



ELEKTRI- MATERJALID

LABORATOORSETE
TÖÖDE
JUHENDID

TALLINN
1970

TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT
Elektrisüsteemide kateeder

E L E K T R I M A T E R J A L I D

LABORATOORSETE TÖÖDE JUHENDID

I o s a

Koostanud T. Metusala

Tallinn
1970

t

N. V. Gogoli nim.
Tartu Linna
Keskraamatukogu
Inv. nr. 230222
(1601100)

SISSEJUHATUS

Igasuguse elektriseadme mõõtmed, kaal, hind ja töökindlus sõltuvad eelkõige tema valmistamiseks kulutatavate elektrimaterjalide õigest valikust.

Materjalide omadusi õpitakse tundma ja kontrollitakse nende proovimisega.

Elektrimaterjalide laboratoorsete tööde eesmärgiks on tutvuda materjalide proovimise meetoditega ja rea elektrimaterjale iseloomustavate suuruste ja sõltuvuste määramine.

Laboratoorsete tööde edukaks sooritamiseks on vaja põhjalikult tutvuda vastavate loengute ja kirjandusega.

Käesolevad elektrimaterjalide laboratoorsete tööde juhendid sisaldavad üksikute tööde ülesanded, iga töö teoreetilise seletuse ja meetodilisi juhendeid tööks.

Nende juhendite koostamisel on kasutatud järgmist kirjandust:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть I, ГЭИ, 1958 и т. I, часть II, ГЭИ, 1959.

Тареев Б.М., Казарновский Д.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959.

Багалея Ю.В., Руководство к лабораторным работам по курсу электротехнические материалы, Харьков, 1959.

Руководство к лабораторным занятиям по электротехническим материалам, ЛЭТИ, 1954.

DIELEKTRIKUTE ELEKTRIJUHTIVUS

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Kontrollida mõõteseadme korrasolekut.
3. Määrata galvanomeetri konstandid.
4. Mõõta katsekeha mahueritakistus toaniiskes seisundis.
5. Mõõta katsekeha pinnaeritakistus toaniiskes seisundis.
6. Mõõta niiske katsekeha mahueritakistus sõltuvalt pingest.
7. Mõõta katsekeha mahueritakistus ballistilisel meetodil.
8. Koostada aruanne, mis peab sisaldama:
 - a) mõõteseadme skeemi ja kirjelduse,
 - b) mõõteviisi lühikese kirjelduse,
 - c) proovitavate materjalide kirjelduse (tüüp, millest valmistatud, omadused jm.),
 - d) mõõtmisel saadud andmed,
 - e) vajalikud arvutused,
 - f) andmete kokkuvõtte tabelina,
 - g) tulemuste graafiku,
 - h) töö analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

Töö seletus

Kõikidel reaalsedel dielektrikutel on teatav elektrijuhtivus, mis on põhjustatud nii dielektriku enda kui ka dielektriku lisandite, vabade ionide liikumisest.

Et vabad ioonid võivad esineda nii dielektriku massis kui ka tema pinnal, eristatakse dielektriku mahujuhtivust ja pinnajuhtivust.

Dielektriku elektrijuhtivuse (või selle pöördväärtuse - takistuse) suurus on oluliseks isolatsioonimaterjali kvaliteedi näitajaks. Et oleks võimalik võrrelda erinevate dielektrikute juhtivust, on kasutusel mõisted "mahueritakistus" ja

"pinnaeritakistus".

Mahueritakistus on arvuliselt võrdne antud materjalist valmistatud l m pikkuste servadega kuubi takistusega, kui vool läbib kuubi kahte vastastakku.

Tasapinnalise katsekeha puhul homogeenses elektriväljas on mahueritakistus avaldatav valemiga:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} [\Omega \cdot m] , \quad (1.1)$$

kus R_v on katsekeha mahutakistus oomides,

S - elektroodi pind m^2 ,

h - katsekeha paksus m .

Pinnaeritakistus on arvuliselt võrdne antud dielektriku pinnal asuva ruudu takistusega, kui elektroodideks on ruudu vastasküljed.

Pinnaeritakistus on arvatav valemiga:

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l} [\Omega] , \quad (1.2)$$

kus R_s on antud materjali pinnatakistus d m pikkuste paralleelsete elektroodide vahel, mis asuvad üksteisest l m kaugusel.

