mõõteriistad - võrdlevad mõõdetavat suurust teise samaliigilise suurusega, näiteks mõõtesillad, kompensatorid.

Mõõdetava suuruse järgi jagunevad mõõteriistad ampermeetriteks, voltmeetriteks, vattmeetriteks, oommeetriteks, faso- meetriteks, arvestiteks jne.

Ekspluatatsioonitingimuste järgi liigitatakse nad järgmistesse gruppidesse:

grupp A - ette nähtud kasutamiseks kuivades köetavates ruumides, temperatuurivahemikus $+10^{\circ}\text{C}$... $+35^{\circ}\text{C}$;

grupp B - ette nähtud kasutamiseks mitteköetavates ruumides, temperatuurivahemikus -30°C ... $+40^{\circ}\text{C}$;

grupp B₁ - ette nähtud kasutamiseks väli- ja mereseadmeis, temperatuurivahemikus -40°C ... $+50^{\circ}\text{C}$;

grupp B₂ - ette nähtud kasutamiseks väli- ja mereseadmeis, temperatuurivahemikus -50°C ... $+60^{\circ}\text{C}$.

ГОСТ 1845-59 järgi jagunevad näitavad ja isekirjutavad mõõteriistad kaheksasse täpsusklassi: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 ja 4,0. Arv, millega tähistatakse täpsusklassi, määrab maksimaalse lubatud taandatud vea suuruse normaalsetes ekspluatatsioonitingimustes (näiteks täpsusklassi 0,5 puhul ei tohi taandatud viga ületada $\pm 0,5\%$). Mõõtmistingimuste erinemisel normaalsetest viga muutub. Samas riiklikus standardis (ГОСТ 1845-59) on toodud mõõteriistade vea muutumise piirid olenevalt mitmesugustest teguritest: sagedusest, temperatuurist, välistest magnetväljadest jne.

Väliste väljade vastu kaitsmise seisukohalt liigitatakse mõõteriistad kahte kategooriasse I ja II. Lubatav näidu muutumine väliste väljade mõjul on toodud tabelis 3.

Tabel 3

Mõõteriista täpsus- klass	Lubatud näida muutumine %	
	I kategooria	II kategooria
0,05; 0,1; 0,2; 0,5	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
1,0; 1,5	$\pm 1,0$	$\pm 2,5$
2,5; 4,0	$\pm 2,5$	$\pm 5,0$

Mõõteriistad täpsusklassiga 0,05 ... 0,5 on lähtemõõteriistad, mida kasutatakse täpsetel mõõtmistel ja tehniliste mõõteriistade kontrollimisel.

Mõõteriistad täpsusklassiga 1,0 ... 4,0 on tehnilised mõõteriistad, mida kasutatakse tavalistel tehnilistel mõõtmistel. Toimimisviisi järgi eristatakse magnetelektrilisi, elektromagnetilisi, elektrodünaamilisi, ferrodünaamilisi, elektrostaatilisi, termoelektrilisi, induktsioon-, alaldiga, elektron- ja vibratsioonmõõteriistu. Vastavad tingmärgid (ГОСТ 1845-59) on toodud tabelis 4.

Tabel 4

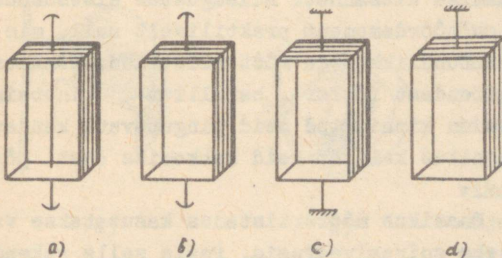
Nimetus	Tingmärk	Nimetus	Tingmärk
Magnetelektriline mõõteriist:		Pooljuhtalaldi	
a) liikuva pooliga		Elektronmuundi	
b) liikuva magnetiga		Termoelektriline mõõteriist (magnetelektriline mehhanism koos termomuundiga)	
d) logomeeter		Elektrodünaamiline mõõteriist	
Elektromagnetiline mõõteriist		Elektrodünaamiline logomeeter	
Elektromagnetiline logomeeter		Ferrodünaamiline mõõteriist	
Otseselt kuumendatav termomuundi			
Kaudselt kuumendatav termomuundi			

Nimetus	Tingmärk	Nimetus	Tingmärk
Ferrodünaamiline logomeeter		Elektron mõõteriist (magnetelektriline mehhanism koos elektronmuundiga)	
Induktsioon-mõõteriist		Väliste magnetväljade vastu kaitstud I kategooria kohaselt	
Induktsioon-logomeeter		Väliste elektriväljade vastu kaitstud I kategooria kohaselt	
Elektrostaatiline mõõteriist			
Magnetelektriline mehhanism koos alaldiga			

3-2. Mõõteriistade detailid

Vaatamata mõõteriistade konstruktsiooni mitmekesisusele on terve rida detaile kõikides mõõteriistades sarnased.

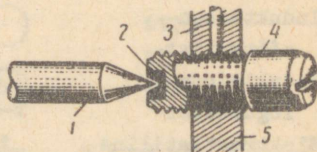
Liikuva osa kinnitus. Pöördumise võimaldamiseks kinnitatakse liikuv osa telje, pooltelgede, tõmmitsate või riputi abil. Joonisel 3-1, a on näidatud liikuva osa kinnitus teljele. Teljed valmistatakse tavaliselt duralumiiniumist, lä-



Joon. 3-1.

bimõõduga 1 ... 1,5 mm. Paljude mõõteriistade puhul ei ole võimalik liikuvast osast telge läbi asetada. Sellisel juhul kinnitatakse liikuva osa külge poolteljed (joon. 3-1, b). Telgede otsa

pressitakse kärnid. Kuna hõõrdumine laagrites peab olema väike, siis kasutatakse elektrimõõteriistade puhul kärnlaagerdust. Kärnlaagerdus (joon. 3-2) koosneb kärnist 1 ja laagrikivist 2. Kärn lõpeb väikese raadiusega (0,01 ... 0,2 mm) sfäärilise poleeritud pinnaga. Kärnid valmistatakse kõrgekvaliteedilisest süsiniktööriistaterasest. Laagrikiivid valmistatakse kõvadest looduslikest või tehismineeraalidest - ahhaadist, rubiinist, korundist. Laagri-



Joon. 3-2.

kivi pressitakse laagrihoidjasse 4, mille abil saab laagrite vahelist kaugust muuta. Laagrihoidja (kruvi 4) kinnitub liikumatu karkassi 5 külge ning laagrihoidja asendi fikseerimiseks on pidurkruvi 3. Laagrikiivisse tehtud süvend on poleeritud. Vaatamata liikuva osa väikesele massile (kuni 1 gramm), on kärni erisurve laagriale väikese kokkupuutepinna tõttu väga suur - kuni 500 kgf/mm^2 (ületab suurte hüdroturbiinide laagrites esineva erisurve). Viimane asjaolu põhjustab vibreerimise või löökiide korral kärni vigastumise ning hõõrdumine suureneb. Hõõrdumisest tingitud viga märgatavalt väheneb, kui kärnlaagerduse asemel kasutada tõmmitsaid või riputeid, nagu näidatud joonisel 3-1, c ja d. Tõmmitsad ja riputid tekitavad vastumomendi ja täidavad liikuva osa laagerdamise ülesannet. Niisugustes elstsushõõrdumisega laagrites on hõõrdemoment praktiliselt null, mis on eriti hinnatav suure tundlikkusega mõõteriistades. Tõmmitsad ja riputid kujutavad endast fosfor-, berüllium-, tinatsinkpronksist niite, mis on kinnitatud neid pingutavate kandedevrude külge. Vedrukinnitus kaitseb neid katkemise eest põrutustel.

Momendivedrud. Enamikus mõõteriistades kasutatakse vastumomendi tekitamiseks spiraalvedrusid. Peale selle rakendatakse spiraalvedrusid ka voolu juhtimiseks liikuvasse ossa. Vedrude materjaliks on fosfor-, tina-, tsink- ja kaadmiumpronks. Vedrud valmistatakse 0,01 ... 0,1 mm paksusest ja

0,3 ... 2 mm laiusest ribast. Vastumoment oleneb vedru pikkusest, laiusest, paksusest, materjalist ja vedru pöördenurgast. Spiraalvedru pööramisel 1^o võrra arendatavat vastumomenti nimetatakse erivastumomendiks:

$$D = E \frac{bh^3}{12L} \text{ Ncm} ,$$

kus D - erivastumoment Ncm;

L - üldine vedru lindi pikkus cm;

h - lindi paksus cm;

b - lindi laius cm;

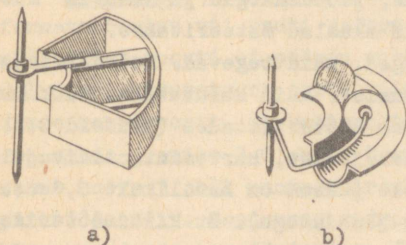
E - materjali elastsusmoodul N/cm².

Kui vedru pöörata kraadi võrra, siis vedru poolt arendatav vastumoment,

$$M_v = \alpha D.$$

Järelikult on spiraalvedru poolt arendatav vastumoment võrdeline pöördenurgaga.

Summutid. Summuti ülesandeks on vähendada liikuva süsteemi võnkumist püsiva hälbeasendi ümber. Summutid on seega vajalikud mõõdetava suuruse kiireks ja täpseks lugemiseks. Aega, mis möödub mõõdetava suuruse muutumise hetkest kuni hetkeni, mil osuti saavutab stabiilse asendi täpsusega 1% skaala pikkusest, nimetatakse sumbeajaks. Enamikul elektrimõõteriistadel on sumbeaeg alla 4 sekundi.

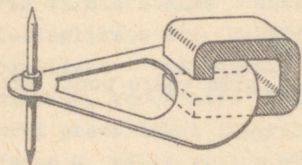


Joon. 3-3.

Elektrilistes mõõteriistades kasutatakse õhk- ja magnetsummuteid. Õhksummuteid on kahte tüüpi: joonisel 3-3, a on tiiviksummuti ja joonisel 3-3, b - kolbsummuti. Tiiviku või kolvi liikumisel mõjub tema pooltele erinev surve, mille tulemusena tekib tiiviku või kolvi liikumist pidurdav

jõud. Rohkem on levinud tiiviksummutid, sest neil on kolbsummutitega võrreldes väiksem inertsmoment ja suurem mehhaaniline tugevus.

Magnetsummuti koosneb püsimagnetist ja selle pilus liikuvast elemendist, milleks võib olla ketas, sektor, silinder või raam. Magnetsummuti ehitus on näidatud joonisel 3-4. Magnetsummutite toime põhineb pidurdusjõududel, mis tekivad



Joon. 3-4.

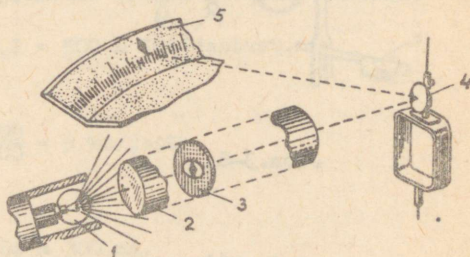
liikuvat elementi läbiva magnetvoo ja selle elemendi liikumisel temas tekkivate induktatsioonvoolude koosmõjul. Magnetsummutid on töökindlamad, sumbemomendid suuremad. Nende puuduseks tuleb lugeda seda, et väljad avaldavad segavat mõju mõõtemehhanismidele ja et tekib lisaviga, kui liikuvale elemendile satub ferromagnetilisi osakesi.

Lugemseadised. Hälbemeetodil mõõtvate mõõteriistade lugemseadised koosnevad skaalast ja osutist. Varem kujundati skaalad valgele paberile, mis liimiti metallalusele. Kaasajal kasutatakse paberskaalaid harva, sest paber muutub aja jooksul kollaseks. Käesoleval ajal trükitakse skaala valge nitrovärviga kaetud pinnale või graveeritakse (stantšitakse) metallplaati, millele järgneb värviga täitmine. Skaala pind värvitakse tavaliselt valgeks, jaotusmärgid ja numbrid mustaks. Lääkimise vähendamiseks skaalad mateeritakse.

Osutid peavad olema kerged, kuid tugevad. Nad valmistatakse tavaliselt duralumiiniumist, kuid kasutatakse ka klaasosuteid. Täpsemates kantavates mõõteriistades (klassid 0,1; 0,2 ja 0,5) kasutatakse keelekujulise, harvemini niidikujulise otsaga osuteid. Osuti keele paksus on harilikult 0,1 ... 0,15 mm (võrdne skaala joone jämedusega). Et kilbimõõteriistade näitu oleks võimalik lugeda küllalt kaugelt, on nende osutite otsad jämedamad, noolekujulised. Kui mõõteriista osuti ei ole otsese kokkupuutes skaalaga, siis sõltub lugemisuurus mõõtja silma asendist. Neil juhtudel võib tekkida vaa-

tesuunast tingitud viga ehk parallaktiline viga. Täpsematel mõõteriistadel on mõõteriista skaalale kinnitatud peegel. Parallaktilise vea vältimiseks valitakse selline vaatesuund, et osuti ja tema kujutis peeglis ühtivad. Peeglitena kasutatakse kroom- või nikkelkattega metallpeegleid.

Valguskiire kasutamine osutina võimaldab tõsta mõõteriista tundlikkust. Joonisel 3-5 on kujutatud valguskiir-osutiga mõõtemehhanism. Hõõglambi 1 valgusvoog läbib optilise süsteemi 2, diafragma 3 ja peegeldub liikuva osal külge kinnitatud peeglit 4 skaalale 5. Diafragma 3 kujutab endast ava, mille tsentris asub osuti otsa kuju. Kiire ühekordsel peegeldumisel liikuvalt peeglit suureneb tundlikkus kaks korda, sest on teada, et kiire langemisnurk võrdub peegeldumisnurgaga.

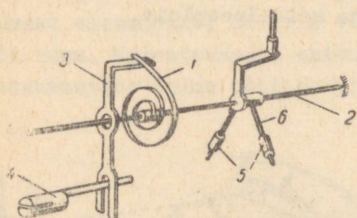


Joon. 3-5.

Kaasajal valmistatakse ka arvnäiduga mõõteriistu. Nendes projekteeritakse mõõtmistulemus mattklaasile helenduva arvuna.

Korrektor. Tingituna spiraalvedru või tõmmitsa jäävdeformatsioonist või osuti deformeerumisest on võimalik, et mõõteriista osuti ei pöördu enam tagasi skaala alguspunkti. Sel juhul kasutatakse osuti viimiseks enne mõõtmist algasendis korrektorit. Korrektori töötamise põhimõttest on kerge aru saada joonise 3-6 abil. Korrektori kruvi 4 pööramisega saame hoova 3 abil muuta spiraalvedru 1 välisotsa kinnituspunkti asendit. Seejuures vedru keerdub ning kutsub esile liikuva osa ja osuti pöördumise. Joonisel 3-6 on näidatud ka tasakaalustamisraskused 5. Tasakaalustamisraskuste kandehargid 6 kujutavad endast painutatud traadikest, mis on kinnitatud

osutihoidja külge. Tasakaalustamisraskuste ülesanne on viia liikuva osa raskuskese teljega ühele sirgele.



Joon. 3-6.

Arretiir. Riputite või tõmmitsatega mõõteriistad on varustatud arretiiridega, millised transportimise ajaks fikseerivad liikuva osa, s.o. teostavad liikuvat osa.

3-3. Mõõteriista konstant ja tundlikkus

Paljude mõõteriistade (eriti mitme piirkonnaga) puhul mõõdetavad skaalajaotuste juures olevad arvud jaotuste arvu või skaala pikkust millimeetrites; skaalal ei ole näidatud, milline mõõdetava suuruse väärtus vastab skaalajaotusele. Neil juhtudel tuleb leida mõõteriista konstant ehk jaotuse väärtus. Konstandi leidmiseks tuleb mõõteulatus A_n jagada jaotuste arvuga α_n :

$$C_A = \frac{A_n}{\alpha_n} \left[\frac{\text{mA}}{\text{jaot.}}; \frac{\text{mV}}{\text{jaot.}} \text{ jne.} \right].$$

Mõõteriista konstant C_A on arvuliselt võrdne mõõdetava suurusega, kui osuti nihkub ühe jaotuse või 1 mm võrra.

Mõõdetava suuruse saamiseks tuleb mõõteriista näit korrutada konstandiga C_A :

$$A = \alpha \cdot C_A.$$

Konstandi pöördväärtust nimetatakse mõõteriista tundlikkuseks:

$$S_A = \frac{1}{C_A} = \frac{\alpha_n}{A_n} \left[\frac{\text{jaot.}}{\text{mA}}; \frac{\text{jaot.}}{\text{mV}} \text{ jne.} \right].$$

Mõõteriista tundlikkus on arvuliselt võrdne osuti nihkumise jaotuste arvuga, kui mõõdetav suurus muutub ühe ühiku võrra.

Näide 11. Milliampermeetri nimivool $I_n = 500 \text{ mA}$ ja tundlikkus $S_I = 0,2 \text{ jaot./mA}$. Leida skaala jaotuste üldarv, konstant ja vool, kui milliampermeetri näit on 60 jaotust.

1. Teades, et $S_I = \frac{\alpha_n}{I_n}$, määrame skaala jaotuste üldarvu:

$$\alpha_n = S_I \cdot I_n = 0,2 \cdot 500 = 100 \text{ jaotust.}$$

2. Leiame konstandi:

$$C_I = \frac{1}{S_I} = \frac{I_n}{\alpha_n} = \frac{500}{100} = 5 \text{ mA/jaot.}$$

3. Ahelas esinev vool

$$I = C_I \alpha = 5 \cdot 60 = 300 \text{ mA.}$$

3-4. Mõõteriistade omatarbevõimsused

Mõõteriistade omatarbevõimsuseks on nende poolt mõõdetavast vooluringist tarbitav võimsus. Väikese võimsusega vooluringides tuleb valida ka väikese omatarbevõimsusega mõõteriistad. sest vastasel korral muutuvad mõõtevead ülemäära suureks. Mõõteriistade omatarbevõimsus on arvutatav valemiga

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} = UI,$$

kus R - mõõteriista sisetakistus;

I - mõõteriista läbiv vool;

U - pinge mõõteriista klemmidel.

Tabelis 5 on toodud mõningate mõõteriistade orienteerivad omatarbevõimsused.
















Tabel 5

Mõõteriista nimetus	Omatarbevõimsus VA	
	Voolumähis 5-A voolu puhul	Pingemähis 100-V pinge puhul
Magnetelektrilised ampermeetrid	0,2 ... 0,5	-
Termoelektrilised ampermeetrid	1 ... 2	-
Elektromagnetilised ampermeetrid	1 ... 2,5	-
Elektrodünaamilised ampermeetrid	3,5 ... 10	-
Magnetelektrilised voltmeetrid	-	0,1 ... 1
Elektromagnetilised voltmeetrid	-	4 ... 6
Elektrodünaamilised voltmeetrid	-	6 ... 12
Elektrodünaamilised vattmeetrid	1,5 ... 5	3 ... 5
Elektrodünaamilised faso-meetrid	3 ... 4	5 ... 8
Induktsioonarvestid	1 ... 2,5	1 ... 4
Sagedusmõõtjad	-	2 ... 5
Registreerivad ampermeetrid	5 ... 15	-
Registreerivad voltmeetrid	-	10 ... 20
Registreerivad vattmeetrid	3 ... 10	8 ... 15

3-5. Tähised mõõteriistade skaalal

Iga mõõteriist on markeeritud vastavalt ГOCT 1845-59 nõudele. Mõõteriista esiküljel, sagedamini skaalal, on märgitud tema konstruktsiooni- ja ekspluatatsioonandmed. Põhilised tingmärgid, mis kantakse elektrimõõteriistadele, on toodud järgnevas tabelis.

Tabel 6

N i m e t u s	Tingmärk	
	Uus	Vana
Mõõdetava suuruse tähis, või mõõteriista nimetus, näit. ampermeeter	A	
Mõõteriista täpsusklass, näit. 0,5	0,5	
Ekspluatatsioonigrupp, näit. B	B	
Kasutatav alalisvoolul	—	
Kasutatav vahelduvvoolul	~	
Kasutatav alalis- kui ka vahelduvvoolul	— ~	
Kasutatav kolmefaasilisel voolul, ühtlane koormus		
Kasutatav kolmefaasilisel voolul, ebahühtlane koormus		
Skaala vertikaalasend		
Skaala horisontaalasend		
Skaala kaldasend, näiteks 60°		
Isolatsiooni proovipinged, näiteks 2 kV		
Pähelepanu! Vaata täiendavaid juhiseid passist või ekspluatatsiooni instruksioonist		
Nimisagedus, kui see erineb 50 Hz-ist. Põhisagedusele või sagedusvahemikule tõmmatakse joon alla	20-50-120 Hz 10-20-60-120 Hz	
Korrektor		
Maandusklemm		
Korpusega ühendatud klemm		

Peale tabelis toodud tähistest märgitakse mõõteriistade skaalale veel:

- mõõtemehhanismi tingmärk;
- välise magnet- või elektriväljade kaitsmise kategooria;

- c) valmistajavabriku märk (näit. ЗИП);
- d) väljalaskeasta ja mooteriista vabriku number;
- e) mooteriista tüüp (näit. З-30; ЗП-2 jne.);
- f) ГОСТ-i number, mille nõudeile ta vastab.

Peale nende võib olla mooteriistade skaalale kantud veel mitmesuguseid andmeid: sisetakistuse suurus, mähiste induktiivsus, nimi-pingelangu suurus jne. Seega on mooteriista skaalale kantud tingmärkide abil tema täielik tehniline karakteristika.

IV. MÕOTERIISTADE MÕOTEMEHHANISMID

4-1. Mõõtemehhanism ja elektriline skeem

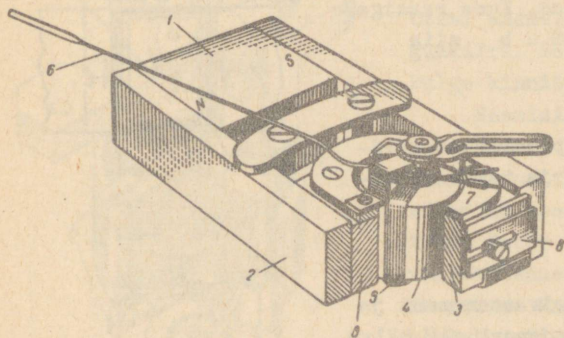
Elektrilised mooteriistad koosnevad elektrilisest skeemist ja mõõtemehhanismist. Skeemi ülesandeks on muundada mõõdetav suurus (võimsus, pinge, mahtuvus) vooluks või mõneks muuks mõõtemehhanismile mõjuvaks suuruseks ja vajaduse korral kompenseerida temperatuuri- või sagedusviga. Mõõtemehhanismis muutub elektromagnetiline energia mehaaniliseks energiaks, mille tulemusena tekib pöördemoment ja sellest tingitud hälve. Mooteriista omadused sõltuvad nii mõõtemehhanismist kui ka elektrilisest skeemist.

Vastavalt toimimispõhimõttele liigitatakse mõõtemehhanismid magnetelektrilisteks, elektromagnetilisteks, elektrodünaamilisteks, ferrodünaamilisteks, elektrostaatilisteks ja induktsioonmehhanismideks.

4-2. Magnetelektriline mehhanism

Magnetelektrilise mehhanismi liikuva osa pöördumine tekitab püsिमagnetі magnetvälja ja voolu magnetvälja vastastikuse mõju tulemusena. Vastavalt konstruktsioonile liigitatakse

se magnelektirilised mehhanismid liikuva raamiga ja paigalseisva raamiga mehhanismideks. Levinumad on liikuva raamiga mehhanismid, mis omakorda jagunevad välise magnetiga, raamisisesese magnetiga ja unipolaarse raamiga mehhanismideks.



Joon. 4-1.

Välise magnetiga mehhanismis (joon.4-1) põhjustab püsimagnet magnetvoo, mis sulgub läbi magnetjuhi 2, poolusekingade 3, silindrilise ferromagnetilise südamiku 4 ja õhupilu, tekitab õhupilul magnetilise induktiooni 0,2 ... 0,3 T. Õhupilu laius on 1 ... 2 mm. Poolusekingad ja ferromagnetiline südamik on vajalikud selleks, et õhupilus oleks radiaalne ühtlaselt jaotatud magnetväli. Õhupilus asetseb raam 5, mis võib pöörduda. Raam koosneb alumiiniumkarkassist (paksus 0,1 ... 0,2 mm) ja sellele keritud isoleeritud vask- või alumiiniumtraadist (\varnothing 0,03 ... 0,2 mm) mähisest. Eriti tundlikes riistades kasutatakse ilma karkassita raame. Raamiga ühisele teljele on kinnitatatud vastumomendi spiraalvedrud ja osuti 6 koos tasakaalustamisraskustega 7. Mõnedel mehhanismidel on väljatiheduse muutmiseks magnetšunt 8, mille abil osa magnetvoogu juhitakse õhupilust mööda. See võimaldab reguleerida tundlikkust. Vool juhitakse rasmi mähisesse läbi spiraalvedrude. Õhupilus olevaid rasmi külgi, millele mõjuvad pöördemomendi tekitavad jõud, nimetatakse aktiivkülgedeks.

Ühele aktiivküljele mõjuv jõud $F = BlwI$, kus B - magnetiline induktioon õhupilus;

l - aktiivkülje pikkus;

w - keerdude arv;
 I - mähist läbiv vool.

Raamile mõjuv pöördemoment
 (joon. 4-2) $M = 2F \frac{b}{2} = Fb = B\ell bwI$,
 kus b - raami laius. Kuna raamiga
 piiratud pindala $S = b$, siis

$$M = BSwI.$$

Liikuva osa pöördumisel ved-
 rud deformeeruvad ja tekib vastu-
 moment

$$M_V = D\alpha,$$

kus D - vedrude erivastumoment ja
 α - raami pöördenurk ehk hälve.

Osuti peatub asendis, mille puhul on täidetud tasakaalu-
 tingimus

$$M = M_V.$$

Asetades sellesse võrdusse M ja M_V avaldised, saame
 $BswI = D\alpha$, millest hälve

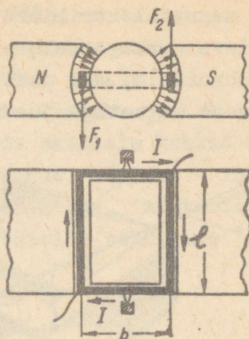
$$\alpha = \frac{BSw}{D} \cdot I.$$

Sellest valemist järeldub:

- 1) hälve on võrdeline vooluga (lineaarne skaala),
- 2) kuna $\alpha = S_I I$, siis voolutundlikkus $S_I = \frac{BSw}{D}$.

Kui mähisesse juhtida vahelduvvool $i = I_m \sin \omega t$, siis
 pöördemoment $M = Bswi = BswI_m \sin \omega t = M_m \sin \omega t$ muutub sa-
 muti siinuseliselt. Küllalt suure inertsmomendi ja omavõnke-
 perioodi korral on hälve võrdeline pöördemomendi keskväärtu-
 sega. Kuna siinuseliselt muutuva momendi keskväärtus on 0,
 siis siinuselise vahelduvvoolu toimel hälvet ei teki.

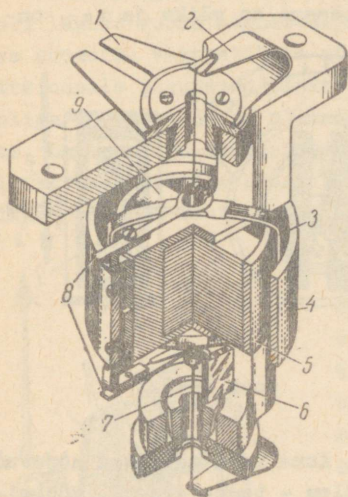
Raami liikumisel indutseeritakse alumiiniumkarkassis
 pöörisevoolud. Nende ja püsिमagnet magnetvälja vastastikuse
 mõju tõttu sumbub võnkumine.



Joon. 4-2.

Uuemates mehhanismides kasutatakse telje ja vedrude asemel tõmmitsaid (joon. 4-3). See võimaldab suurendada tundlikkust ja täpsust. Tõmmitsatele 7 antakse vajalik mehhaaniline pinge lehtvedrudega 2.

Osuti asemel kasutatakse valguskiirt. Seepärast on raami külge kinnitatud peegel 6.



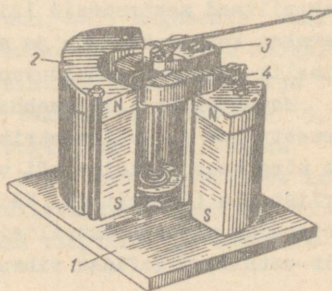
Joon. 4-3.

Raamisiseses magnetiga mehhanismil (joon. 4-3) on raami sees ferromagnetilise südame asemel püsomagnet 9. Selle ümber on metallrõngas 5 väljatiheduse ühtlustamiseks õhupilus. Magnetvoog sulgub rõngakujulise ikke 4 kaudu. Selle mehhanismi eelisteks on väiksem püsomagnet (materjal on kallis) ja väiksem kaal. Puuduseks on magnetvälja ebaühtlus õhupilus ja seega väiksem täpsus. Kasuta-

takse madala täpsusklassiga riistades.

Unipolaarse raamiga mehhanism (joon. 4-4) võimaldab saavutada skaalanurka üle 200° , mistõttu riista gabariidid on sama skaalapikkuse juures väiksemad. Tingituna konstruktsioonist on raamil ainult üks aktiivkülg.

Liikuva magnetiga mehhanism (joon. 4-5) on lihtne ja töökindel. Puudusteks on suur inertsmoment ja raske liikuv osa, milleks on püsomagnet 1 koos teljega 2 ja osutiga. Püsomagnet pöörduv poole 3 läbiva voolu magnetvälja mõjul. Sum-



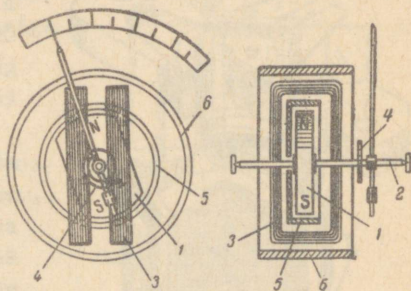
Joon. 4-4.

mutiks on vask- või alumiiniumsilinder 5, milles magneti liikumisel indutseeritakse pöörisvoolud. Kaitseks väliste magnetväljade eest on permalloist ekraan 6. Vastumomendi tekitab spiraalvedru 4. Selle mehhanismi täpsus on väike ja ta on tundlik välistele magnetväljadele. Kasutatakse transportmasinate (autod, lennukid jne.) mõõteriistades.

Väliste magnetväljade mõju magnetelektrilise mehhanismi hälbele on väike, sest püsिमagnet magnetväli õhupilus on suhteliselt tugev. Temperatuuri muutumisel muutuvad magnetiline induksioon õhupilus B ja vedrude erivastumoment D . Kuna need muutused mõjuvad hälbele eri suundades (vt. hälbevalem - temperatuuri tõusmisel B ja D mõlemad vähenevad), siis nad vastastikku peaaegu kompenseerivad teineteist ja temperatuurivea põhjuseks on peamiselt mähise ja vedrude takistuse muutumine. Temperatuurivea vähendamiseks või kõrvaldamiseks kasutatakse temperatuurivea kompensatsiooniskeeme (vt. § 5-5).

Suure tundlikkuse, väikese omatarbe, suure täpsuse ja hälbe ning voolu vahelise lineaarse seose tõttu on magnetelektrilised mehhanismid laialt levinud. Nende puudusteks on keerukas konstruktsioon ja see, et ilma muundita pole teda võimalik kasutada vahelduvvoolu mõõtmiseks.

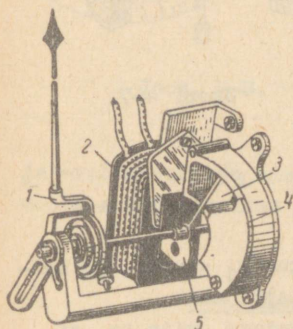
Magnetelektrilisi mehhanisme kasutatakse alalisvoolu-ampereetes ja -voltmeetes, galvanomeetrites, ommetrites ning koos alaldiga või termomuundiga universaalsetes mõõteriistades (testrites). Väikese inertsmomendiga ja omavõnkeperioodiga magnetelektrilisi mehhanisme kasutatakse valguskiir-ostsillograafides vibraatoritena.



Joon. 4-5.

4-3. Elektromagnetiline mehhanism

Elektromagnetilise mõõtemehhanismi liikuv osa pöörduv pooli läbiva voolu magnetvälja ja ühe või mitme ferromagnetilise südamikuga vastastikuse mõju tulemusena. Vastavalt konstruktsioonile jagunevad elektromagnetilised mehhanismid lamepooliga (joon. 4-6) ja silinderpooliga (joon. 4-7) mehhanismideks. Lamepooliga mehhanismis tõmbub pooli 2 läbiva voolu toimel ferromagnetiline südamik 5 pooli sisse, mille tulemusena liikuv osa koos osutiga 1 pöörduv. Kilbiriistade südamik on



Joon. 4-6.

valmistatud elektrotehnilisest terasest, laboratoorse riistade südamik aga permalloyist. Alalisvoolu mõõtmisel sõltub näit hüstereesi tõttu sellest, kas mõõdetav vool kujunes voolu tugevnemisel või nõrgenemisel. Seepärast elektrotehnilisest terasest südamikuga riistad ei vasta alalisvoolu korral täpsusklassile ja skaalale on kantud märk "∞" ("kasutatav vahelduvvoolul"). Permalloy kitsa hüstereesisilmuse tõttu on permalloy südamikuga mehhanismid kasutatavad nii alalis- kui vahelduvvooluriistades,

Silinderpooliga mehhanismis (joon. 4-7) magneetib vool pooli 3 sees oleva paigalseisva südamiku 6 ja liikuva südamiku 2. Liikuv südamik tõukub paigalseisvast eemale ja telje 1 kaudu pöörab osutit 4. Vastumomendi tekitab spiraalvedru 5. Silinderpooliga mehhanism on tehnoloogilisem ja ühtlasema skaalaga kui lamepooliga mehhanism. Kuid sama magnetilise induktsiooni ja seega pöördemomendi tekitamiseks vajab ta suuremat magneetimisergutust IW , millest tingituna ka tema omatarve on suurem.

Elektromagnetilise mehhanismi pöördemoment

$$M = kI^2,$$

kus I - mähist läbiv vool;

k - võrdetegur.

Võrdetegur

$$k = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha},$$

kus $\frac{dL}{d\alpha}$ - induktiivsuse muutumise kiirus hälbe muutumisel.

Järelikult sõltub võrdetegur k pooli ja südamike kujust, nende vastastikusest asendist ja hälbest.

Kuna vedrude või tõmmitsate vastumoment $M_v = D\alpha$, siis vastavalt tasakaalutingimusele

$\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = D\alpha$, millest hälve

$$\alpha = \frac{1}{2D} \frac{dL}{d\alpha} \cdot I^2 = k_1 \cdot I^2.$$

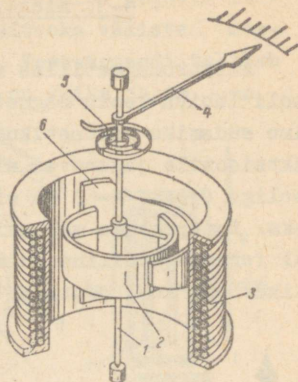
Järelikult:

1) kui $\frac{dL}{d\alpha} = \text{const}$, siis ka võrdetegur $k_1 = \text{const}$ ja hälve on võrdeline voolu ruuduga (ruutskaala);

2) kuna hälve on võrdeline voolu ruuduga, siis ta ei sõltu voolu suunast ja mehhanism on kasutatav nii alalis- kui ka vahelduvvoolu korral;

3) skaalat saab muuta lineaarsemaks, kui valida sobivalt $\frac{dL}{d\alpha}$, s.t. südamike ja pooli kuju ning nende vastastikune asetus.

Vahelduvvoolu mõõtmisel on elektromagnetilise mehhanismi hälve võrdeline efektiivväärtuse ruuduga. Kuna magnetvälja tihedus poolis on suhteliselt väike, siis elektromagnetilise mehhanismi hälbele avaldavad mõju välised magnetväljad. Nende mõju vähendamiseks mehhanism varjestatakse ferromagnetilise varjega või valmistatakse astaatilisena. Astaatilisel mehhanismil (joon. 4-8) on kaks pooli ja kaks südamikku. Nad on paigutatud nii, et tekitavad samasuunalised pöördemomendid. Mähiste magnetväljad on vastusuunalised. Väline magnetväli tugevdab ühe ja nõrgendab teise pooli magnetvälja ning

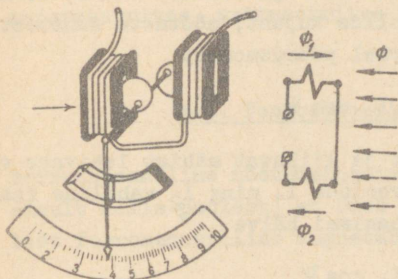


Joon. 4-7.

summaarne mõju on seega null. Selleks et vältida summuti magnetvälja mõju näidule, valmistatakse elektromagnetilised meh-

hanismid vajaduse korral õhksummutitega.

Elektromagnetilised mõõtemehhanismid on kõige lihtsamad ja töökindlamad. Kuna vool ei läbi momendivedrusid, siis taluvad hästi ülekoormust. Puuduseks on suur omatarve, ebalineaarne skaala ja hüsteeresist ning pöörivooludest tingituna väike täpsus. Kasutatakse vahelduvvoolu kilbiampereetrites

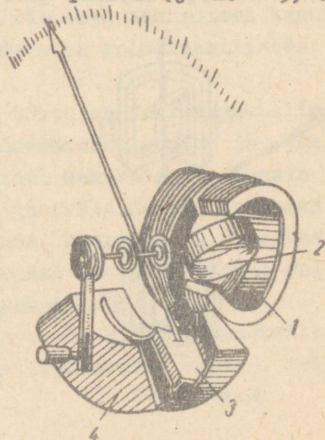


Joon. 4-8.

ja -voltmeetrites ning laboratoorseset alalis- ja vahelduvvooli-ampereetrites ja -voltmeetrites.

4-4. Elektrodünaamiline mehhanism

Elektrodünaamilises mõõtemehhanismis tekib pöördemoment paigalseisvat pooli ja liikuvat pooli läbivate voolude magnetväljade vastastikusel mõjul. Liikuv pool 2 (joon. 4-9) on kinnitatud osutiga ja õhksummuti 4 tiivikuga 3 ühisele teljele ja asub paigalseisva pooli 1 sees. Telje läbiviimise hõlbustamiseks koosneb paigalseisev pool tavaliselt kahest poolest. Vool juhitakse liikuvasse pooli momendivedrude kaudu. Mehhanismi pöördemoment alalisvoolu korral



Joon. 4-9.

$$M = k_1 I_1 I_2,$$

kus I_1 ja I_2 on voolud paigalseisvas ja liikuvas mähises; k_1 on võrdetegur, mis sõltub poolide kujust, mõõtmete suhetest ja hälbest. Vahelduvvoolu korral pöördemoment

$$M = k_1 I_1 I_2 \cos \psi,$$

kus I_1 ja I_2 on paigalseisvat ja liikuvat mähist läbivate voolude efektiivväärtused ja ψ voolude I_1 ning I_2 vaheline faasinähe. Elektrodünaamilise mehhanismi hälve

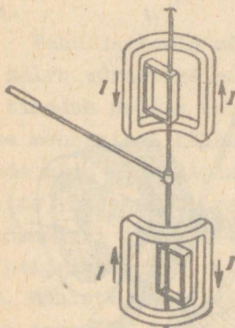
$$\alpha = k I_1 I_2 \cos \psi,$$

kus võrdetegur $k = \frac{k_1}{D}$. Kuna poolide magnetväljad on väga nõrgad, siis on elektrodünaamiline mehhanism väga tundlik välisete magnetväljade suhtes. Seepärast valmistatakse nad õhksummutiga ning varjestatakse kahekordse ferromagnetilise varjega (väline vari pehmeterasest, seesmine permalloist). Valmistatakse ka astaatilisi elektrodünaamilisi mehhanisme (joon.