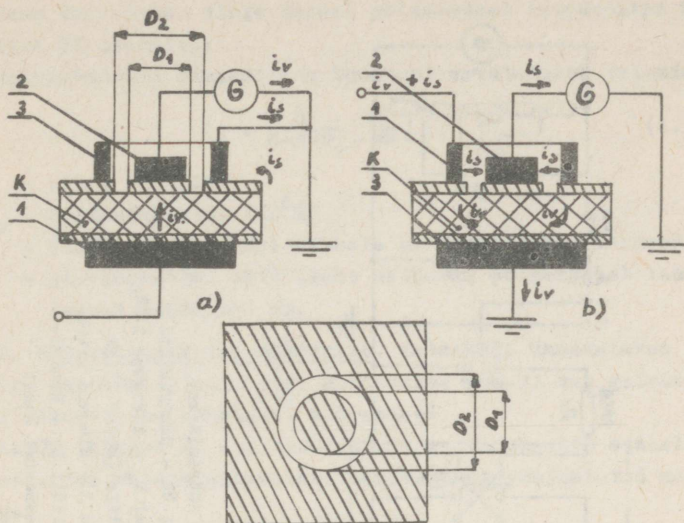
Dielektrikute eritakistuste mõõtmisel kasutatakse alalisvoolu, kuna vahelduvvoolu kasutamisel läbib dielektrikut peale juhtivusvoolu veel polarisatsioonivool.

Dielektriku mahu- ja pinnatakistuse mõõtmiseks kasutatakse nn. vahetu mõõtmise meetodit ja kondensaatori laadimise meetodit.

Esimese meetodi puhul mõõdetakse dielektrikut läbivat voolu. Teades voolu ja dielektrikule rakendatud pinget, saame arvutada takistuse.

Kondensaatori laadimise meetodil laetakse kondensaator läbi uuritava katsekeha ja mõõdetakse kondensaatori laengut. Elektroodid tahkete tasapinnaliste dielektrikute mahu- ja pinnatakistuse mõõtmiseks valmistatakse fooliumist ja kleebitakse katsekehade pinnale.

Nii mahu- kui ka pinnatakistuse mõõtmisel kasutatakse kolmest elektroodist koosnevat elektroodide süsteemi erinevas lülituses (joon. 1). Kaitseelektroodi kaudu eemaldatakse antud mõõtmisel mittevajalik voolukomponent selliselt, et on võimalik mõõta puhast mahu- või pinnatakistust.



Joon. 1. Elektroodide ühendamine:

a) mahutakistuse mõõtmisel, b) pinnatakistuse mõõtmisel.
 K - katsekeha, 1 ja 2 - mõõteelektroodid, 3 - kaitse-
 elektrood.

Metoodilisi juhendeid

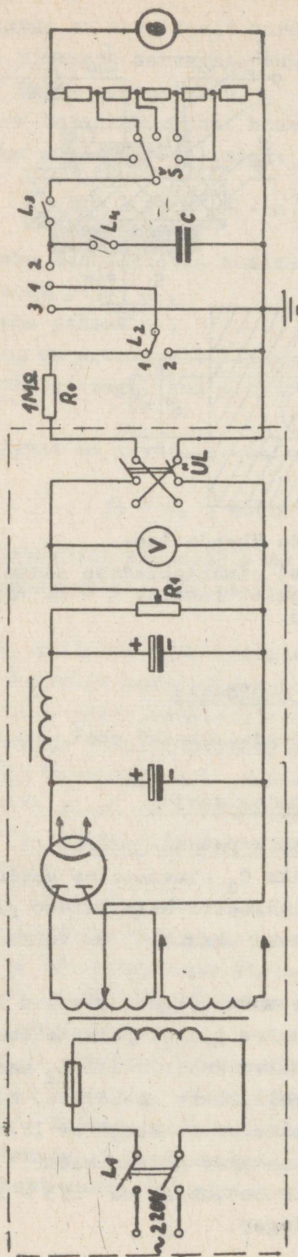
Mõõtmised teha joonisel 2 toodud skeemi abil.

a. Vahetu mõõtmise meetod

1. Galvanomeetri dünaamilise konstandi määramine. Galvanomeetri dünaamiliseks konstandiks C_d nimetatakse volutugevuse väärtust, mille mõjul galvanomeetri kiir kaldub galvanomeetri peeglist 1 m kaugusel asuval skaalal 1 mm võrra kõrvale.

C_d määramiseks lühistatakse mõõteseadmel klemmid 1 ja 2, lülitatakse sisse alaldi, tõstetakse pinget potentsiomeetri R_1 abil vajaliku väärtuseni. Lülitatakse ümberlüli L_2 asendisse 1, seatakse galvanomeetri šunt sellisesse asendisse, mille puhul galvanomeetrit läbib minimaalne vool. Seejärel lülitatakse sisse galvanomeetri lüliti L_3 , seatakse galvanomeetri šunt asendisse, kus kiire kõrvalekalle moodustab ca $1/3 - 1/2$ skaala ulatusest, ning tehakse lugem.

A



Joon. 2. Skeem dielektrikute mahu- ja pinnatakistuse määramiseks.

A - alaldi; L_1 - võrgulüliti; R_1 - reostaat; $ÜL$ - ümberüliti objektile antava pingepolaarsuse muutmiseks; R_0 - takistus $1\text{M}\Omega$; L_2 - ümberüliti pingepolaarsuse muutmiseks; R_0 - takistus $1\text{M}\Omega$; katseobjekti maandamiseks (asend 2); 1, 2 ja 3 - klemmid katseobjekti ühendamiseks; L_3 - galvanomeetri lüliti; L_4 - kondensaatori lüliti; C - kondensaator; δ - galvanomeetri šunt; G - peegalgalvanomeeter.

Sama korratakse pinge teisel polaarsusel (muudetakse ümberlüliti ÜL asendit).

Galvanomeetri dünaamiline konstant arvutatakse valemist:

$$C_d = \frac{U}{n \cdot \alpha \cdot R_0} \left[\frac{A}{mm} \right], \quad (1.3)$$

kus U on pinge voltides,

R_0 - kaitsetakistus ($10^6 \Omega$),

n - šundi tegur (šundi kaanele on kirjutatud suurused $\frac{1}{n}$),

α - galvanomeetri näit (kahe erineval polaarsusel tehtud lugemi keskmine) mm.

2. Mahueritakistuse määramine. Katsekeha ühendatakse skeemiga vastavalt joon. 1-a. Mõõdetakse samuti kui galvanomeetri dünaamilise konstandi määramisel.

Lugem tehakse 60 sek. möödumisel galvanomeetri sisselülitamisest. See väldib polarisatsioonivoolust põhjustatud mõõtmisvigu.

Mahutakistus arvutatakse valemist:

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h} = \frac{U \cdot S}{I \cdot h} = \frac{U}{C_d \alpha n} \cdot \frac{\pi D_1^2}{4h} [\Omega \cdot m], \quad (1.4)$$

kus D_1 on mõõteelektroodi diameeter m,

h - katsekeha paksus m.

3. Pinnaeritakistuse määramine. Katsekeha lülitatakse skeemi vastavalt joon. 1-b ja mõõdetakse samuti kui eelmiselgi juhul, samal pingel.

Pinnaeritakistus arvutatakse valemist:

$$\rho_s = \frac{2\pi U}{C_d \alpha n \ln \frac{D_2}{D_1}} [\Omega], \quad (1.5)$$

kus D_2 ja D_1 on elektroodide diameetrid (vt. joon. 1-a).

b. Kondensaatori laadimise meetod

1. Galvanomeetri ballistilise konstandi määramine. Galvanomeetri ballistiliseks konstandiks C_b nimetatakse laengu hulka, mis, läbides galvanomeetrit, kallutab galvanomeetri kiire galvanomeetri peeglist f m kaugusel asuval skaalal l mm võrra kõrvale. C_b määramiseks lühistatakse mõõteseadmel klemmid 1 ja 2, lülitatakse sisse alaldi, tõstetakse pinget reostaadi

R_1 abil vajaliku väärtuseni. Lülitatakse ümberlülitil L_2 asendisse 1. Galvanomeetri šunt lülitatakse sellisesse asendisse, et galvanomeetrit läbiv vool oleks minimaalne. Lülitatakse sisse lülitil L_4 ja laaditakse kondensaatorit C 1 min. jooksul. Kondensaator laaditud, asetatakse lülitil L_2 keskmisse asendisse, lülitatakse sisse lülitil L_3 ja loetakse skaalalt galvanomeetri kiire maksimaalne kõrvalekalle. Kui kiire kõrvalekalle on liiga väike, siis valitakse galvanomeetri šundi ümberlülitile selline asend, mis annab normaalse kõrvalekalde, ja korratakse mõõtmist.

Sama korratakse pinge teise polaarsuse puhul (lülitil \bar{U} teine asend).

Mõõtmise lõpetatud, lülitatakse välja L_3 ja ümberlülitil L_2 lülitatakse asendisse 2.

Galvanomeetri ballistiline konstant arvutatakse valemist:

$$C_b = \frac{C \cdot U}{n \cdot \alpha_{\max}} \left[\frac{C}{\text{mm}} \right], \quad (1.6)$$

kus C on kondensaatori mahtuvus F,

α_{\max} - maksimaalne galvanomeetri kiire kõrvalekalle kondensaatori tühjendamisel (kahe erineval polaarsusel tehtud mõõtmiste keskmine).

2. Mahueritakistuse määramine. Katsekeha ühendatakse skeemiga vastavalt joon. 1 a. Lülitatakse sisse alaldi, ümberlülitil L_2 lülitatakse asendisse 1, lülitatakse sisse lülitil L_4 ja laaditakse kondensaatorit läbi katsekeha 5 min. jooksul. Seejärel asetatakse lülitil L_2 keskmisesse asendisse, lülitatakse sisse L_3 ning loetakse galvanomeetri ballistiline kõrvalekalle.