4-10), mis omavad kaks paari paigalseisvaid ja liikuvaid pole. Voolu suunad paigalseisvates poolides ja seega ka poolide magnetväljad on vastassuunalised. Häiriv magnetväli tugevdab ühe ja nõrgendab teise paigalseisva pooli magnetvälja ning mõjub kummagi poolipaari pöördemomendile eri suunas. Selleks et mõlema poolipaari pöördemomendid oleksid samasuunalised,

on ka liikuvates poolides voolud vastassuunalised.

Elektrodünaamilise mehhanismi eelisteks on näidu sõltumatus voolu liigist (alalis- või vahelduvvool) ja sagedusest; võimalus valmistada suure täpsusega vahelduvvoolumõõteriistu; kuna hälve sõltub peale voolude ka vooludevahelisest faasinähest, siis saab seda mehhanismi kasutada vattmeetrites ja mujal, kus on vaja faasitundlikku mehhanismi.

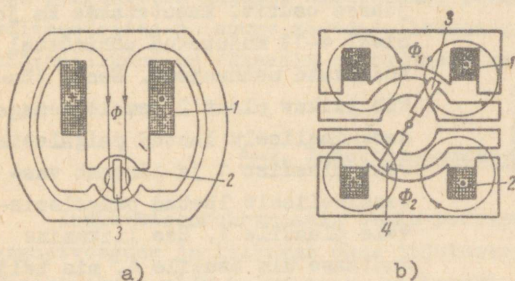


Joon. 4-10.

Puuduseks on suur omatarve ning tundlikkus ülekoormuse ja väliste magnetväljade suhtes. Elektrodünaamilisi mehhanisme kasutatakse täpsetes laboratoorsetes vahelduv- ja alalisvoolu- ampermeetrites, vattmeetrites ja voltmeetrites.

4-5. Ferrodünaamiline mehaanizm

Ferrodünaamiline mõõtemehhanism erineb elektrodünaamilisest ainult selle poolest, et omab magnetiliselt pehmet materjalist ferromagnetilist magnetahelat (joon. 4-11).



Joon. 4-11.

Joonisel 4-11, a on kujutatud ühe liikuva raamiga mehhanism. Paigalseisva mähise 1 magnetvoog läbib õhupilu 2, milles asub liikuv mähis 3. Joonisel 4-11, b on kujutatud kahe

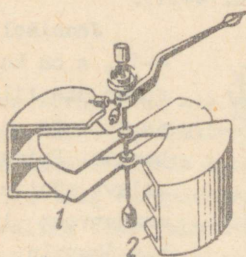
liikuva raamiga mehhanism. Liikuv mähis 3 asub paigalseisva mähise 1 magnetväljas ja liikuv mähis 4 asub paigalseisva mähise 2 magnetväljas. Kahe liikuva mähisega mehhanismi kasutatakse kahe vattmeetri meetodil mõõtvates kolmefaasilistes vattmeetrites.

Ferromagnetilise magnetahela tõttu on ferromagnetilise mehhanismi magnetväli tugevam, pöördemoment suurem ja omatarve väiksem kui elektrodünaamilisel mehhanismil. Tugeva magnetvälja tõttu on ka väliste magnetväljade mõju väiksem. Magnetahelas tekkivate pöörivoolude, hüstereesi, rauaskadude ja magnetimiskõvera ebalinearsuse tõttu on täpsus palju väiksem kui elektrodünaamilisel mehhanismil.

Kasutatakse peamiselt vahelduvvoolu kilbivattmeetrites ning suure pöördemomendi tõttu isekirjutavates amper-, volt- ja vattmeetrites.

4-6. Elektrostaatiline mehhanism

Elektrostaatilise mõõtemehhanismi pöördemoment tekib kahe elektrilaenguga plaadisüsteemi vastastikuse mõju tulemusena. Joonisel 4-12 on kujutatud mehhanism, milles liikuva



Joon. 4-12.

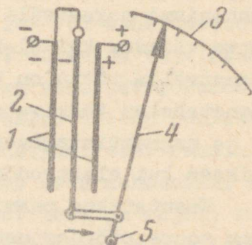
plaadid 1 pöörduvad paigalseisvasse kambritesse 2, pöörates seejuures osutit. Kasutatakse ka joonisel 4-13 kujutatud põhimõttel toimivaid mehhanisme. Nende tõukub liikuva plaat 2 eemale temaga samanimeliselt laetud paigalseisvast plaadist 1 ja läheneb vastasnimeliselt laetud paigalseisvale plaadile 1. See liikumine kantakse üle osutile 4, mis telje ümber pöördues annab skaalal hälbe.

Elektrostaatilise mehhanismi pöördemoment

$$M = kU^2,$$

kus U - mehhanismile rakendatud pinge, $k = \frac{1}{2} \cdot \frac{dC}{d\alpha}$ - võrdetegur, mis sõltub plaatide kujust, asetusest ja hälbest.

Plaatide sobiva kuju valikuga võib ruutskala muuta tunduvalt lineaarsemaks. Tööprintsibiist järeldub, et elektrostaatiline mehhanism mõõdab vahetult pinget. Liikuvad ja paigalseisvad plaadid moodustavad kondensaatori, mille mahtuvus sõltub hälbest, muutudes mõnest pikofaradist mõnekümne pikofaradini.



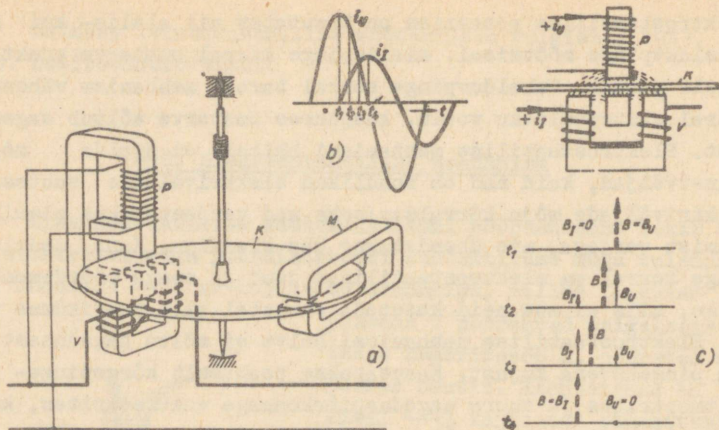
Joon. 4-13.

Elektrostaatiline mehhanism on kasutatav nii alalis- kui ka vahelduvpinge mõotmisel. Alalispinge korral omatarve praktiliselt puudub. Vahelduvpinge korral tarbib mehhanism vähesel määral mahtuvuslikku voolu, kusjuures omatarve sõltub sagedusest. Elektrostaatilise mehhanismi hālbele ei avalda mõju magnetväljad, kuid nad on tundlikud elektriväljade suhtes. Elektriväljade mõju kõrvaldamiseks nad varjestatakse alumiumist varjega, mis ühendatakse ühe klemmiga. Kuna madala pinge korral on elektrostaatilised jõud ja seega pöördemoment väike, siis ei saa neid kasutada pingetel alla paarikümne volti. Elektrostaatilise mehhanismi hālve ei sõltu sagedusest ega pingekõvera kujust. Kasutatakse peamiselt kõrgepinge-voltmeetrites ja suure sageduspiirkonnaga voltmeetrites, kui mõõtepiirkond on vähemalt parkümmend volti.

4-7. Induktsioonmehhanism

Induktsioonmehhanismis tekib pöördemoment vahelduvate magnetvoogude ja liikuvas osas indutseeritud pöörivoolude vastastikuse mõju tulemusena. Liikuvaks osaks on tavaliselt alumiumketas. Vastavalt liikuvat osa läbivate magnetvoogude arvule jaotatakse induktsioonmehhanismid ühevoolisteks ja mitmevoolisteks mehhanismideks. Ühevoolistel mehhanismidel on üks elektromagnet, mis liikuva ketta telje suhtes asetseb asümmeetriliselt. Kuigi ühevoolise mehhanismi konstruktsioon on lihtne, ei kasutata teda tänapäeva mõõtmistehnikas. Põhjuseks on väike pöördemoment.

Mitmevoolised mehhanismid jagunevad kahte gruppi: kulgeva magnetväljaga mehhanismid ja pöörleva magnetväljaga mehhanismid. Kulgeva magnetväljaga mehhanismides nihkub magnetilise induktsiooni maksimaalväärtus ühe elektromagneti pooluse alt teise elektromagneti pooluse alla, vedades ketast kaasa. Magnetvälja nihkumist selgitab joonis 4-14. Kuna selliseid mehhanisme kasutatakse elektrienergia arvestites, siis on joonisel kujutatud skemaatilisel ühefaasilise induktsioonarvesti ajursüsteem.



Joon. 4-14.

Elektromagnetid P ja V on lülitatud nii, et ühes neist tekib pingega võrdeline vool i_U ja teist läbib tarbija vool i_I . Nende voolude tekitatud magnetvood läbivad alumiiniumketast k. Ketta pöörlemist pidurdab püsomagnet M. Voolud i_U ja i_I on faasis nihutatud vastavalt joonisele 4-14, b veerand perioodi ehk $\frac{\pi}{2}$ radiaani. Joonisel 14, c on kujutatud magnetilise induksiooni maksimumi asukoht hetkedel t_1 , t_2 , t_3 ja t_4 . Magnetilise induksiooni maksimum liigub alati eestõttava magnetvoo poolt mahajääva magnetvoo poole.

Kahe magnetvooga mehhanismi pöördemoment

$$M = k' f \dot{\Phi}_1 \dot{\Phi}_2 \sin \psi,$$

kus k' - konstruktsioonist ja ketta takistusest sõltuv võrdetegur;

$\dot{\Phi}_1$ ja $\dot{\Phi}_2$ - ketast läbivad magnetvood;

ψ - $\dot{\Phi}_1$ ja $\dot{\Phi}_2$ vaheline faasinihe;

f - vahelduvvoolu sagedus.

Pöördemomendi valemist järeldub:

1) pöördemomendi tekitamiseks on vaja vähemalt 2 mag-

netvoogu või ühe magnetvoo 2 komponenti, mis on ajas ja ruumis nihutatud;

2) pöördemoment on maksimaalne, kui magnetvoogude vaheline faasinihe $\psi = \frac{\pi}{2}$ ($\sin \frac{\pi}{2} = 1$);

3) pöördemoment on võrdeline sagedusega.

Kui õhupilud elektromagnetite pooluste vahel on küllalt kitsad ja rauaskaod väikesed, siis on magnetvood mähiseid läbivate vooludega faasis. Kui sealjuures südamikud pole magnetiliselt küllastunud, on magnetvood võrdelised vooludega ja pöördemoment

$$M = k f I_1 I_2 \sin \psi,$$

kus k - Võrdetegur;

I_1 ja I_2 - mähiseid läbivate voolude efektiivväärtused;

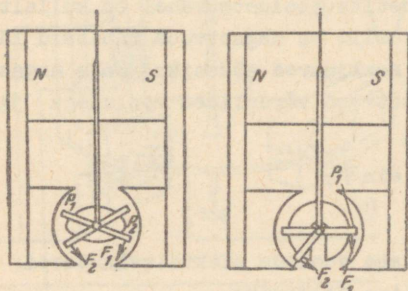
ψ - I_1 ja I_2 vaheline faasinihe.

Magnetringide väikeste magnetiliste takistuste tõttu on induksioonmehhanismi magnetvood tugevad, pöördemoment suur ja väliste magnetväljade mõju väike. Suur pöördemoment võimaldab valmistada mehhanismide liikuva osa tugeva konstruktsiooniga, ilma et selle kaal põhjustaks suurt hõõrdeviga. Tugeva konstruktsiooni tõttu on induksioonmehhanismid vastupidavad ka ülekoormustele. Temperatuuri muutumisel muutuvad alumiiniumketta ja mähiste aktiivtakistused ja seega ka pöördemoment, põhjustades temperatuurivea. Tänapäeval kasutatakse induksioonmehhanisme peamiselt vahelduvvoolu-energiaarvestites ja releedes. Varem kasutati neid suure pöördemomendi tõttu ka vahelduvvoolu-ampermeetrites, -voltmeetrites ja -vattmeetrites. Induksioonmehhanismi tööpõhimõttest järeldub, et alalisvooluriistades teda kasutada ei saa.

4-8. Logomeetrid

Logomeetriteks nimetatakse mõõtemehhanisme, millede hälve sõltub kahe elektrilise suuruse suhtest (logos - kreeka keeles suhe). Logomeetrid liigitatakse samuti kui teisedki mõõtemehhanismid magnetelektrilisteks, elektromagnetilisteks,

elektrodünaamilisteks ja ferrodünaamilisteks. Magnetelektrilistel logomeetritel (joon. 4-15) on kaks ühisele teljele kinnitatud raami P_1 ja P_2 , millele mähistesesse juhitud voolud I_1 ja I_2 põhjustavad vastasuunalised pöördemomendid M_1 ja M_2 .



Joon. 4-15.

Mehaanilist vastumomenti tekitavad vedrud puuduvad. Voolud juhitakse mähistesesse momendivabade juhtmete abil. Kui õhupilu on ebaühtlane, siis kummagi raami pöördemoment sõltub hälbest erinevalt ja liikuva osa pöördumisel ülekaalus oleva momendi toimel tekib teatud hälbel olukord, mil $M_1 = M_2$, ja logomeeter on tasakaalus. Magnetelektrilise logo-

meetri hälve sõltub voolude suhtest

$$\alpha = f \left(\frac{I_1}{I_2} \right).$$

Magnetelektrilisi logomeetreid kasutatakse pingest sõltumatu näiduga oommeetrites ja mõnedes sildlülitusega mõõteriistades (näiteks takistustermomeetrites).

Elektromagnetilisel logomeetril (joon. 4-16) on kaks südamikku ja kaks pooli. Kumbki pool, tõmmates südamikku endasse, põhjustab vastasuunalise pöördemomendi. Elektromagnetilise logomeetri hälve

$$\alpha = f \left(\frac{I_1^2}{I_2^2} \right).$$

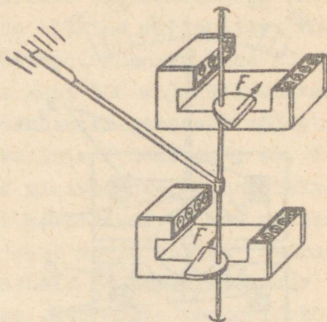
Elektrodünaamilisel logomeetril (joon. 4-17) on üks paigalseisev pool A ja kaks liikutavat pooli B_1 ja B_2 , milledest kumbki tekitab erisuunalise pöördemomendi. Hälve

$$\alpha = f \left(\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} \right),$$

kus I_1 ja I_2 - voolud liikuvates poolides;

ψ_1 - faasinihe I_1 ja paigalseisva pooli voolu I vahel;

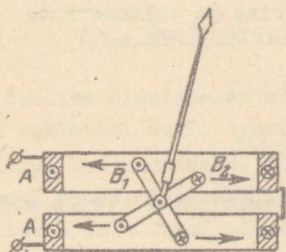
ψ_2 - faasinihe I_2 ja paigalseisva pooli voolu I vahel.



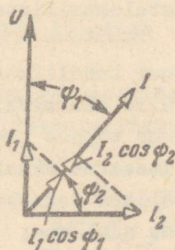
Joon. 4-16.

Ferrodünaamilisel logomeetril (joonis 4-18) on kaks paigalseisvat pooli A_1 ja A_2 ning kaks liikuvat pooli B_1 ja B_2 . Mähised A_1 ja B_1 on ühendatud järjestikku. Samuti on ühendatud järjestikku A_2 ja B_2 . Esimest mähisepaari läbib vool I_1 ja teist paari I_2 . Hälve

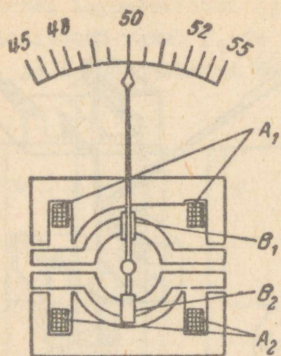
$$\alpha = f \left(\frac{I_1^2}{I_2^2} \right).$$



Joon. 4-17.



Elektromagnetilisi, elektrodünaamilisi ja ferrodünaamilisi logomeetreid kasutatakse sagedusenõõtjates, mahtuvusenõõtjates ja fasomeetrites. Logomeetri õigeks töötamiseks peavad sõltumata logomeetri tüübist olema täidetud järgmised tingimused:



Joon. 4-18.

1) peab olema kaks ühisele teljele kinnitatud mõõteelementi, mis tekitavad vastassuunalise momendid;

2) vähemalt üks momentidest peab sõltuma hälbest;

3) mehaaniline vastumoment peab puuduma.

Logomeetrite kasutamine mõõteriistades võimaldab vältida pin-ge või sageduse muutumisest tingitud mõõtevigu, sest need mõjuvad ühteviisi nii murru nimetajale kui ka lugejale.

V. VOOLU JA PINGE MÕOTMINE

5-1. Magnetelektrilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Magnetelektriliste ampermeetrite ja voltmeetrite head omadused:

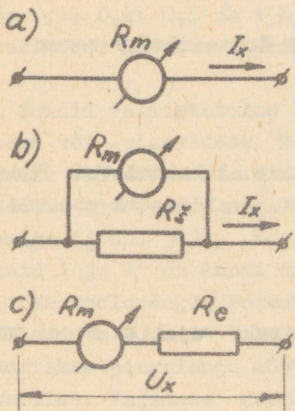
- 1) suur tundlikkus;
- 2) väike omatarve;
- 3) suur täpsus (kuni klass 0,1);
- 4) lineaarne skaala;
- 5) väliste magnetväljade ja temperatuuri väike mõju;
- 6) hea sumbuvus;
- 7) võimalus universaalsundi abil valmistada paljupiirkonnalisi ampermeetreid.

Puudused:

- 1) võimalus mõõta ainult alalisvoolu või -pinget;
- 2) tundlikkus ülekoormustele;
- 3) mõõtemehhanismi keeruline konstruktsioon ja kõrge hind.

Magnetelektrilised riistad on tänapäeval kõige levinumad alalisvooluriistad. Neid kasutatakse laboratoorsete alalisvooluriistadena ning siis, kui on oluline mõõteriista väike omatarve. Milliamperemeetrites mõõtepiirkonnaga kuni 50 mA

(harva kuni 500 mA) lülitatakse mõõtemehhanism otseselt mõõdetavale voolule (joon. 5-1, a). Tugevama nimivooluga magnetelektrilist mehhanismi ei saa valmistada, sest voolu toimel vedrud soojeneksid ja nende elastsus muutuks. Suuremate voolupiirkondade saamiseks lülitatakse mehhanismiga paralleelselt šunt (joon. 5-1, b). Magnetelektriline voltmeeter koosneb väikese nimivooluga (0,1 ... 7,5 mA) mõõtemehhanismist ja sellega järjestikku lülitatud eeltakistist (joon. 5-1, c).



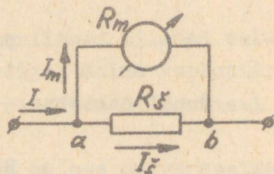
Joon. 5-1.

5-2. Šundi arvutus ja šuntide liigitus

Šundiks nimetatakse mõõtemehhanismiga paralleelselt ühendatud takistit. Šunti kasutatakse alalisvooluriistade voolupiirkonna laiendamiseks. Mõõdetav vool (joon. 5-2) tekitab punktide a ja b vahel pingelang

$$U_{ab} = I_m R_m = I \frac{R_s R_m}{R_s + R_m},$$

kus I_m - mehhanismi läbiv vool;
 R_m - mehhanismi ja selle ühendusjuhtmete takistuste summa;



Joon. 5-2.

I - mõõdetav vool;

R_{S} - šundi takistus.

Valemi teisendamisel saame:

$$I = I_m \frac{R_m + R_{\text{S}}}{R_{\text{S}}} = I_m \left(\frac{R_m}{R_{\text{S}}} + 1 \right) = I_m p_I,$$

kus voolupiirkonna laiendamise ehk šunteerimise tegur

$$p_I = \frac{R_m}{R_{\text{S}}} + 1$$

näitab, mitme kordseks on voolupiirkond laiendatud. Kuna voolupiirkonna laiendamise teguri saab avaldada ka voolude kaudu

$$p_I = \frac{I}{I_m},$$

siis saab voolupiirkonna laiendamiseks vajaliku šundi takistuse arvutada seosest

$$R_{\text{S}} = \frac{R_m}{p_I - 1}.$$

Näide 12. Mehhanismi nimiaandmed on 75 mV ja 5 mA. Arvutada šundi takistus voolupiirkonnale 100 mA.

Mehhanismi takistus

$$R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{75}{5} = 15 \Omega.$$

Voolupiirkonna laiendamise tegur

$$p_I = \frac{I}{I_m} = \frac{100}{5} = 20.$$

šundi takistus

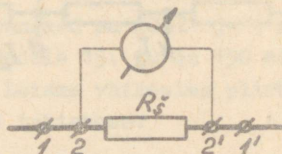
$$R_{\text{S}} = \frac{R_m}{p_I - 1} = \frac{15}{20 - 1} = 0,789 \Omega.$$

šundid liigitatakse seesmisteks (asuvad mõõteriista sees) ja välisteks šuntideks. Välistes šundid jagunevad individuaalšuntideks ja kalibreeritud šuntideks. Individuaalšunt on kasutatav ainult koos selle riistaga, mille number on tal.

le märgitud. Kalibreeritud šundid on kasutatavad koos mistahes millivoltmeetriga, mille nimihälve vastab šundi nimipingelangule. Vastavalt standardile IOCT 1845-59 valmistatakse kalibreeritud šundid nimipingelangudega 45, 75, 100 või 150 mV. Sama standard liigitab šundid kuude täpsusklassi 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 ja 1,0. Täpsusklassi number näitab šundi takistuse lubatavat erinevust nimitakistusest protsentides.

Šundid valmistatakse tavaliselt manganiintraadist, -varrastest või -plaatidest. Nende takistus on väike. Ühendusklemmide all esinevate üleminekutakistuste mõju vähendamiseks valmistatakse šundid sageli 4

klemmiga (joon. 5-3). Vooluklemmid 1 ja 1' on šundi ühendamiseks vooluringi. Potentsiaaliklemmide 2 ja 2' külge ühendatakse pingelangu mõõtev mõõteriist. Vajaduse korral, kui mehhanismiharu takistusele avaldab lubamatult suurt mõju ühendusjuhtmete takistus, tuleb mõõtemehhanism ühendada



Joon. 5-3.

välise šundiga kalibreeritud, s.t. kindlat takistust omava juhtmetega. Šunte valmistatakse nimivooluga kuni 6000 A.

5-3. Universaalse šundi arvutus

Mitme mõõtepiirkonnaga magnetelektirilised riistad valmistatakse tavaliselt universaalse šundiga. Kolme voolupiirkonnaga universaalse šundiga ampermeetri skeem on joonisel 5-4, a.

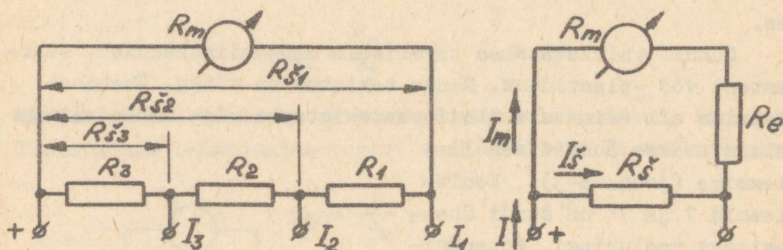
Sõltuvalt valitud mõõtepiirkonnast on osa universaalse šundi takistitest mehhanismi harus eeltakistiks (joon. 5-4, b). Voolupiirkonna I_2 puhul šundi takistus $R_s = R_3 + R_2$ ja eeltakistus $R_e = R_1$.

Universaalse šundi arvutamist alustatakse väikseimale

mõõtepiirkonnale I_1 vastava šundi takistuse $R_{\text{š1}}$ arvutamiseks:

$$R_{\text{š1}} = \frac{R_m}{P_{\text{II}} - 1},$$

kus $P_{\text{II}} = \frac{I_1}{I_m}$.



Joon. 5-4.

Teiste piirkondade šuntide takistuste arvutusvalemi tuletamisel lähtume punktide a ja b (joon. 5-4, b) vahelisest pingest:

$$U_{ab} = I_m (R_m + R_e) = I \frac{R_{\text{š}} (R_m + R_e)}{R_m + R_e + R_{\text{š}}},$$

millest

$$I = I_m \frac{(R_m + R_e + R_{\text{š}}) (R_m + R_e)}{R_{\text{š}} (R_m + R_e)} = I_m \frac{R_m + R_e + R_{\text{š}}}{R_{\text{š}}} = I_m \frac{R}{R_{\text{š}}}$$

kus $R = R_m + R_e + R_{\text{š}}$ on mõõtemehhanismi ja universaalse šundi kogutakistuse takistuste summa (vrd. joon. 5-4, a ja 5-4, b). Valitud voolupiirkonnale vastava šundi takistuse saab leida seosest

$$R_{\text{š}} = \frac{R}{P_I}.$$

Vastavalt sellele

$$R_{\text{a}2} = \frac{R}{P_{12}} = \frac{R}{\frac{I_2}{I_m}} \quad \text{ja} \quad R_{\text{a}3} = \frac{R}{P_{13}} = \frac{R}{\frac{I_3}{I_m}} .$$

Teades kõikidele piirkondadele vastavaid suntide takistusi, saab arvutada, millistest takistustest tuleb universaal-sunt koostada.

$$R_1 = R_{\text{a}1} - R_{\text{a}2};$$

$$R_2 = R_{\text{a}2} - R_{\text{a}3};$$

$$R_3 = R_{\text{a}3}.$$

Näide 13. Mõõtemehhanismi nimiandmed on 20Ω ja 5 mA . Arvutada universaalne sunt piirkondadele 15 ; 30 ja 150 mA .

Leiame väikseima piirkonna

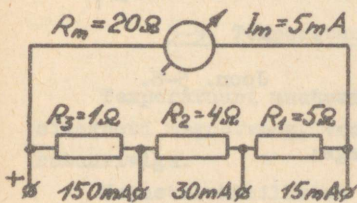
šundi takistuse:

$$R_{\text{a}1} = \frac{R_m}{P_{I1} - 1} = \frac{R_m}{\frac{I_1}{I_m} - 1} =$$

$$= \frac{20}{\frac{15}{5} - 1} = 10\Omega,$$

Kogutakistus

$$R = R_m + R_{\text{a}1} = 20 + 10 = 30\Omega$$



Joon. 5-5.

Ülejäänud voolupiirkondade suntide takistused

$$R_{\text{a}2} = \frac{R}{P_{12}} = \frac{R}{\frac{I_2}{I_m}} = \frac{30}{\frac{30}{5}} = 5\Omega;$$

$$R_{\text{a}3} = \frac{R}{P_{13}} = \frac{R}{\frac{I_3}{I_m}} = \frac{30}{\frac{150}{5}} = 1\Omega.$$

Leiame šundi koostamiseks vajalikud takistused:

$$R_3 = R_{\text{š}3} = 1\Omega;$$

$$R_2 = R_{\text{š}2} - R_{\text{š}3} = 5 - 1 = 4\Omega;$$

$$R_1 = R_{\text{š}1} - R_{\text{š}2} = 10 - 5 = 5\Omega.$$

5-4. Eeltakisti arvutus

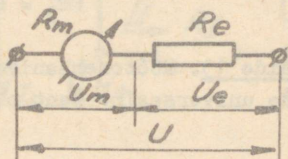
Vastavakt joonisel 5-6 kujutatud skeemile voltmeetrit läbiv vool

$$I = \frac{U}{R_m + R_e} = \frac{U_m}{R_m},$$

millest

$$U = U_m \frac{R_m + R_e}{R_m} = U_m \left(\frac{R_e}{R_m} + 1 \right) =$$

$$= U_m p_u,$$



Joon. 5-6.

kus U_m - mõõtemehhanismile langev pinge;
 U - mõõdetav pinge;
 R_m - mehhanismi takistus;
 R_e - eeltakisti takistus;
 p_u - pingepiirkonna laiendamise tegur:

$$p_u = \frac{U}{U_m}.$$

Avaldades antud pingepiirkonna laiendamise tegurile vastava eeltakistuse, saame:

$$R_e = R_m(p_u - 1).$$

Näide 14. Mehhanismi nimiaandmed on 5 mA ja 100Ω . Arvutada eeltakistus piirkonnale 250 V.

Mehhanismi nimipinge

$$U_m = I_m R_m = 5 \cdot 100 = 500 \text{ mV} = 0,5 \text{ V}.$$

Pingepiirkonna laiendamise tegur

$$p_u = \frac{U}{U_m} = \frac{250}{0,5} = 500.$$

$$\text{Eeltakistus } R_e = R_m(p_u - 1) = 100(500 - 1) = 49900\Omega.$$

Eeltakistid keritakse manganiintraadist. Nad liigitatakse seesmisteks ja välisteks eeltakistiteks. Välistes eeltakistid jagunevad individuaalseteks (on kasutatavad ainult koos selle mehhanismiga, mille number neile on märgitud) ja kalibreeritud eeltakistiteks. Kalibreeritud eeltakistid on kasutatavad kõikide mehhanismidega, mille nimivool ei ületa eeltakisti nimivoolu. Kalibreeritud eeltakistid valmistatakse nimivooludega 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 7,5; 15 ja 30 mA ning täpsusklassidega 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 ja 1,0.

5-5. Temperatuurivea kompenseerimine

Temperatuuri muutumisel muutuvad mähiste takistused, püsिमagnet magnetvoog, vedrude erivastumoment ja tekib temperatuurivea.

Magnetelektrilistes riistades kompenseerib erivastumomendi muutumise püsिमagnet magnetvoo muutus ja seega jääb temperatuurivea põhjuseks takistuste muutumine.

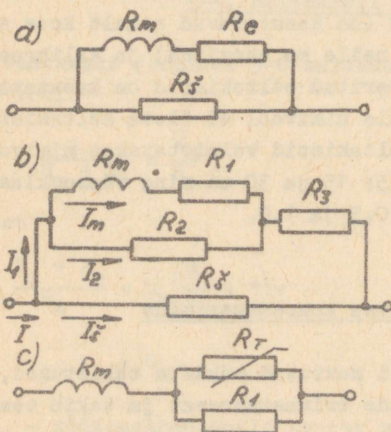
Vase ja alumiiniumi takistuse temperatuuritegur $\beta = +0,4 \frac{\%}{\text{deg}}$. Seega temperatuuri muutus 1 kraadi võrra muutub mehhanismi mähise takistus 0,4% võrra. Ilma šundita milliampermeetrites see temperatuurivea ei põhjusta, kuna mehhanismi läbiv vool $I = \frac{U}{R + R_m}$ ja mõõtemehhanismi takistus R_m on palju väiksem ülejäänud vooluringi kogutakistusest R ning seega R_m muutumine ei avalda märgatavat mõju mehhanismi läbivale voolule. Voltmeetrites on mehhanismi mähisega järjestiku manganiinist eeltakisti (joon. 5-1, c), mille takistuse temperatuuritegur $\beta_e \approx 0$.

Eeltakistiga voltmeetri takistuse temperatuuritegur

$$\beta = \frac{\beta_m R_m + \beta_e R_e}{R_m + R_e} = \frac{\beta_m R_m + OR_e}{R_m + R_e} = \beta_m \frac{R_m}{R_m + R_e}.$$

Järelikult temperatuuriviga väheneb nii mitu korda kui mitu korda on eeltakistiga voltmeetri kogutakistus suurem mõõtemehhanismi takistusest. Ampermeetritel täpsusklassiga

1; 1,5 ja 2,5 vähendatakse temperatuuriviga samuti mehhanismiga järjestikku ühendatava eeltakistiga (joon. 5-7, a). Täpsusklassid 0,2 ja 0,5 nõuavad aga keerukamat, nn. järjestik-paralleelset temperatuurivea kompenseerimise skeemi (joon. 5-7, b). Selle tööpõhimõtte on järgmine. Temperatuuri tõusmisel suureneb R_m suurenemise tõttu ahela kogutakistus ja väheneb I_1 . Kuna mehhanismiharuga on paralleelselt lülitatud suure positiivse takistuse temperatuuriteguriga takisti R_2 (vasest),



Joon. 5-7.

siis selle takistus suureneb rohkem kui mehhanismiharu takistus $R_m + R_1$ ja toimub haruvoolude I_m ja I_2 ümberjaotumine. Takistuste R_m , R_2 , R_1 ja R_3 (viimased kaks manganiinist) õige valiku korral jääb mehhanismi läbiv vool I_m praktiliselt muutumatuks.

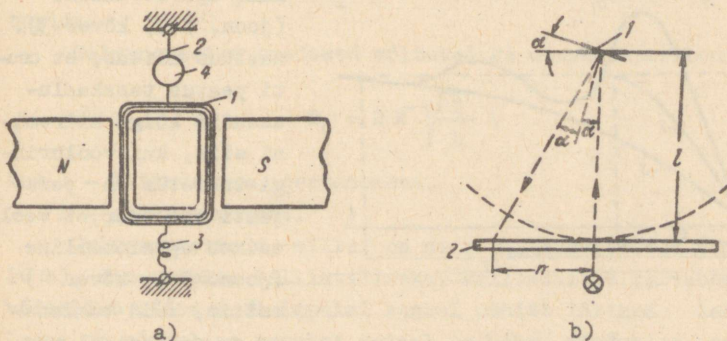
Kuna pooljuhttakistitel on suur negatiivne takistuse temperatuuritegur $\beta = -(25 \dots 35)\%$, siis kasutatakse tänapäeval temperatuurivea kompenseerimiseks ka pooljuhttakisteid. Joonisel 5-7, c on kujutatud termokompensaatoriga skeem. Termokompensaator koosneb pooljuhttermotakistist R_T ja sellega paralleelselt lülitatud manganiintakistist R_1 . Viimane on vajalik R_m ja R_T temperatuurist sõltumise sobitamiseks, kuna

termotakisti R_T takistus sõltub temperatuurist mittelineaarselt. Termokompensaatorit kasutatakse isegi riistades, millele täpsusklass on 0,1 (M1150).

Väga väikese mõõtepiirkonnaga millivoltmeetrites on tähtis, et kogu pinge langeks vahetult mehhanismi mähisele. Seejärel kasutatakse nendes kompensatsiooniskeemide asemel sageli termomagnetilist šunti. See on püsिमagneti pooluseid ühendav vase ja nikli või raua ja nikli sulamist plaat, mis juhib osa magnetvoogu tööpilust mööda. Termomagnetilise šundi magnetiline läbitavus temperatuuri tõusmisel väheneb, mistõttu väheneb möödajuhitav magnetvoog, suureneb magnetiline induktatsioon tööpilus ning suureneb mehhanismi tundlikkus, kompenseerides takistuse suurenemisest tingitud temperatuurivea.

5-6. Galvanomeetrid

Galvanomeetriteks nimetatakse gradueerimata skaalaga suure pinge- või voolutundlikkusega elektrimõõteriistu. Vajaduse korral skaala gradueeritakse mõõtmisi teostava isiku poolt. Kõige levinumad on magnetelektirilised galvanomeetrid. Osutiga galvanomeetritel voolutundlikkus on $10^5 \dots 10^7 \frac{\text{mm}}{\text{A}}$, peegalgalvanomeetritel aga $10^7 \dots 10^{10} \frac{\text{mm}}{\text{A}}$. Peegalgalvanomeetri ehitus on skemaatiliselt kujutatud joonisel 5-8. Raam 1 on riputatud peene elastse metallniidi 2 külge, mis on



Joon. 5-8.

ühtlasi ka üheks voolujuhiks. Teiseks voolujuhiks on väga peenike momendivaba metall-lint 3. Raami pöördenurga määramine toimub peeglist 4 skaalale peegelduva valguskiire abil (joon. 5-8, b). Valgusallikalt langeb kiir peeglile 1. Peegli pöördumisel nurga α võrra on peegeldumis- ja langemisnurga summa 2α ja valguskiir langeb skaalale 2, andes hälbe n jaotust. Seega

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n}{l},$$

kus l on skaala kaugus peeglist. Väikeste pöördenurkade (kuni 3°) korral võime tangensi asendada nurgaga ja saame:

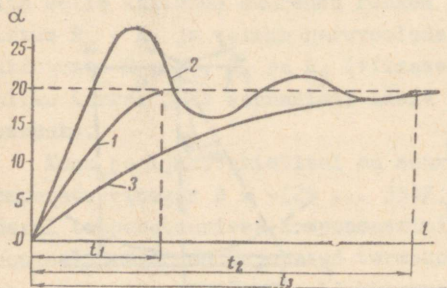
$$2\alpha = \frac{n}{l},$$

millest hälve

$$n = 2\alpha l.$$

Seega galvanomeetri tundlikkus $S_I = \frac{n}{I} = \frac{2\alpha l}{I}$ on võrdeline peegli kaugusega skaalast. Sageli asetatakse skaala galvanomeetrist 1 ... 1,5 m kaugusele.

Võimalikult kerge liikuva osa saamiseks valmistatakse galvanomeetrite raam ilma alumiiniumist karkassita. Seega jääb sumbumise peamiseks põhjuseks raami liikumisel vahetult mähises indutseeritav vool. Selle voolu tugevus ja seega ka sumbuvus sõltuvad vooluringi takistusest. Kui takistus on suur (sumbuvus väike), siis esineb sumbuva perioodiline võnkumine (joon. 5-9, kõver 2). Kui takistus on väike (sumbumus



Joon. 5-9.

suur), siis on liikumine aperiiodiline (joon. 5-9, kõver 3). Analüüs näitab, et osuti peatub tasakaaluasendis kõige kiiremini siis, kui vooluringi takistus on parajasti nii suur, et veel esineb aperiiodiline (joon. 5-9, kõver 1) režiim, kuid takistuse suurendamisel muu-

tuks perioodiliseks võnkumiseks. Sellist piirrežiimi nimetatakse kriitiliseks režiimiks ja sellele vastavat takistust kriitiliseks takistuseks R_{kr} :

$$R_{kr} = R_g + R_{kr.v},$$

kus R_g - galvanomeetri takistus,

$R_{kr.v}$ - kriitiline välistakistus.

Selleks et osuti võimalikult kiiresti peatuks tasakaaluasendis, peab galvanomeetriga ühendatud ahela takistus olema võimalikult lähedane kriitilisele välistakistusele.

Galvanomeetri mehhanismi voolutundlikkus (vt. magnetelekt-riline mehhanism)

$$S_I = \frac{\alpha}{I} = \frac{B S_w}{D}$$

Pingetundlikkus

$$S'_U = \frac{\alpha}{U} = \frac{\alpha}{I R_g} = \frac{S_I}{R_g}.$$

Kuna galvanomeetrit kasutatakse kriitilises režiimis, siis on tähtsam kriitilisele režiimile vastav pingetundlikkus:

$$S_U = \frac{S_I}{R_{kr}}.$$

Kuna S_I on võrdeline korrutisega $B S_w$ ja R_{kr} on võrdeline korrutisega $B^2 S_w^2$, siis pole võimalik valmistada galvanomeetrit, millel oleks korruga suur voolutundlikkus S_I ja suur pingetundlikkus S_U . Kui S_I on suur, siis on S_U väike ja vastupidi.