Siis lülitatakse välja L_3 , ümberlülitil L_2 lülitatakse asendisse 2, sellega lühistatakse kondensaator ja katsekeha. Pärast katsekeha ja kondensaatori tühjenemist 5 min. jooksul korratakse katsed uuesti pinge teise polaarsuse juures.

Mahueritakistus arvutatakse valemist:

$$\rho_v = \frac{U \cdot t}{C_b \alpha_{\max} \cdot n} \frac{\pi D_1^2}{4h} [\Omega \text{ m}], \quad (1.7)$$

kus t on kondensaatori laadimise aeg sek.

Kirjandus:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 55-59, 68-82.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, ГЭИ, 1959, стр. 18-22.

Тареев Б.М., Казарновский, Д.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959, стр. 7-24.

T ö ö nr. 2

DIELEKTRILISE LÄBITAVUSE JA DIELEKTRIKU KAONURGA MÕOTMINE SCHERINGI SILLAGA

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Seada sild töökorra.
3. Mõõta proovikehade dielektriliste kadude, mahtuvuse ja dielektrilise läbitavuse arvutamiseks vajalikud suurused mitmesugustel pingetel vahelduvvoolu silla MДП abil.
4. Koostada töö aruanne, mis sisaldagu:
 - a) mõõteseadme kirjelduse ja põhimõttelise skeemi,
 - b) mõõtmismeetodi lühikese kirjelduse,
 - c) proovitavate materjalide välise kirjelduse,
 - d) mõõtmisel saadud andmed,
 - e) vajalikud valemid ja arvutused koos seletustega,
 - f) mõõtmisel ja arvutamisel saadud andmete kokkuvõtte tabelina,
 - g) tulemuste graafiku ning
 - h) töö tulemuste analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

Töö seletus

Töö eesmärgiks on dielektriku kaonurga tangensi ja dielektrilise läbitavuse mõõtmise meetoditega tutvumine, kus-

juures kasutatakse vahelduvvoolu silda.

Dielektriline läbitavus (ϵ) ja kaonurga tangens ($\text{tg } \delta$) on põhilisteks isoleermaterjali iseloomustavateks suurusteks.

Dielektriline läbitavus näitab, mitu korda suureneb antud geometriliste mõõtmetega kondensaatori laeng või mahtuvus sama pinge juures, kui elektroodide-vaheline vaakuum asendada antud dielektrikuga.

Reaalses dielektrikus esinevad alati kaod, seepärast on nurk voolu ja pinge vahel dielektrikut läbivas vooluahelas alati väiksem kui 90° .

Dielektriliseks kaonurgaks δ nimetatakse nurka, mis täiendab mahtuvusliku vooluringi voolu ja pinge vahelist nurka 90° ni:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_a}{I_r} \quad , \quad (2.1)$$

kus I_a on voolu aktiivkomponent,

I_r - voolu reaktiivkomponent.

Dielektriliste kadude $P[W]$ suurus mahtuvust $C[F]$ omavas dielektrikus pinge efektiivväärtuse $U[V]$ ja sageduse $f[Hz]$ juures on:

$$P = U^2 \omega C \text{tg } \delta [W] \quad . \quad (2.2)$$

Sellest valemist on näha, et mida suurem on nurk δ nende võrdsete tingimuste juures, seda suuremad on kaod dielektrikus. Seega on $\text{tg } \delta$ dielektrilisi kadusid iseloomustav suurus.

Sagedusel $f = 50 \text{ Hz}$ mõdetakse $\text{tg } \delta$ ja δ väärtusi tavaliselt vahelduvvoolu silla abil.

Joonisel nr. 3 on toodud Scheringi silla põhimõtteline skeem. Skeemi elementideks on:

1. Etaloonkondensaator C_0 .
2. Reguleeritav takisti R_3 .
3. Reguleeritav kondensaator C_4 koos temaga paralleelselt lülitatud takistiga R_4 .
4. Katsetatav dielektrik (R_x ja C_x), mis on kujutatud järjestikuse aseskeemi abil. Sellise aseskeemi puhul:

$$\text{tg } \delta = \omega R_x C_x \quad (2.3)$$

5. Silla diagonaali lülitatud galvanomeeter.

Muutes C_4 ja R_3 suurst, tasakaalustatakse sild, s.t. saavutatakse pingevõrdsus punktides a ja b.

Silla tasakaalu võrranditest

saame:

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3}, \quad (2.4)$$

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_0}. \quad (2.5)$$

Asetades võrrandid (2.4) ja (2.5) võrrandisse (2.3), saame:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \omega C_x R_x = \omega C_4 R_4. \quad (2.6)$$

Joon. 3. Vahelduvvoolu

silla põhimõtteline skeem. Seega on uuritava objekti mahtuvus ja δ avaldatud tuntud suuruste kaudu.

Valides takistuse R_4 suuruseks $R_4 = 3183 \Omega$, saame $f = 50$ Hz puhul:

$$\omega R_4 = 2\pi 50 \cdot 3183 = 10^6$$

ja

$$\operatorname{tg} \delta_x = 10^6 \cdot C_4. \quad (2.7)$$

Järelikult gradueerides mahtuvuste skaala mikrofaradites, saame sealt vahetult lugeda uuritava objekti $\operatorname{tg} \delta$ väärtuse. Dielektriline läbitavus on arvutatav tasapinnalise kondensaatori mahtuvuse valemist:

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{h} [F], \quad (2.8)$$

kus h on dielektriku paksus m ,

S - elektroodi pind m^2 ,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}.$$

Teades C_x ja $\operatorname{tg} \delta_x$ väärtusi, võib määrata kadude suuruse dielektrikus:

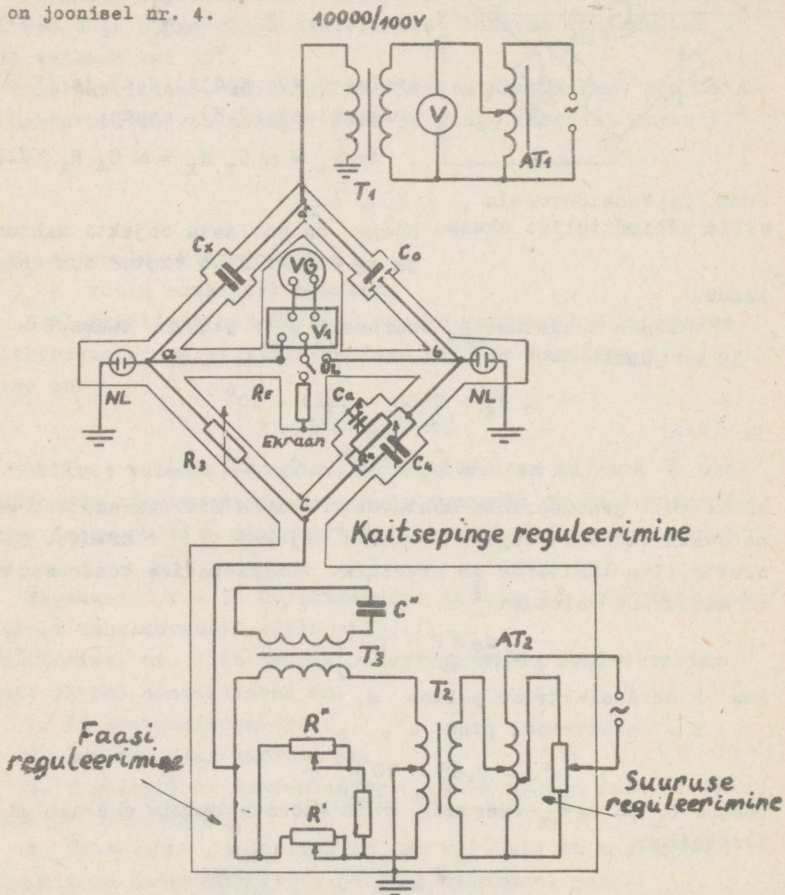
$$P = U^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta_x [W], \quad (2.9)$$

kus pinge U on voltides ja mahtuvus C_x faradites. Erikaod dielektriku mahuühiku kohta määratakse valemist:

$$P = \frac{P}{V} = \frac{U^2 \cdot \omega \cdot C_x \cdot \operatorname{tg} \delta_x}{S \cdot h} \left[\frac{W}{\text{cm}^3} \right] \quad (2.10)$$

Metoodilisi juhendeid

Mõõtmisel kasutatava vahelduvvoolu silla (tüüp MIII) skeem on joonisel nr. 4.



Joon. 4. Vahelduvvoolu silla MIII skeem.

Silda toidetakse vahelduvvoolu võrgust läbi pinget tõstva trafo T_1 .

Peale silla põhielementide - etaloonkondensaatori C_0 (mahtuvusega $C_0 = 95,3$ pF), mõõteobjekti C_x , reguleeritava mahtuvuse C_4 ja reguleeritava takistuse R_3 , takistuse R_4 ($R_4 = 3183 \Omega$) ning vibratsioongalvanomeetri VG - koosneb MIII tüüpi sild veel reast lisaelementidest.

Galvanomeetri tundlikkuse suurendamiseks lülitatakse galvanomeeter silla diagonaali läbi võimendi V_1 , võimendusteguriga ~ 60 .