Galvanomeetri omadused sõltuvad ka omavõnkeperioodist

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{D}},$$

kus I - liikuva osa inertsmoment,

D - erivastumoment.

Galvanomeetreid, millel on suur omavõnkeperiood (umbes 20 s), nimetatakse ballistiliseks. Ballistiline galvanomeeter võimaldab mõõta vooluimpulsi kestel mähist läbinud laengut. Laeng on võrdeline impulsi toimel tekkinud võnkumise esimese väljalöögiga

$$Q = C_q n_1,$$

kus Q - laeng;

$C_q \left[\frac{C}{\text{jaot.}} \right]$ - ballistiline konstant;

n_1 [jaot.] - esimene (maksimaalne) väljalöökk.

Galvanomeetri valikul tuleb lähtuda:

1) pinge- või voolutundlikkusest S_U või S_I ;

2) kriitilisest välistakistusest $R_{kr.v}$;

3) omavõnkeperioodist T_0 .

Galvanomeetreid kasutatakse:

1) potentsiaalide võrdsuse määramiseks sildlülitustes ja kompensatorites;

2) väga väikeste voolude (suurte takistuste mõõtmisel) mõõtmiseks;

3) väikeste pingete (termo-emj.) mõõtmiseks;

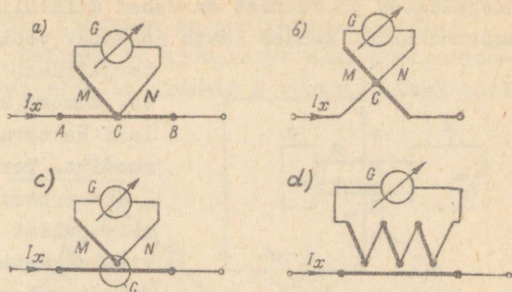
4) vooluimpulsi laengu mõõtmiseks (mahtuvuste, induktiivsuste ja magnetvoogude mõõtmisel ballistilisel meetodil).

Vahelduvvooluahelates kasutatakse resonants-galvanomeetreid. Viimastel aastatel on hakanud levima nn. fotokompensatsioon-mõõteriistad, millede kasutatakse koos galvanomeetriga fotoelektrilisi võimendeid. Need võimaldavad mõõta veelgi väiksemaid voolusid ja pingesid.

5-7. Termoelektrilised mõõteriistad

Termoelektriline mõõteriist koosneb magnetelektrilisest mehhanismist ja termomuundist (joon. 5-10). Termomuundi koosneb ühest (joon. 5-10, a,b,c) või mitmest (joon. 5-10, d) termopaarist ja kuumutustraadist. Termopaari MN külmade otste vahele on ühendatud mõõtemehhanism. Termopaari teist otsa soojendab kuumutustraat, mida läbib mõõdetav vool I_x . Saadav termo-emj. on võrdeline termopaari otste temperatuuride vahetusega. Kuna temperatuuride vahe on peaaegu võrdeline voolu efektiivväärtuse ruuduga, siis ka hälve on võrdeline mõõdetava voolu efektiivväärtuse ruuduga.

Kuumutustraata valmistatakse plaa-tina-iriidiumist või konstantaanist, sest see peab taluma kõrget temperatuuri, et saada võimalikult suurt (200 ... 300 deg) temperatuurivahet. Termopaaridena kasutatakse raud-konstantaan-, mangaani-konstantaan-, kuld-pallaadium-plaatinairiidium- jt. termopaare, millele andmed on tabelis 7.



Joon. 5-10.

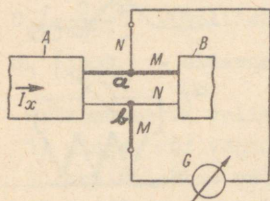
Tabel 7

Termopaar	Suurim lubatud temperatuur C	Termo-emj. suurima lubatava temperatuuri korral mV
Raud-konstantaan	600	30
Kromell-konstantaan	600	40
Kromell-kopell	600	49
Mangaani-konstantaan	200	10
Kuld-pallaadium-plaatinairiidium	1000	46

Väikeste voolude (kuni 1 A) mõõtmisel kasutatakse vaakuumtermomuundeid (joon. 5-10, b). Nendes on termomuundi paigutatud klaaskolbi, milles on tekitatud vaakuum. See väldib soojuskadusid ja võimaldab kasutada kõrgemat kuumutustraadi temperatuuri. Tulemuseks on suurem emj. ja seega riista suurem tundlikkus.

Sõltuvalt voolu suunast esineb termopaari kuumas ühenduskohas täiendav soojuse eraldumine või neeldumine (Peltier' efekt). Seetõttu sõltuvad termo-emj. ja näit voolu suunast.

Kirjeldatud puudustest on vabad sildlülituses (joon. 5-11) ampermeetrid. Nendes läbib mõõdetav vool I_x erinevatest ma-



Joon. 5-11.

terjalidest M ja N kuumutustraate. Kumbki kuumutustraate on ühtlasi ka termopaari üheks elektroodiks. Termoelemendi ülejäänud 2 elektroodi on ühendatud nii, et materjalist M elektrood on keevitatud materjalist N kuumutustraadi külge ja materjalist N elektrood on keevitatud materjalist M kuumutustraadi külge.

Punktid a ja b on termopaaride kuumadeks ühenduskohtadeks. Termopaaride külmade otsede madal ja konstantne temperatuur saavutatakse massiivsete ja hästi soojust juhtivate otsikute A ja B abil. Kui punktid a ja b on valitud nii, et sild on tasakaalus, siis mõõtemehhanismi harusse vool ei hargne ja puudub Peltier' efekt, sest vool ei lähe üle ühest materjalist teise. Selle skeemiga ampermeetreid võib gradueerida alalisvoolu abil.

Termoelektriliste riistade eelised:

1) näidu sõltumatus sagedusest suures sageduspiirkonnas 20 Hz ... 20 MHz;

2) suur tundlikkus.

Nende puudused:

1) väike täpsus (klass 1,5 või 2,5);

2) näidu sõltuvus keskkonna temperatuurist;

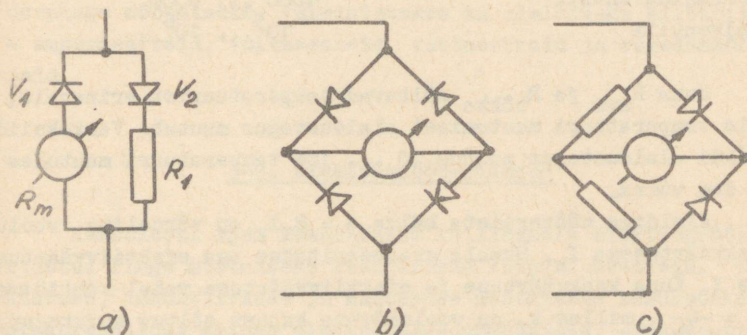
3) termomuundite väike eksploatatsiooniga.

Termoelektrilisi mõõteriistu kasutatakse peamiselt ampermeetritena kõrgsagedusvoolude (kuni 100 MHz) mõõtmisel, sest nende elektrimahtuvus on väike.

5-8. Alaldiga mõõteriistad

Alaldiga mõõteriist koosneb magnetelektrilisest mehhanismist ja pooljuhtalaldist, Mõõteriistadeks kasutatakse pea-

niselt vaskoksiid-, germaanium- või räni-aldeid. Levinumad skeemid on joonisel 5-12. Lihtsaim on poolperioodalaldiga skeem (joon. 5-12, a). Selleks et mõõteriist ühel poolperioodil ei katkestaks vooluringi, on skeemis 2 ventiili. Ühel pool-



Joon. 5-12.

perioodil pääseb vool ventiili V_1 kaudu mõõtemehhanismi. Teisel poolperioodil juhitakse vool V_2 kaudu mehhanismist mööda. Seega väldib kahe ventiili kasutamine vooluringi katkemise poolperioodil, mil vool ei läbi mehhanismi. Takisti R_1 on vajalik selleks, et takistus mõlemal poolperioodil oleks ühesuurune. Selleks võetakse $R_1 = R_m$.

Kahekordselt tugevam vool läbib mõõtemehhanismi, kui poolperioodalaldi asemel kasutada täisperioodalaldi. Kõige levinum on sildlülituses täisperioodalaldi (joon. 5-12, b). Sage li asendatakse sildlülituses temperatuurivea vähendamiseks 2 ventiili takistitega (joon. 5-12, c).

Pooljuhtventiilide takistus sõltub voolu suunast. Ava-suunas on takistus väike, tõkkesuunas suur. Alaldustegur

$$k = \frac{I_{\text{ava}}}{I_{\text{tõkke}}} = \frac{R_{\text{tõkke}}}{R_{\text{ava}}}$$

Mõõteriistades kasutatavate ventiilide alaldustegurid on antud tabelis 8.

Ventiili liik	Alaldustegur k
Vaskoksiidventiil	600 ... 1000
Germaaniumventiil	4000 ... 6000
Räniventiiil	$10^5 \dots 10^6$

Kuna R_{ava} ja $R_{tõkke}$ sõltuvad temperatuurist erinevalt, siis temperatuuri muutumisel alaldustegur muutub. Vaskoksiid-alaldi alaldustegur muutub 10 ... 18% temperatuuri muutudes 10 deg võrra.

Alaldiga mõõteriista hälve $\alpha = S_I I_k$ on võrdeline voolu keskväertusega I_k . Skaala gradueeritakse aga efektiivväärtustes I . Kuna keskväertuse ja efektiivväärtuse vahel kehtib seos $k_f = \frac{I}{I_k}$, milles k_f on voolukõvera kujust sõltuv kujutegur, siis hälve

$$\alpha = \frac{S_I}{k_f} \cdot I$$

sõltub voolukõvera kujust (k_f väärtusest). Alaldiga mõõteriistad gradueeritakse siinuselise pingega või vooluga, mille $k_f = 1,11$. Kui mõõdetav pinge või vool ei ole siinuseline, siis $k_f \neq 1,11$ ja esineb mõõdetava suuruse graafiku kujust tingitud lisaviga.

Ventiilide mahtuvuse (vaskoksiidventiilil ligikaudu 60 pF/mm², germaaniumventiilil 10 korda väiksem) tõttu pääseb osa voolu vahelduvvooluna mõõtemehhanismist mööda. See pärast on vaskoksiidventiilidega riistad kasutatavad sagedustel kuni 10 kHz, germaaniumventiilidega riistad aga sagedustel kuni 50 kHz.

Ventiilide pinge-voolu karakteristikute ebalineaarsuse tõttu on alaldiga mõõteriistade skaalad ebalineaarsed.

Alaldiga mõõteriistade eelised:

- 1) suur tundlikkus;
- 2) väike omatarve;
- 3) näidu sõltumatus sagedusest helisageduse piirkonnas.

Puudused:

1) väike täpsus (täpsusklass 1,5 või 2,5);

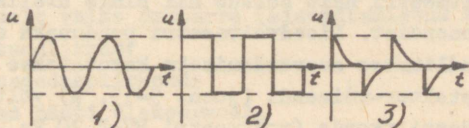
2) näit sõltub mõõdetava suuruse graafiku kujust (kõrgematest harmoonilistest).

Alaldiga mõõteriistaks on tester vahelduvvoolu ja vahelduvpinge mõõtmiseks. Valmistatakse ka alalditega kilbiriistu - ampermeetreid, voltmeetreid, vattmeetreid ja sagedusmõõtjaid.

5-9. Elektronmõõteriistad

Käesoleval ajal kasutatakse laialdaselt elektronmõõteriistu. Pinge mõõtmiseks kasutatakse lampvoltmeetreid. Täpsuse, induktiivsuse ja mahtuvuse mõõtmiseks kasutatakse elektronsildu. Esineb elektronsagedusmõõtjaid, -fasomeetreid ja arvukalt teisi elektronmõõteriistu. Elektronmõõteriistad koosnevad elektronlampe sisaldavast lülitusest, mis alaldab, võimendab ja muundab elektrilisi suursi, ning magnetelektrilisest mõõtemehhanismist.

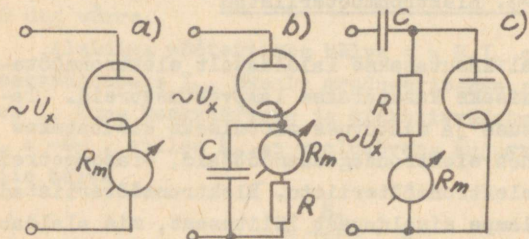
Kõige levinumad elektronmõõteriistadest on lampvoltmeetrid. Vastavalt standardile ГОСТ 9781-61 liigitatakse lampvoltmeetrid seitsmesse täpsusklassi: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 ja 10. Vastavalt kasutusalaale liigitatakse lampvoltmeetrid alalispinge-, vahelduvpinge- ja impulssvoltmeetriteks. Vastavalt sellele, kas hälve on võrdeline mõõdetava pinge keskväärtusega, efektiivväärtuse ruuduga või amplituudiga, liigitatakse lampvoltmeetrid lineaarseteks, kvadratuur- ja amplituudvoltmeetriteks. Kuna nende kõikide skaalad on gradueeritud efektiivväärtustes, siis ühe ja sama pinge mõõtmisel võime saada erinevaid tulemusi. Joonisel 5-13 toodud graafikutega pingete mõõtmisel annab amplituudvoltmeeter kõigil kolmel juhul sama hälbe, näidates pinget $U = 0,707 U_m$ ja või-



Joon. 5-13.

maldades seega määrata amplituude $U_m = \frac{U}{0,707}$. Kvadratuurvoltmeeter (hälve on võrdeline pinge U efektiivväärtuse ruuduga) näitab kõigil kolmel juhul efektiivväärtust, mis on kõige suurem 2. ja kõige väiksem 3. graafiku korral. Lineaarne voltmeeter (hälve on võrdeline pinge keskvärtusega) annab õige näidu ainult siinuselise pinge korral. Tema eeliseks on aga lineaarne skaala.

Liitsaima diodvoltmeetri skeem on joonisel 5-14, a. Diod toimib poolperioodalaldina. Hälve on võrdeline keskvärtusega.

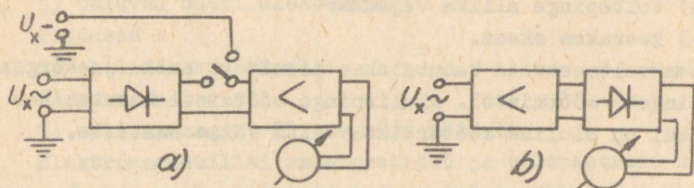


Joon. 5-14.

Takistuse R ja mahtuvuse C viimisega skeemi (joon. 5-14, b), kui kondensaatori tühjenemise vooluringi ajakonstant $\tau = C(R + R_m)$ on palju suurem mõõdetava pinge perioodist, muutub voltmeeter ampli-

tuudvoltmeetriks. Poolperioodil, mil diod on avatud, laadub kondensaator pinge amplituudini; teisel poolperioodil tühjeneb ta läbi mõõtemehhanismi ja takisti R . Suure ajakonstandi tõttu ei suuda kondensaatori pinge poolperioodi vältel nimetamisväärselt langeda ja mõõtemehhanismi hälve on võrdeline amplituudiga. Kirjeldatud voltmeetrid olid avatud sisendiga. Nende puuduseks on erinev takistus erisuunaliste poolperioodide ajal. Sellest puudusest on vaba suletud sisendiga diodvoltmeeter (joon. 5-14, c). Suletud sisendiga voltmeeter reageerib ainult mõõdetava pinge vahelduvkomponendile, sest kondensaator C ei lase läbi pinge alaliskomponenti. Avatud sisendiga voltmeetri näit sõltub nii pinge alalis- kui ka vahelduvkomponendist. Diodvoltmeetri puuduseks on väike tundlikkus. Tundlikkuse suurendamiseks kasutatakse võimendeid. Skeemiga detektor-võimendi (joon. 5-15, a) voltmeetrid omavad suurt sageduspiirkonda (voltmeetri B7-2 20 Hz ... 400 M Hz),

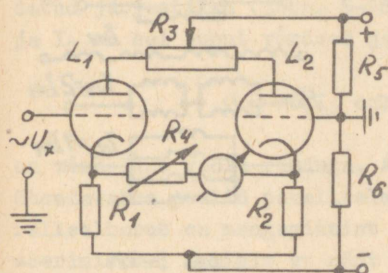
kuid väikest tundlikkust (B7-2 väikseim piirkond on 1,5 V). Kuna nendes voltmeetrites kasutatakse alalispingevõimendeid,



Joon. 5-15.

siis on nendega võimalik mõõta ka alalispinget. Skeemiga võimendi-detektor (joon. 5-15, b) voltmeetrid omavad suurt tundlikkust, kuid kitsamat sageduspiirkonda, sest vahelduvpingevõimendi võimendustegur sõltub sagedusest. Voltmeetri B3-3 väikseim piirkond on 10 mV, sageduspiirkond 30 Hz ... 10 MHz.

Sageli kasutatakse lampvoltmeetrites sildlülitust (joon. 5-16). Silla õlgadeks on takistite R_1 ja R_2 takistused ning lampide L_1 ja L_2 sisetakistused. Potentsiomeetri R_3 abil tasakaalustatakse sild. Kui



Joon. 5-16.

lambi L_1 võrele rakendada mõõdetav pinge U_x , siis muutub lambi L_1 sisetakistus, sild läheb tasakaalust välja ja mõõtemehhanismi läbib vool $I = f(U_x)$. Eeltakisti R_{μ} on tundlikkuse ja seega mõõtepiirkondade muutmiseks.

Lampvoltmeetrite eelised:

- 1) äärmiselt väike omatarve (sisendtakistus kuni 25 M Ω);
- 2) suur tundlikkus;
- 3) suur sageduspiirkond;
- 4) taluvad hästi ülekoormusi.

Puudused:

- 1) väike täpsus;
- 2) vajadus lambi vahetamise järel uuesti gradueerida;
- 3) toitepinge allika vajadus;
- 4) keerukas skeem.

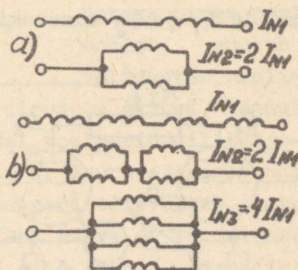
Lampvoltmeetreid kasutatakse peamiselt heli- ja kõrgsageduspingete mõõtmistel. Alalispinge mõõtmisel kasutatakse juhul kui on oluline mõõteriista eriti väike omatarve.

5-10. Elektromagnetilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Elektromagnetilistel ampermeetritel läbib kogu mõõdetav vool mõõtemehhanismi mähist. Magneetimisergutus on 200... 300 A. Seega koosneb 5-A nimivooluga ampermeetri mähis 40 ... 50 keerust. 300-A nimivooluga ampermeetri mähis koosneb vasklati ühest keerust. Kuna pingelang mähisel on suhteliselt suur (umbes 400 mV), siis piirkonna laiendamine šundiga pole soovitatav, kuna šundid tuleks suured ja kallid. Mitme piirkonnaga ampermeetrite mähis koosneb seksioonidest, millede ümberlülitamise teel saab muuta nimivoolu vastavalt suhtele 1 : 2 (joon. 5-17, a) või 1 : 2 : 4)joon.5-17, b).

Elektromagnetilistes voltmeetrites on mõõtemehhanismi pooliga järjestikku lülitatud eeltakisti. Nende nimivool on 25 ... 50 mA. Väikeste piirkondadega (1,5; 7,5 ja 15 V) voltmeetrite nimivool on kuni 200 mA.

Elektromagnetilisi ampermeetreid valmistatakse sagedustele kuni 1500 Hz. Kuna voltmeetritel on pooli induktiivsus suurem, siis nende laiendatud sageduspiirkond on 90 ... 200 Hz.



Joon. 5-17.

Elektromagnetiliste riistade eelised:

- 1) lihtne konstruktsioon;
- 2) kõlblikkus alalis- ja vahelduvvoolule;
- 3) taluvad hästi ülekoormust.

Puudused :

- 1) ebalineaarne skaala;
- 2) suur omatarve;
- 3) väliste magnetväljade mõju näidule.

Elektromagnetilisi ampermeetreid ja voltmeetreid kasutatakse vahelduvvoolu kilbiriistadena (täpsusklassid 1,5 ja 2,5) ning laboratoorsete alalis- ja vahelduvvooluriistadena (täpsusklass 0,5).

5-11. Elektrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Kuna elektrimõõteriistade liikuv osa peab olema kerge, siis valmistatakse liikuva osa pool väikese ristlõikega traadist. Sellest tingituna ei ületa liikuva pooli nimivool 500 mA.

Milliampermeetrites on liikuv ja paigalseisev pool ühendatud järjestikku (joon. 5-18, a). Kuna voolud poolides I_1 ja I_2 on sel juhul võrdsed ja faasis, siis hälve

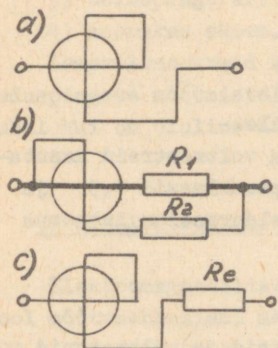
$$\alpha = kI_1I_2 \cos \psi = kI^2$$

on võrdeline voolu ruuduga. Ampermeetrites, millel $I_N > 0,5$ A, ühendatakse poolid paralleelselt (joon. 5-18, b). Mõlemas paralleelharus on manganiinist takisti temperatuurivea kompenseerimiseks. Selleks et näit oleks sama nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul, peab mõlema paralleelharu reaktiiv- ja aktiivtakistuste vahel kehtima seos $\frac{X_1}{R_1} = \frac{X_2}{R_2}$. Ka mähiste paralleellülituse korral $\alpha = kI^2$.

Voltmeetrites on omavahel järjestikku ühendatud poolid lülitatud järjestikku eeltakistiga (joon. 5-18, c). Hälve

$$\alpha = k_1I_U^2 = k_1\left(\frac{U}{Z_V}\right)^2 = k_2U^2.$$

Kuna voltmeetri mähised ja eeltakisti omavad siiski teatavat induktiivsust, siis esineb sagedusviga, sest voltmeetri näivtakistus Z_v sageduse tõusmisel veidi suureneb. Sagedusvea kompenseerimiseks ühendatakse kõrge täpsusklassiga voltmeetrites sobivalt valitud eeltakisti osaga paralleelselt kondensaator.



Elektrodünaamiliste ampermeetrite ja voltmeetrite ruutskaala saab muuta tunduvalt lineaarsemaks mehhanismi poolide mõõtmete ja vastastikuse asendi õige valikuga.

Elektrodünaamiliste riistade head omadused:

1) suur täpsus (klass 0,1; 0,2 ja 0,5);

2) kõlblikkus nii alalis- kui ka vahelduvvoolu (kuni 3 kHz) mõõtmiseks; laiendatud sageduspiirkonnad ulatuvad 5 ... 10 kHz-ni.

Joon. 5-18.

Nende puudused:

- 1) suur omatarve;
- 2) suur tundlikkus ülekoormustele;
- 3) näidu sõltuvus välistest magnetväljadest;
- 4) kõrge hind.

Elektrodünaamilisi riistu kasutatakse täpsete laboraatorsete mõõteriistadena ja lähteriistadena tehniliste mõõteriistade kontrollimisel.

5-12. Ferrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Ferrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid erinevad elektrodünaamilistest selle poolest, et elektrodünaamilise mõõtemehhanismi asemel kasutatakse ferrodünaamilist mehhanismi. Sellest tingituna on nende täpsusklass madal (1,5 või 2,5), pöördemoment suur ja neid saab valmistada tugeva konst-

ruksiooniga. Nende skeemid ei erine oluliselt elektrodünaamiliste ampermeetrite ja voltmeetrite skeemidest. Erinevusi on ainult vigu kompenseerivate elementide osas. Ferrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid pole eriti levinud, sest elektromagnetilised on lihtsamad ja odavamad. Neid kasutatakse vahelduvvoolu kilbiriistadena rasketes mehaanilistes tingimustes (vibratsioon, põrutused) ja 240° -se skaalanurgaga riistadena, kui on vajalik, et riist võtaks kilbil vähe ruumi. Suure pöördemomendi tõttu valmistatakse ka isekirjutavad vahelduvvoolu ampermeetrid ja voltmeetrid ferrodünaamilistena.

Palju levinumad on ferrodünaamilised vattmeetrid, faso- meetrid ja sagedusmõõtjad.

5-13. Kompensatsioonimeetod

Kompensatsioonimeetodit kasutatakse pingete ja pinge kaudu ka voolude ning takistuste täpseks mõõtmiseks. Kompensatsioonimeetod seisneb mõõdetava pinge võrdlemises küllalt täpse pingega, milleks tavaliselt on normaalelemendi elektromotoorne jõud. Mõõteseadet, mille abil toimub kompensatsioonimeetodil mõõtmine, nimetatakse kompensatoriks. Kompensatori põhisõlmeks on mitmekohalise täpsusega reguleeritav spetsiaalne takistusmagasin nn. potentsiomeeter. Kompensatsioonimeetodi eelisteks on suur täpsus ja asjaolu, et sel puhul ei koormata mõõteobjekti vooluga, mistõttu on võimalik mõõta elektromotoorset jõudu.

Puudusteks on keerukas ja kallis aparatuur ning suur ajakulu kompensatsiooniolukorra väljareguleerimiseks.

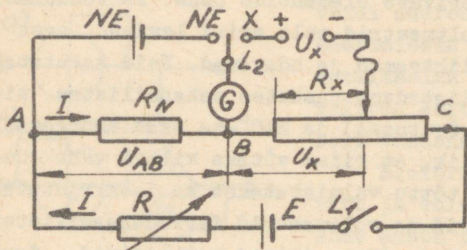
5-14. Alalisvoolukompensatori töö põhimõte

Normaalelemendi NE elektromotoorse jõu E_N järgi (joon. 5-19) reguleeritakse õigeaks töövool I. Selleks viiakse ümberlüüti L_2 asendisse NE ja takistuse R muutumisega viiakse galvanomeetri osuti nullile. Sel juhul $U_{AB} = E_N$ ja potentsiomeet-

rit BC läbiv töövool $I = \frac{E_N}{R_N}$. Töövoolu muutmata viiakse lüli-
ti L_2 asendisse x ja potentsiomeetri BC liugkontakti abil

reguleeritakse galvano-
meetri osuti uuesti nul-
lile. Sel juhul on mõõ-
detav pinge U_x kompen-
seeritud pingelanguga
takistusel R_x ja $U_x =$
 $= IR_x$. Asendades $I =$
 $= \frac{E_N}{R_N}$ saame:

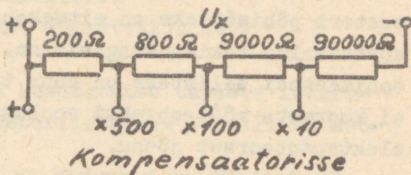
$$U_x = E_N \frac{R_x}{R_N}$$



Joon. 5-19.

Tavaliselt valitakse R_N nii, et $I = 1$ mA või 0,1 mA. Sel juhul on mõõdetav pinge U_x arvuliselt võrdne takistusega R_x (või 10 korda väiksem) ja on loetav potentsiomeetri BC liugkontakti skaalalt. Küllaldase täpsuse saavutamiseks peab takistus R_x olema määratav viie- kuni kuuekohalise täpsusega. Seepärast kasutatakse potentsiomeetrina BC erikonstruktsiooniga takistumagasiini.

Vastavalt töövoolu-
ringi ABCLA takistusele
liigitatakse alalisvoolu
kompensaatorid suure takistusega kompensaatoriteks (takistus mõniküm-
mend kilo-oomi) ja väi-
kese takistusega kompensaatoriteks (takistus
alla mõne kilo-oomi). Esimesi kasutatakse laboratoorsete mõõ-
teriistade (klass 0,1 ... 0,5) kontrollimiseks. Nende mõõte-
piirkond on 1,2 ... 2,5 V. Kõrgemate pingete mõõtmisel tuleb
kasutada pingejagajat (joon. 5-20). Mõõtmise täpsus on um-
bes 0,02%.



Joon. 5-20.

Väikese takistusega kompensaatorid kasutatakse väikeste (alla 0,1 V) pingete ja elektromotoorsete jõudude (termo-emj.)

mõõtmiseks. Nende töövool on suurem (kuni 25 mA) ja täpsus väiksem.

5-15. Voolu ja takistuse mõõtmine kompensaaatoriga

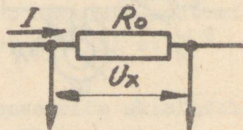
Veolu tugevuse määramiseks mõõdetakse kompensaaatoriga lähtetakistusel R_0 mõõdetava voolu I_x toimel tekkinud pingelang U_x ja arvutatakse vool $I_x = \frac{U_x}{R_0}$. Lähtetakisti valikul tuleb arvestada, et I_x ei ületaks lähtetakisti nimivoolu ja U_x ei ületaks kompensaaatori mõõtepiirkonda, kuid oleks suurema täpsuse saavutamiseks võimalikult suur.

Takistuse määramiseks ühendatakse mõõdetav takisti järjekorras samas suurusjärgus oleva lähtetakistiga ja mõõdetakse pingelangud neil mõlemal. Mõõtmise hõlbustamiseks on skeemis

(joon. 5-22) ümberlülititi L_2 . Seosest $\frac{U_x}{R_x} = \frac{U_0}{R_0}$ saame, et $R_x =$

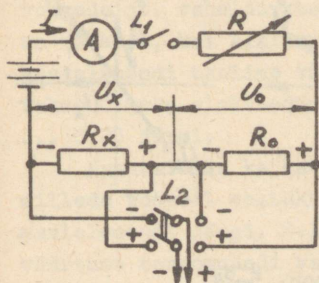
$$= R_0 \frac{U_x}{U_0}.$$

Ampermeeter on skeemis ainult selleks, et kontrollida, kas vool on takistite nimivooludega lubatud piirides. Ampermeetri täpsusklass pole oluline, sest ampermeetri näitu R_x arvutamisel ei kasutata.



Kompensaaatorisse

Joon. 5-21.

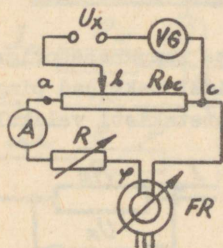


Joon. 5-22.

5-16. Vahelduvvoolukompensaaatorid

Teadaoleva sagedusega siinuseline vahelduvpinge on määratud kahe suurusega: amplituudiga (või efektiivväärtusega)

ja algfaasiga. Järelikult peavad vahelduvvoolukompensaatorid võimaldama muuta nii kompenseeriva pinge efektiivväärtust kui ka algfaasi. Tööpõhimõtte järgi liigitatakse vahelduvvoolukompensaatorit kahte gruppi:



Joon. 5-23.

1) polaarkoordinaatides mõõtvad kompensaatorid;

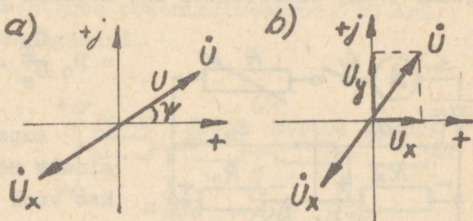
2) ristkoordinaatides mõõtvad kompensaatorid.

Polaarkoordinaatides mõõtvatel kompensaatoritel (joon. 5-23) reguleeritakse töövool nõutud väärtusele ampermeetri näidu järgi takistuse R muutmisega. Kompenseeriva pinge suurust U reguleeritakse takistuse R_{bc} muutmise teel. Pinge algfaasi reguleeritakse faasiregulaatoriga FR .

Kompensatsiooniolukorda, mil $\dot{U} = -\dot{U}_x$, näitab vibratsioonigalvanomeeter VG . Polaarkoordinaatides mõõtev kompensaator määrab pingevektori \dot{U} mooduli U ja argumendi ψ kaudu (joon. 5-24, a).

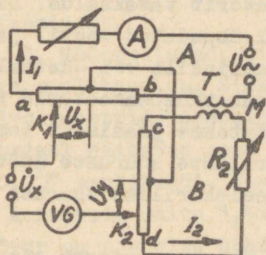
Ristkoordinaatides mõõtev kompensaator määrab pingevektori \dot{U} selle projektsioonide kaudu reaalteljele (U_x) ja imaginaarteljele (U_y), milledest pinge moodul (efektiivväärtus) $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$ ja argument (algfaas) $\psi = \arctg \frac{U_y}{U_x}$ (joon. 5-24, b).

Ristkoordinaatides mõõtvatel kompensaatoril (joon. 5-25) on 2 töövooluahelat A ja B. Nende töövoolude I_1 ja I_2 vahel on faasinihe $\frac{\pi}{2}$ (90°), mis saavutatakse vooluringide sidestamise teel ilma raudsüdamikuta nn. õhktransformaatori



Joon. 5-24.

T abil. Pingelangud takistustel ab ja cd on samuti nihutatud faasis $\frac{\pi}{2}$. Liugkontaktide k_1 ja k_2 asendite muutmise teel muudetakse pinge komponente U_x ja U_y , kuni nende vektoriaalne summa \dot{U} kompenseerib mõõdetava pinge \dot{U}_x . Sel juhul näitab vibratsioongalvanomeeter VG nulli. Töövool I_1 reguleeritakse ampermeetri näidu järgi. Töövool $I_2 = \frac{\omega M}{R_2} \cdot I_1$, kus ω - voolu nurksagedus, M - trafo mähiste vastastikune induktiivsus ja R_2 - sekundaarahela takistus. Sageduse muutumisel muutub



Joon. 5-25.

ja seega I_2 . Selleks et potentsiomeetri cd gradueering ei sõltuks sagedusest, tuleb sageduse muutumisel muuta takistust R_2 , nii et $\frac{\omega M}{R_2}$ jääb muutumatuks.

Potentsiomeetrite skaaladele pole märgitud mitte kompenseeriva pinge koordinaadid, vaid mõõdetava pinge $\dot{U}_x = -\dot{U}$ koordinaadid, mis tunduvalt lihtsustab \dot{U}_x määramist.

Vahelduvvoolukompensaatoreid kasutatakse vahelduvate elektromotoorsete jõudude, pingete, magnet-

voogude jt. vahelduvvoolusuuruste mõõtmisel. Nende täpsus on väiksem, kui alalisvoolukompensatoritel, sest puudub normaalelemendi taoline täpne vahelduvpinge mõõt ja töövool seatakse õigeks elektrodünaamilise ampermeetri (täpsusklass 0,1 ... 0,2) järgi.

Kasutatakse ka keerukamaid seadmeid, nn. komparaatoreid, millele töövool seatakse õigeks (täpsusega kuni 0,02%) normaalelemendi järgi. Selleks võrreldakse töövoolu efektiivväärtust termomuundi vahendusel alalisvooluga, mille väärtus omakorda on seatud õigeks pingelangu võrdlemisel normaalelemendi elektromotoorse jõuga.

5-17. Automaatkompensaatorigid

Eespool kirjeldatud kompensaatorigid tagavad suure mõõtetäpsuse, kuid nende töövoolu reguleerimine ja tasakaalustami-

ne on aeganõudvad. Neid kasutatakse peamiselt laboratooriumides. Väikeste elektromootorsete jõudude täpsetel mõõtmistel tsehhides kasutatakse automaatkompensaatoreid. Automaatkompensaatoriks nimetatakse alalisvoolukompensaatorit, mille töövoolu reguleerimine ja tasakaalustamine toimuvad automaatselt. Nendes on tasakaaluindikaatori (galvanomeetri) asemel vibromuundi kaudu lülitatud elektronvõimendi, mille väljundisse on ühendatud reverseeritav elektrimootor. Mootor liigutab reohordi liugkontakti, hoides kompensaatorit tasakaalus. Liugkontaktiga on mehaanilise ülekande abil ühendatud osuti ja kirjutusmehhanism, mis kirjutab diagrammlindile või -kettale mõõdetava suuruse sõltuvana ajast. Automaatkompensaatorid tagavad mõõtmistäpsuse $\pm 0,5\%$. Neid kasutatakse peamiselt temperatuuri ja mitmete teiste mitteelektriliste suuruste mõõtmisel koos muundiga mis mõõdetava mitteelektrilise suuruse muundab alalispingeks või vooluks.

Automaatsillad erinevad automaatkompensaatoritest ainult mõõteskeemi (kompensatsiooniskeemi asemel sildskeem vv. § 7-5) poolest.

5-18. Mittesiinuseliste pingete ja voolude mõõtmine

Voolu või pinget iseloomustatakse efektiivväärtusega (I ; U), keskvärtusega (I_k ; U_k) või amplituudiga (I_m & U_m). Efektiivväärtuse ja keskvärtuse suhet $k_f = \frac{U}{U_k}$ nimetatakse kujuteguriks ning amplituudi ja efektiivväärtuse suhet $k_a = \frac{U_m}{U}$ tiputeguriks. Siinuselise voolu või pinge korral $k_f = 1,11$ ja $k_a = \sqrt{2} = 1,41$. Mõõteriistade skaalad on gradueeritud siinuselise pinge efektiivväärtustes. Seetõttu mittesiinuseliste voolude või pingete mõõtmisel võivad eri tüüpi mõõteriistade näidud olla erinevad. Kõik voltmeetrid ja ampermeetrid võime jaotada kolme gruppi:

1. Mõõteriistad, mille hälve on võrdeline mõõdetava suuruse efektiivväärtusega. Siia kuuluvad elektromagnetilised, elektrodünaamilised, ferrodünaamilised, elektrostaatilised ning termoelektrilised ampermeetrid ja voltmeetrid

kvadratuursed lampvoltmeetrid. Loetletud riistad näitavad, sõltumata pingekõvera kujust, õiget efektiivväärtust.

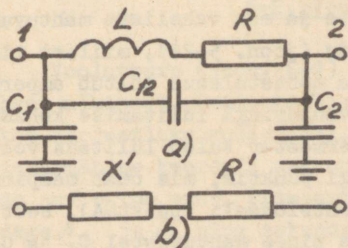
2. Mõõteriistad, millede hälve on võrdeline mõõdetava suuruse keskväertusega. Siia kuuluvad magnetelektirilised ja alaldiga voltmeetrid ning ampermeetrid ja lineaarse skaalaga lampvoltmeeter. Gradueerimisel siinuselise pingega $U = k_f U_k = 1,11U_k$. Mittesiinuselise pinge või voolu mõõtmisel $U \neq 1,11U_k$ ja nende riistade näit mittesiinuselise suuruse mõõtmisel on vale. Näit sõltub esinevate harmooniliste keskväertustest ja algfaasidest.

3. Mõõteriistad, millede hälve on võrdeline mõõdetava pinge amplituudiga. Siia kuuluvad lampvoltmeetritest amplituudvoltmeetrid. Ajatelje suhtes sümmeetrilise pingekõvera mõõtmisel näitavad need sõltumata kõvera kujust pinget, mis on 0,707 amplituudi. Nende näidust saab määrata amplituudi, kui korrutada näitu 1,41-ga ($U_m = \frac{U}{0,707} = 1,41 U$). Kui pingekõver on ajatelje suhtes ebasümmeetriline, siis sõltub näit voltmeetrile rakendatud pinge faasist (sellest, kumb juhe kumma klemmiga on ühendatud).

5-19. Kõrgsageduspingete ja voolude mõõtmine

Mõõteriistad omavad aktiivtakistust, induktiivsust ja mahtuvust. Magnetelektiriliste, elektromagnetiliste, elektrodünaamiliste ja termoelektiriliste mõõteriistade aseskeem on joonisel 5-26, a, kusjuures 1 ja 2 on riista klemmid ning R , L ja C mõõtemehhanismi ja skeemi parameetrid. C_{12} on sisendjuhtmete vaheline mahtuvus. C_1 ja C_2 on sisendjuhtmete ja

maa vahelised mahtuvused. Aseskeemi parameetrid on eri süsteemi riistadel erineva suurusega. Joonisel 5-26, b on näidatud ka peale teisendamist saadud ekvivalentne aseskeem parameetritega R' ja X' .



Joon. 5-26.

Elektrostaatiliste ja alalditega mõõteriistade ning lampvoltmeetrite aseskeem on joonisel 5-27.

Mõõteriista vooluringi lülitamine ei tohi muuta vooluringi töörežiimi. Järelilikult peab ampermeetri takistus olema väike (lülitatakse järjestikku). Voltmeetri takistus (lülitatakse paralleelselt) peab olema suur. Mõõteriistade takistused sõltuvad aga sagedusest, sest induktiivtakistus $x_L = 2\pi fL$ ja mah-
tuvustakistus $x_C = \frac{1}{2\pi fC}$.

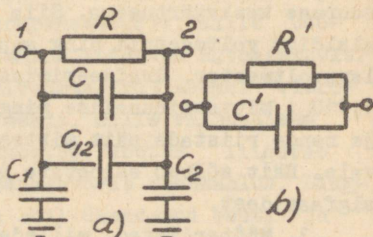
Elektrodünaamilisel ampermeetril, mille induktiivsus $L = 25 \mu\text{H}$, on induktiivtakistus sagedusel 50 Hz $0,0008 \Omega$, sagedusel 5 kHz 8Ω ja sagedusel 5 MHz 800Ω . See piirab elektrodünaamiliste ampermeetrise kasutamist kõrgetel sagedustel. Elektrostaatilistel voltmeetritel, mille $C = 50 \text{ pF}$, on mahtvuslik takistus sagedusel 50 Hz $60 \text{ M}\Omega$, sagedusel 5 MHz aga 600Ω .

Ülaltoodu tõttu on mõõdetavate suuruste sageduste ülempiir elektromagnetilistel ja elektrodünaamilistel riistadel 5-8 kHz, alalditega riistadel 10 kHz ja elektrostaatilistel riistadel 10 MHz. Kõrgematel sagedustel kasutatakse termoelektrilisi ampermeetreid ja lampvoltmeetreid.

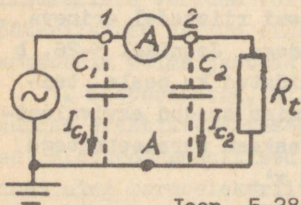
Kõrgsagedusahelates mõõtmisel võivad suuri mõõtmisvigu põhjustada veel:

1) äravool sisestusjuhtmete ja maa vaheliste mahtuvuste

kaudu (joon. 5-28), millest tingituna mõõtetulemus sõltub ampermeetri vooluringi lülitamise kohast; ampermeeter tuleb lülitada vooluringi punktis, mis omab maapinna potentsionaali (punkt A), sest siis pinge mahtuvustel C_1 ja C_2



Joon. 5-27.



Joon. 5-28.

on 0 ja äravool nende kaudu puudub;

2) resonantsi tekkimine mõõteriista sisselüliatmisel; selle vältimiseks peab mõõteriista elektriline omavõnkesagedus olema mõõdetava suuruse võnkesagedusest palju suurem.

VI. MÕÕTETRANSFORMAATORID

6-1. Üldist

Mõõtetrafod jagunevad voolu- ja pingetrafodeks. Nende ülesandeks on:

1) mõõteriistade mõõteulatuse laiendamine vahelduvvoolu-ahelais;

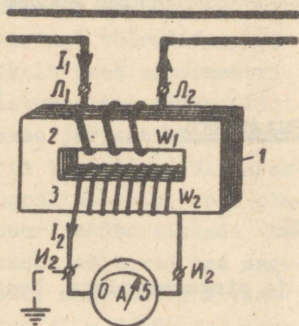
2) mõõteriistade eraldamine kõrgepingest, ohutuse tagamiseks mõõtmisel kõrgepingeseadmeis.

Peale selle võimaldavad mõõtetrafod, võrreldes šuntide ja eeltakistitega mõõta tugevaid voole ja kõrgeid pingeid palju täpsemini. Kui voolupiirkonna laiendamiseks kasutatakse vahelduvvoolu puhul šunti, tekib täiendav viga sõltuvalt sagedusest, sest sageduse muutumisel ei muutu šundi ja mõõteriista takistus ühesuguselt. Pingetrafode omatarbevõimsus on väiksem kui eeltakistitel. Kui võngus pinge maa suhtes ületab 250 V, siis mõõtmisel tuleb ohutuse tagamiseks sekundaarmähiste üks klemm ja terassüdamik maandada.

6-2. Voolutrafo

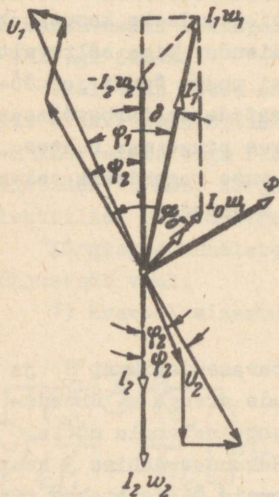
Voolutrafo (joon. 6-1) koosneb terassüdamikust 1 ja kahest mähisest. Primaarmähis 2 keerdude arvuga w_1 ühendatakse järjestikku vooluringi, milles soovime voolu mõõta. Primaarmähise keerdude arv on väike. Sekundaarmähise 3 keerdude arv w_2 on suur. Primaarmähise klemmid tähistatakse tähtedega \mathcal{A}_1 ja \mathcal{B}_2 ning sekundaarmähise klemmid vastavalt \mathcal{A}_1

ja I_2 . Sekundaarmähistega ühendatakse mõõteriistade (ampermeetri, vattmeetri jne.) voolumähised. Keerdude arvu vahetamine valitakse nii, et nimiprimaarvoolu korral on sekundaarvool 5 A (harvemini erinev, näit. 1 A).



Joon. 6-1.

joonisel 6-2. Mõõdetav vool I_1 , läbides primaarmähist, tekitab magnetimisergutuse $I_1 w_1$, millest suurem osa kompenseeritakse sekundaarmagneetimisergutuse $I_2 w_2$ poolt, aga väiksem osa, s.o. resulteeriv magnetimisergutus $I_0 w_1$ tekitab trafo südamikus magnetvoo ϕ . Viimase poolt indutseeritakse sekundaarmähises elektromotoorne jõud. Normaalset töörežiimil on voolutrafo südamikus magnetvoog väike ($B = 0,08 \dots 0,1$ T).



Joon-6.2

Voolutrafo töötab lühisrežiimis, sest mõõteriistade voolumähiste takistus on väike ($0,2 \dots 1,6 \Omega$). Voolu tugevus primaarmähises võib muutuda nullist kuni nimivooluni, aga lühiste korral võib ületada nimivoolu kümneid kordi. Seega oleneb primaarvool I_1 tarbijast. Voolutrafo vektordiagramm on toodud joonisel 6-2.

Mõõdetav vool I_1 , läbides primaarmähist, tekitab magnetimisergutuse $I_1 w_1$, millest suurem osa kompenseeritakse sekundaarmagneetimisergutuse $I_2 w_2$ poolt, aga väiksem osa, s.o. resulteeriv magnetimisergutus $I_0 w_1$ tekitab trafo südamikus magnetvoo ϕ . Viimase poolt indutseeritakse sekundaarmähises elektromotoorne jõud. Normaalset töörežiimil on voolutrafo südamikus magnetvoog väike ($B = 0,08 \dots 0,1$ T). Voolutrafo tühijooksuvoolu I_0 all tuleb mõista voolu, milline peaks primaarmähist läbima avatud sekundaarmähise korral, et tekitada südamikus sama suurt magnetvoogu, nagu see esineb voolutrafo antud töörežiimil. Kui muutumatu I_1 korral suurendada sekundaarahela takistust, siis vool I_2 ja sekundaarmagneetimisergutus ($I_2 w_2$) vähene-

vad, kuid resulteeriv magneetimisergutus $I_0 w_1$ ja magnetvoog suurenevad. Sekundaarahela katkestamisel ($z_2 = \infty$, $I_2 = 0$) võrdub sekundaar-magneetimisergutus primaar-magneetimisergutusega. Selle tagajärjel magnetvoog südamikus suureneb tunduvalt ning magnetiline induktsioon võib tõusta väärtuseni $B = 1,4 \dots 1,8$ T. Rauaskadu suureneb tunduvalt, mistõttu tekib südamiku ohtlik kuumenemine. Samuti tõuseb sekundaarpinge, mis suletud sekundaarahela puhul on madal, väga kõrgeks ning võib osutada ohtlikuks inimestele. Sellest järeldub, et mõõtmisel ei tohi voolutrafo sekundaarmähist kunagi avatuks jätta. Kui mõõteriista ei ühendata, siis sekundaarmähis tuleb lühistada.

Voolutrafo tegelikuks ülekandeteguriks ehk konstandiks nimetatakse tegeliku primaarvoolu I_1 ja tegeliku sekundaarvoolu I_2 suhet:

$$k_I = \frac{I_1}{I_2}.$$

Primaarvoolu leidmiseks tuleb sekundaarvool korrutada voolutrafo ülekandeteguriga:

$$I_1 = k_I I_2.$$

Kuid voolutrafo tegelik konstant ei ole harilikult teada, sest ta oleneb voolutrafo töörežiimist. Primaarvool määratakse järgmiselt:

$$I_1^j = k_{In} \cdot I_2,$$

kus I_1^j - leitud primaarvoolu ligikaudne väärtus;

$$k_{In} = \frac{I_{n1}}{I_{n2}} - \text{voolutrafo nimikonstant; võrdub nimivoolude suhtega.}$$

Voolu mõõtmisel voolutrafo tingitud voolu viga ehk voolutarfo ülekandeviga

$$\begin{aligned}
 \gamma_I = \gamma_k &= \frac{I_1^j - I_1}{I_1} \cdot 100\% = \frac{k_{In} I_2 - k_I I_2}{k_I I_2} \cdot 100\% = \\
 &= \frac{k_{In} - k_I}{k_I} \cdot 100\%.
 \end{aligned}$$

Peale vooluvea esineb veel nurgaviga. Voolutrafo nurgaveaks nimetatakse nurka δ primaarvooluvektori ja 180° pööratud sekundaarvooluvektori vahel (joon. 6-2). Nurgaviga on positiivne, kui 180° pööratud I_2 vektor tõttab I_1 ees. Nurgaviga mõjutab mõõtmise täpsust neil juhtudel, kui voolutrafoga ühendatud mõõteriistade näit oleneb voolu ja pinge vahelisest nihkenurgast (vattmeetrid, arvestid jne.).

Voolutrafo vead olenevad tühijooksuvoolust ehk resulteerivast magneetimisergutusest. Oletame, et tühijooksuvool $I_0 = 0$, siis $I_0 w_1 = 0$ ja primaar-magneetimisergutus võrdub sekundaar-magneetimisergutusega: $I_1 w_1 = I_2 w_2$.

Järelikult siis

$$1) \frac{w_2}{w_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{n1}}{I_{n2}} = k_I = k_{In} \text{ ja vooluviga kõikidel töö-}$$

režiimidel on null;

2) vektor I_1 ja 180° pööratud vektor I_2 langevad faasis ühte, ning nurgaviga on samuti null.

Kuna voolutrafo vigu põhjustab tühijooksuvool, siis olenevad vead samadest suurustest kui tühijooksuvoolgi:

1) magnetahela magnetilisest takistusest, s.o. südamiku magnetilisest läbitavusest ja geomeetrilistest mõõdetest;

2) sekundaarahela välistakistusest ja võimsustegurist $\cos \varphi_2$;

3) sekundaarvoolust I_2 ;

4) voolu sagedusest.

Vigade vähendamiseks valmistatakse voolutrafode südamikud kõrgekvaliteedilisest elektrotehnilisest terasest ja suure ristlõikepinnaga. Samuti kasutatakse eriskeemiga ja erikonstruktsiooniga voolutrafosid, milles vigu on võimalik kompenseerida.

Kuna vead olenevad voolutrafo sekundaarahela välistakistuse suurusest, siis on tehaste poolt määratud sekundaarahela nimitakistus, s.o. sekundaarne nimikoormus oomides või nimivõimsus voltamprites, mille puhul vead ei ületa antud täpsusklassile lubatavaid. Sekundaarahela nimikoormuse ja nimivõimsuse vahel kehtib seos:

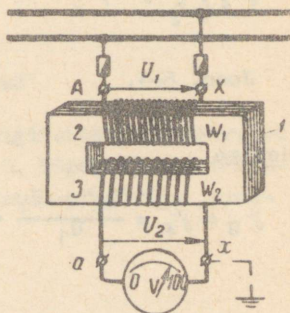
$$S_n = I_{n2}^2 Z_n.$$

Lubatava vooluvea järgi liigitatakse voolutrafod viide täpsusklassi: 0,2; 0,5; 1,0; 3,0 ja 10. Arvud näitavad maksimaalset vooluviga protsentides.

Sekundaarsed nimikoormused voolutrafodel, mille sekundaarne nimivool $I_{n2} = 5$ A, on 0,1; 0,15; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,4; 3 ja 4Ω .

6-3. Pingetrafo

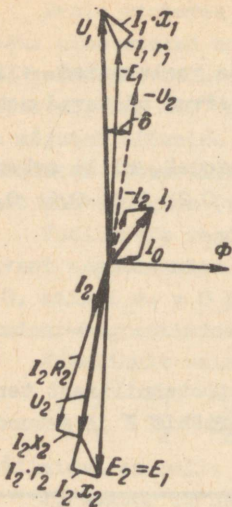
Pingetrafo (joon. 6-3) koosneb elektrotehnilisest terasest magnetahelast 1, millel asub primaarmähis 2 ja sekundaarmähis 3. Keerdude arvud on vastavalt w_1 ja w_2 . Primaarmähise keerdude arv on suur ja ta ühendatakse sulavkaitsmete kaudu mõõdetava kõrgepingega. Primaarmähise algus tähistatakse tähega A ja lõpp tähega X. Sekundaarmähise keerdude arv on väiksem ja nimipinge tavaliselt 100 V. Sekundaarmähise klemmid tähistatakse tähtedega a ja x. Sekundaarmähisega ühendatakse voltmeetrid, vattmeetrite pingemähised jne. Kuna mõõteriistade pingemähiste takistused on suured, siis töötab pingetrafo praktiliselt tühijooksurežiimis. Pinge U_1 mõjul primaarmähisist läbib vahelduvvool tekitab südamikus vahelduva magnetvoo. Viimane indutseerib sekundaarmähises pinge U_2 . Vektordiagramm on toodud joonisel 6-4.



Joon. 6-3.

Tegeliku primaarpinge U_1 ja tegeliku sekundaarpinge U_2 suhet nimetatakse pingetrafo tegelikuks ülekandeguriks ehk konstandiks:

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



Joon. 6-4.

deviga

$$\gamma_U = \gamma_k = \frac{U_1' - U_1}{U_1} \cdot 100\% = \frac{U_2 K_{Un} - U_2 K_U}{U_2 K_U} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{K_{Un} - K_U}{K_U} \cdot 100\% = \gamma_k.$$

Peale pingeväea esineb veel nurgaviga. Nurgaväeks nimetakse nurka δ primaarpingevекtori ja 180° pööratud sekundaarpingevекtori vahel (joon. 6-4). Nurgaviga on positiivne, kui 180° pööratud sekundaarpingevектор tõttab primaarpingevекtori ees, vastasel juhul negatiivne. Nurgaviga avaldab mõõtmise täpsusele mõju ainult sel juhul; kui kasutatakse mõõteriistu, mille näit on olnud faasinurgast (vattmeetrid, arvestid jne.).

Vigade tekkimise põhjuseks on pingelangud pingetrafo mähistes. Kui pingelangud võtta võrdseks nulliga ($I_r = 0$;

Primaarpinge leidmiseks tuleb mõõdetud sekundaarpinge korrutada pingetrafo tegeliku konstandiga

$$U_1 = k_U U_2.$$

Kuna tegelik ülekan-detegur ei ole teada, sest ta on olnud trafo koormusest, siis kasutatakse primaarpinge leidmiseks seost

$$U_1' = k_{Un} U_2,$$

kus U_1' - mõõdetava primaarpinge ligikaudne väärtus;

$$k_{Un} = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} - \text{pingetrafo nimiülekan-detegur (tehase poolt antud).}$$

Pinge mõõtmisel pingetrafast tingitud pingeviga ehk pingetrafo ülekan-

$I_x = 0$), siis $E_1 = U_1$ ja $E_2 = U_2$ (vt. joon. 6-4) ning järelikult

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{n1}}{U_{n2}} = k_U = k_{Un},$$

s.t. pingeviga on võrdne nulliga igasugusel koormusel. Peale selle langeb U_1 faasis ühte E_1 -ga ja U_2 ühtib E_2 -ga, järelikult on ka nurgaviga null.

Vigade vähendamiseks tuleb vähendada mähiste takistusi (r_1 ; r_2 ; x_1 ja x_2). Aktiivtakistuste vähendamiseks valmistatakse mähised suure ristlõikega traadist ning voolutihedus võetakse väike. Induktiivtakistuste vähendamiseks valmistatakse südamikud terasest, magnetiline induksioon valitakse 0,6 ... 1,0 T, vähendatakse puistet.

Suurimat näivvõimsust, millega võib pingetrafot koormata, ilma et vead ületaksid lubatavaid suurusid, nimetatakse pingetrafo nimivõimsuseks:

$$S_n = I_{n2} U_{n2} = \frac{U_{n2}^2}{Z_{n2}} = I_{n2}^2 Z_{n2}.$$

Lubatava pingeviga suuruse järgi liigitatakse pingetrafod nelja täpsusklassi: 0,2; 0,5; 1,0 ja 3,0. Täpsusklassi tähistavad arvud näitavad maksimaalset lubatavat pingeviga protsentides.

VII. TAKISTUSE, INDUKTIIVSUSE JA MAHTUVUSE

MÕOTMINE

7-1. Üldist

Elektriline takistus on vooluringi või seadme üks tähtsamaid parameetreid. Praktikas esinevad takistused on väga erineva suurusega: 10^{-6} ... $10^{15} \Omega$. Kõik takistused võib nende suurusjärgu järgi liigitada kolme gruppi:

- a) väikesed takistused - 1Ω ja vähem;

b) keskmised takistused - $1\Omega \dots 0,1 M\Omega$;

c) suured takistused - $0,1 M\Omega$ ja rohkem.

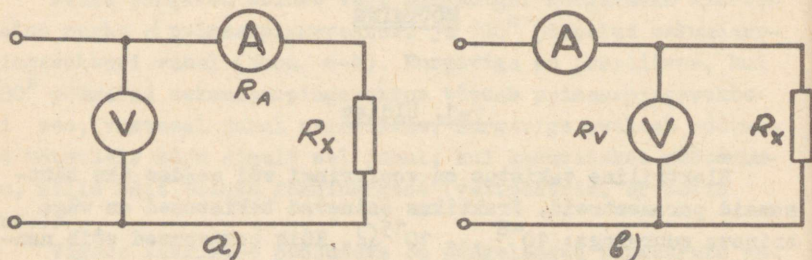
Takistuse mõõtmise meetodi valik sõltub takistuse suurusjärgust ja vajalikust mõõtetäpsusest. Väikeste takistuste mõõtmisel tuleb arvestada ühendusjuhtmete takistuse ja kontaktide üleminekutakistuse mõjuga. Väikeste takistuste hulka kuuluvad: elektrimasinate ankrumähiste takistused, ampermeetrite takistused, süntide takistused, voolutrafode takistused, voolutrafode mähiste takistused jne. Takistuste mõõtmisel võib kasutada üldist aparatuuri (voltmeetrid, ampermeetrid, galvanomeetrid, takistusmagasinid jne.), millest koostatakse mõõteskeem, või takistuse mõõtmiseks ettenähtud spetsiaalset aparatuuri - oommeetreid, sildu jne. Viimaste abil mõõtmine on kiirem ja lihtsam.

7-2. Takistuse mõõtmine voltmeetri-ampermeetri meetodil

See on kõige lihtsam meetod takistuse mõõtmiseks. Mõõdame pinget U ja voolu I ning tundmatu takistuse arvutame Ohmi seaduse järgi:

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

Mõõta võime kahe mõõteskeemi järgi, mis on toodud joonisel 7-1.



Joon.7-1.

Mõõtmisel skeemi a järgi näitab voltmeeter rohkem ampermeetri takistusel tekkiva pingelangu võrra. Ampermeetri näit on õige. Mõõdetava takistuse tegelik väärtus

$$R_x = \frac{U - IR_a}{I} = \frac{U}{I} - R_A.$$

Skeemi b puhul on voltmeetri näit õige, sest paralleeltakistustel on pinged võrdsed. Ampermeeter näitab rohkem voltmeetri läbiva voolu I_V võrra. Mõõdetava takistuse tegelik väärtus

$$R_x = \frac{U}{I_x} = \frac{U}{I - I_V} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_V}}.$$

Kuna praktilistel mõõtmistel takistus arvutatakse sageli ligikaudse valemi järgi, siis on vaja teada, millist skeemi valida, et mõõteviga ei oleks väga suur. Suhteline takistuse mõõteviga skeemi a puhul

$$\gamma_R = \frac{R_x^i - R_x}{R_x} \cdot 100\% = \frac{R_A}{R_x} \cdot 100\%$$

ja skeemi b puhul

$$\gamma_R = \frac{R_x^i - R_x}{R_x} \cdot 100\% = - \frac{R_x}{R_x + R_V} \cdot 100\%.$$

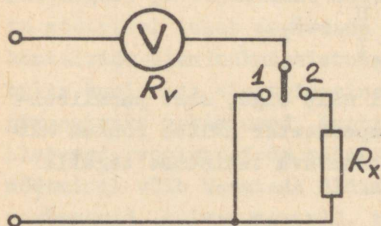
Järelikult tuleb skeemi a kasutada neil juhtudel, kui mõõdetav takistus on ampermeetri takistusega võrreldes suur (suurem 100 või rohkem korda). Skeemi b tuleb kasutada neil juhtudel, kui mõõdetav takistus on voltmeetri takistusega võrreldes väike (väiksem 100 või rohkem korda).

7-3. Takistuse mõõtmine voltmeetriga

See meetod on kasutatav keskmiste ja suurte takistuste mõõtmisel. Voltmeetri takistus R_V peab olema teada. Mõõteskeem on toodud joonisel 7-2. Asetades ümberlülitit asendisse

1, mõõdame vooluallika pinget U_1 . Seejärel asetame ümberlülitit asendisse 2 ja loeme voltmeetri näidu U_2 . U_2 on U_1 -st väiksem pingelangu võrra mõõdetaval takistusel. Mõõdetava takistuse leiame Ohmi seaduse järgi:

$$R_x = \frac{U_x}{I} = \frac{U_1 - U_2}{I} = \frac{U_1 - U_2}{\frac{U_2}{R_v}} = R_v \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right).$$

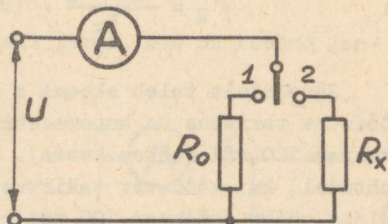


Joon. 7-2.

Mõõtevea suurus sõltub toiteallika pinget U stabiilsusest ja voltmeetri täpsusklassist.

7-4. Takistuse mõõtmine asendusmeetodil

Keskmise suurusega takistuse mõõtmine asendusmeetodil toimub joonisel 7-3 toodud skeemi kohaselt. Algul asetame ümberlülitit asendisse 1 ja mõõdame tuntud takistust R_0 läbiva voolu I_0 . Seejärel asetame ümberlülitit asendisse 2 ja mõõdame voolu I_x . Eeldades, et toiteallika pinget U on konstantne ja jättes arvestamata ampermeetri takistuse, saame:



Joon. 7-3.

$$\frac{U}{R_x} : \frac{U}{R_0} = \frac{I_x}{I_0} = \frac{R_0}{R_x},$$

mildest

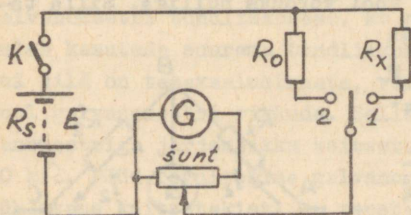
$$R_x = R_0 \frac{I_0}{I_x}.$$

Kui reguleerida takistust R_0 nii, et voolud I_x ja I_0 oleksid võrdsed, siis

$$R_x = R_0.$$

Sellel meetodil suurte takistuste mõõtmisel asendatakse ampermeeter šundiiga varustatud galvanomeetriga. Mõõteskeem

on toodud joonisel 7-4.



Joon. 7-4.

Asetanud šundi liugkontakti kõige väiksema tundlikkuse asendisse, asetame ümberlülitit asendisse 1. Edasi sulgeme lülitit K ja suurendame galvanomeetri tundlikkust vajaliku suuruseni. Sel juhul ahelas

$$I = C_I P^\alpha = \frac{E}{R_x + R_G + R_S}.$$

Seejärel asetame ümberlülitit asendisse 2 ja muudame takistust R_0 nii, et galvanomeetri hälve oleks niisama suur kui varem (šundi takistust mitte muuta), siis

$$I = C_I P^\alpha = \frac{E}{R_0 + R_G + R_S}.$$

Eelmistest võrrandeist järeldub, et konstantsete E , R_G ja R_S puhul

$$R_x = R_0.$$

Väga suurte takistuste (näiteks kaabli isolatsioonitakistus, isolaatorite pinnatakistus) mõõtmisel kasutatakse sama meetodit, kuid veidi muudetud kujul.

7-5. Takistuse mõõtmine ühekordse sillaga

Ühekordse sillaga takistuse mõõtmine toimub võrdlusmeetodil; tundmatut takistust võrreldakse tuntud takistusega. Ühekordse silla skeem on toodud joonisel 7-5. Sild koosneb kolmest takistusmagasinist R_1 , R_2 ja R_4 , mis koos mõõdetava takistusega R_x moodustavad suletud nelinurga ABCD. Ühte diagonaali ühendatakse galvanomeeter, teise toiteallikas. Sulgenud lülitid L_1 ja L_2 , reguleerime takistusi R_1 , R_2 ja R_4 nii, et galvanomeetrit läbiv vool võrduks nulliga. Silla tasakaalu puhul on punktide B ja D potentsiaalid võrdsed: $\varphi_B = \varphi_D$ ja $I_1 = I_2$ ning $I_3 = I_4$. See tähendab, et pingelang punktist A punkti B peab võrduma pingelanguga punktist A punkti D:

$$U_{AB} = U_{AD} \text{ ehk } I_1 R_1 = I_3 R_x.$$

Samuti peab pingelang punktide B ja C vahel võrduma pingelanguga punktide D ja C vahel:

$$U_{BC} = U_{DC} \text{ ehk } I_2 R_2 = I_4 R_4.$$

Jagame esimese võrrandi teisega:

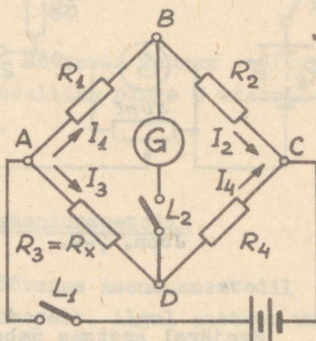
$$\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_3 R_x}{I_4 R_4}.$$

Kuna $I_1 = I_2$ ja $I_3 = I_4$, siis saame:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_4} \text{ ehk } R_1 R_4 = R_x R_2,$$

millest

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



Joon. 7-5.

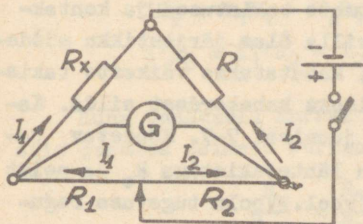
Saadud suhe jääb kehtima, kui galvanomeetri ja toiteallika asukohad ringi vahetada. Tähistades $\frac{R_1}{R_2} = K$, võime valemi kirjutada kujul: $R_x = KR_4$. Ka siit ilmneb, et sillas toimub tundmatu takistuse R_x võrdlemine R_4 -ga. Takistused R_1 ja R_2 võivad omada mistahes suurusi, kuid nende suhe peab olema teada. Takistuste R_1 ja R_2 suhet nimetatakse sillateguriks. Sillateguriks ehk sillakonstandiks on arv, millega tuleb korrutada R_4 väärtust, et saada R_x -i väärtust. Sillateguri suurus valitakse olenevalt mõõdetava takistuse suurusel ($\frac{100}{1}$; $\frac{10}{1}$; $\frac{1}{1}$; $\frac{1}{10}$; $\frac{1}{100}$ jne.).

Mõõtmise täpsus sõltub takistusmagasinide täpsusest ja galvanomeetri tundlikkusest. Et saavutada suuremat täpsust, tuleb kasutada suurema tundlikkusega galvanomeetrit. Algul, kui sild on tasakaalustamata, võib galvanomeetrit läbiv tugev vool galvanomeetri rikkuda. Selle vältimiseks ühendatakse galvanomeetriga järjestikku kaitsetakisti R_k suurusjärgus 3 ... 50 k Ω . Nüüd reguleerime galvanomeetri hälbe nulli, seejärel lühistame kaitsetakisti ja teostame täpse tasakaalustamise. Mõõtmise täpsus on 0,1 ... 0,01%, erijuhtudel kuni 0,001%.

Takistusmagasinidest koostatud sillad on gabariitidelt suured. Mõõtmete vähendamiseks kasutatakse sildu, kus kaks

takistusmagasini on asendatud kalibreeritud manganintraadiga (reohord). Sellise silla põhimõtteskeem on joonisel 7-6.

Liugkontakt jagab manganintraadi takistuse kaheks takistuseks (R_1 ja R_2). Tasakaalu korral



Joon. 7-6.

$$I_1 R_1 = I_2 R_2,$$

$$I_1 R_x = I_2 R_1,$$

millest

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R}.$$

Tundmatu takistuse R_x avaldame järgmiselt:

$$R_x = R \frac{R_1}{R_2} = R \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = R \cdot \frac{l_1}{l_2}.$$

Suhe $\frac{l_1}{l_2}$ kantakse tavaliselt silla skaalale, mis asub paralleelselt kalibreeritud traadiga. Takistus R on muudetav astmeliselt ümberlülitite või pistiku abil. Need sillad on väiksema täpsusega, sest traadi ristlõige võib mõningates kohtades kulumise tagajärjel muutuda. Mõõtmise täpsus ei ületa tavaliselt 12%. Kirjeldatud põhimõttel toimivad väikesegabariidilised takistussillad MMB.

Rehordsildu kasutatakse elektrolüütide takistuse mõõtmisel. Polariseerimise vältimiseks toidetakse neid sildu vahelduvvooluga. Galvanomeetri asemel kasutatakse peatelefone. Sild on tasakaalus, kui toon peatelefonis on minimaalne.

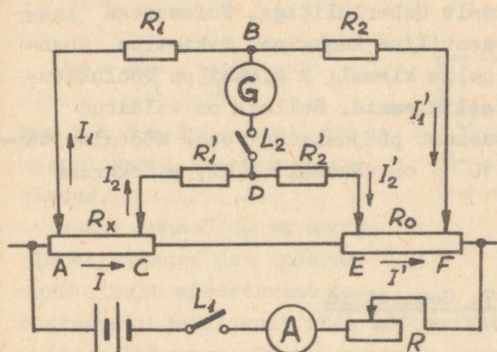
7-6. Takistuse mõõtmine kahekordse sillaga

Väikeste takistuste mõõtmisel ühekordse sillaga tekib suur mõtteviga, sest ühendusjuhtmete takistused ja kontaktide üleminekutakistused jäävad silla õlas järjestikku mõõdetava takistusega. Toodud põhjusel kasutatakse väikeste takistuste (alla 10Ω) täpseks mõõtmiseks kahekordset silda. Kahekordse silla põhimõtteskeem on joonisel 7-7. Mõõdetav takistus R_x ühendatakse järjestikku lähtetakistiga R_0 ja neist juhitakse läbi suhteliselt tugev vool. Voolu tugevuse reguleerimiseks ühendatakse vooluallikaga järjestikku reostaat R ja voolu mõõtmiseks ampermeeter. Takistid R_1 ; R_1' ; R_2 ja R_2' on reguleeritavad. Et vool I_1 ja I_2 oleks võimalikult väike, valitakse takistid $R_1 = R_1' \geq 10 \Omega$ ja $R_2 = R_2' \geq 10 \Omega$. Seega on ühendusjuhtmete ja kontaktide üleminekutakistuste mõju väike. Sulgenud lüliti L_1 reostaadi R abil, reguleerime voolu nõutavale suurusle, olenevalt R_0 suurusest. Seejärel sulgeme lüliti L_2 ja muudame takistuste suhet R_1/R_1' ; R_2/R_2' , kuid

nii, et $R_1 = R_1'$ ja $R_2 = R_2'$, kuni galvanomeetri hälve on null. Tasakaalu korral $\varphi_B = \varphi_D$; $I_1 = I_1'$; $I_2 = I_2'$ ja $I = I'$.

Järelikult pingelang punktist A punktini B peab võrduma pingelanguka punktist A punktini D. Teiselt poolt pingelang punktist B punktini F peab võrduma pingelanguga punktist D punktini F.

Saame kirjutada võrrandeid:



Joon. 7-7.

$$I_1 R_1 = I R_x + I_2 R_1';$$

$$I_1 R_2 = I_2' R_2' + I' R_0.$$

Avaldame neist $I R_x$ ja $I' R_0$

$$I R_x = I_1 R_1 - I_2 R_1' = R_1 (I_1 - I_2);$$

$$I' R_0 = I_1' R_2 - I_2' R_2 = R_2 (I_1' - I_2').$$

Kuna tasakaalu korral $I = I'$ ja $I_1 - I_2 = I_1' - I_2'$, siis jagades esimese võrrandi teisega, saame:

$$\frac{R_x}{R_0} = \frac{R_1}{R_2},$$

millest mõõdetav takistus

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2}.$$

Takistuse täpsel mõõtmisel kahekordse sillaga tuleb arvestada ka võimalusega, et R_x ja R_0 ühenduskohtades tekivad

termoelektromotoorseid jõud. Et vältida termoelektromotoorsest jõududest põhjustatud vigu, tuleb mõõtmiste teostada kaks korda - kord ühe, kord vastupidise voolu suunaga. Voolu suunda muudetakse tavaliselt ümberlülitiga. Tulemuseks loetakse kahe mõõtmise aritmeetiline keskmine. Takistite ühendamiseks tuleb kasutada nelja klemmi; 2 klemmi on vooluklemmid ja 2 klemmi potentsiaalikleemid. Sellega on välditud klemmide üleminekutakistustest põhjustatud vead. Mõõtmise täpsus piirkonnas $10^{-6} \dots 10^{-5}$ on vähemalt 1,5%, piirkonnas $10^{-3} \dots 10^3$ 0,05%.

7-7. Oommeetrid

Oommeetriteks nimetatakse mõõteriistu, millede skaalalt on otseselt loetav mõõdetav takistus. Oommeetrites kasutatakse harilikult magnetelektrilist mõõtemehhanismi, harvem ferrodünaamilist. Oommeetrid võib jagada kahte gruppi:

1. Oommeetrid, millede mõõtemehhanismil on üks liikuv raam koos vastupöördemomenti tekitavate vedrudega. Nende näit sõltub toiteallika pingest.

2. Oommeetrid, millede mõõtemehhanismil on kaks liikutavat raami (logomeeter). Nende näit ei sõltu toiteallika pingest. Vastupöördemomenti tekitavad vedrud puuduvad, vool juhatakse mähistes painduvate metall-lintide abil, mis nimetamisväärset pöördemomenti ei tekita.

Üherraamilise mõõtemehhanismiga oommeetrid. Need oommeetrid võivad olla kas järjestikskeemiga või paralleelskeemiga.

Järjestikskeemiga oommeeter koosneb harilikult ühe raamiga magnetelektrilisest mõõtemehhanismist koos eeltakistiga R_e . Mõõdetav takistus R_x ühendatakse järjestikku - sellest tulenebki skeemi nimetus. Toiteallikaks on tavaliselt väike kuivelement, mis asetseb oommeetri korpuses, kuid võib kasutada ka välist vooluallikat. Oommeetri skeem on näidatud joonisel 7-8. Avatud lüliti L korral läbib mõõtemehhanismi vool

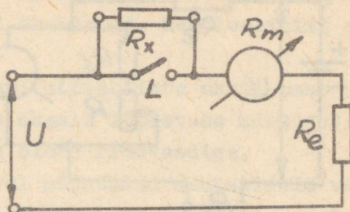
$$I = C_I \alpha = \frac{U}{R_x + R_m + R_e} = \frac{U}{R_x + R},$$

millest liikuva osa pöördenurk

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \cdot \frac{1}{R_x + R},$$

kus $R = R + R_e$ - antud oommeetri puhul konstantne takistus.

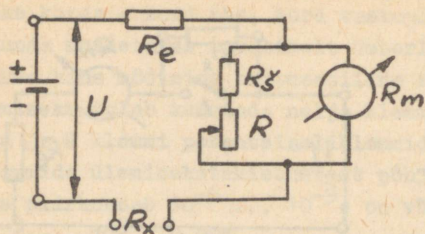
Kui suhe U/C_I ei muutu, oleneb liikuva osa pöördenurk ainult mõõdetavast takistusest; järelikult võib mõõteriista skaala gradueerida takistuse ühikutes. Kuivelementide pinge aja jooksul muutub. Seepärast oommeetrid, mis töötavad kuivelementidega, on varustatud seadistega, mille abil saab hoida suhe U/C_I konstantsena C_I reguleerimise teel. Selliseks seadiseks võib olla magnetiline šunt. See kujutab endast pehmest ferromagnetilisest materjalist plaati, mis asub mõõtemehhanismi pooluskingade lähedal. Muutes magnetilise šundi ja pooluskingade vahelist kaugust kruvi abil, muudame magnetilist induktiooni mõõtemehhanismi õhupilus.



Joon. 7-8.

Mõõtmise käik on järgmine. Sulgeme lüliti L (Või lühistame mõõdetava takistuse ühendusklemmid) ja reguleerimiskruvi pööramisega asetame mõõteriista osuti kontrolltäpile, mis antud skeemi puhul ühtib oommeetri skaala nullpunktiga. Seejärel ühendame mõõteklemmid mõõdetava takistusega ja loeme skaalalt takistuse väärtuse.

Teine moodus suhet U/C_I konstantsena hoidmiseks seisneb selles, et mõõtemehhanism on varustatud muudetavat takistust omava šundiga. Reguleerimise käik on samasugune kui magnetilise šundi puhul. Põhimõtteskeem on joonisel 7-9. Teist moodust kasutatakse testrite puhul, sest neis põhjustaks reguleerimine magnetilise šundiga volt- ja ampermeetri skaalade mittevastavuse.



Joon. 7-9.

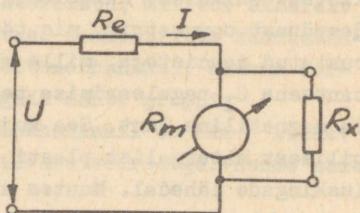
Paralleelskeemiga oom-
meeter koosneb samuti ha-
rilikust ühe raamiga mag-
netelektrilisest mõõte-
mehhanismist koos eelta-
kistiga. Mõõdetav takis-
tus ühendatakse mõõtemeh-
hanismiga paralleelselt,
millest tulenebki tema ni-
metus. Põhimõtteskeem on
toodud joonisel 7-10. Vool

ahela mittehargnevas osas

$$I = \frac{U}{R_e + \frac{R_x R_m}{R_x + R_m}}$$

Mõõtemehhanismile
langeb pinge

$$I_m R_m = I \frac{R_x R_m}{R_x + R_m}$$



Joon. 7-10.