Operaatori ja mõõteskeemi kaitseks on ühendatud silla nurkadesse a ja b neonlahendid NL. C_x või C_0 läbilöögi puhul lahendid töötavad ja maandavad silla.

Kõik silla elemendid ja juhtmed on ekraaneeritud, mis kaitseb skeemi välismõjude eest.

Takisti R_4 keskpunkti ja ekraani vahele lülitatud kondensaator C_a on ette nähtud silla sümmetreerimiseks, s.o. parasitmahtuvuste "õlg R_4 -ekraan" ja "õlg R_3 -ekraan" võrdsustamiseks. Silla sümmetreerimine toimub eri skeemi järgi silla ülesseadmisel ja perioodiliselt enne suuremaid mõõtmiste seeriaid.

Et kompenseerida läbi isolatsiooni ja kondensaatori C_a ekraanile suunduvaid kaavoole, luuakse ekraani ja silla punkti c vahel kaitsepinge.

Skeem kaitsepinge saamiseks koosneb autotrafost AT_2 , mille abil reguleeritakse kaitsepinge suurust; trafost T_2 , mis pöörab kaitsepinge faasi 180° võrra ja kondensaatorist C" ning kahest takistist R' ja R" koosnevast faasiregulaatorist.

Kaitsepinge suuruse ja faasi õigsust kontrollitakse galvanomeetri abil, lülitades galvanomeetri punkti a ja ekraani vahele läbi takistuse R_e .

Sild MIII on määratud mahtuvuse mõõtmiseks piirides 40 - 20000 pF ja $tg \delta$ mõõtmiseks piirides $1 \cdot 10^{-4}$ - 1,0. Silla viga mahtuvuse mõõtmisel $\pm 0,5\%$ ja $tg \delta$ mõõtmisel $\pm 1,5\%$.

Mahtuvuse ja $tg \delta$ mõõtmise kord

1. Ühendada uuritav objekt skeemi.
2. Kontrollida silla skeemi joon. 4 järgi.
3. Asetada galvanomeetri tundlikkus ja võimendi võimendus minimaalseks.

4. Lülitada ümberlülititi "sild-ekraan" (joonisel 4 tähistatud ÜL) keekmisse asendisse.

5. Kontrollida, et autotrafo AT₁ oleks nullasendis.

6. Juhendaja juuresolekul lülitada sisse silla, võimendi ja galvanomeetri toide.

7. Tõsta sujuvalt pinget autotrafo AT₁ abil vajaliku väärtuseni, samal ajal jälgida neonlahendeid. Neonlahendi süttimisel lülitada kiiresti välja kõrgepingetrafo toide.

8. Teha esialgne mõõtmine, milleks lülitada ümberlülititi asendisse "sild", asetada galvanomeetri tundlikkuse regulaator asendisse 2 ja võimendi regulaator keskasendisse. Vaheldumisi reguleerides R₃ ja C₄ püüda tasakaalustada sild, aeg-ajalt suurendades galvanomeetri tundlikkust ja võimendi võimendust. Pärast tasakaalustamist viia galvanomeetri tundlikkus asendisse 1.

9. Reguleerida kaitsepinge, milleks: a) ümberlülititi lülitada asendisse "ekraan"; b) pöörata algul kaitsepinge regulaatoreid pealkirjaga "Трубо" ja seejärel regulaatoreid pealkirjaga "ТОНКО" *, saavutada galvanomeetri valgusriba väikseim laius, järk-järgult suurendades galvanomeetri tundlikkust. Saavutanud galvanomeetri valgusriba väikseima laiuse, viia galvanomeetri tundlikkus asendisse 1.

10. Teha täpsustatud mõõtmine, milleks lülitada ümberlülititi asendisse "sild" ja korrata punktis 8 näidatud operatsioone. Silla täielikus tasakaaluolekus ümberlülititi "sild-ekraan" asendi muutmine ei mõjuta kiire laiust galvanomeetri ekraanil, mõõtmine loetakse lõpetatuks ja fikseeritakse suurused R₃ ja C₄ (tg δ).

Uuuritava objekti C_x, ε, P ja p määratakse valemitest: (2.4), (2.8), (2.9) ja (2.10).

Kirjandus:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 26-33; 83-95.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, ГЭИ, 1959, стр. 25-29.

Тареев Б.М., Казарновский Д.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959, стр. 28-44.

DIELEKTRILISE LÄBITAVUSE JA KAONURGA
MÕÖTMINE Q-MEETRIGA

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Määrata Q-meetri abil proovikehade dielektriline läbitavus ja kaonurga tangens mitmesugustel sagedustel.
3. Koostada aruanne, mis peab sisaldama:
 - a) mõõteseadme põhimõttelise skeemi ja kirjelduse,
 - b) mõõtmismeetodi lühikese kirjelduse,
 - c) proovitavate materjalide kirjelduse välisvaatluse alusel,
 - d) mõõtmisel saadud andmed,
 - e) vajalikud arvutused koos valemite ja seletusega,
 - f) mõõtmisel ja arvutamisel saadud andmete kokkuvõtte tabelina,
 - g) tulemuste graafiku ning
 - h) töö analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

Töö seletus

Töö eesmärgiks on tutvuda mõningate materjalide ϵ ja $\text{tg } \delta$ sõltuvusega sagedusest.