Neist võrrandeist näh-
tub, et mõõtemehhanismi läbib vool

$$I_m = C_I \alpha = \frac{U}{R_e + R_m + \frac{R_e R_m}{R_x}} = \frac{U}{k_1 + \frac{k_2}{R_x}}$$

kus $k_1 = R_e + R_m$ ja $k_2 = R_e R_m$ - antud oomeetril konstantsed
suurused.

Liikuva osa pöördenurk

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \cdot \frac{1}{k_1 + \frac{k_2}{R_x}}$$

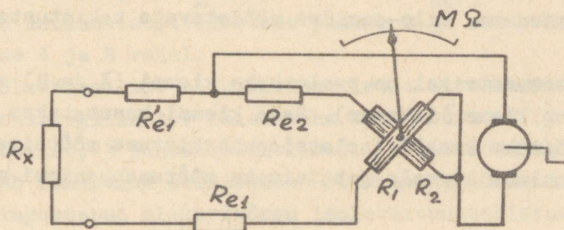
Seega muutmatu suhte $\frac{U}{C_I}$ puhul oleneb oomeetri liikuva
osa pöördenurk ainult mõõdetavast takistusest. Järelikult

võib mõõteriista skaalat gradueerida takistuse ühikutes. Toiteallika pinge muutumisel tuleb reguleerida suhet U/C_I . Reguleerimisel peab R_x olema lahti ühendatud. Reguleerimist on võimalik teostada kahel viisil:

- 1) magnetilise šundiga - kuni mõõteriista osuti asub kontrolltäpil (kohastikku oomide skaala lõpmatuse märgiga);
- 2) eeltakistiga järjestikku oleva reostaadiga.

Kuna järjestiklülituse korral mõjutavad suhteliselt väikesed takistused mõõtemehhanismi läbivat voolu, siis kasutatakse väikeste takistuste mõõtmisel (kuni 1000) paralleelskeemiga oommeetrid. Suhteliselt suurte takistuste mõõtmisel kasutatakse aga järjestikskeemiga oommeetrid, sest suurte takistuste lülitamisel paralleelselt mõõtemehhanismiga muutub mõõtemehhanismi läbiv vool väga vähe.

Kaheraamilise mõõtemehhanismiga oommeetrid. Oommeetritel, millede näit ei sõltu toiteallika pingest, on mõõtemehhanismiks magnetelektriline logomeeter. Harvemini, (näiteks maandustakistuse mõõtjates, mis töötavad vahelduvvooluga) kasutatakse ferrodünaamilist logomeetrit. Järjestikskeemiga



Joon. 7-11.

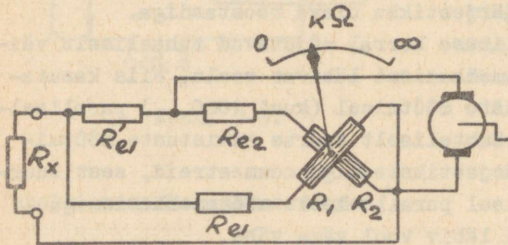
oommeetri põhimõtteskeem on joonisel 7-11. Raamimähised koos järjestikku ühendatud takistitega moodustavad kaks paralleelharu.

Esimese haru takistus $R_1 + R_{e1} + R_x = k_1 + R_x$ ja teise haru takistus $R_2 + R_{e2} = k_2$.

Kuna voolud paralleelharudes jagunevad pöördvõrdeliselt harude takistustega, võime kirjutada:

$$\alpha = F \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = F \left(\frac{K_2}{K_1 + R_x} \right).$$

Seega oleneb liikuva osa pöördnurk mõõdetava takistuse suuruselt. Toiteallikana võib kasutada kuivelemente, vahelduvvoolutoite pu-



Joon. 7-12.

selt esimese raamimähisega; seega vool esimeses raamimähises sõltub R_x suuruselt. Paralleelskeemiga logomeetreid kasutatakse väiksemate, kilo-oomides mõõdetavate takistuste mõõtmiseks.

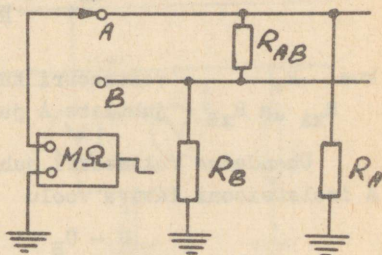
Megaohmmeetritel on peale kahe klemmi (1 ja 3) sageli veel kolmas klemm 2 (ekraan). Seda klemmi kasutatakse erimõõtmistel, näiteks kaabli isolatsioonitakistuse mõõtmisel pinna-juhtivusvoolude kõrvale juhtimiseks mõõtemehhanismi mähisest.

7-8. Isolatsioonitakistuse mõõtmine

Isolatsiooni korrasolekust sõltub elektriseadme töökindlus. Juhtmete isolatsioon aja jooksul halveneb, seetõttu tuleb isolatsiooni seisukorda eksploatatsioonis perioodiliselt kontrollida. Isolatsioonitakistuse mõõtmisel peab pinge olema võimalikult lähedane seadme nimipingele, kuid mitte alla 100 V. Mõõta tuleb nii iga juhtme ja maa vaheline kui ka juhtmetevaheline isolatsioonitakistus. Sealjuures peavad kõik tarbijad (elektrilambid, elektrimootorid) olema võrgust

eraldatud, kuid kõik lülitid sisse lülitatud.

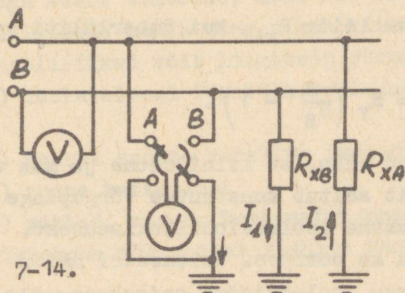
Kui seade on pingevaba, siis kasutatakse isolatsioonitakistuse mõõtmiseks megaoommeetrit. Joonisel 7-13 on toodud isolatsioonitakistuse mõõtmise kord kahejuhtmelises võrgus. Megaoommeetri klemm $\bar{\Pi}$ ühendatakse liinijuhtme-ga A ja teine klemm 3 ühen-datakse maaga. Tarbijad on lahti ühendatud. Nagu joo-niselt nähtub, ei ole mõõt-misel saadud resultaat võrd-ne A juhtme isolatsioonita-kistusega R_A maa suhtes. Näit on võrdne kahe para-leelharu ekvivalentse takistusega: ühes harus R_A ja teises harus R_{AB} ning R_B järjestikku. See mõõdetud ekvivalentne ta-kistus $R_{ek.A}$ on väiksem R_A -st ehk äärmisel juhul võrdne R_A -ga. Kuigi me ei saa mõõdetud väärtuse abil leida R_A -d, või-me kindlad olla, et R_A ei ole väiksem $R_{ek.A}$ -st. Samal viisil mõõdame isolatsioonitakistuse juhtme B ja maa vahel ning juhtmete A ja B vahel.



Joon. 7-13.

Kolmefaasilise elektrivõrgu isolatsioonitakistus mõõde-takse analoogiliselt. Tuleb teha kuus mõõtmist (3 juhtme ja maa vahelist, 3 juhtmetevahelist). Isolatsioonitakistuse suu-rus peab rahuldama eeskirjades ettenähtud nõudeid.

Pingestatud elektrivõrgu isolatsioonitakistust saame mää-rata voltmeetrite abil. Mõõtmise skeem on toodud joonisel 7-14.



Joon. 7-14.

Isolatsioonitakis-tuse määramiseks mõõ-dame:

- 1) võrgupinge U;
- 2) pinge juhtme A ja maa vahel U_A ;
- 3) pinge juhtme B ja maa vahel U_B .

Juhtme B isolatsiooniläbiv vool

$$I_1 = \frac{U - U_A}{R_{xB}} = \frac{U}{\frac{R_{xA}R_V}{R_{xA} + R_V} + R_{xB}},$$

kus R_V - voltmeetri takistus;

R_{xA} ja R_{xB} - juhtmete A ja B isolatsioonitakistus maa vahel.

Ühendades voltmeetri juhtmega B, saame kirjutada juhtme A isolatsiooniläbiva voolu

$$I_2 = \frac{U - U_B}{R_{xA}} = \frac{U}{\frac{R_{xB}R_V}{R_{xB} + R_V} + R_{xA}}.$$

Lahendades need võrrandid R_{xA} ja R_{xB} suhtes, leiame juhtmete ja maa vahelise isolatsioonitakistuse:

$$R_{xA} = R_V \frac{U - U_A - U_B}{U_B};$$

$$R_{xB} = R_V \frac{U - U_A - U_B}{U_A}.$$

Kui juhtme A isolatsioonitakistus on suur, võrreldes voltmeetri takistusega, siis ümberlülitati olles asendis A on voltmeeter ühendatud järjestikku isolatsioonitakistusega R_{xB} . Selle suurust võib määrata valemiga:

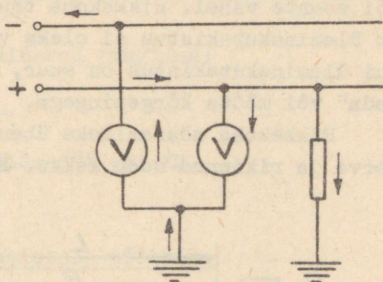
$$R_{xB} = R_V \left(\frac{U}{U_A} - 1 \right).$$

Analoogiliselt saame leida R_{xA} , kui ümberlülitati on asendis B:

$$R_{xA} = R_V \left(\frac{U}{U_B} - 1 \right).$$

Neist võrrandeist on näha, et liinijuhtme ja maa vahele ühendatud voltmeetri näit sõltub konstantse võrgupinge U puhul ainult teise liinijuhtme isolatsioonitakistusest. Voltmeetri võib gradueerida ka oomides. Voltmeetri näidu järgi võib alati otsustada võrgu isolatsiooni seisukorra üle.

Isolatsiooni kontrollimisel võib ühe voltmeetri ja ümberlülititi asemel kasutada kaht voltmeetrit. Vastav lülitus on toodud joonisel 7-15. Kui isolatsiooni seisukord on normaalne, võrdub voltmeetritele langev pinge poole liinipingega. Kui ühe juhtme isolatsioonitakistus väheneb, siis selle juhtmega ühendatud voltmeetri näit samuti väheneb. Teise voltmeetri näit suureneb, sest pinge jaguneb võrdeliselt takistustele.



Joon. 7-15.

Kolmefaasilises võrgus toimub isolatsiooni kontroll kolme voltmeetri abil, mis ühendatakse liinijuhtmete ja maa vahele. Kui kõigi juhtmete isolatsioonitakistus on ühesugune, siis iga voltmeetri näit on võrdne faasipingega. Mingis faasis isoaltsioonitakistuse vähenemisel väheneb ka selle faasi voltmeetri näit, kuna teiste voltmeetrите näidud suurenevad. Kõrgepingevõrgus ühendatakse voltmeetrid pingetrafo sekundaarmähistega.

7-9. Rikkekohta määramine kaabelliinis

Isolatsiooni rikkekoha täpne määramine kaabelliinides omab väga suurt tähtsust, sest see võimaldab vähendada lasketikaevamistöõde mahtu ning riket kiiresti kõrvaldada.

Kaablirikked võib liigitada järgmistesse gruppidesse:

1) isolatsiooni läbilõök voolujuhtiva soone ja kesta vahel;

2) kaabli soonte vahelise isolatsiooni läbilõök;

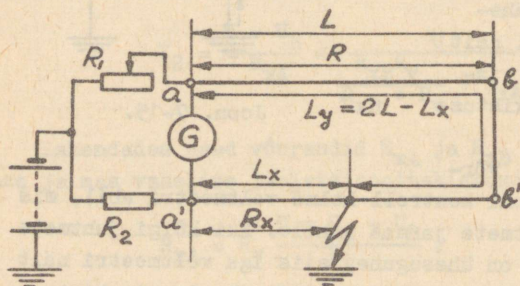
3) soone katkemine;

4) rikked, mis on kombinatsioonid eelmistest gruppidest.

Rikkekohta määramisel kaablis kasutatakse väga mitmesugu-

seid meetodeid, milledest levinumaks on rikkekoha määramine sillaga. Seda meetodit saab kasutada juhul, kui esineb lühis kolmesoonelise kaabli voolujuhtiva soone ja maa vahel või soonte vahel. Rikkekoha täpseks määramiseks on vajalik, et üleminekutakistus ei oleks väga suur (mitte üle 1000Ω). Kui üleminekutakistus on suur, tuleb rikkekoht "sisse põletada" või mõõta kõrgepingega.

Rikkekoha määramiseks ühendatakse kaabli teises otsas terve ja riknenud soon kokku. Esimesse kaabli otsa ühendatakse



Joon. 7-16.

se galvanomeeter ning takistusmagasinid R_1 ja R_2 . Sageli asendatakse takistusmagasinid kalibreeritud traadiga (reohordiga). Mõõtmise skeem on toodud joonisel 7-16. Tähistame kaabli ühe soone takistuse tähega R . Tasakaalu korral $R_1 R_x = R_2 (2R - R_x)$,

millest

$$R_x = 2R \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Määratud R_x ning teades soone materjali eritakistust ja soone ristlõiget s , saame leida L_x -i:

$$\frac{L_x}{s} = 2 \frac{L}{s} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2},$$

millest

$$L_x = 2L \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Tulemuse kontrollimiseks on otstarbekas teha teine mõõtmine, kusjuures eelnevalt vahetatakse omavahel kaabli soonte otsad a ja a' . Sellel juhul mõõdame L_y :

$$L_y = 2L \frac{R_2'}{R_1' + R_2'}$$

kus R_1' ja R_2' - takistusmagasinide väärtused teisel mõotmisel.

Oige mõotmise puhul on täidetud tingimus:

$$L_x + L_y = 2L.$$

Kasutatakse tavaliselt silda YMB või KM.

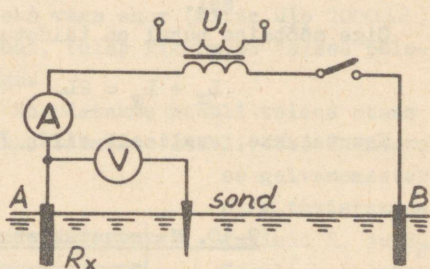
7-10. Maandustakistuse mõotmine

Üldist. Elektrotehnilistes seadmetes kasutatakse maandusi teenindava personali kõrgepinge alla sattumise vältimiseks ja samuti ka töömaandusi, mis on vajalikud võõraste mõjude kõrvaldamiseks. Lubatud maandustakistuse suurused on toodud "Elektriseadmete ehituse eeskirjade" I osas.

Maanduseks nimetatakse mingi elektriseadme elektrilist ühendust maaga. Maandiks nimetatakse ühte või mitut metalljuhti (toru, plaat, nurkraud jne.), mis on vahetult ühenduses pinnasega. Maandusjuhtmeteks on maandi ja elektriseadmete vahelised ühendusjuhtmed. Maandusseadmeks nimetatakse maandi ja maandusjuhtmete kompleksi. Maandusseadme maandustakistus koosneb maandi ja maa vahelisest üleminekutakistusest, maandusjuhtmete takistusest ja maandi enda takistusest. Maandusjuhtmete ja maandi takistused on harilikult väga väikesed ning neid võime jätta arvestamata. Seega oleneb maandusseadme takistus peamiselt maandi ja pinnase vahelisest üleminekutakistusest. Viimane omakorda sõltub peamiselt pinnasest, s.t. kas see on kuiv või märg, liivane või kivine jne., ning samuti aastaajast.

Kuna ekspluatatsioonis võib maandustakistus märgatavalt muutuda (näit. vihma või põua tagajärjel), siis on vaja maandustakistust perioodiliselt kontrollida. Mõõta tuleb vahelduvvooluga, sest alalisvoolu puhul tekib maanduselektroodide juures niiskes pinnases polarisatsiooninähtus, mis mõjutab oluliselt mõõtmistulemusi.

Maandustakistuse mõõtmine voltmeetri-ampermeetri meetodil. Mõõtmise skeem on kujutatud joonisel 7-17. Mõõdetav maandi A ja abimaandi B ühendatakse jõutrafo sekundaarmähisega. Voltmeeter ühendatakse sondiga. Viimaseks on pinnasesse löödud kergesti ümberpaigutatav metallvarras. Sondi kaugus maanditest peab olema ca 20 m, et ta asuks nullpotentsiaaliga pinnases. Mõõdame pin-ge U ja voolu I ning arvutame maandustakis-tuse:



Joon. 7-17.

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

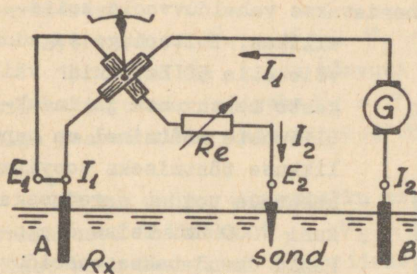
Mõõtmisel on vaja kasutada voltmeetrit, mille takistus on palju suurem sondi takistusest. Vastasel juhul tekib mõõtmisel suur viga. Voltmeetri takistus R_v jääb järjestikku son-di takistusega R_s ja need omakorda on paralleelsed mõõdetava takistusega R_x . Sondi takistusest tingitud mõõteviga

$$R = \frac{R_{\text{sond}}}{R_v + R_{\text{sond}}} \cdot 100\%.$$

Parimaid tulemusi annab elektrostaatiline, elektron- või alaldiga voltmeetri kasutamine. See meetod on kõige enam levinud vastutusrikastel mõõtmistel ja eriti just väikeste maandustakistuste mõõtmisel.

Maandustakistuse mõõtja MC-08. Mõõteriist MC-08 on ette nähtud maandustakistuste ja pinnase eritakistuste mõõtmiseks. Omab kolme mõõtepiirkonda: 10Ω ; 100Ω ja 1000Ω . Saab temaga ka mõõta maandusjuhtmete takistust piirkonnas $0,02 \dots 1000\Omega$. Põhimõtteskeem on joonisel 7-18. Mõõtemehhanismiks on magnetelektriline logomeeter. Logomeetri esimene mähis on ühendatud vooluringi, kus on järjestikku vooluallikas, mõõde-tav maandi (takistusega R_x) ja abimaandi (takistusega R_B).

Vooluringis esineb vool I_1 . Logomeetri teise mähisega on järjestikku eeltakisti R_e ja sond takistusega R_s . Nagu jooniselt nähtub, on teisele vooluharule langev pinge võrdne mõõdetavale maandile langeva pingega.



Joon. 7-18.

Järelikult logomeetri teises mähises

$$I_2 = \frac{I_1 R_x}{R_2 + R_e + R_s},$$

kus R_2 - logomeetri teise mähise takistus.

Logomeetri liikuva osa pöördenurk

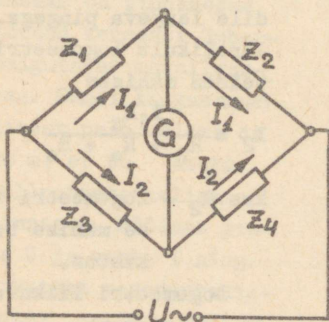
$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{I_1}{\frac{I_1 R_x}{R_2 + R_e + R_s}}\right) = f\left(\frac{R_2 + R_e + R_s}{R_x}\right) = F\left(\frac{k}{R_x}\right),$$

kus $k = R_2 + R_e + R_s$ takistus, mille juures teostatakse mõõteriista skaala gradueerimist.

Kui k on konstantne, siis sõltub logomeetri liikuva osa pöördenurk ainult maandustakistuse R_x suuruselt. Kuna sondi takistus on erinevatel mõõtmistel erisugune, on eeltakisti R_e reguleeritav. Eeltakistit reguleeritakse iga kord enne mõtmist. Asetanud ümberlülitit asendisse "reguleerimine" (seejuures omavahel ühendatud E_1 , I_1 , E_2 ja I_2), muudame eeltakisti nii, et osuti oleks kontrolljoonel. Magnetelektriline logomeeter töötab alalisvoolul. Kuna aga mõõtmiseks on vaja vahelduvvoolu, on mõõteriist varustatud mehaaniliste muunditega.

7-11. Vahelduvvoolusilla tasakaalutingimused

Vahelduvvoolusilla põhimõtteskeem on toodud joonisel 7-19. Silla diagonaali AB ühendatakse vahelduvvoolu-toite-



Joon. 7-19.

Elektrotehnikast on teada, et:

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad Z_3 = z_3 e^{j\varphi_3};$$

$$Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \quad Z_4 = z_4 e^{j\varphi_4}.$$

Asetades need näivtakistuste avaldised eelmisse seosesse, saame üldise tasakaaluvõrrandi:

$$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}.$$

Selle ühe tasakaaluvõrrandi võime asendada kahe võrrandiga:

$$z_1 z_4 = z_2 z_3;$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3.$$

Seega tasakaalu korral peab olema täidetud kaks tingimust;

1) silla vastastikku asuvate õlgade näivtakistuste korrutised peavad olema võrdsed;

allikas. Toitepinge sagedus võib olla 50 Hz, kuid väikeste mahtuvuste ja induktiivsuste mõtmisel on tundlikkuse tõstmiseks soovitatav kasutada toidet sagedusega kuni 1000 Hz. Teise diagonaali ühendatakse vahelduvvoolugalvanomeeter või peatelefon. Tasakaalu korral: $\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_2 Z_3$ ja $\dot{I}_1 Z_2 = \dot{I}_2 Z_4$.

Jagades esimese võrrandi teisega, saame:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad \text{ehk} \quad Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3.$$

2) silla vastastikku asuvate õlgade nihkenurkade summad peavad olema võrdsed.

Tasakaalu reguleerimisel tuleb muuta vähemalt kahte parameetrit.

Võrrandist $\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3$ järeldub, et

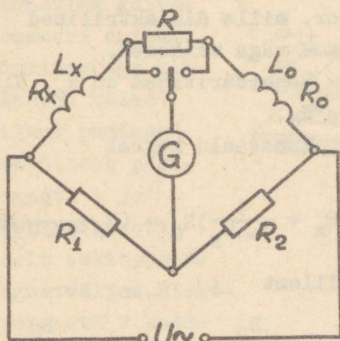
1) kui silla kahes kõrvuti asuvas õlas on ainult aktiivtakistused, (näiteks $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$), siis ülejäänud kaks õlga peavad olema induktiivsed või mahtuvuslikud, s.o. $\varphi_3 = \varphi_4$;

2) kui kahes vastastikku asuvas õlas on ainult aktiivtakistused (näiteks $\varphi_1 = \varphi_4 = 0$), siis kahest ülejäänud õlast peab üks olema induktiivne ja teine mahtuvuslik $\varphi_2 + \varphi_3 = 0$, s.o. $\varphi_2 = -\varphi_3$ ehk $\varphi_3 = -\varphi_2$.

Seega võimaldab vahelduvvoolusild võrrelda induktiivsusi või mahtuvusi omavahel või võrrelda induktiivsust mahtuvusega.

7-12. Induktiivsuse mõõtmine sillaga

Joonisel 7-20 on toodud induktiivsuse L_x mõõtmise sildskeem, mis põhineb tundmatu induktiivsuse L_x võrdlemisel läheteinduktiivsusega L_0 .



Joon. 7-20.

Kuna poolid võivad olla väga erineva aktiivtakistusega, siis on skeemi ühendatud takisti R , mis tuleb ümberlülititi abil ühendada järjestikku kas R_x -ga või R_0 -ga olenevalt suhete R_x/L_x ja R_0/L_0 vahekorrast. Takisti R vale lülituse korral ei saa silda tasakaalustada.

Oletame, et tasakaal saavutati siis, kui R oli järjestikku R_x -ga, siis

$$\begin{aligned} (R + R_x + j\omega L_x)R_2 &= \\ &= (R_0 + j\omega L_0)R_1. \end{aligned}$$

Avaldame mõõdetavad suurused:

$$R_x = R_0 \frac{R_1}{R_2} - R; \quad L_x = L_0 \frac{R_1}{R_2}.$$

Kui aga tasakaalu saavutamiseks oli vaja R ühendada järjestikku R_0 -ga, siis

$$R_x = R_0 + R \frac{R_1}{R_2}; \quad L_x = L_0 \frac{R_1}{R_2}.$$

Tasakaalustamine toimub R_1 , R_2 ja R muutmisega. Reguleerimise kord on järgmine. Takistuste R_1 ja R_2 muutmisega reguleeritakse vool galvanomeetris minimaalseks. Seejärel muudame takistust R , kuni vool galvanomeetris on minimaalne. Seejärel reguleerime uuesti R_1 ja R_2 jne.

Kui takisti R valitud õlas ei võimalda silda tasakaalustada, siis tuleb ta ümber lülitada teise õlga ja tasakaalustamist alustada uuesti.

7-13. Mahtuvuse mõõtmine sillaga

Joonisel 7-21 on toodud üks paljudest võimalikest mahtuvuse mõõtmise sildskeemidest. Skeemis on C_x mõõdetav mahtuvus ja C_0 - lähtekondensaat

tor, mille dielektrilised kaod väga väikesed.

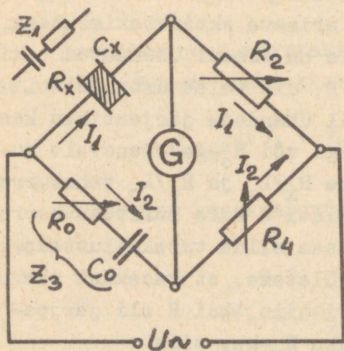
Reguleeritavad on R_0 , R_2 ja R_4 .

Tasakaalu korral

$$(R_x + \frac{1}{j\omega C_x})R_4 = (R_0 + \frac{1}{j\omega C_0})R_2,$$

millest

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_4}; \quad C_x = C_0 \frac{R_4}{R_2}.$$



Joon. 7-21.

Saab mõõta ka kondensaatori kaonurga tangensit:

$$\operatorname{tg} \delta_x = R_0 \omega C_0,$$

kus $\omega = 2\pi f$ - elektriline nurksagedus.

Silla tasakaalustamine toimub järgmiselt. Seame reostadi $R_0 = 0$ ning siis muudame takistusi R_2 ja R_4 , kuni vool galvanomeetris on minimaalne. Pärast seda, mitte muutes takistusi R_2 ja R_4 , reguleerime takistuse R_0 muutmisega voolu galvanomeetris minimaalseks. Edasi muudame uuesti R_2 ja R_4 jne. Selliselt tuleb toimida 5-6 korda. Kui mõõdetava kondensaatori dielektrilisi kadusid ei ole vaja arvestada, võib takistusmagasini R_0 ära jätta.

7-14. Vibratsioongalvanomeeter

Vahelduvvoolu sildskeemides kasutatakse nulliindikaatorina vibratsioon-(resonants-) galvanomeetreid, mida ehitatakse kas liikuva

pooliga või liikuva magnetiga.

Joonisel 7-22 on näidatud liikuva magnetiga galvanomeetri ehitus.

Tõmmitsatega kinnitatud väike

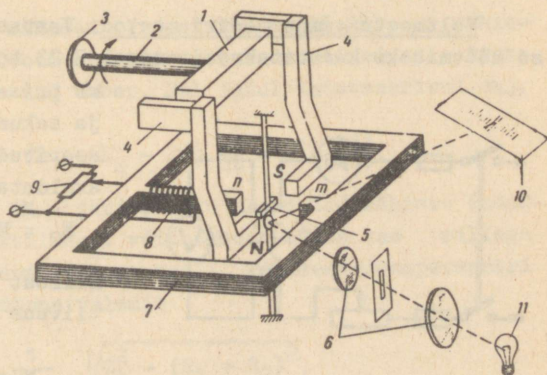
liikuv püsimgagnet 5 asub püsimgneti 1 ja

elektromagneti poolt tekitatavas

magnetväljas. Elektromagneti 7 kesk-

misel osal asub mähis 8. Poolusekingade 4 vahel asuva püsimgneti 1 poolt tekitatav magnetväli on paralleelne liikuva

magnetiga 5 telgjoonega. Voolu esinemisel mähises 8 on elektro-



Joon. 7-22.

magneti poolt tekitatav magnetväli risti püsिमagneti 5 telgjoonega ($n - m$ -suunaline). Kui mähis 8 on tooteta, siis elektromagneti magnetväli võrdub nulliga ning liikuv magnet koos peegliaga asub nullasendis. Valgusallikast 10 läbi optilise süsteemi 6 suunatud valguskiir peegeldub peeglit skaalale 10, kus on nähtav kitsas valguskiir.

Kui mähis 8 ühendada pingejagaja 9 kaudu vahelduvvooluahelasse, tekib pooluste $n - m$ vahel magnetväli, mille suund muutub vastavalt vahelduvvoolu sagedusele. Liikuv magnet hakkab sama sagedusega võnkuma ning skaalal on näha lai valgustatud riba. Liikuva magneti omavõnkesagedus sõltub suurel määral püsिमagneti 1 poolt tekitatud magnetväljast. Nupu 3 pööramisel pöörduv koos teljega 2 ka püsिमagnet 1 ning magnetiline induksioon õhupilus väheneb, mistõttu muutub resonantsisagedus. Vibratsioonalvanomeetrid on kasutatavad sagedusvahemikus 30 ... 100 Hz.

7-15. Vastastikuse induktiivsuse mõõtmine

Voltmeetri-ampermeetri meetod. Vastastikuse induktiivsuse mõõtmiseks kasutatakse joonisel 7-23 toodud skeemi. Mõõdame

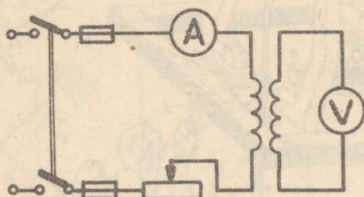
primaarmähises voolu I_1 ja sekundaarmähises indutseeritud emf. Viimane on avaldatav järgmiselt:

$$E_2 = MI_1\omega,$$

millest vastastikuse induktiivsus

$$M = \frac{E_2}{I_1\omega},$$

kus $\omega = 2\pi f$ - elektriline nurksagedus.



Joon. 7-23.

Antud meetodi puhul paremate tulemuste saamiseks on vaja kasutada elektrostaatilist voltmeetrit. Mingi teise voltmeetri kasutamisel on viga seda väiksem, mida suurem on voltmeetri sisetakistus.

Mähiste järjestikku ühendamise meetod. Mõõtmise skeem
 on näidatud joonisel 7-24. Kui ühendada kaks mähist järjes-
 tikku selliselt, et mähistes tekkivad magnetvood oleksid ühe-
 suunalised, siis indutseeritud emj.

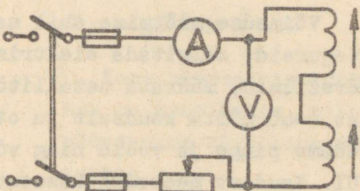
$$e = -(L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt} = -L_a \frac{di}{dt},$$

Kus $L_a = L_1 + L_2 + 2M$ - järjestikku ühendatud mähiste induktiivsus. Seda induktiivsust võib määrata ükskõik millisel meetodil. Näiteks voltmeetri-ampermeetri meetodi korral kasutame valemit

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_a^2 - (R_1 + R_2)^2},$$

kus Z_a - kahe mähise näivtakistus, kui mähiste magnetvood on sama-
 suunalised;

R_1 ja R_2 - mähiste aktiivtakistused.



Joon. 7-24.

Nüüd ühendame mähised järjestikku selliselt, et mähistes tekkivad magnetvood oleksid vastassuunalised, s.o. vahetame ühe mähise klemmid ümber. Sel juhul indutseeritud emj.

$$e = -(L_1 + L_2 - 2M) \frac{di}{dt} = -L_b \frac{di}{dt},$$

kus $L_b = L_1 + L_2 - 2M$ - järjestikku ühendatud mähiste induktiivsus. Seda induktiivsust võib samuti mõõta kas sillaga või voltmeetri-ampermeetri meetodil. Voltmeetri-ampermeetri meetodi korral kasutame valemit

$$L_b = \frac{1}{\omega} \sqrt{Z_b^2 - (R_1 + R_2)^2},$$

kus Z_b - kahe mähise näivtakistus, kui mähiste magnetvood on vastassuunalised.

Vastastikune induktiivsus avaldub järgmiselt:

$$L_a - L_b = 4M,$$

millest

$$M = \frac{L_a - L_b}{4} .$$

VIII. VÕIMSUSE MÕOTMINE

8-1. Võimsuse mõõtmise meetodid

Võimsuse mõõtmise abil saame määrata elektriseadmete kasutegureid, selgitada elektriseadmetele kõige ökonoomsemad töörežiimid, määrata metallitöötlemisel löikejõudu jne. Võimsust saab mõõta kaudselt ja otseselt. Kaudse meetodi puhul mõõdame pinget ja voolu ning võimsuse arvutame valemiga $P = UI$. Kaudset meetodit kasutatakse alalisvoolu puhul. Vahelduvvoolu puhul ei ole see meetod isegi aktiivkoormusel rakendatav kuigi suure täpsusega. Ka alalisvoolu puhul omab kaudne meetod puudusi:

- 1) võimsuse määramine on seotud ajakuluga;
- 2) mõõteviga on suhteliselt suur

$$\gamma_P = \gamma_U + \gamma_I .$$

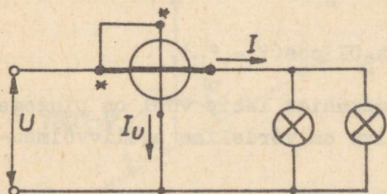
- 3) muutuva võimsuse mõõtmine on tülikas.

Otsese mõõtmismeetodi puhul kasutatakse vattmeetreid - nende skaalalt on mõõdetav võimsus otseselt loetav. Vattmeetrid on kasutatavad nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul. Vahelduvvoolu korral mõõdavad nad aktiivvõimsust. On olemas ka reaktiivvõimsuse mõõtjaid. Näivvõimsus määratakse vattmeetri-amperemeetri meetodil.

8-2. Võimsuse mõõtmine vattmeetriga

Vattmeeter on elektrodünaamiline mõõteriist. Selle liikumatut pooli, mis ühendatakse koormusega järjestikku, nime-

tatakse vattmeetri järjestik- ehk voolumähiseks. Liikuv pool ühendatakse koormusega paralleelselt ja seda nimetatakse vattmeetri paralleel- ehk pingemähiseks. Vattmeetri ühendamise



Joon. 8-1.

skeem on joonisel 8-1. Voolumähist läbib tarbija koormusvool I . Pingemähist läbib vool I_U on võrdeline pingega. Vattmeetri liikuva osa pöördenurk alalisvoolu korral

$$\alpha = k I_U I = k \frac{U}{R_U} I.$$

Kuna pingemähise takistus on konstantne, siis on pöördenurk võrdeline võimsusega

$$\alpha = \frac{k}{R_U} \cdot UI = k_1 UI = k_1 P.$$

Nagu sellest võrrandist nähtub, on vattmeetri skaala ühtlaste jaotustega.

Mõõtmisel vattmeetriga on vaja teada, et kui muudame voolu suunda ühes mähises, siis pöördemomendi suund muutub ning skaalalt ei ole võimalik näitu lugeda (erand kahepoolse skaala puhul - nulliga keskel). Seepärast on mähiste algused tähistatud tärniga * ; neid nimetatakse ka "generaatorkelemmideks". Voolumähise tärniga klemm tuleb ühendada vooluallika poolse juhtmega ja pingemähise tärniga klemm selle juhtmega, kuhu on ühendatud voolumähis (vt. joon. 8-1).

Eeldame, et vahelduvvooluahelas pinge $u = U_m \sin \omega t$ ja vool $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$. Vattmeetri voolumähist läbib tarbija vool $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$, pingemähist aga vool

$$i_U = \frac{U_m}{Z_U} \sin(\omega t - \varphi_U) = I_{Um} \sin(\omega t - \varphi_U),$$

kus Z_U - pingemähise näivtakistus,

φ_U - nihkenurk I_U ja U vahel, mis on tingitud pingemähise induktiivsusest.

Vektordiagramm on toodud joonisel 8-2. Liikuva osa pöördenurk vahelduvvoolu korral

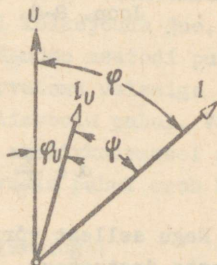
$$\begin{aligned}\alpha &= k_2 I_U I \cos(\varphi - \varphi_U) = k_2 \frac{U}{Z_U} I \cos(\varphi - \varphi_U) = \\ &= k_3 UI \cos(\varphi - \varphi_U).\end{aligned}$$

Kui nurk $\varphi_U = 0$, s.o. pingemähist läbiv vool on pingega faasis, siis pöördenurk ehk hälve on võrdeline aktiivvõimsusega

$$\alpha = k_3 UI \cos \varphi = k_3 P.$$

Kui pingemähise näivtakistus on võrdne aktiivtakistusega ($Z_U = R_U$), siis on vattmeetri näit võrdse võimsuse puhul ühesugune nii alalis- kui ka vahelduvvoolu korral.

Voolumähiste nimivool on tavaliselt 5 A. Ehitatakse ka vattmeetreid, mille voolumähisel on kaks nimivoolu, näiteks 5 ja 10 A. Sel juhtumil koosneb voolumähis kahest sektsioonist. Sektsioonide järjestikühenduse korral saame väiksema ja paralleelühenduse korral suurema nimivoolu. Pingemähise nimivool on normaalselt 3 mA (vanadel tüüpidel 30 mA). Pingemähis koos sissemonteeritud eeltakistitega ehitatakse pingetele 75 kuni 600 V. Pingepiirkonna muutmine toimub ümberlülitite abil. Eeltakistitena kasutatakse induktiivsus, vabu, bifilaarselt keritud takistuspoole. Nurk φ_U on neil minimaalne. Täpsemates vattmeetrites ühendatakse nurgavea φ_U kompenseerimiseks ühele osale eeltakistist paralleelselt kondensaator.

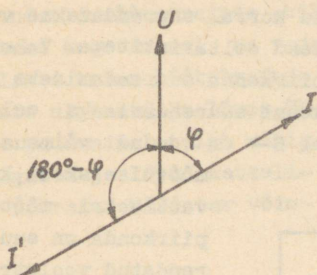


Joon. 8-2.

Väliste magnetväljade mõju eest kaitsmiseks kasutatakse varjestamist (ekraneerimist) või astaatilist mõõtemehhanismi.

Võimsuse mõõtmisel vahelduvvooluvõrgus tuleb tähele panna, et generaatorklemmid oleksid õieti ühendatud. Kui ühen-

dame voolumähise vastupidi, nagu näidatud joonisel 8-3, siis vattmeetri hälve $\alpha = k_3 UI \cos(180^\circ - \varphi) = k_3 UI \cos \varphi$. Vattmeetri liikuv osa püüab pöörduda vastassuunas, mistõttu hälvet on võimatu määrata. Sama olukord tekib pingemähise klemmide ümbervahetamisel.



Joon. 8-3.

Vattmeetritel täpsusklassiga 0,2 ja 0,5 on skaalal arvudega tähistatud jaotuste arv. Võimsuse määramiseks tuleb leida vattmeetri konstant C_w , s.o. ühele jaotusele vastav võimsus. Need vattmeetrid gradueeritakse nii, et nimivoolul I_n , nimipingel U_n ja $\cos \varphi = 1,0$ puhul saame

nimihälbe α_n . Vattmeetri konstandi leiame järgmiselt:

$$C_w = \frac{U_n I_n}{\alpha_n} \text{ W/jaot.}$$

Kui vattmeetril on mitu mõõtepiirkonda, tuleb leida igale piirkonnale vastav konstant.

Näide 15. Vattmeetril on järgmised mõõtepiirkonnad: voolu järgi 2,5 A ja 5 A; pinge järgi 30, 150 ja 300 V. Skaalal on 150 jaotust.

Igale piirkonnale vastav konstant on toodud tabelis 9.

Tabel 9

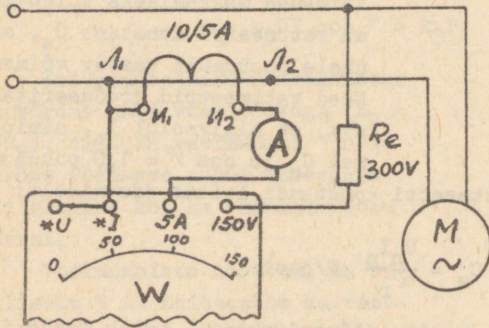
Pingeapiirkond V	Vattmeetri konstant W/jaot.	
	Voolupiirkond 2,5 A	Voolupiirkond 5 A
30	0,5	1
150	2,5	5
300	5	10

Mõõdetava võimsuse saamiseks tuleb vattmeetri hälve korrutada konstandiga:

$$P = \alpha C_W.$$

Suurte võimsuste mõõtmisel tuleb nii voolu- kui ka pingepiirkonda suurendada. Alalisvoolu korral suurendatakse voolupiirkond süntidega ja pingepiirkond eeltakistitega. Vahelduvvoolu korral kasutatakse voolupiirkonna suurendamiseks ainult voolutrafosid ja pingepiirkonna suurendamiseks eeltakisteid või pingetrafosid. Joonisel 8-4 on toodud võimsuse

mõõtmise skeem, kus vattmeetri mõõtepiirkonda on suurendatud voolutrafo ja eeltakisti abil. Ampermeeter on ette nähtud vattmeetri voolumähist läbiva voolu tugevuse kontrollimiseks. Eeltakisti suurendab pingepiirkonda antud juhul 300 voldini. Pingepiirkonnas konstant $k_U = 300/150$. Mõõdetav



Joon. 8-4.

võimsus on arvutatav järgmiselt:

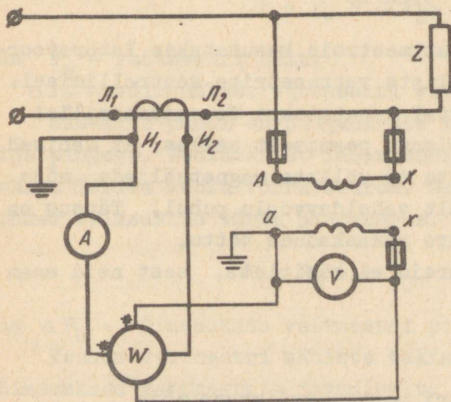
$$P = \alpha C_W k_U k_I = \alpha \frac{5 \cdot 150}{150} \cdot \frac{300}{150} \cdot \frac{10}{5}.$$

Joonisel 8-5 on toodud eeltakisti vale lülitus. Vattmeetri voolu- ja pingemähise vaheline potentsiaalide vahe on normaalselt väike. Kui eeltakisti R_e ühendada pingemähise algusesse, nagu näidatud joonisel 8-5, võib mähistevaheline potentsiaalide vahe tunduvalt suureneeda (kuni 600 V-ni). Selle tagajärjel võib kergesti tekkida mähiste vahel isolatsiooniläbilöök. Teiseks suurenevad sel juhul mähistevahelised elektrostaatilised mõjud ning sellest tingituna tekib lisaviga.

Joonisel 8-6 on toodud võimsuse mõõtmise skeem, kus vattmeetri mõõtepiirkonda on suurendatud mõõtetetrafoode abil. Lülituse koostamisel on vaja kindlasti teada mõõtetetrafoode mähiste alguseid ja lõppe. Tähiste puudumisel tuleb mähiste algused ja lõpud katseliselt määrata. Mõõdetav võimsus

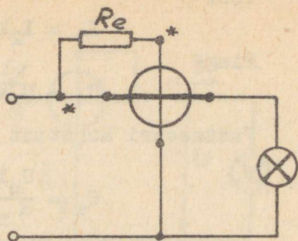
$$P = \alpha C_W k_U k_I = \alpha \frac{U_n I_n}{n} \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{I_1}{I_2},$$

kus U_1 ja I_1 - mõõtetetrafoode primaarpoole nimisuurused,
 U_2 ja I_2 - mõõtetetrafoode sekundaarpoole nimisuurused.



Joon. 8-6.

$$k_U = \frac{6000}{100} = 60.$$



Joon. 8-5.

Näide 16. Amper-

meeter $I_n = 5$ A, voltmeeter $U_n = 110$ V ja vattmeeter 5 A, 120 V, 150 jaotust skaalal, ühendati voolutrafoga 100/5 A ja pingetrafoga 6000/100 V (skeem joonisel 8-6). Ampermeeter näitas 4 A, voltmeeter 95 V ja vattmeetri hälve oli 55 jaotust. Leida vool, pinge, võimsus ja võimsustegur.

Mõõtetetrafoode ülekandetegurid:

$$k_I = \frac{100}{5} = 20;$$

Vool

$$I_1 = I_2 k_I = 4 \cdot 20 = 80 \text{ A.}$$

Pinge

$$U_1 = U_2 k_U = 95 \cdot 60 = 5700 \text{ V}$$

Vattmeetri konstant

$$C_w = \frac{U_n I_n}{\alpha n} = \frac{120 \cdot 5}{150} = 4 \frac{\text{W}}{\text{jaot.}}$$

Vattmeetri poolt mõõdetav võimsus

$$P_2 = \alpha C_w = 4 \cdot 55 = 220 \text{ W.}$$

Primaarvõimsus

$$P_1 = P_2 k_U k_I = 220 \cdot 20 \cdot 60 = 264000 \text{ W} = 264 \text{ kW.}$$

Võimsustegur

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{U I} = \frac{264000}{5700 \cdot 80} = 0,582.$$

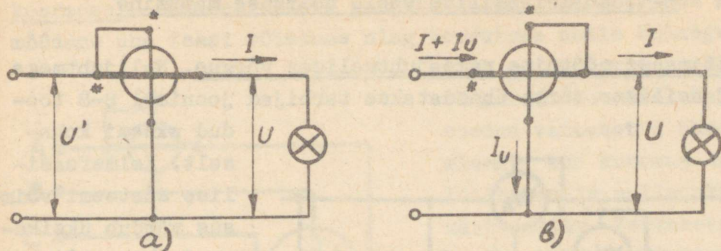
Elektrodünaamilisi vattmeetreid kasutatakse laboratoorsetel mõõtmistel ja tehniliste vattmeetrите kontrollimisel.

Tööstuslikel mõõtmistel kasutatakse ferrodünaamilisi vattmeetreid. Erinevus seisneb peamiselt selles, et mähised on terassüdamikel. Seetõttu on väliste magnetväljade mõju väiksem. Kasutatakse ainult vahelduvvoolu puhul. Täpsus on väiksem südamikes tekkivate rauaskadude tõttu.

Induksioon-vattmeetreid ei käsitleta, sest neid enam ei toodeta.

8-3. Vattmeetri omatarbevõimsuse mõju

Vattmeetri pingeharu võime ühendada kas voolumähise alguse või lõpuga, nagu näidatud joonisel 8-7. Omatarbe tõttu vattmeeter ei mõõda õieti, vaid tekivad vead. Eriti suurt mõju avaldab see väikeste võimsuste mõõtmisel, mil tuleb omatarbevõimsusega arvestada.



Joon. 8-7.

Skeemi a puhul on vattmeetri pingeharule langev pinge U' tarbija pingest U suurem voolumähises tekkiva pingelangu võrra. Voolumähist läbiv vool I on võrdne tarbija vooluga. Seega näitab vattmeeter rohkem võimsuskao võrra voolumähises. Tarbija võimsus

$$P = P_w - \Delta P_I,$$

kus P_w - vattmeetri näit;

ΔP_I - võimsuskadu vattmeetri voolumähises.

Skeemi b puhul on pingeharule langev pinge võrdne tarbija pingega. Voolumähist läbiv vool on tarbija voolust pingeharu läbiva voolu võrra suurem. Seega näitab vattmeeter rohkem võimsuskao võrra pingeharus. Tarbija võimsus

$$P = P_w - \Delta P_U,$$

kus ΔP_U - võimsuskadu vattmeetri pingeharus.

Teades vattmeetri mähiste takistusi, saame arvutada võimsuskadod vattmeetris järgmiselt:

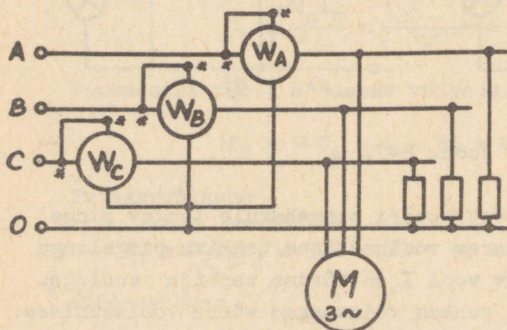
$$\Delta P_I = I^2 R_{wI}; \quad \Delta P_U = \frac{U^2}{R_{wU}},$$

kus R_{wI} ; R_{wU} - vattmeetri voolumähise ja pingeharu takistused.

Tarbija võimsuse mõõtmisel on otstarbekam kasutada skeemi a, vooluallika võimsuse mõõtmisel aga skeemi b, sest $\Delta P_U > \Delta P_I$.

8-4. Kolmefaasilise voolu võimsuse mõõtmine

Võimsuse mõõtmine neljajuhtmelistes võrgus. Nulljuhtmega kolmefaasilisse võrku ühendatakse tarbijad joonisel 8-8 toodud skeemi kohaselt.



Kolmefaasilise süsteemi võimsus võrdub üksikute faaside võimsuste summaga, s.o.

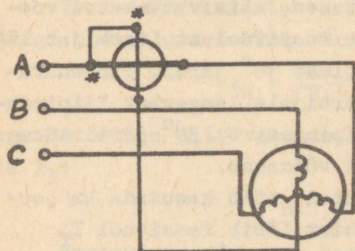
$$\begin{aligned}
 P &= P_A + P_B + P_C = \\
 &= I_A U_A \cos \varphi_A + \\
 &+ I_B U_B \cos \varphi_B + \\
 &+ I_C U_C \cos \varphi_C.
 \end{aligned}$$

Joon. 8-8.

Aktiivvõimsuse mõõtmiseks tuleb neljajuhtmelistesse võrku ühendada kolm vattmeedit, nagu näidatud joonisel 8-8. Iga vattmeeter mõõdab ühe faasi võimsust. Kolmefaasilise voolu võimsuse saamiseks vattmeeditre näidud liidetakse. Kolme vattmeetri asemel kasutatakse tavaliselt üht kolmeelemendilist vattmeedit. Viimane koosneb kolmest paigalseisvast poolist (voolumähised) ja kolmest liikuvast poolist (pingemähised) ühisel teljel, mille külge on kinnitatud osuti. Resulteeriv pöördemoment on võrdne üksikute elementide poolt tekitatud pöördemomentide summaga. Skaala on gradueeritud vastavalt kolmefaasilise süsteemi võimsusele. Selle vattmeetri lülitusskeem on samasugune nagu joonisel 8-8.

Ühtlasel koormusel on võimalik võimsust mõõta ühe vattmeetriga. Kuna kõik kolm faasi on ühesuguselt koormatud, siis mõõdame ühe faasi võimsuse ja korrutame selle kolmega. Neljajuhtmelistes süsteemis esineb ühtlast koormust harva.

Võimsuse mõõtmine kolmejuhtmelistes võrgus sümmeetrilisel koormusel. Sümmeetriliste pingete ja ühtlase koormuse korral mõõdame ühe faasi võimsuse ning korrutame selle kolmega. Siin



Joon. 8-9.

võib esineda mitu erinevat olukorda. Joonisel 8-9 on toodud vattmeetri ühendusskeem, kus koormus on tähtlülituses ja nullpunkt on kättesaadav. Vattmeetri voolumähist läbib faasivool I_f ning pingeharule antakse faasipinge U_f . Järelikult mõõdab vattmeeter ühe faasi võimsust

$$P_w = P_f = U_f I_f \cos \varphi,$$

kus φ - U_f ja I_f vaheline nihkenurk.

Kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsus

$$P = 3P_w = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi.$$

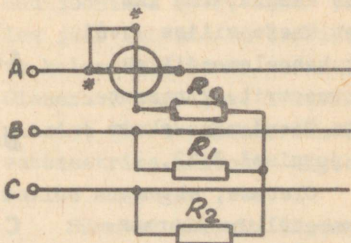
Kui ühtlasel koormusel ei ole nullpunkt kättesaadav või kui tarbijad on ühendatud kolmnurka, tuleb takistite abil moodustada kunstlik nullpunkt, nagu näidatud joonisel 8-10.

Nullpunkt moodustatakse kahe takisti R_1 ja R_2 abil, kusjuures kummagi takistuse suurus peab olema võrdne vattmeetri pingeharu takistusega (koos eeltakistiga).

$$R_U + R_e = R_1 = R_2,$$

kus R_U - vattmeetri pingemähise takistus;

R_e - eeltakisti takistus.

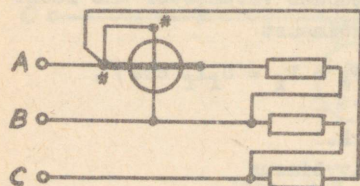


Joon. 8-10.

Seega tarbijate tähtlülituse korral läbib voolumähist faasivool I_f , pingeharule antakse faasipinge U_f ning vattmeetri näit on võrdne ühe faasi võimsusega.

Kui tarbijad on kolmnurklülituses, siis vattmeetri voolumähist läbib liinivool I , mis on faasivoolust (tarbijat läbib) $I_f\sqrt{3}$ korda suurem ja faasivoolust 30° järel. Pingeharule langeb faasipinge U_f , mis on tarbijale langevast liinipingest $U\sqrt{3}$ korda väiksem ja on liinipingest U 30° järel. Seega vattmeeter mõõdab ikkagi ühe faasi võimsust.

Tarbijate kolmnurklülituse puhul võib kasutada ka joonisel 8-11 toodud skeemi. Voolumähist läbib faasivool I_f



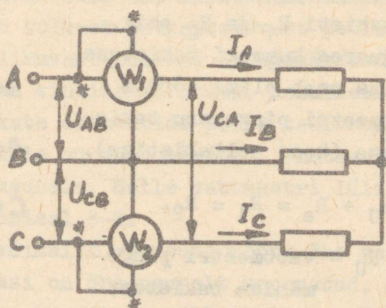
Joon. 8-11.

(võrdne tarbija vooluga) ja pingeharule antakse liinipinge U (võrdne tarbija pingega). Kolme-faasilise voolu võimsuse saamiseks korrutame vattmeetri näitu kolmega.

Võimsuse mõõtmine kolmejuhtmelises võrgus kahe vattmeetri meetodil. Kolmejuhtmelises võrgus saab kahe vattmeetri meetodil

mõõta aktiivvõimsust nii sümmeetrilisel kui ka ebasümmeetrilisel koormusel. Tarbijad võivad olla kas täht- või kolmnurklülituses. Mõõtmiseks kasutatakse kas kaht ühefaasilist või üht kaheelemendilist vattmetrit. Vattmeetrите ühendamise skeem on joonisel 8-12.

Oletame, et on sümmeetriline koormus tähtlülituses. Kolme-faasilise voolu võimsuse hetkväärtus



Joon. 8-12.

$$P = P_A + P_B + P_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C,$$

kus P_A , P_B ja P_C - faasivõimsuste hetkväärtused.

Voolude hetkväärtuste summa peab Kirchhoffi I seaduse järgi olema igal hetkel võrdne nulliga:

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Avaldame siit vattmeetrite voolumähist mitteläbiva voolu i_B :

$$i_B = -i_A - i_C.$$

Asetame i_B võimsuse hetkväärtuse võrrandisse:

$$\begin{aligned} P &= i_A u_A - i_A u_B - i_C u_B + i_C u_C = i_A(u_A - u_B) + i_C(u_C - u_B) = \\ &= i_A u_{AB} + i_C u_{CB}. \end{aligned}$$

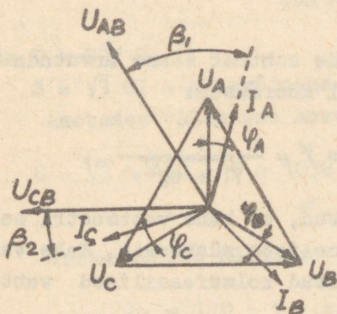
Seega on võimsuse hetkväärtus p väljendatav kahe liikme summana. Minnes üle efektiivväärtustele, võime kirjutada:

$$P = U_{AB} I_A \cos \beta_1 + U_{CB} I_C \cos \beta_2 = P_1 + P_2.$$

Esimene liige kujutab endast vattmeetri W_1 poolt mõõdetud suurust ja teine liige vattmeetri W_2 poolt mõõdetud suu-

rust. Vektordiagramm on toodud joonisel 8-13. Sama valem jääb kehtima ka tarbijate kolmnurklülituse korral. Olenemata tarbijate lülitusviisist võrdub aktiivvõimsus vattmeetrite näitude algebralise summaga.

Sümmeetrilisel (induktiivse iseloomuga) koormusel nihkenurgad $\beta_1 = 30^\circ + \varphi$ ja $\beta_2 = 30^\circ - \varphi$. Seega sümmeetrilisel koormusel vattmeetrite näidud



Joon. 8-13.

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi),$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi).$$

Vattmeetrite näidud on võrdsed ainult sümmeetrilisel oomilisel koormusel ($\varphi = 0$).

$$P_1 = P_2 = UI \cos 30^\circ.$$

Kui nihkenurk $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0,5$), siis üks vattmeetritest näitab nulli,

$$P_1 = UI \cos(30^\circ + \varphi) = UI \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0,$$

järelikult kolmefaasilise voolu võimsus on võrdne teise vattmeetri poolt mõõdetud võimsusega. On kerge näha, et kui nurk $\varphi > 60^\circ$ ($\cos < 0,5$), siis üks vattmeetritest näitab vastasuunas. Sel juhul tuleb muuta voolu suunda kas voolu- või pingemähises ning näit lugeda negatiivseks. Kui nihkenurk $\varphi = 90^\circ$ ($\cos \varphi = 0$), siis vattmeetrite näidud on võrdsed, kuid vastasmärgilised:

$$P_1 = UI \cos(30^\circ + 90^\circ) = UI \cos 120^\circ = -0,5 UI,$$

$$P_2 = UI \cos(30^\circ - 90^\circ) = UI \cos 60^\circ = 0,5 UI,$$

ning vattmeetrite näitude summa võrdub nulliga:

$$P = P_1 + P_2 = 0.$$

Olenevalt vattmeetrite näitude suhtest saame arvutada ka $\cos \varphi$, kuid ainult sümmeetrilisel koormusel:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2}; \quad \cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

Olgu lõpuks veel kord rõhutatud, et kahe vattmeetri meetod on kasutatav ainult kolmejuhtmelises süsteemis. Kahe vattmeetri meetodi põhimõttel on ehitatud kolmefaasilised vattmeetrid ja arvestid.

Näide 17. Võrdsete faasikoormustega tarbija võimsuse mõõtmisel kahe vattmeetri meetodil näitasid vattmeetrid

$P_1 = 2000 \text{ W}$, $P_2 = -500 \text{ W}$. Leida aktiivvõimsus ning faasinihe pinge ja voolu vahel.

Aktiivvõimsus

$$P = P_1 + P_2 = 2000 - 500 = 1500 \text{ W}.$$

Faasinihke leiame järgmiselt:

$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \sqrt{3} \frac{2000 + 500}{2000 - 500} = \sqrt{3} \frac{2500}{1500} = 2,89,$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 2,89^2}} = 0,327,$$

$$\varphi = 70^\circ 55'.$$

Näide 18. Sümmeetrilise koormusega kolmeefaasilises võrgus mõõdeti aktiivvõimsust kahe vattmeetri meetodil. Vattmeetrите näitude summa oli 807 W, liinivoolud 5 A ja liinipinged 120 U.

Leida kummagi vattmeetri näit.

Vattmeetrите näite saab määrata järgmiste valemitega:

$$P_1 = UI \cos(30^\circ + \varphi) \quad \text{ja} \quad P_2 = UI \cos(30^\circ - \varphi).$$

Tundmatu on nurk φ , mille määrame järgmise seose põhjal:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S},$$

$$\text{kus } P = 807 \text{ W},$$

$$S = \sqrt{3} UI - \text{näivvõimsus.}$$

Asetades valemisse arväärtused, saame:

$$S = \sqrt{3} \cdot 120 \cdot 5 = 1038 \text{ VA}; \quad \cos \varphi = \frac{807}{1038} = 0,77;$$

$$\varphi = 39^\circ.$$

Vattmeetrите näidud:

$$P_1 = 120 \cdot 5 \cdot \cos(30^\circ + 39^\circ) = 214,8 \text{ W},$$

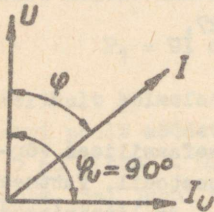
$$P_2 = 120 \cdot 5 \cdot \cos(30^\circ - 39^\circ) = 592,2 \text{ W}.$$

Kontroll:

$$P = P_1 + P_2 = 214,8 + 592,2 = 807 \text{ W.}$$

8-5. Reaktiivvõimsuse mõõtmine

Elektrodünaamilise vattmeetri hälve on võrdeline reaktiivvõimsusega, kui pingemähist läbivat voolu nihutada pingest 90° ($\varphi_U = 90^\circ$), nagu näidatud joonisel 8-14. Sel juhul vattmeetri liikuva osa pöördenurk



Joon. 8-14.

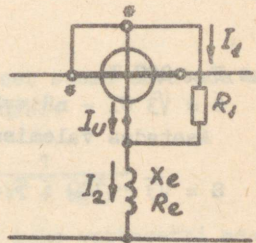
$$\begin{aligned} \alpha &= k_3 UI \cos(90^\circ - \varphi) = \\ &= k_3 UI \sin \varphi = k_3 Q. \end{aligned}$$

Nihkenurk 90° pinge ja pingemähist läbiva voolu vahel tekitatakse kunstliku skeemi abil, nagu näidatud joonisel 8-15. Selleks tuleb pingemähisega paralleelselt lülitada aktiivtakisti R_1 , mille takistus on arvutatav järgmiselt:

$$R_1 = \frac{X_U X_e - R_U R_e}{R_U + R_e},$$

kus X_U ja R_U - pingemähise reaktiiv- ja aktiivtakistus;
 X_e ja R_e - eeltakisti reaktiiv- ja aktiivtakistus.

Kolmefaasilise voolu puhul võib reaktiivvõimsust mõõta kolme ühefaasilise või ühe kolmeelemendilise aktiivvõimsuse vattmeetriga, kusjuures pingemähiseid läbivate voolude nihutamine toimub pingete asendamise meetodil. Kolmefaasilise voolu korral jääb liinipinge U_{BC} faasipingest U_A maha 90° , liinipinge U_{CA} jääb faasipingest U_B maha 90° ja liinipinge U_{AB} jääb faasipingest U_C maha 90° . Ühendades esimese vattmeetri nii, et



Joon. 8-15.

voolumähist läbib vool I_A , ja pingemähise pingele U_{BC} , on vattmeetri näit

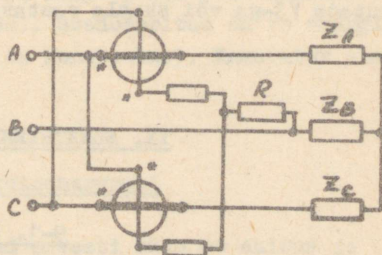
$$I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} I_A U_A \sin \varphi = \sqrt{3} Q_A,$$

s.o. vattmeetri poolt mõõdetav võimsus on $\sqrt{3}$ korda suurem A-faasi reaktiivvõimsusest. Jagades vattmeetri näidu $\sqrt{3}$ -ga

(või gradueerime vattmeetri ümber), saame tema näidu järgi määrata A-faasi reaktiivvõimsuse. Analogiliselt saab teise ja kolmanda vattmeetri näidu järgi määrata B ja C faasi reaktiivvõimsusi. Joonisel 8-16 on toodud vattmeetrите ühendamise skeem reaktiivvõimsuse mõõtmisel. Skeem on ühesugune nii kolmejuhtmelisele kui ka

neljajuhtmelisele süsteemile. Kolmefaasilise voolu reaktiivvõimsuse saame, kui vattmeetrите näitude summa jagame $\sqrt{3}$ -ga.

Ühtlasel koormusel piisab ainult ühest vattmeestrist, mille näitu tuleb korrutada $\sqrt{3}$ -ga (kuna vattmeetri näit $Q_1 = \sqrt{3} Q_F$, siis $Q = \sqrt{3} \cdot \sqrt{3} Q_F = 3Q_F$). Kolmefaasilise reaktiivvõimsuse saame leida ka siis, kui aktiivvõimsust mõõdame kahe vattmeetri meetodil. On teada, et sümmeetrilisel koormusel



Joon. 8-17.

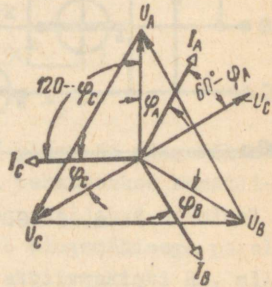
$$\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} = \frac{Q}{P},$$

järelikult

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2).$$

Kolmejuhtmelises võrgus saab reaktiivvõimsust mõõta kahe aktiivvõimsuse vattmeetriga või ühe kaheelemendilise vattmeetriga. Ühendusskeem on toodud joonisel 8-17. Vattmeetrite pingeharude takistused ja takisti R moodustavad sümmeetrilise tähtlülituse. Selle tulemusena langeb vattmeetrite pingemähisetele faasipinge, esimese vattmeetri pingemähisele pinge U_C ja teise omale pinge U_A (joon. 8-18). Vattmeetrite näitude summa

$$\begin{aligned} P_1 + P_2 &= I_A U_C \cos(60^\circ - \varphi) + \\ &+ I_C U_A \cos(120^\circ - \varphi) = \\ &= I_f U_f \left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \right. \\ &+ \left. \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \sqrt{3} I_f U_f \sin \varphi = \sqrt{3} Q_f. \end{aligned}$$



Seega kolmefaasilise voolu reaktiivvõimsuse saamiseks tuleb vattmeetrite näitude summat korrutada $\sqrt{3}$ -ga või skaala vastavalt ümber gradueerida.

Joon. 8-18.

IX. ELEKTRIENERGIA MÕOTMINE

9-1. Üldist

Elektrienergiat on võimalik mõõta kaudselt ja otseselt. Kaudse mõõtmisviisi puhul mõõdame võimsuse vattmeetriga ja aja stopperiga; sel juhul energia $W = Pt$. Võimsuse otseseks mõõtmiseks kasutatakse arvesteid. Arvestid kujutavad endast summeerivaid mõõteriistu, mis on ette nähtud teatud ajavahe- mikul läbiva elektrienergia või vooluhulga mõõtmiseks. Näi-

tavatest mõõteriistadest erinevad arvestid selle poolest, et liikuva osa pöördenurk ei ole piiratud spiraalvedruga. Arvesti liikuva osa ühele pöördele vastab mõõdetava suuruse kindel väärtus. Tarbitud elektrienergia või elektri hulga registreerimiseks on igal arvestil loendusmehhanism (numeraator). Viimane kujutab endast pöörete arvu loendurit ja on ühendatud liikuva osaga hammasrattaülekande kaudu.

Töötamisviisi järgi võib arvesteid liigitada järgmiselt.

1. Induktsioonarvestid. Neis pöörleb alumiiniumketas kulgeva magnetvälja mõjul. Mõõdab vahelduvvooluenergiat.

2. Elektrodünamiilised arvestid. Liikuv pool pöörleb paigalseisva pooli poolt tekitatud magnetväljas. Mõõdab alalisvooluenergiat.

3. Magnetelektrilised arvestid. Liikuv mähis pöörleb püsimagnetite magnetväljas. Mõõdab tegelikult elektri hulga, nimetatakse seetõttu ka ampertunniarvestiks. Loendusmehhanismilt on aga loetav tarbitud energia; seejuures on eeldatud, et pinge on konstantne (võrdne nimipingega). Kasutatav alalisvoolu puhul.

4. Elektrolüütilised arvestid. Tarbitud energia määramisel kasutatakse elektrolüüsinähtust. Koormusvool või osakoormusvoolust läbib elektrolüüti, mille tagajärjel toimub mingi aine eraldumine. Eraldunud aine hulga järgi saab määrata läbinud elektri hulka (ampertunde). Gradueeritud on ta energiaühikutes (eeldusel, et pinge on konstantne). Kasutatav alalisvoolu puhul.

9-2. Induktsioonarvesti

Joonisel 9-1 on kujutatud arvesti tüüp CO ehitus ja ühendamise skeem. Arvesti koosneb teljele kinnitatud alumiiniumkettast K ja kahest elektromagnetist - tarbijaga järjestikku ühendatud voolumagnetist A ja paralleelselt ühendatud pingemagnetist B. Voolumagneti mähist läbib tarbija vool I, tekitades magnetvoo ϕ_1 , mis läbib alumiiniumkettast kahes kohas. Pingemagneti mähist läbiv vool I_u tekitab südamikus mag-

netvoo ϕ_u , mis jaguneb kaheks: töömagnetvooks ϕ_{ut} ja magnetvooks ϕ_{uo} . Töömagnetvoog ϕ_{ut} läbib alumiiniumketast ühes kohas, magnetvoog ϕ_{uo} ketast aga ei läbi. Magnetvood ϕ_i ja ϕ_{ut}

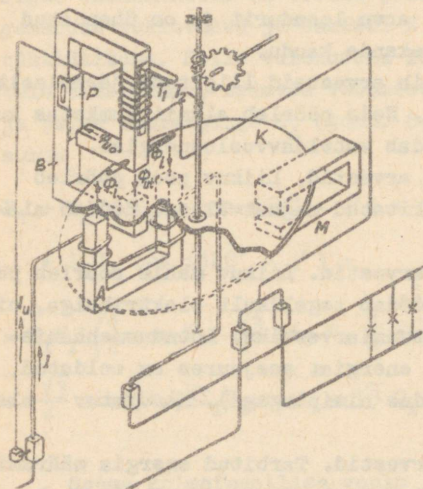
indutseerivad ketast lämbides selles pöörisvoolude. Kettas indutseeritud pöörisvoolude ja magnetvoogude vastastikuse mõju tulemusena kettale mõjub pöördemoment

$$M = k f \phi_{mi} \phi_{mut} \sin \psi,$$

kus f - vahelduvvoolu sagedus;

ϕ_{mi} - voolumagneti poolt tekitatava magnetvoo amplituudväärtus;

ϕ_{mut} - pingemagneti poolt tekitatava töömagnetvoo amplituudväärtus;



Joon. 9-1.

ψ - magnetvoogude vaheline nihkenurk.

Et aktiivenergia arvesti pöördemoment oleks võrdeline tarbija aktiivvõimsusega, s.o. $M = k_1 UI \cos \varphi$, selleks peavad olema täidetud järgmised tingimused:

- 1) voolumagneti poolt tekitatav magnetvoog peab olema võrdeline vooluga;
- 2) pingemagneti poolt tekitatav töömagnetvoog peab olema võrdeline pingega;
- 3) $\sin \psi = \cos \varphi$.

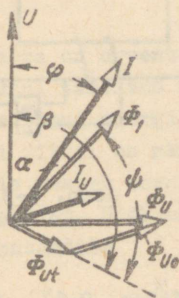
Esimene tingimus on täidetud, kui magnetahelas ei esine küllastust.

Teine tingimus on täidetud, kui sagedus ei muutu, sest

$$\phi_u = \frac{U}{4,44 f W}$$

(konstantse f ja w korral on magnetvoog võrdeline U -ga).

Kolmanda tingimuse täitmiseks on vajalik, et magnetvoogude ϕ_i ja ϕ_{ut} vaheline nihkenurk $\psi = 90^\circ - \varphi$, sest siis $\sin \psi = \sin(90^\circ - \varphi) = \cos \varphi$. Joonisel 9-2 on toodud arvesti vektordiagramm. Vool I jääb faasis pingest nurga φ võrra maha (nurga suurus oleneb tarbija parameetritest).



Joon. 9-2.

Vool I tekitab magnetvoo ϕ_i , mis südamikutes tekkivate rauaskadude tõttu jääb voolust I maha nurga α võrra. Pingemagnetis läbiv vool I_U on nihutatud pingest ligikaudu 90° , sest pingemähise keerdude arv on suur (8000...12000). Südamikutes tekkivate rauaskadude tõttu jäävad magnetvood ϕ_{ut} ja ϕ_{uo} voolust I_U maha erinevate nurkade võrra. Vektordiagrammist näeme, et nurk pinges U ja magnetvoo ϕ_{ut} vahel

$$B = \varphi + \alpha + \psi.$$

Arvestades, et $\psi = 90^\circ - \varphi$, saame:

$$B = \varphi + \alpha + 90^\circ - \varphi = 90^\circ + \alpha.$$

Sellise nurga B saavutamiseks on pingemagnet kujundatud hargneva magnetahelana. Magnetvoog ϕ_{ut} kulgeb läbi ketta ja alumise magnetahela osa kaudu tagasi (vt. joon. 9-1). Teine magnetvoog ϕ_{uo} ei läbi ketast, vaid kulgeb tagasi keskmise südamiku kaudu. Suuremate rauaskadude ja alumiiniumketta mõju tõttu jääb magnetvoog ϕ_{ut} voolust I_U suurema nurga võrra maha kui magnetvoog ϕ_{uo} . Sellisel viisil võime saavutada, et nurk $B \geq 90^\circ + \alpha$.

Nurga B reguleerimiseks on kaks võimalust.

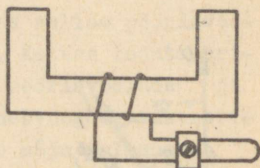
1. Voolumagnetil asub väikese keerdude arvuga mähis, mis on lühistatud reguleeritava traattakistiga (joon. 9-3). Mähises indutseeritud pöörivoolud suurendavad kadusid magnetvoo ϕ_i teekonnal ja järelikult suurendavad nurka α . Nurga α

muutmiseks on vaja muuta lühismähise takistust.

2. Nagu nähtub jooniselt 9-1, asub pingemagneti keskmise südamiku õhupilus vask- või pronksplaat P, mida saab õhupilus nihutada. Plaadis indutseeritud pöörisevoolud suurendavad kaadusid magnetvoo Φ_{uo} teekonnal, seega muutub nurk β .

Kaasaegsetes arvestites kasutatakse rohkem esimest moodust.

Koormuse sisselülitamisel arvesti mõjub kettale pöördemoment



Joon. 9-3.

$$M = k_1 UI \cos \varphi = k_1 P.$$

Ketas hakkab pöörlema ning püsिमagneti M (joon. 9-1) mõjul tekib pidurdusmoment, mis on võrdeline ketta pöörlemiskiirusega:

$$M_p = k_2 n.$$

Muutumata koormuse korral $M = M_p$ ehk

$$k_1 P = k_2 n,$$

millest

$$n = \frac{k_1}{k_2} \cdot P.$$

Seega on ketta pöörlemiskiirus võrdeline tarbija aktiivvõimsusega. Teisiti öeldes, tarbitava võimsuse üle võib otustada arvesti ketta pöörlemiskiiruse järgi.

$$P = \frac{k_2}{k_1} \cdot n = Kn.$$

Kui aja t jooksul tarbitav võimsus on P , siis arvestit läbinud energia

$$W = Pt = Knt = KN,$$

kus $N = nt$ - ketta pöörete arv aja t jooksul.

Seega saame arvesti ketta pöörete arvu järgi määrata arvestit läbinud energiat. Võrdetegur K on igal arvestil konstantne suurus ja teda nimetatakse arvesti tegelikuks konstandiks

$$K = \frac{Pt}{N} = \frac{W}{N} \left[\frac{W_s}{P} ; \frac{kWh}{P} \right]$$

Seega on arvesti tegelik konstant võrdne ketta ühe pöörde jooksul tarbitud energiahulgaga.

Tarbitud energia summeeritakse loendusmehhanismi poolt. Arvesti sildil on märgitud ülekandearv C , s.o. ketta pöörete arv, mis vastab energia ühele ühikule, näiteks $1 \text{ kWh} = 3800$ ketta pööret. Ülekandearvu pöördväärtust nimetatakse arvesti nimikonstandiks

$$K_n = \frac{1}{C} \left[\frac{W_s}{P} ; \frac{kWh}{P} \right] .$$

Nimikonstant on arvuliselt võrdne arvesti poolt registreeritud energiaga ketta ühe pöörde jooksul.

Arvesti poolt registreeritud energia

$$W' = K_n N .$$

Tegelik tarbitud energia

$$W = KN .$$

Arvesti absoluutne viga

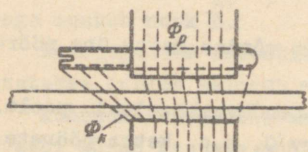
$$\Delta W = W' - W .$$

Arvesti suhteline viga

$$\begin{aligned} \gamma_W &= \frac{W' - W}{W} \cdot 100\% = \frac{K_n N - KN}{KN} \cdot 100\% = \\ &= \frac{K_n - K}{K} \cdot 100\% . \end{aligned}$$

Arvesti ketta pöörlemisel esineb laagrites hõõrdumine. Hõõrdemomendi poolt põhjustatud viga väikestel koormustel võib osutada väga suureks. Vea vähendamiseks hõõrdemoment kompenseeritakse lisapöördemomendi poolt. Lisapöördemomendi tekitamiseks on kaks moodust.

Esimese mooduse puhul on paralleelselt kettaga pingemagneti külge kinnitatud pikk peenike kruvi (näidatud ka joonisel 9-1). Kruvi võib ühele või teisele poole keeramisega nihutada. Nüüd jaguneb ketast läbiv töömagnetvoog ϕ_{ut} kaheks:

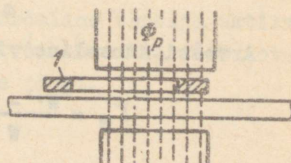


Joon. 9-4.

ϕ_p ja ϕ_k (joon. 9-4). Kuna magnetilised takistused nendele magnetvoogudele on erinevad, siis need magnetvood on faasis nihutatud. Magnetvoog ϕ_k jääb faasis maha. Nende magnetvoogude mõjul tekib väike pöördemoment - ketas hakkab liikuma faasis mahajääva magnetvoo suunas. Hõõrdemomenti kompenseeriv lisapöördemoment

võib põhjustada ketta pöörlemise koormuse puudumisel ainult pingemagneti mõjul. Põhjuseks võib olla arvesti vale reguleerimine, võrgupinge kõrgenemine või hõõrdumise vähenemine arvesti kinnitusselina vibreerimise tõttu. Selle vältimiseks on pingemagneti ja telje külge kinnitatud ferromagnetilisest materjalist pidurduslipukesed T_1 ja T_2 (vt. joon. 9-1). Pingemagneti mõjul on pidurduslipuke T_1 magneetunud ning pidurduslipukese T_2 lähenemisel tõmbab seda jõuga, mis on küllaldane ketta peatamiseks. Voolu mitteesinemisel voolumähises ja pingel (0,8 ... 1,1) U_n ei tohi ketas teha rohkem kui ühe pöörde.