Kuna laengute ümberpaiknemise aeg kadudeta polarisatsioonil puhul on väga väike, võrreldes pingepolaarsuse muutumisega isegi väga kõrgetel sagedustel, siis neutraalsetel dielektrikutel praktiliselt puudub ϵ sõltuvus sagedusest.

Dipoolsetel dielektrikutel suurendades neile rakendatud pinget sagedust, jääb ϵ algul muutumatuks, kuid alates mingist kriitilisest sagedusest, kus laengud ei jõua ühe poolperioodi vältel täielikult ümber paikneda, hakkab ϵ väärtsus sageduse kasvades langema.

Mitteühtlastes dielektrikutes, näit. niiskunud dielektrikutes, esineb nn. struktuurne (kihtidevaheline) polarisatsioon. Struktuurse polarisatsiooni puhul koguneb laeng dielektriku eri osade lahutuspiiridele (niiskunud dielektriku puhul veetilgakeste pinnale). Laengute ümberpaiknemise aeg struktuurse polarisatsiooni puhul on väga suur, ulatudes vahel minutitesse ja isegi tundidesse. Seega antud dielektriku dielektrilise läbitavuse ϵ (või sellega võrdelise mahtuvuse C) sõltuvuse järgi rakendatud pingele sagedusest saab hinnata antud dielektriku niiskumise astet.

Kõige üldisemal kujul on $\operatorname{tg} \delta$ sõltuvus sagedusest näidatud joon. 5, kus

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \operatorname{tg} \delta = \infty \qquad \lim_{\omega \rightarrow \infty} \operatorname{tg} \delta = 0$$

Nende piirväärtuste füüsikaline sisu:

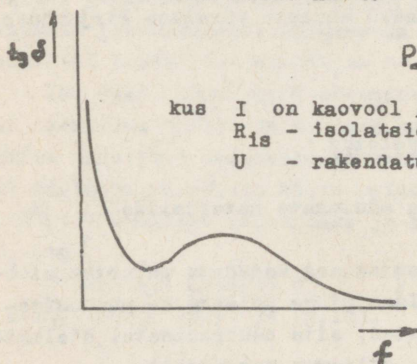
väärtuste $\omega = 0$ ja $\omega = \infty$ puhul valem

$$P = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta \qquad (3.1)$$

peab andma dielektriliste kadude (P) lõplikud väärtused. Kui $\omega = 0$, omandab eelmine valem kuju:

$$\operatorname{tg} \delta \qquad P_m = UI = \frac{U^2}{R_{is}} \qquad (3.2)$$

kus I on kaavool A ,
 R_{is} - isolatsiooni takistus Ω ,
 U - rakendatud pingele V .



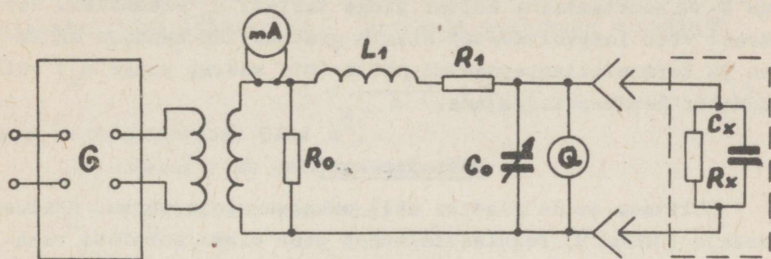
Kõveral (joon. 5) olevad $\operatorname{tg} \delta$ maksimum- ja miinimumväärtused esinevad mitteühtlase (kihilise) dielektriku puhul.

Joon. 5. Dielektrilise kaonurga tangensi teoreetiline sõltuvus sagedusest.

Metoodilisi juhendeid

Mahtuvuse, dielektrilise läbitavuse ja dielektrilise kaonurga mõõtmiseks mitmesugustel sagedustel kasutatakse Q-meetrit KB-1 (joon. 6).