Teise mooduse puhul asetatakse pingemagneti ja ketta vahelisse õhupilusse õhuke nelinurkne vaskraam (joon. 9-5). Vaskraamis indutseeritud pöörivoolude poolt tekitatakse samuti magnetvoog ϕ_k , mis jääb põhimagnetvoost ϕ_p faasis maha. Vaskraami asendi nihutamisega saab reguleerida lisapöördemomendi suurust.



Joon. 9-5.

Täpsuse järgi liigitatakse aktiivenergia arvestid täpsusklassidesse: 1, 2 ja 2,5 ning reaktiivenergia arvestid klassidesse 2 ja 3. Lähtearvestite täpsusklass on 0,5.

Ühefaasiliste arvestite lubatavad vead on toodud tabelis 10.

Tabel 10

Koormus %-des nimikoormusest	Lubatavad vead %-des			
	klass 1,0	klass 2,0	klass 2,5	
5	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	-	cos $\varphi = 1,0$ puhul
10	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
150	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
200	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	-	
10	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	-	cos $\varphi = 0,5$ puhul
20	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	

Minimaalset koormust, väljendatuna protsentides nimikoormusest, mille puhul arvesti ketas hakkab peatuseta pöörlema, nimetatakse arvesti tundlikkuseks. Nimipingel, nimisagedusel ja $\cos \varphi = 1,0$ puhul peab arvesti ketas peatuseta pöörlema koormusel, mis ei ületa 0,5% nimikoormusest arvestitel klassiga 1,0; 1% nimikoormusest arvestitel klassiga 2,5 ja 1,5% nimikoormusest arvestitel klassiga 2,5 ja 3.

Arvestite mõõteulatust on võimalik suurendada mõõtetrafode abil. Sel juhul tuleb arvesti näitu korrutada mõõtetrafode ülekandeguritega.

Pingepiirkonda eeltakistiga muuta ei või, kuna aktiivtakistus muudab faasinihet magnetvoogude vahel.

Näide 19. Ühefaasilise arvesti sildil on andmed: 5 A; 127 V; 50 Hz; 1 kWh = 2500 ketta pööret. Arvesti kontrollimisel kasutati vattmeetrit, mille $I_n = 5$ A, $U_n = 150$ ja $\alpha_n = 150$ jaotust. Vattmeetri hälve oli 92 jaotust. Kolme minuti jooksul arvesti ketas tegi 57 pööret. Leida arvesti viga.

Arvesti nimikonstant

$$K_n = \frac{1}{C} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 60}{2500} = 1440 \frac{W_s}{P}.$$

Arvesti tegeliku konstandi leidmiseks määrame võimsuse

$$C_w = \frac{U_n I_n}{\alpha n} = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \frac{W}{\text{jaot.}},$$

$$P = C_w \alpha = 5 \cdot 92 = 460 W..$$

Arvesti tegelik konstant

$$K = \frac{Pt}{N} = \frac{460 \cdot 3 \cdot 60}{57} = 1450 \frac{W_s}{P}.$$

Arvesti suhteline viga

$$\gamma_w = \frac{K_n - K}{K} \cdot 100\% = \frac{1440 - 1450}{1450} \cdot 100 = -0,69\%.$$

9-3. Aktiivenergia mõõtmine kolmefaasilises võrgus

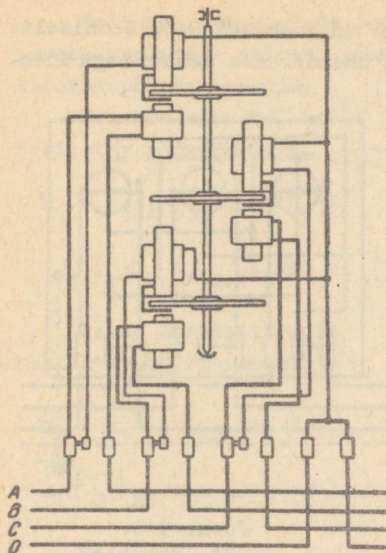
Aktiivenergia mõõtmiseks neljajuhtmehises kolmefaasilises süsteemis kasutatakse kolmeelemendilist arvestit. Sellise arvesti põhimõtteline lülitusskeem on toodud joonisel 9-6. Arvestil on kolm elektromagnetite komplekti, mis toimivad ühisele teljele kinnitatud kolmele kettale. Kolmeelemendilise arvesti iga elektromagneti komplekti ehitus ei erine ühefaasilise arvesti ehitusest. Arvestil on üks loendusmehhanism.

Kolmajuhtmehises kolmefaasilises süsteemis mõõdetakse aktiivenergiat kaheelmendilise arvestiga. Sellisel arvestil on kaks elektromagnetite komplekti, mis toimivad ühisele teljele kinnitatud kahele kettale või ka ühele kettale (joon. 9-7). Mõnikord kasutatakse kaheelmendilise arvesti asemel kaht ühefaasilist arvestit. Nii kaheelmendilise kui ka kahe ühefaasilise arvesti ühendusskeem ei erine võimsuse mõõtmise skeemist kahe vattmeetri meetodi puhul.

Ühe kettaga kaheelmendilises arvestis võivad ühe elektromagnetite komplekti poolt kettas indutseeritud voolud osa-

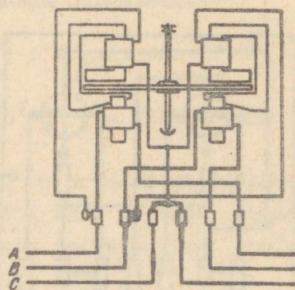
liselt läbida teise elektromagneti komplekti poolt tekitatud magnetvoogude mõjusfääri. Seetõttu võivad tekkida täiendavad pöörde- või pidurdusmomentid, mis põhjustavad lisavea. Eriti suur lisaviga võib tekkida faasijärjestuse muutmisel. Nimetatud põhjusel tuleb arvesti ühendamisel kinni pidada arvestile ettenähtud faasijärjestusest (mille puhul arvesti on reguleeritud).

Energia mõõtmisel kahe ühefaasilise arvestiga pöörleb faasinihkel üle 60° ühe arvesti ketas vastassuunas.



Joon. 9-6.

Seega on muutunud selle arvesti põhipöördemomendi suund ning seetõttu tekib lisaviga, sest hõõrdemomenti kompenseeriv pöördemoment mõjub nüüd lisapidurdusmomendina.



Joon. 9-7.

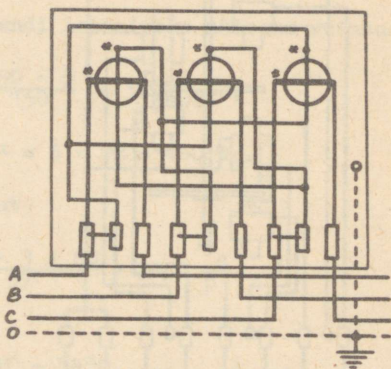
9-4. Reaktiivenergia mõõtmine kolmefaasilises võrgus

Reaktiivenergia mõõtmiseks neljajuhtmelises võrgus kasutatakse reaktiivenergia arvesteid CP4-W673. Arvesti on kolme-

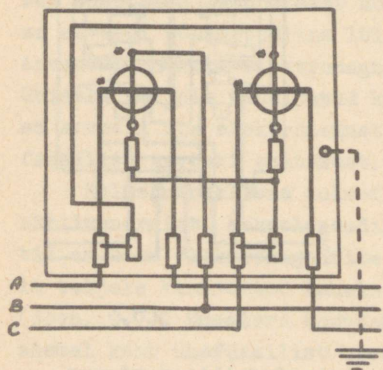
elemendiline ja tema ühendusskeem on joonisel 9-8. Jooniselt on näha, et arvesti pingemähised ühendatakse samuti nagu ühendati vattmeetrите pingemähised reaktiivvõimsuse mõõtmisel. Teljele mõjuv pöördemoment on võrdeline kolmefaasilise voolu reaktiivvõimsusega.

Kolmejuhtmelises võrgus kasutatakse reaktiivenergia mõõtmiseks arvesteid CP3-M671. See arvesti on kaheelemendiline ja tema ühendusskeem on joonisel 9-9- Aktiivenergia arvestist erineb ta selle poolest, et mõlema elemendi pingemähisele lange-

va pinge ja pingemähise poolt tekitatava magnetvoo vaheline nihkenurk β ei ole $90^\circ + \alpha$, vaid on $60^\circ + \alpha$. Nurga β vähenemine saavutatakse sellega,



Joon. 9-8.



Joon. 9-9.

et pingemähistega ühendatakse järjestikku aktiivtakistid. Vektordiagramm on kujutatud joonisel 9-10. Esimese elemendi voolumähist läbib vool I_A , tekitades magnetvoo ϕ_A . Pingemähisele rakendatakse pinge U_{BC} ; vool pingemähises I_{BC} jääb pingest U_{BC} maha 60° . Teise elemendi voolumähist läbib vool I_C , tekitades magnetvoo ϕ_C . Pingemähisele rakendatakse pinge U_{AC} ; vool pingemähises I_{AC} jääb pingest U_{AC} maha 60° .

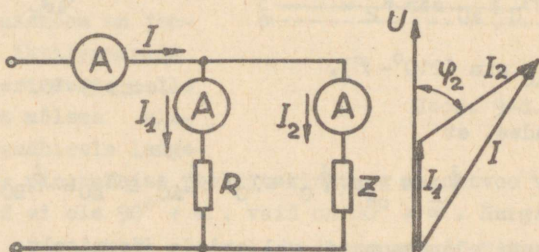
X. VÕIMSUSTEGURI JA SAGEDUSE MÕOTMINE

10-1. Võimsusteguri kaudne mõõtmine

Võimsustegurit saame määrata kaudsel teel, mõõtes pinget, voolu ja aktiivvõimsuse

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

Kui vattmeetrit ei ole, siis saab võimsustegurit määrata kolme ampermeetri meetodil. Tarbijaga Z , mille võimsustegurit soovime määrata, tuleb ühendada paralleelselt aktiiv-



Joon. 10-1.

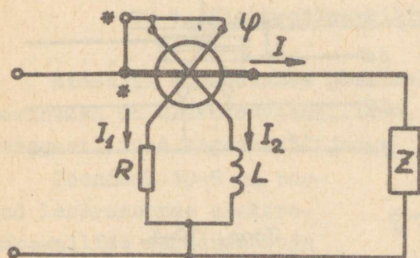
takistus R , nagu näidatud joonisel 10-1. Teades voolusid I , I_1 ja I_2 , saame ehitada vektordiagrammi (vt. joon. 10-1). Nurga φ_2 võime määrata graafiliselt ja nurgafunktsioonide tabelist leiame $\cos \varphi_2$. võimsusteguri saame arvutada ka koosinuslause abil

$$\cos \varphi_2 = \frac{I^2 - I_1^2 - I_2^2}{2I_1I_2}$$

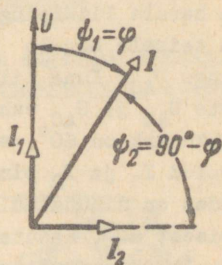
Kaudse meetodi puuduseks on väike mõttetäpsus ja suur ajakulu koosinuse arvutamiseks. Nende puuduste tõttu kasutatakse enamikul juhtudel näitavaid mõõteriistu, mille skaalalt on võimsustegur otseselt loetav. Neid mõõteriistu nimetatakse fasomeetriteks.

10-2. Elektrodünaamiline fasomeeter

Elektrodünaamilises fasomeetris kasutatakse mõõtemehhanismina elektrodünaamilist logomeetrit, mille ühendusskeem on kujutatud joonisel 10-2. Logomeetri paigalseisev mähis ühendatakse järjestikku tarbijaga. Ühe liikuva mähisega on ühendatud järjestikku induktiivsuvaba eeltakisti ja teise liikuva mähisega induktiivpool L. Liikuvad mähised koos eeltakistitega moodustavad kaks paralleelset pingeharu. Esimeses pingeharus ühtib vool I_1 faasis pingega U, teise pingeharu vool I_2 aga on pingest U 90° järel (joon. 10-3). Kuna vastupöördenemomente tekitavad vedrud puuduvad, siis mõõtevabas olukorras on liikuv süsteem ükskõikses tasakaalus.



Joon. 10-2.



Joon. 10-3.

Fasomeetri vooluringi ühendamisel tekitab paigalseisvat mähist läbiv vool I magnetvoo $\dot{\phi}$. Magnetvoo ja voolude I_1 , I_2 vastastikuse toime tulemusena mõjub liikuvale osale kaks vastassuunalist pöördenemomente. Liikuva osa pöördenurk

$$= F \left(\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} \right) = F \left(\frac{I_2 \cos (90^\circ - \varphi)}{I_1 \cos \varphi} \right) = F \left[\frac{I_2}{I_1} \operatorname{tg} \varphi \right],$$

kus φ - voolu I ja pingega U vaheline nihkenurk.

Pingeharude konstantsete takistuste korral

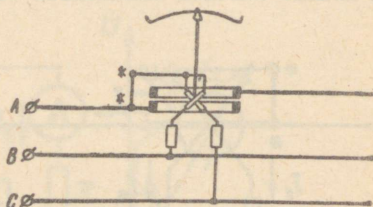
$$= F [k \operatorname{tg} \varphi] = F_1 \varphi .$$

Seega oleneb fasomeetri liikuva osa pöördenurk voolu ja pinge vahelisest nihkenurgast ning järelikult võib skaalat gradueerida kas nurga φ või $\cos \varphi$ väärtustes.

Erinevalt teistest elektrodünaamilistest mõõteriistadest sõltub elektrodünaamilise fasomeetri näit sagedusest, sest sageduse muutumisel muutub teise pingeharu takistus, kuna esimese pingeharu takistus jääb konstantseks.

Joonisel 10-4 on toodud elektrodünaamilise kolmefaasilise fasomeetri ühendusskeem. Erinevus ühefaasilisest fasomeetrist seisneb selles, et teises pingeharus on induktiivpooli asemel takisti niisama suure aktiivtakistusega kui esimeses pingeharus. Paigalseisvat mähist läbib liinivool.

Pingeharudele rakendatakse liinipinge - esimesele harule liinipinge U_{AB} ja teisele harule liinipinge U_{AC} . Kuna liinipingete U_{AB} ja U_{AC} vaheline nihkenurk on 60° , siis ka voolud I_1 ja I_2 pingeharudes on nihutatud üksteisest 60° . Kasutatav on

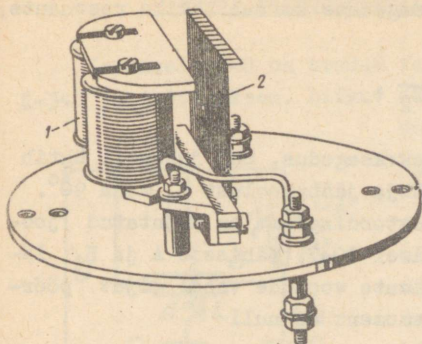


Joon. 10-4.

ainult sümmeetriliste pingete ja voolude korral (sümmeetrilisel koormusel). Näit sagedusest ei sõltu. Lülituskilpidele monteeritavad fasomeetrid ehitatakse ferrodünaamilistena.

10-3. Vibratsioonssagedusmõõtja

Vibratsioonssagedusmõõtja ehitus on näidatud joonisel 10-5. Ta koosneb elektromagnetist 1 ja reast eri omavõnkesagedusega teras-lehtvedrukkestest või -keelekestest 2. Üksiku keelekese omavõnkesagedus erineb naaberkeelekese omast tavaliselt 0,5 Hz võrra. Elektromagneti tootmisel mõõdetava sagedusega vahelduvvooluga tekib perioodiliselt muutuv magnetväli, mis paneb keelekesed võnkuma. Suurima amplituudiga hak-



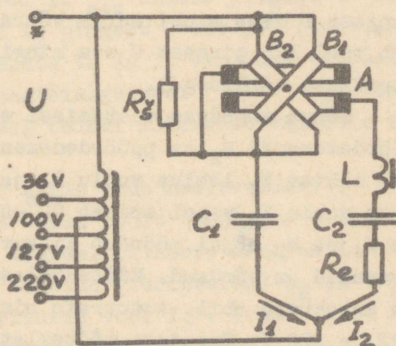
Joon. 10-5.

10-4. Elektrodünaamiline sagedusmõõtja

Kaasajal kasutatakse peamiselt osutiga sagedusmõõtjaid. Levinumad on elektrodünaamilised, ferrodünaamilised ja elektromagnetilised sagedusmõõtjad.

Joonisel 10-6 on toodud laboratoorse elektrodünaamilise sagedusmõõtja \bar{A} -506 põhimõtteskeem. Liikuva pooliga B_1 on ühendatud järjestikku kondensaator C_1 ning nad koos moodustavad esimese paralleelharu. Liikuva pooliga B_2 on ühendatud järjestikku paigalseisev pool A , induktiivpool L , kondensaator C_2 ja eeltakisti R_e ning need koos moodustavad teise paralleelharu. Sundi R_s abil on on reguleeritav skaala iseloom. Induktiivsus L ja mahtuvus C_2 valitakse selliselt, et antud mõõte-

kab võnkuma see keeleke, mille omavõnkesagedus ühtib toitevoolu sagedusega. Et keelekese lõpp on painutatud ja valgeks värvitud, siis näib ta võnkudes pikaks veninud heleda ristkülikuna. Sagedusmõõtja ühendatakse võrku paralleelselt.



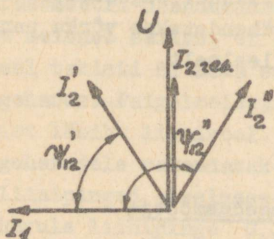
Joon. 10-6.

riistaga mõõdetava keskmise sageduse korral tekiks resonants, s.o.

$$\omega_{kL} = \frac{1}{\omega_k C_2},$$

kus $\omega_k = 2\pi f_k$ - keskmine nurksagedus. Sel juhtumil ühtib vool I_2 res faasis pingega U ja jääb voolust I_1 maha 90° .

Vektordiagramm on kujutatud joonisel 10-7. Mähiseid A ja B_1 läbivate voolude vahel mõjuv pöördemoment on null



Joon. 10-7.

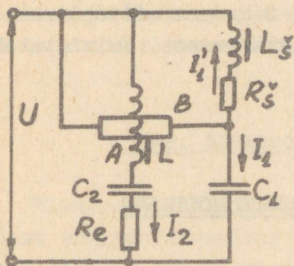
$$M_1 = kL_1 I_2 \cos 90^\circ = 0.$$

Mähiseid A ja B_2 läbiva voolu I_2 tekitatud pöördemomendi mõjul pöörduv mähis B_2 asendisse, mille puhul magnetvälja energia on maksimaalne, s.o. kui mähiste magnetvood suunalt ühtivad. Sageduse muutumisel muutub vool I_2

suuruselt ja faasilt. Sageduse suurenemisel jääb vool I_2'' pingest U maha mingi nurga võrra. Sageduse vähenemisel tõttab vool I_2' pingest U ees mingi nurga võrra (nurgad on vastupidiste märkidega).

Seega sageduse muutumisel mõjub liikuvale osale peale pöördemomendi M_2 ka pöördemoment M_1 , sest nihkenurk liikuva mähis B_1 läbiva voolu I_1 ja paigalseisvat mähis A läbiva voolu I_2 vahel erineb 90° -st ($\psi_{12} \neq 90^\circ$). Pöördemomentide M_1 ja M_2 mõjul pöörduv liikuv osa asendisse, kus pöördemendid on võrdsed. Mõõteahelasse ühendatakse sagedusmõõtja autotrafo abil. Autotrafo nimi-primaarpinged on 36, 100, 127 ja 220 V. Sageduse mõõteulatus on $\pm 10\%$ mõõdetava sageduse keskmisest väärtusest, näiteks 50 Hz puhul 45 ... 55 Hz.

Joonisel 10-8 on toodud ferrodünaamilise sagedusmõõtja D-340 põhimõtteskeem. Liikuv mähis B, mis on šunteeritud induktiivpooliga L_B ja takistiga R_B moodustab koos järjestikku ühendatud kondensaatoriga C_1 esimese paralleelharu. Induktiivsust L omav paigalseisev mähis A koos järjestikku ühendatud kondensaatori C_2 ja takistiga R_e moodustab teise paralleelharu. Paigalseisva mähise induktiivsus L ja kondensaatori mahtuvus C_2 valitakse nii, et mõõdetava keskmise sageduse korral esineks teises



Joon. 10-8.

paralleelharus resonants, s.o.

$$\omega_k L = \frac{1}{\omega_k C_2}.$$

Resonantsi korral on vool I_2 res faasis pingega U . Esimeses paralleelharus on vool I_1 pingest U ees 90° (kui jätta arvestamata šundi mõju). Voolume I_1 ja I_2 vaheline nihkenurk $\psi_{12} \approx 90^\circ$. Seega siis resonantsisagedusel ($\omega_0 = \omega_k$) võrdub voolude I_1 ja I_2 vastastikusel toimel liikuvale mähisele B mõjuv pöördemoment nulliga.

Nüüd oletame, et liikuv mähis asub meelevaldselt, kusjuures paigalseisva mähise A voolu poolt tekitatav magnetvoog läbib liikuva mähise B kerde. Liikuv mähises indutseerub emj. Kuna mähis B on suletud (lühistatud) L_B ja R_B kaudu, siis tekib selles kontuuris vool I_1' . Voolu I_1 ja paigalseisva mähise A magnetvoo vastastikusel mõjul tekib täiendav pöördemoment. Viimase mõjul püüab liikuv mähis asetuda nii, et tema keerud oleksid tasapinnas, mis on paralleelne paigalseisva mähise poolt tekitatud magnetvooga, s.o. püüab asetuda neutraalasendisse (siis võrdub indutseeritud emj. nulliga). Järelikult resonantsisageduse korral võib mähis asetse da ainult neutraalasendis.

Kui mõõdetav sagedus erineb resonantsisagedusest, tekib voolude I_1 ja I_2 vastastikusel mõjul pöördemoment. Liikuv osa pöörduv seni, kuni täiendav pöördemoment tasakaalustab pöördemomendi. Pöördumise suund oleneb sellest, kas mõõdetav sagedus on suurem või väiksem resonantsisagedusest.

Nimipinge on 127, 220 ja 380 V. Sageduse mõõtepiirkond $\pm 10\%$ keskmisest mõõdetava sageduse väärtusest. Valmistatakse kesksagedusele 50 ja 200 Hz.

XI. KIIRELT MUUTUVATE SUURUSTE MÕÖTMINE

11-1. Üldist

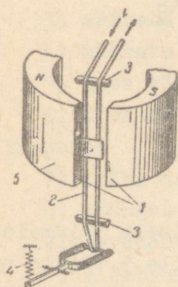
Sageli on tarvis määrata, kuidas muutub mõõdetav suurus teatud ajavahemiku vältel. Kui muutused on aeglased, siis kasutatakse isekirjutavaid mõõteriistu. Need joonestavad suuruse muutumise graafiku tindiga diagrammilindile või -kettale. Kiirelt kulgevate protsesside uurimiseks ei saa isekirjutavaid riistu kasutada, sest liikuva osa suure inertsiga tõttu ei jõua nad jälgida mõõdetava suuruse muutusi. Kiireltmuutuvate suuruste kõverate uurimiseks kasutatakse ostsillograafe. Ostsillograafid jagunevad elektromehaanilisteks ja elektronostsillograafideks.

Elektromehaanilise ostsillograafi mõõtemehhanism omab inertsiga ja on seetõttu kasutatav ainult väikese sagedusega (alla paari kilohertsiga) perioodiliste ja millisekundites mõõdetavate aperioidiliste protsesside uurimiseks. Elektronostsillograaf on praktiliselt inertsivaba ja seega võimaldab ostsillograafierida perioodilisi protsesse, mille sagedus on kuni paarsada megahertsiga, ja aperioidilisi protsesse, mille kestus on murdosa mikrosekundist. Elektromehaanilised ostsillograafid võimaldavad tavaliselt samaaegselt kasutada 3 ... 12 vibraatorit ja seega ostsillograafierida samaaegselt 3 ... 12 kõverat. Elektronostsillograafidest on kõige levinu-

mad ühe kiirega ostsillograafid. Need võimaldavad korraga vaadelda ainult üht kõverat. Kodumaine tööstus valmistab ka mitme kiirega elektronostsillograafe, mis võimaldavad korraga vaadelda mitut kõverat. Ka ühe kiirega ostsillograafiga on võimalik samaaegselt vaadelda kaht kõverat, kuid siis tuleb kasutada elektronkommutaatorit.

11-2. Elektromehaaniline ostsillograaf

Elektromehaaniline ostsillograaf koosneb mõõtemehhanismidest ehk vibraatoritest, optilisest süsteemist, kõverate vaatlemise ja fotografeerimise seadmetest ning elektrilisest lülitusest. Vibraatorid jagunevad magnetelektrilisteks, ferrodünaamilisteks ja elektrostaatilisteks. Kõige levinumad on magnetelektrilised. Neid kasutatakse pinge ja voolu ostsillografeerimiseks. Ferrodünaamilisi vibraatoreid kasutatakse peamiselt võimsuse ostsillografeerimiseks.



Joon. 11-1.

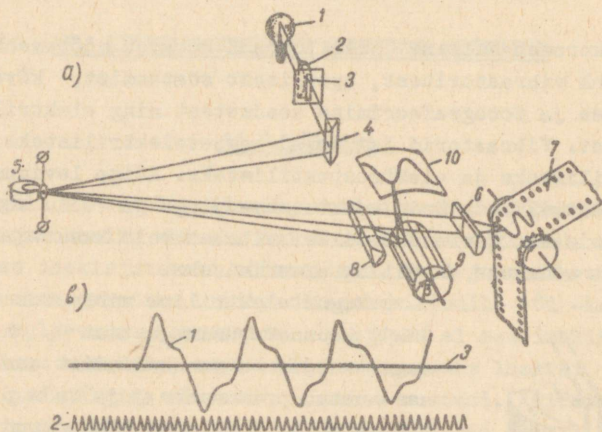
Magnetelektriline vibraator (joon. 11-1) koosneb püsomagnetist 1, mille magnetväljas on pronkslindist aas 2, See aas toetub prismadele 3 ja teda pingutab vedru 4. Aasale on kinnitatud peeglike 5. Kogu kirjeldatud süsteem on paigutatud spetsiaalsesse läbipaistvasse räniorgaanilisse vedelikku ja paigutatud plastmassist kesta. Kestas oleva akna kaudu pääseb valguskiir peeglile ja tagasi. Räniorgaaniline vedelik on vajaliku sumbumuse tekitamiseks. Aasa läbiva vahelduvvoolu toimel hakkab aas

püsimagneeti magnetväljas võnkuma. Kui vibraatori liikuva osa inertsmoment on küllalt väike ja omavõnkesagedus küllalt suur, siis on peegli pöördenurk igal hetkel võrdeline aasa läbiva voolu hetkväärtusega.

Vibraatori valikul tuleb arvestada selle voolutundlikkust ja omavõnkesagedust. Vibraator võimaldab ilma moo-

nutusteta uurida võnkumisi, mille võnkesagedus ei ületa $\frac{1}{10}$ vibraatori omavõnkesagedusest. Mittesiinuseliste võnkumiste uurimisel on vajalik, et ei moonutataks kõrgemaid harmoonilisi. Näiteks vibraator, mille omavõnkesagedus on 5000 Hz, ei moonuta 500-Hz sagedusega voolukõverat. Seega 50-Hz vahelduvvoolu uurimisel annab ta moonutatusteta edasi 10. harmoonilise.

Elektromehaanilise ostsillograafi optiline skeem on joonisel 11-2, a. Hõõglambist 1 langeb valguskiir läbi kon-



Joon. 11-2.

densaator-läätse 2 ja diafragma 3 kolmetahulisele prismale 4 ning selles murdumise järel vibraatori peeglile 5. Peale peegeldumist vibraatori peeglit suundub osa kiirt läbi läätseläätse 6, mis teravustab kiire filmile 7. Pärast filmi ilmutamist saadakse ostsillogramm (joon. 11-2, b). Ostsillograaf võimaldab samaaegselt fotografeerimisega ka fotografeeritavat kõverat vaadelda. Selleks juhitakse osa kiirt läbi prisma 8 pöörlevale peegeltahkudega prismale 9 ja sealt mattklaasile 10. Kui peegeltahkudega prisma pöörleb ühtlase kiirusega, nii et $t = kT$ (kus t on aeg, mis kulub prisma pöördumiseks ühele tahule vastava nurga β võrra, T - uuritava prot-

sessi periood ja k - täisarv), siis saadakse mattklaasil uuritava kõvera paigalseisev kujutis. Kui $k = 1$, siis on mattklaasil kujutatud üks tsükkel, kui $k = 2$, siis 2 tsükli jne. Kui peegeltahkudega prisma ei pöörle, siis tekib mattklaasil kriips, mille pikkus on võrdeline uuritava kõvera positiivse ja negatiivse amplituudi summaga. Ostsillogrammi (kõver 1 joonisel 11-2) ordinaattelje mõõtkava sõltub vibraatori tundlikkusest. Ajatelje (3 joonisel 11-2) mõõtkava määratakse eri vibraatoriga, nn. ajamärkijaga, mille võnkeperiood on teada. Ajamärkija võnkumine (kõver 2 joonisel 11-2) ostsillografeeritakse samaaegselt uuritava protsessiga.

11-3. Elektronostsillograaf

Elektronostsillograaf on universaalne ja asendamatu mõõteriist. Temaga on võimalik:

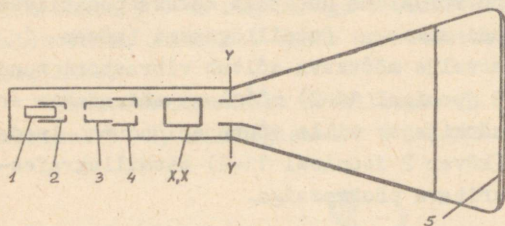
- 1) uurida ping- ja voolukõveraid;
- 2) vaadelda pingepulsse ja määrata nende kestust ning amplituude;
- 3) määrata sagedust ja faasinihet;
- 4) määrata väikseid ajavahemikke;
- 5) üles võtta elektronlampide tunnusjooni;
- 6) üles võtta ferromagnetiliste materjalide hüstereesi-silmuseid;
- 7) mõõta modulatsioonisügavust;
- 8) määrata võimendite sagedusarakteristikuid.

Elektronostsillograafi põhiosõlmed:

- 1) elektronkiiretoru,
- 2) laotuspingegeneraator,
- 3) vertikaalhälvituse ja horisontaalhälvituse võimendid,
- 4) toiteblokk.

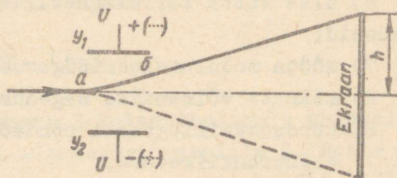
Elektronkiiretoru (joon. 11-3) on elektrovaakuumseadis, mille katoodist 1 emiteeruvad elektronid koondatakse silindriliste anoodide 3 ja 4 elektrivälja toimele kitsaks elektrownide kimbuks, nn. elektronkiireks, mis langeb toru esipinnas olevale fluorestseerivale ekraanile 5. Kiire fokuseerimine ja

seega kujutise teravustamine toimub katoodipoolse anoodi 3 pinge (0,2 ... 1 kV) muutumise teel. Teise anoodi 4 anood-



Joon. 11-3

pinge on kõrgem (1 ... 4 kV). Katoodi ümbritseb silindriline põhjas väikest auku omav tüürelektrood 2, mis toimib trioodi tüürvõre taoliselt. Tüürelektroodi pinge mõjutab emissioonivoolu ja seega ka elektronikiire intensiivsust ning fluorestseeruva punkti (kujundi) heledust ekraanil. Ekraanile suunduvat elektronkiirt saab hälvitada horisontaalsihis horisontaalhälvitusplaatide XX ja vertikaalsihis vertikaalhälvitusplaatide YY pingestamisega, sest elektronid nende negatiivse laengu tõttu tõukuvad negatiivsest plaadist eemale ja tõmbuvad positiivse plaadi poole. Kui vertikaalhälvitusplaatidele rakendada vahelduvpinge, siis hakkab kiir võnkuma ja ekraani järelhelenduse tõttu näeme ekraanil vertikaalset kriipsu. Selle pikkus sõltub ostsillograafi pingetundlikkusest ja hälvitusplaatidele rakendatud pingest. Ostsillograafi pingetundlikkus on võrd-



Joon. 11-4.

ne hälvituspinge ühele ühikule vastava kiire hälbega (kõrvalekaldega) ekraani tsentrist. Jooniselt 11-4 on näha, et pingetundlikkus $S_U = \frac{h}{U} \frac{\text{mm}}{\text{V}}$. Elektronikiiretorude tundlikkus on 0,15 ... 1,5 $\frac{\text{mm}}{\text{V}}$. Võimendite olemasolu tõttu on tänapäeval ostsillograafide maksimaalsed pingetundlikkused 10 ... 80 $\frac{\text{mm}}{\text{V}}$.

Tundlikkused horisontaalsihis ja vertikaalsihis on tavaliselt erineva suurusega.

Kui rakendada nii vertikaal- kui ka horisontaalhälvitusplaatidele siinuselised pinged, siis juhul, kui nende sagedused suhtuvad nagu täisarvud, saadakse ekraanile paigalseivad, nn. Lissajous' (lissajuu) kujundid. Nende kuju sõltub sageduste suhtest, pingetevahelisest faasinihkest ja pingete amplituudide suhtest. Joonisel 11-5 kujutatud Lissajous' kujundid on saadud võrdsete amplituudidega hälvituspingete puhul.

$\frac{f_x}{f_y}$ \ φ	0	45°	90°	135°	180°
1:1					
1:2					
1:3					
2:3					

Joon. 11-5.

Sageduste suhte määramiseks tuleb üldjuhul kujutada ette kaks sirglõiku, milledest üks (XX) on paralleelne horisontaalhälvitusplaatidega ja teine YY on paralleelne vertikaalhälvitusplaatidega nii, et need sirged ei läbi kujundi sõlmpunkte (joon. 11-6) ja ära lugeda, mitu korda lõikavad mõlemad sirglõigud kujundit.

Kui üks sagedustest on teada, saab teise määrata seosest

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{n_x}{n_y},$$

kus f_x - horisontaalhälvituspinge sagedus;

f_y - vertikaalhälvituspinge sagedus;

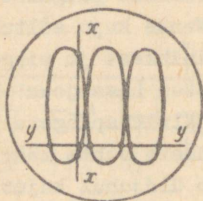
n_x - lõikepunktide arv horisontaalhälvitusplaatidega paralleelse sirglõiguga;

n_y - lõikepunktide arv vertikaalhälvitusplaatidega paralleelse sirglõiguga.

Olgu joonisel 11-6 kujutatud juhul $f_y = 1500$ Hz. Kuna

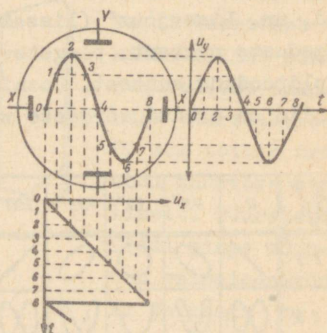
$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{2}{6}, \text{ siis } f_x = \frac{1}{3} f_y = \frac{1}{3} \cdot 1500 = 500 \text{ Hz.}$$

Selleks et ekraanile saada uuritava pinge sõltuvust ajast, rakendatakse uuritav pinge vertikaalhälvitusplaatidele y_1y_2 ja horisontaalhälvitusplaadile x_1x_2 rakendatakse laotuspinge-generaatorist saadav saehammaspinge (joon. 11-7. Olgu uurita-

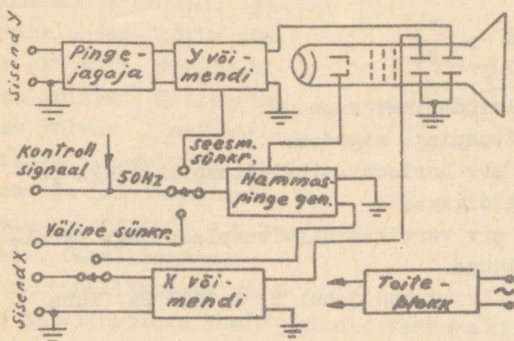


Joon. 11-6.

va pinge periood T_y ja laotuspinge periood T_x . Selleks et saada ekraanile uuritava pinge perioodile T_y vastav üks tsükkel, peab $T_x = T_y$. Kui $T_x = nT_y$ (kus n on täisarv), siis saadakse ekraanil n tsükli. Kui n ei ole täisarv, siis saame ekraanil paigalseisva graafiku asemel liikuvat. Laotuspinge ja uuritava pinge perioodide



Joon. 11-7.



Joon. 11-8.

suhte konstantsuse tagamiseks sünkroniseeritakse laotuspinge uuritava pingega.

Joonisel 11-8 on kujutatud ostsillograafi C 1-1 blokk skeem. Pingejagaja abil saab vertikaalhälvitus tundlikkust astmeliselt muuta. Täiuslikumad, nn. impulssostsillograafid sisaldavad veel

ajakalibraatori, mis annab elektronkiiretoru tüürelektroodile moduleeriva vahelduvpinge. Selle negatiivne poolperiood kustutab kiire, mille tulemusena saadakse ekraamil täpitatud kujutis (joonis 11-9). Kui ajakalibraatori pinge periood on teada, saab mõõta impulsside kestust.

Joon. 11-9.



XII. MAGNETILISED MÕÖTMISED

12-1. Üldist

Elektriaparaatide (trafod, magnetvõimendid) ja elektrimasinate (mootorid, generaatorid) omadused sõltuvad nende magnetahelate omadustest, mis omakorda sõltuvad magnetahelate konstruktsioonist ja nende valmistamiseks kasutatud materjalidest. Seetõttu on vaja mõõta elektriaparaatides ja masinates esinevaid magnetvooge ning magnetilisi induktsioone. Ferromagnetiliste materjalide omaduste määramiseks võetakse üles magneetimiskõverad ja hüstereesisilmused ning mõõdetakse rauaskaovõimsused.

12-2. Magnetvoo mõõtmine ballistilise galvanomeetriga

Magnetvoo mõõtmiseks ühendatakse järjestikku mõõtepoolkeerdude arvuga w , ja takistusega R_p , ballistiline galvanomeeter takistusega R_g ja takisti takistusega R_1 (joon. 12-1). Mõõtepooliga ahelduva magnetvoo muutumisel indutseeritakse mõõtepoolis elektromotoorne jõud, mille hetkväärtus

$$e = -w \frac{d\phi}{dt}$$

ja vooluringis tekib vool

$$i = \frac{e}{R} = - \frac{w}{R} \frac{d\phi}{dt},$$

kus $R = R_g + R_p + R_1$ on vooluringi kogutakistus.

Teisendades saame:

$$i dt = - \frac{w}{R} d\phi,$$

kus idt on aja dt vältel galvanomeetri läbinud laeng.

Kui lõpliku ajavahemiku Δt vältel magnetvoog muutub $\Delta \phi$ võrra, siis läbib galvanomeetrit laeng, mille absoluutväärtus

$$Q = \frac{w}{R} \Delta \phi,$$

millest

$$\Delta \phi = \frac{R}{w} Q.$$

$$\text{Kuna } Q = C_q \alpha_m,$$

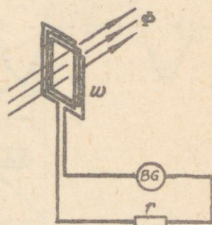
kus C_q on galvanomeetri ballistiline konstant ja α_m maksimaalne hälve, siis

$$\Delta \phi = \frac{C_q R}{w} \alpha_m = \frac{C_\phi}{w} \cdot \alpha_m,$$

kus

$$C_\phi = C_q R \left[\frac{C_q R}{\text{jaot.}} = \frac{wb}{\text{jaot.}} \right]$$

on galvanomeetri ballistiline konstant, väljendatuna magnetvoo ühiku kaudu. Järelikult, teades galvanomeetri ballistilist konstanti C_ϕ ja mõõtepooli keerdude arvu w , saame galvanomeetri maksimaalse hälbe α_m järgi määrata mõõtepoolidega ahelduva magnetvoo muutuse.



Joon. 12-1.

Kui magnetvoog muutub $\dot{\Phi}$ -st nullini, siis $\Delta\dot{\Phi} = \dot{\Phi} - 0 = \dot{\Phi}$
 = ja saame mõõta magnetvoo muutuse kaudu magnetvoogu, sest
 sel juhul

$$\dot{\Phi} = \frac{C}{w} \dot{\Phi} \alpha_m.$$

Kui magnetvoog muutub $+\dot{\Phi}$ -st $-\dot{\Phi}$ -ni, siis $\Delta\dot{\Phi} = \dot{\Phi} -$
 $-(-\dot{\Phi}) = 2\dot{\Phi}$ ja

$$\dot{\Phi} = \frac{C}{2w} \dot{\Phi} \alpha_m.$$

Magnetvoo muutumist võib põhjustada:

- 1) mõõtepooli magnetväljast väljaviimisega;
- 2) mõõtepooli pööramisega magnetvälja jõujoontega risti;
- 3) elektromagneti ergutusvooluringi katkestamisega;
- 4) ergutusvooluringis voolu suuna muutmisega ($\Delta\dot{\Phi} = 2\dot{\Phi}$);
- 5) püsिमagneti eemaldamisega mõõtepoolist.

12-3. Magnetilise induksiooni mõõtmine

Teades mõõtepooliga piiratud pindala S , saame magnetvoo
 muutuse $\Delta\dot{\Phi} = \frac{C}{w} \dot{\Phi} \alpha_m$ kaudu mõõta magnetilise induksiooni muu-
 tust

$$\Delta B = \frac{\Delta\dot{\Phi}}{S} = \frac{C}{wS} \dot{\Phi} \alpha_m.$$

Kui magnetvoog muutub nullist $\dot{\Phi}$ -ni (või vastupidi), siis
 $\Delta\dot{\Phi} = \dot{\Phi}$ ja keskmine magnetiline induksioon mõõtepooli asuko-
 has

$$B = \frac{\dot{\Phi}}{S} = \frac{C}{wS} \dot{\Phi} \alpha_m.$$

12-4. Ballistilise konstandi määramine

* Kuna galvanomeetri ballistiline konstant C_d sõltub voo-
 luringi takistusest, siis määratakse ta magnetvoo mõõtmiseks

reguleeritud vooluringi takistuse $R = R_g + R_w + R_m$ juures
 joonisel 12-2 toodud lülituse abil, viies ümberlülitasi asen-
 disse 2. C_ϕ arvutatak-
 se seosest

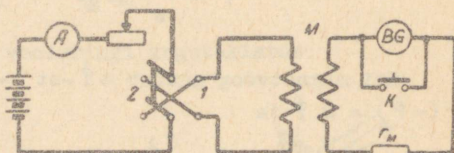
$$C_\phi = \frac{2MI_1}{\alpha_m},$$

kus M - vooluringide
 vastastikune
 induktiivsus;

I_1 - vool primaar-
 vooluringis;

α_m - ballistilise galvanomeetri maksimaalne hälve primaar-
 vooluringi ümberlülitamisel.

Joonisel 12-5 kujutatud skeemiga katseseade võimaldab
 määrata ka ballistilist konstanti. Selleks viiakse ümberlü-
 litasi $ÜL_1$ asendisse 1 ja teostatakse voolu ümberlülitamine lü-
 litasi $ÜL_2$.



Joon. 12-2.

12-5. Magnetvoo mõõtmine milliveebermeetriga

Milliveebermeeter ehk fluksmeeter on magnetelektrilise
 galvanomeetri eriliik, millel on tähtsuselt väike vastu-
 moment. Tema töötamine põhineb sellel, et suletud vooluringi
 aheldusvoog püüab säilida muutumatuna. Magnetvoo mõõtmiseks
 ühendatakse mõõtepool 4 milliveebermeetri klemmidega 2 ja 6
 (joon. 12-3). Ümberlülitasi 3 viiakse asendisse "mõõtmine" ja
 muudetakse mõõtepooliga ahelduvat magnetvoogu. Kuna voolurin-
 gi aheldusvoog püüab säilitada esialgset väärtust, siis pöör-
 dub mõõtemehhanismi raam 10 kuni on täidetud tingimus

$$w_\Delta \phi = BS w_1 \alpha,$$

kus B - magnetiline induksioon mõõtemehhanismi tööpilus;

S - mõõtemehhanismi raamiga piiratud pindala;

w_1 - mõõtemehhanismi raami keerdude arv;

α - milliveebermeetri hälve;

w - mõõtepooli keerdude arv;

$\Delta\phi$ - mõõtepooliga aheldunud magnetvoo muutus.

Avaldades saame:

$$\Delta\phi = \frac{BSw_1}{w} \alpha = \frac{C\phi}{w} \alpha,$$

kus $C = BCw_1$ - milliveebermeetri konstant.

$$\begin{aligned} \text{Tavaliselt } C &= 10^4 \frac{\text{mWb}}{\text{jaot.}} = \\ &= 0,1 \frac{\text{mWb}}{\text{jaot.}} \end{aligned}$$

Osuti tagastamiseks nulli viiakse lüliti 3 asendisse "Korrektor". Sel juhul ühendub korrektori raami mähis 8 mõõtemehhanismi raami mähisega. Pöörates nupu 5 abil korrektori raami, muudame sellega ahelduvat magnetvoogu, mis põhjustab mõõtemehhanismi raami ja osuti pöördumise. Osuti nulli viimine teeb mõõtmise mugavamaks, kuid pole kohustuslik, kuna $\Delta\phi$ võib määrata hälbe muutuse järgi:

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1,$$

kus α_1 - hälve enne magnetvoo muutmist ja α_2 - hälve pärast magnetvoo muutmist.

12-6. Magneetimiskõvera ülesvõtmine

Magneetimiskõvera $B = f(H)$ kuju sõltub materjali magnetilisest olukorrast. Esmase magneetimise kõvera saamiseks tuleb täielikult lahtimagneetitud (kuumutatud Curie punktini ja lastud aeglaselt juhtuda väljaspool magnetvälja) materjali magneetida väljatugevuse suurendamisega nullist maksi-

maalseni. Praktiliselt võime lahtimagneedituks lugeda katsekeha, millele keritud mähist läbis vahelduvvool, mis tekitab maksimaalse väljatugevuse $4000 \frac{\text{A}}{\text{m}}$ ($40 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$) ning mille tugevust aeglaselt vähendati kuni nullini. Lahtimagneetamiseks võib kasutada ka alaisvoolu. Sel juhul tuleb samaaegselt voolu vähendamiselega muuta perioodiliselt mõnikümmend korda voolu suunda.

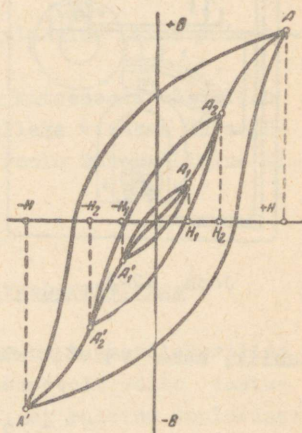
Tavaliselt määratakse esmase magneetimiskõvera asemel magneetimise põhikõver, mis saadakse sümmeetriliste hüstereesisilmuste tippude (punktid O , A_1 , A_2 ja A joonisel 12-4) ühendamise teel. See on küllalt lähedane esmase magneetimise kõverale.

Katseseadme skeem on joonisel 12-5. Suurim täpsus saavutatakse toroidikujulise katsekehaga, millele on keritud magneetimismähis keerude arvuga w_1 ja mõõtemähis keerude arvuga w_2 . Kuna toroidikujulist katsekeha on raske valmistada, siis kasutatakse sageli suletud magnetringi loomiseks permeameetrit (joon. 12-6). Permeameeter koosneb massiivsest magnetjuhust 1, millesse on võimalik asetada vardakujulist katsekeha 2, ja magneetimismähisest w_1 ning mõõtemähisest w_2 .

Magneetimise põhikõvera ülesvõtmiseks lühistatakse galvanomeeter lüliti k_1 abil ja teostatakse lahtimagneetimine, muutes voolu suunda lüliti UL_2 abil. Seejärel reguleeritakse reostaadiga R_2 välja vool I_1 , mis tekitab väljatugevuse

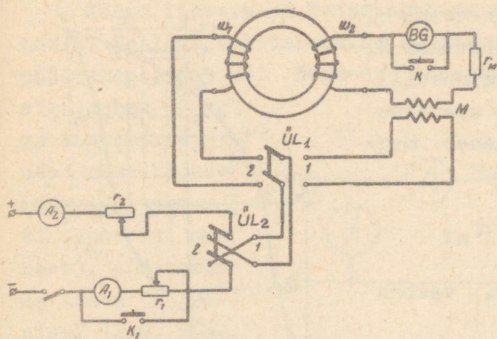
$$H_1 = \frac{I_1 w_1}{\ell},$$

kus ℓ - magnetvoo keskmine pikkus.



Joon. 12-4.

Selleks et kujuneks sümmeetriline hüstereesisilmus tip-
pudega $A_1 - A_1'$ (joon. 12-4), teostatakse magnetiline ette-



Joon. 12-5.

$$\Phi_1 = \frac{C \phi}{2w_2} \alpha_m$$

ja magnetiline induksioon

$$B_1 = \frac{\Phi_1}{S} = \frac{C \phi}{2w_2 S} \alpha_m,$$

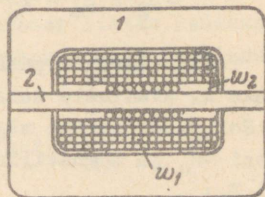
kus S - katsekeha ristlõige.

Järgmiseks korratakse sama mõõtmiskäiku väljatugevusel H_2 jne., kuni on saadud kõikide nõutud punktide koordinaadid H ja B . Seejärel joonestatakse magneetismiskõver.

valmistus vooluga I_1 , muutes ümberlü-
liti $ÜL_2$ abil 10
korda voolu suunda.
Seejärel avatakse
lülitit K ning mõõ-
detakse galvanomeet-
riga magnetvoo muu-
tus ümberlülitit $ÜL_2$
viimisel ühest asen-
dist teise. Kuna

$$\Delta \Phi = 2 \phi,$$

siis



Joon. 12-6.

12-7. Hüstereesisilmuse ülesvõtmine

Katseseadme skeem on sama mis magneetimise põhikõvera
ülesvõtmisel (joon. 12-5). Mõõtmisel reguleeritakse esmalt

väljatugevus H_m (joon. 12-7), teostatakse magnetiline ettevalmistus ja mõõdetakse B_m samuti kui magnetimise põhikõvera ülesvõtmisel. Seejärel vähendatakse väljatugevus väärtuseni H_1 reostaadi R_1 abil, lühistatakse R_1 lüliti k_1 abil, tehakse magnetiline ettevalmistus ja siis avatakse lüliti K_1 . Seejuures väheneb magnetiline induksioon

$$\Delta B_1 = B_m - B_1 = \frac{C \phi}{S_w} \cdot \alpha_{m1}$$

võrra. Väljatugevusele H_1 vastab magnetiline induksioon

$$B_1 = B_m - \Delta B_1.$$

Analoogiliselt määratakse magnetilised induksioonid esimese veerandi teistes punktides.

Näiteks punktile A_2 vastab

$$B_2 = B_m - \Delta B_2,$$

kus

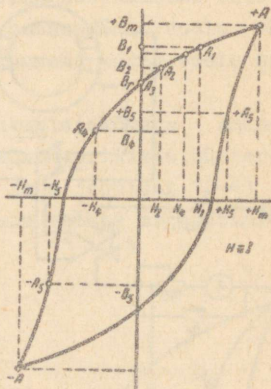
$$\Delta B_2 = B_m - B_2 = \frac{C \phi}{S_w} \cdot \alpha_{m2}.$$

Teise veerandi punktide (näiteks A_4) korral muudetakse lisaks K_1 avamisele samaaegselt ümberlülitiga $ÜL_2$ voolu suunda. Sel juhul muutub magnetvälja tugevus väärtuselt H_m väärtuseni $-H_4$ ja magnetiline induksioon väärtuselt B_m väärtuseni B_4 :

$$B_4 = B_m - \Delta B_4 = B_m - \frac{C \phi}{S_w} \alpha_{m4}.$$

Sel viisil võetakse üles hüstereesisilmuse üks pool. Teine pool joonestatakse esimesega sümmeetrilisena.

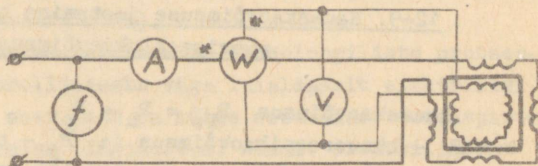
Palju kiiremini saab hüstereesisilmust määrata ferrograafi abil, mis võimaldab hüstereesisilmust vaadelda ostsillograafi ekraanil.



Joon. 12-7.

12-8. Rauaskaovõimsuse mõõtmine

Kõige lihtsam on rauaskaovõimsust mõõta vattmeetri meetodil. Selleks valmistatakse uuritavast materjalist ribad mõõtmega 50x3 cm. Nendest koostatakse 4 paketti kogumasisiga umbes 10 kg ja asetatakse need rauaskadude mõõtmise aparraati (Epsteini aparraat). Mõõteseadme skeem on joonisel 12-8. Magneetimähisele rakendatakse nõutud induksioonile vastav vahelduvpinge



Joon. 12-8.

$$U \approx 4,44fw3B_m,$$

kus f - vahelduvpinge sagedus;

w - magneetimähise keerdude arv;

S - katsekeha ristlõige;

B_m - maksimaalne induksioon.

Mõõtemähisega ühendatakse skeemis näidatud mõõteriistad.

Kuna antud skeemi korral mõõdab vattmeeter lisaks rauaskaovõimsusele ka voltmeetri ja enda pingeharu omatarbevõimsust, siis rauaskaovõimsus

$$P_{FC} = P - (P_V + P_{WU}),$$

kus P - mõõdetud võimsus;

P_V - voltmeetri omatarbevõimsus;

P_{WU} - vattmeetri pingeharu omatarbevõimsus.

Kuna rauaskaovõimsus sõltub maksimaalsest induksioonist ja sagedusest, siis tuleb tingimata märkida, millise sageduse ja maksimaalse induksiooni juures rauaskaovõimsus mõõdeti.

Materjali iseloomustav erirauaskaovõimsus, s.t. kaovõimsus ferromagnetilise massi 1 kg kohta

$$P_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{m},$$

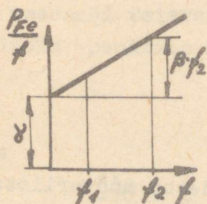
kus m - katsepaketi mass.

12-9. Rauaskaovõimsuse jaotamine hüstereesi- ja pöörisvoolukaovõimsuseks

Rauaskaovõimsus $P_{Fe} = P_h + P_p$, kus P_h - hüstereesikaovõimsus ja P_p - pöörisvoolukaovõimsus.

Hüstereesikaovõimsus on võrdeline sagedusega. Seega $P_h = \alpha f$. Pöörisvoolukaovõimsus on võrdeline sageduse ruuduga. Seega $P_p = Bf^2$.

Rauaskaovõimsuse $P_{Fe} = \alpha f + Bf^2$ jaotamiseks hüstereesi- ja pöörisvoolukaovõimsuseks tuleb määrata tegurid α ja B .



Joon. 12-9.

Jagades võrrandi $P_{Fe} = \alpha f + Bf^2$ mõlemad pooled sagedusega, saame $\frac{P_{Fe}}{f} = \alpha + Bf$, mis on sirge võrrand (vt. joon. 12-9).

α ja B määramiseks mõeldetakse P_{Fe} kahel sagedusel f_1 ja f_2 . Arvutatakse $\frac{P_{Fe1}}{f_1}$ ja $\frac{P_{Fe2}}{f_2}$ ning nende punktide järgi joonestatakse sirge $\frac{P_{Fe}}{f} = F(f)$. Saadud graafikult määratakse algordinaat α ja sirge tõus B . Teades neid tegureid, saab määrata hüstereesikaovõimsuse

$$P_h = \alpha f$$

ja pööriskaovõimsuse

$$P_p = Bf^2$$

teistel sagedustel.

XIII. MITTEELEKTRILISTE SUURUSTE ELEKTRILINE MÕOTMINE

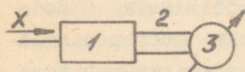
13-1. Üldist

Tänapäeval kasutatakse sageli temperatuuri, rõhu, lahuste kontsentratsiooni, detailide mõõtmete ja muude mitte-

elektriliste suuruste mõõtmiseks elektrilisi mõõteriistu, sest need:

- 1) võimaldavad korraldada pidevat mõõtmist ja mõõtetulemuste registreerimist ning vajaduse korral sooritavad mõõtetulemustega ka matemaatilisi tehteid;
- 2) võimaldavad rakendada distants- ja kaugmõõtmist;
- 3) omavad suurt mõõteulatust, tundlikkust ja täpsust;
- 4) võimaldavad mõõta kiirelt kulgevate protsesside parameetreid (ostsillograafi abil).

Kodumaistes tehastes kasutatakse tehnoloogiliste protsesside ja toodangu kontrollimiseks väga laialdaselt elektrilisi kontrollmõõteriistu, sest need on kõige sobivamad tootmisprotsesside automatiseerimise tingimustes. Ainult elektriliste mõõteriistade kasutamine võimaldab mõõta maapinnalt kosmoselaevas ja selle ümbruses toimuvaid protsesse iseloomustavaid suurusi. Lihtsamad mitteelektriliste suuruste elektrilised



Joon. 13-1.

mõõteriistad (joon. 13-1) koosnevad mõõtemuundist 1, mis muundab temale mõjuva mitteelektrilise suuruse x elektriliseks, ühendusjuhtmeist 2 ja mõõtemehhanismist 3, mille osuti hälve sõltub mõõdetavast mitteelektrilisest suurusest. Enamik neist riistadest on aga tunduvalt komp-

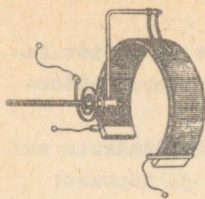
litseeritumad, sisaldades lisaks muundile ja mõõtemehhanismile keerukaid skeeme (sildskeemid, kompensatsiooniskeemid), võimendeid, stabilisaatoreid.

13-2. Mõõtemuundid

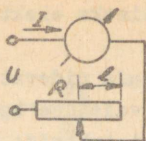
Mõõtemuundid liigitatakse kahte põhigruppi.

1. Parameetrilised muundid. Nendel muutub mõõdetava suuruse muutumisel mingi vooluringi iseloomustav parameeter R , L , M või C . Parameetriliste muunditega mõõteriistad peavad omama toitepinge allika, sest muidu pole võimalik parameetreid mõõta.

2. Generaatormuundid. Nendes tekib mõõdetava mitteelektrilise suuruse toimel elektromotoorne jõud.

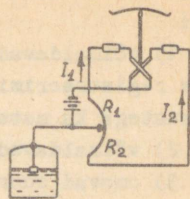


a)



b)

$$I = \frac{U}{R} = f(\ell)$$



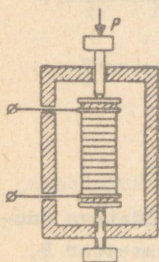
c)

Joon. 13-2.

Parameetrilised muundid liigitatakse omakorda alljärgnevalt.

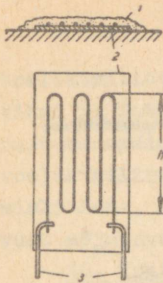
1. Reostaatmuundid (joon. 13-2, a). Mõõdetav suurus mõjub reostaadi liugkontaktile. Tema asendist sõltub vooluringi takistus. Reostaatmuundeid kasutatakse nihete (13-2, b), vedelike nivoo (joon. 13-2, c) jt. suuruste mõõtmiseks. Joonisel 13-2, c kujutatud nivoomõõtjas kasutatakse mõõtemehhanismina logomeetrit. Liugkontakti asendi muutumisel muutub takistuste R_1 ja R_2 suhe ja seega voolude I_1 ja I_2 suhe ning mõõteriista näit.

2. Kontakttakistusmuundid. Põhinevad kontakttakistuse muutumisel mõõdetava suuruse toimel. Näiteks süsiseibidest samba (13-3) takistus sõltub seibi kokkusuurvast jõust P . Kasutatakse deformatsiooni, survejõu ja rõhu mõõtmisel.



Joon. 13-3.

3. Tensotakistid. Põhinevad traadi takistuse muutumisel traadi deformeerimisel. Tensotakisti (joon. 13-4) valmistatakse peenest konstantaan- või kroomnikkeltraadist, mille läbimõõt on 0,02 ... 0,04 mm. Traat kleebitakse paberile 2. Traadi otsad keevitatakse väljaviikide 3 külge. Valmis tensotakisti liimitakse liimiga 1 katsetatavale detailile. Detaili deformeerumisel deformeerub ka temaga jäigalt ühendatud takisti traat ja seega muutub takistus. Kasu-



Joon. 13-4.

tatakse mitmesuguste konstruktsioonide katsetamisel tekkivate sisepingete mõõtmiseks. Koormamisel tekkiiva takistuse suhtelise muutuse järgi on võimalik määrata detailis tekkinud mehaanilise pinge suurust.

4. Termotakistid. Termotakistite takistus sõltub temperatuurist ja seega peale takistit läbiva voolu veel ümbritseva keskkonna omadustest (jahtumistingimustest). Termotakistid valmistatakse peenest 0,02 ...

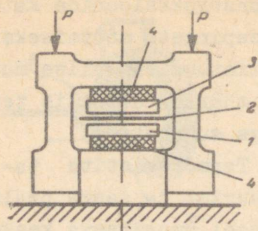
0,06 mm jämedusest plaatina, vask- või nikkeltraadist, mille pikkus on 500 korda suurem läbimõõdust.

Nende takistus on 50 ... 100 . Platinast termotakistid on kasutatavad temperatuuril kuni 500°C, niklist kuni 300°C ja vasest kuni 150°C. Kuna pooljuhtide takistuse temperatuuritegur on kümneid kordi suurem metallide takistuse temperatuuritegurist, siis temperatuuril alla 100°C kasutatakse sageli pooljuhttermotakisteid MMT. Termotakisteid kasutatakse temperatuuri, õhu liikumiskiiruse, gaaside segu koosseisu ja vaakuumi mõõtmiseks.

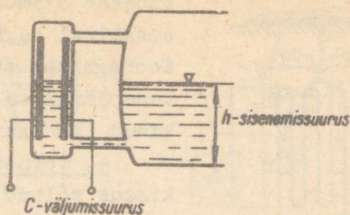
5. Elektrolüütilised muundid. Põhinevad elektrolüüdi takistuse sõltumisel elektrolüüdi kontsentratsioonist. Kasutatakse lahuste kontsentratsioonide mõõtmisel.

6. Magnetostriktsioonmuundid. Põhinevad ferromagnetilise südamik magnetilise läbitavuse ja seega südamikule keritud mähise induktiivsuse sõltumisel südamikus esinevatest mehaanilistest pingetest. Kasutatakse jõu, rõhu ja väikeste lineaarsete nihete mõõtmisel.

7. Mahtuvusmuundid. Põhinevad muundi elektrimahtuvuse sõltumisel mõõdetavast suuruselt. Kuna kondensaatori $C = \frac{\epsilon S}{d}$, siis mõõdetava suuruse mõju mahtuvusele võib toimuda plaatide pindala S, plaatidevahelise kauguse d või plaatidevahelise dielektriku dielektrilise läbitavuse ϵ kaudu. Mahtuvusmuundeid kasutatakse jõu, rõhu, niiskuse, pöördenurga, ainete nivoo jt. suuruste mõõtmisel. Joonisel 13-5 on kujutatud mahtuvuslik dünamomeeter. Jõu P toimel muutub isolatoritele 4 kinnitatud kohtkindla elektroodi 1 ja liikuva elektroodi 3 va-



Joon. 13-5.

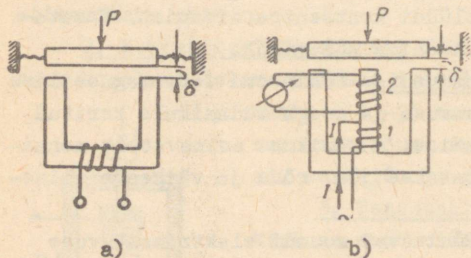


Joon. 13-6.

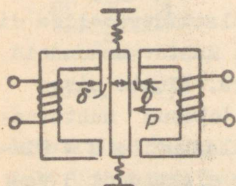
hakaugus ja seega mahtuvus. Vilgukivist plaat 2 on õhupilu läbilöögitugevuse suurendamiseks. Mahtuvus on tavaliselt 10 ... 20 pF. Toidetakse kõrgsageduspingega. Kasutatakse jõudu- de 250 kgf kuni 2500 T mõõtmisel. Mahtuvusliku nivoomõõtja (joon. 13-6) mahtuvus sõltub sellest, millise kõrguseni on elektrootidide vahe täidetud reservuaaris oleva ainega, mille dielektriline läbitavus ϵ erineb õhu omast.

8. Induktiivsusemuundid. Põhinevad induktiivsuse L (joon. 13-7, a) või vastastikuse induktiivsuse M (joon. 13-7, b) sõltumisel muundi magnetringi osade vastastikusest asendist ja

selle kaudu mõõdetavast suurusel. Induktiivsed diferentsiaalmuundid (joon. 13-8) koosnevad kahest poolist, milledest ühe induktiivsuse vähenemisel teise induktiivsus suureneb. Kasutatakse jõu, rõhu ja lineaarsete nihete mõõtmiseks.



Joon. 13-7.

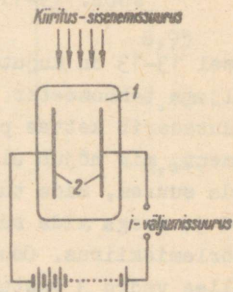


Joon. 13-8.

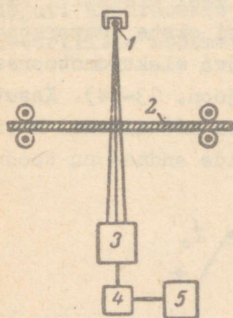
9. Fotoelektrilised muundid. Need põhinevad fotoefektil, s.t. voolu tugevuse või elektromotoorse jõu sõltumisel muundile langevast valgusvoost. Fo-

toelektriliste muundite hulka kuuluvad fototakistid, fotoastikud ja fotoelemendid. Viimatimainitud on tegelikult generaatormuundid, sest nad toodavad elektromotoorset jõudu. Fotoelektrilisi muundeid kasutatakse lineaarmõõtmete, pöörlemiskiiruse, temperatuuri ja vedelike ning gaaside läbipaistvust mõjutavate suuruste mõõtmisel.

10. Ionisatsioonmuundid (joon. 13-9). Ionisatsioonmuundid põhinevad suletud ruumis 1 elektroodide 2 vahel oleva gaasi ioniseerimisel radioaktiivse kiirguse toimel. Ioonide kontsentratsioon ja seega voolu tugevus sõltub kiirguse intensiivsusest, mis omakorda sõltub paljudest teguritest. Kasutatakse gaasi tiheduse, metallplaatide paksuse, hõrenduse jt. suuruste mõõtmiseks. Joonisel 13-10 on kujutatud lindi paksuse mõõtmise põhimõtte. Radioaktiivsest elemendist 1 väljuv kiirgus läbib mõõdetava lindi 2 ja neeldub osaliselt selles. Lindist väljunud kiirgus, mille intensiivsus sõltub lindi paksusest, langeb ionisatsioonmuundile 3, põhjustades elektrivoolu, mille tugevus sõltub lindi paksusest. See vool tekitab pingelangu, mida võimendab võimendi 4. Lindi paksust näitab mõõtemehhanismi 5 osuti. Gaasi rõhümõõtjas (joon. 13-10) radioaktiivse elemendi 1 kiirguse toimel muundis 2 tekkiv ionide kontsentratsioon sõltub gaasi rõhust muundis. Seega sõltuvad takistit 3 läbiv vool ja takistil tekkiv pingelang gaasi rõhust. Saadud pingelang võimendatakse võimendiga 4 ja võimendi väljundiga ühendatud mõõtemehhanism 5 näitab gaasi rõhku.



Joon. 13-9.

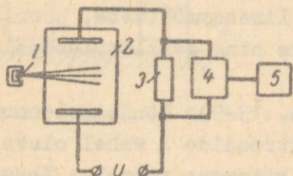


Joon. 13-10.

Generaatormuundid jagunevad omakorda vastavalt elektromotoorse jõu saamisele järgmiselt:

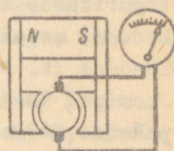
1. Induktsioonmuundid. Induktsioonmuundides mõõdetav suurus muundatakse indutseeritud elektromotoorseks jõuks

$e = -w \frac{d\phi}{dt}$, mis on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega. Induktsioonmuundeid kasutatakse kulgeva või pöörleva liikumise kiiruse mõõtmisel. Joonisel 13-12 on kujutatud induktsioontahhomeetri skeem. Indutseeritud emj. ja seega mõõtemehhanismi hälve sõltuvad ankru pöörlemiskiirusest. Joo-

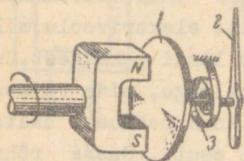


Joon. 13-11.

nisel 13-13 on kujutatud pöörleva magnetväljaga tahhomeeter. Pöörlev püsimagnet indutseerib kettas pöörisvoolud. Pöördemoment, mis mõjub alumiiniumkettale 1, on seda suurem, mida tugevamad on pöörisvoolud ja seega mida suurem on püsimagneti pöörlemiskiirus. Osuti 2 peatub asendis, milles vedru 3 vastumoment ja kettale mõjuv pöördemoment on võrdsed. Seega sõltub hälve püsimagneti pöörlemiskiirusest.

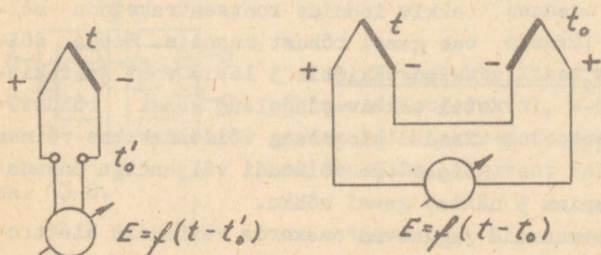


Joon. 13-12.



Joon. 13-13.

2. Termoelektrilised muundid. Põhinevad termoelektrilisel efektil, mis seisneb termopaari otste temperatuuride vahel sõltuva elektromotoorse jõu tekkimisel (joon. 13-14). Kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks. Levinumate termopaaride andmed on toodud tabelis 11.



Joon. 13-14.

Tabel 11

Termopaari materjal	Tähis	Maksimaalne mõdetav temperatuur °C		Termoelektromotoorne jõud mV temperatuuril 100°C, kui külm ühenduskoht on temperatuuril 0°C
		Lühiaegne	Kestev	
1. Vask -konstantaan ³⁸	-	-	300	5,3
2. Vask - kopell	MK	600	400	4,75
3. Raud - kopell	K	800	600	5,75
4. Kromell - kopell	XK	800	600	6,95
5. Kromell- alumell	XA	1300	900	4,10
6. Platinaroodium - plaatina	-	1600	1300	0,64

³⁸ mittestandardne.

3. Piesoelektrilised muundid. Põhinevad piesoelektrilisel efektil, mis seisneb mõnede ainete (kvarts) kristalli tahkude vahel elektrilise pinge tekkimises mehaanilise jõu mõjul. Kasutatakse kiirelt muutuvate jõudude, rõhu ja geometriliste mõõtmete mõõtmisel.

- В.С. Попов. Электромеханические измерения и приборы. Госэнергоиздат, 1963.
- А. Фремке. Электрические измерения. Госэнергоиздат, 1963.
- Ш.М. Алукер. Электроизмерительные приборы. Профтехиздат, 1962.
- Г.М. Терешин. Радиоизмерения. Госэнергоиздат, 1963.
- М.М. Мамонов. Сборник задач по электрическим измерениям. Судпромгиз, 1962.
- Г.П. Шкурин. Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам. Воениздат, 1960.
- Г.П. Шкурин. Справочник по новым электроизмерительным приборам. Воениздат, 1964.
- К.Б. Карандеев. Специальные методы электрических измерений. Госэнергоиздат, 1963.
- П.И. Цветков. Переносные амперметры и вольтметры постоянного тока. Госэнергоиздат, 1963.
- М.Ф. Власов, С.М. Пигин, В.И. Червякова. Сборка и регулировка электроизмерительных приборов. Госэнергоиздат, 1963.
- Н.Г. Вострокнутов. Техника измерений электрических и магнитных величин. Госэнергоиздат, 1956.
- F. Henze. Mehrfarbige Mess-schaltungen der Starkstrom-technik, Fachbuchverlag, 1956.
- Uldine elektrotehnika. Toimetanud R. Hollmann. Eesti Riiklik Kirjastus, 1954.
- I. Elgas. Elektrimõõtmiste käsiraamat. Eesti Riiklik Kirjastus, 1963.
- A. Nesterenko, P. Ornatski. Aparaatide detailid ja sõlmed. Eesti Riiklik Kirjastus, 1962.
- A. Emmo, A. Kõverjalg, V. Paju. Füüsika praktikumi tööjuhendid. Eesti Riiklik Kirjastus, 1961.

S i s u k o r d

Eessõna	3
Sissejuhatus	4
I. Mõõtmismeetodid ja mõõtevead	5
1-1. Mõõtmismeetodid	5
1-2. Mõõtevigade liigitus	6
1-3. Mõõtmistulemuse absoluutne viga	7
1-4. Mõõtmistulemuse suhteline viga	8
1-5. Mõõteriista taandatud viga	9
1-6. Mõõtevea määramine otsese mõõtmismeetodi korral .	10
1-7. Mõõtevea määramine kaudse mõõtmismeetodi korral .	11
II. Elektriliste suuruste mõõdud	15
2-1. Elektromotoorse jõu mõõdud	15
2-2. Elektrilise takistuse mõõdud	17
2-3. Lähteinduktiivsused	19
2-4. Lähtemahtuvused	20
III. Üldteatmed elektrimõõteriistadest	21
3-1. Mõõteriistade klassifikatsioon	21
3-2. Mõõteriistade detailid	23
3-3. Mõõteriista konstant ja tundlikkus	28
3-4. Mõõteriistade omatarbevõimsused	29
3-5. Tähised mõõteriistade skaalal	30
IV. Mõõteriistade mõõtemehhanismid	32
4-1. Mõõtemehhanism ja elektriline skeem	32
4-2. Magnetelektriline mehhanism	32
4-3. Elektromagnetiline mehhanism	37
4-4. Elektrodünaamiline mehhanism	39
4-5. Ferrodünaamiline mehhanism	41
4-6. Elektrostaatiline mehhanism	42
4-7. Induktsioonmehhanism	43
4-8. Logomeetrid	45

V. Voolu ja pinge mõõtmine	48
5-1. Magnetelektrilised ampermeetrid ja voltmeetrid . .	48
5-2. Šundi arvutus ja šuntide liigitus	49
5-3. Universaalse šundi arvutus	51
5-4. Beltakisti arvutus	54
5-5. Temperatuurivea kompenseerimine	55
5-6. Galvanomeetrid	57
5-7. Termoelektrilised mõõteriistad	60
5-8. Alaldiga mõõteriistad	62
5-9. Elektronmõõteriistad	65
5-10. Elektromagnetilised ampermeetrid ja voltmeetrid . .	68
5-11. Elektrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid . .	69
5-12. Ferrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid . . .	70
5-13. Kompensatsioonimeetod	71
5-14. Alalisvoolukompensaatori tööpõhimõte	71
5-15. Voolu ja takistuse mõõtmine kompensaatoriga	73
5-16. Vahelduvvoolukompensaatorid	73
5-17. Automaatkompensaatorid	75
5-18. Mittesiinuseliste pingete ja voolude mõõtmine . . .	76
5-19. Kõrgsageduspingete ja voolude mõõtmine	77
 VI. Mõõtetransformaatorid	 79
6-1. Üldist	79
6-2. Voolutrafod	79
6-3. Pingetrafod	83
 VII. Takistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse mõõt- mine	 85
7-1. Üldist	85
7-2. Takistuse mõõtmine voltmeetri-ampermeetri meetodil	86
7-3. Takistuse mõõtmine voltmeetriga	87
7-4. Takistuse mõõtmine asendusmeetodil	88
7-5. Takistuse mõõtmine ühekordse sillaga	90
7-6. Takistuse mõõtmine kahekordse sillaga	92
7-7. Oommeetrid	94
7-8. Isolatsioonitakistuse mõõtmine	98
7-9. Rikkekohta määramine kaabelliinis	101
7-10. Maandustakistuse mõõtmine	103

7-11. Vahelduvvoolusilla tasakaalutingimused	106
7-12. Induktiivsuse mõõtmine sillaga	107
7-13. Mahtuvuse mõõtmine sillaga	108
7-14. Vibratsioongalvanomeeter	109
7-15. Vastastikuse induktiivsuse mõõtmine	110
VIII. Võimsuse mõõtmine 112	
8-1. Võimsuse mõõtmise meetodid	112
8-2. Võimsuse mõõtmine vattmeetriga	112
8-3. Vattmeetri omatarbevõimsuse mõju	118
8-4. Kolmefaasilise voolu võimsuse mõõtmine	120
8-5. Reaktiivvõimsuse mõõtmine	126
IX. Elektrienergia mõõtmine 128	
9-1. Üldist	128
9-2. Induktsioonarvesti	129
9-3. Aktiivenergia mõõtmine kolmefaasilises võrgus . .	136
9-4. Reaktiivenergia mõõtmine kolmefaasilises võrgus .	137
X. Võimsusteguri ja sageduse mõõtmine 140	
10-1. Võimsusteguri kaudne mõõtmine	140
10-2. Elektrodünaamiline fasomeeter	141
10-3. Vibratsioonisagedusmõõtja	142
10-4. Elektrodünaamiline sagedusmõõtja	143
10-5. Ferrodünaamiline sagedusmõõtja	145
XI. Kiirelt muutuvate suuruste mõõtmine 146	
11-1. Üldist	146
11-2. Elektromehaaniline ostsillograaf	147
11-3. Elektronostsillograaf	149
XII. Magnetilised mõõtmised 153	
12-1. Üldist	153
12-2. Magnetvoo mõõtmine ballistilise galvanomeetriga .	153
12-3. Magnetilise induktsiooni mõõtmine	155
12-4. Ballistilise konstandi määramine	155
12-5. Magnetvoo mõõtmine milliveebermeetriga	156
12-6. Magneetimiskõvera ülesvõtmine	157
12-7. Hüsteresisilmuse ülesvõtmine	159

12-8. Rauaskaovõimsuse mõõtmine	161
12-9. Rauaskaovõimsuse jaotamine hüstereesi- ja pööris- voolukaovõimsuseks	162

XIII. Mitteelektriliste suuruste elektriline

mõõtmine	162
13-1. Üldist	162
13-2. Mõõtemuundid	163
Kasutatud ja soovitatav kirjandus	170

Hind 36 kop.

A
27600
4787166

TÜ RAAMATUKOGU

1 0300 00478716 6