Kõrgsagedusgeneraator (G) sagedusdiapasooniga 50 kHz - 50 MHz on induktiivselt seotud mõõteskeemiga, mis koosneb sidestusinduktiivsusest, vahetatavast poolist (L_1 ; R_1) ja regu-



Joon. 6. Q-meetri KB-1 põhimõtteline skeem.

leeritavast kondensaatorist (C_0); kondensaatoriga on paralleelselt ühendatud lampvoltmeeter (Q), mille skaala on gradueeritud headuse ($Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\text{tg}\delta}$) ühikutes; samuti paralleelselt ühendatakse uuritav kondensaator (C_x ; R_x). Kondensaator C_0 on praktiliselt kadudeta, seepärast mõõteringi ekvivalentne aktiivtakistus ilma uuritava kondensaatorita on R_1 . Sidestuspool on koormatud induktiivsuvaba takistiga R_0 , mille takistus on väga väike, seepärast võib lugeda, et kogu ampermeetriga mõõdetav vool läbib takistust R_0 . Pinge takistuse R_0 klemmidel peab olema kogu mõõtmise vältel konstantne. Selleks hoitakse R_0 läbiv vool mõõtmiste vältel konstantne. Seda kontrollitakse termomilliampermeetri abil.

Lampvoltmeetri näit resonantsi puhul on võrdeline headusega. Pinge kondensaatori C_0 klemmidel:

$$U_{C_0} = I \frac{1}{\omega C_0} \quad (3.3)$$

Vool mõõteringis resonantsi puhul ilma uuritava kondensaatorita:

$$I = \frac{U_0}{R_1} \quad (3.4)$$

Peale selle

$$\frac{1}{\omega C_0} = \omega L \quad (3.5)$$

seepärast

$$U_c = \frac{\omega L_1}{R_1} U_0 = Q_1 U_0, \quad (3.6)$$

kus U_0 on konstantsena hoitav pinge takisti R_0 klemmidel. Seepärast võib lampvoltmeetri skaala gradueerida headuse ühikutes ja termomilliampermeetri näitu (mis määrab pinge U_0) võib vaadelda headuse kordajana.

Mõõtmise kord

Lülitada seade pistiku abil vahelduvvoolu võrku. Headuse kordaja (МНОЖ. Q) reguleerimisnupp peab olema äärmises vasakus asendis ja võrgulüliti asendis "välja lülitatud". Q-meetri vasakpoolsete klemmidega ühendatakse nõutav pool, sagedusdiapasoonide ümberlülititi (ДИАПАЗОН) lülitatakse vastavasse asendisse ja reguleeritakse nupu "ЧАСТОТА" abil nõutav sagedus (vasakpoolsel skaalal).

Lülitada sisse võrgulüliti, ja pärast seadme soojenemist 1 - 2 min. kestel võib alustada mõõtmist.

Headuse kordajate jäme- ja peenreguleerimisnuppude (МНОЖ. Q ГРУБО, МНОЖ. Q ПЛАВНО) abil seada mõõteriista МНОЖИТЕЛЬ Q osuti asendisse 1,5.

Reguleerides kondensaatori C_0 mahtuvust nupuga "ЕМКОСТЬ", häälestatakse mõõtekontuur resonantsi generaatori sagedusega ja fikseeritakse Q_1 ja C_1 väärtused.

Resonantsi olukorras näitab lampvoltmeeter maksimaalset pinget (mõõteriista Q maksimaalne näit).

Seejärel ühendatakse uuritav kondensaator Q-meetri parempoolsete klemmidega, häälestatakse mõõtekontuur uuesti resonantsi generaatori sagedusega eespool kirjeldatud viisil ning fikseeritakse Q_2 ja C_2 väärtused.

Mõõtmisi korratakse analoogiliselt mitmesugustel sagedustel.

Enne pooli vahetamist tuleb alati pöörata headuse kordaja (МНОЖ. Q) reguleerimisnupp äärmisse vasakusse asendisse ja välja lülitada võrgulüliti.

Uuritava kondensaatori mahtuvus ja dielektriku $tg \delta$ arvutatakse valemitest:

$$C_x = C_1 - C_2, \quad (3.7)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1 \cdot Q_2} \cdot \frac{C_1}{C_1 - C_2} . \quad (3.8)$$

Teades kondensaatori mõõtmeid, saab uuritava materjali dielektrilise läbitavuse ϵ arvutada mahtuvuse valemist:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{h} [F] , \quad (3.9)$$

kus S on elektroodi pind m^2 ,
 h - dielektriku paksus m ,
 ϵ_0 - elektriline konstant.

Kirjandus:

- Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 26-40, 83-85.
 Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, ГЭИ, 1959, стр. 25-26, 37-39.
 Тареев Б.М., Казарновский Л.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959, стр. 28-34, 50-57.

Т 8 8 nr. 4

DIELEKTRIKUTE FÜSİKALISED OMADUSED

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Mõõta tahke (kristalse ja amorfse) dielektriku pehmenemistäpp kuuli ja rõnga meetodil.
3. Mõõta kristalse ja amorfse materjali temperatuuri muutus jahtumisel, sõltuvalt ajast.
4. Mõõta õli viskoossus Engleri järgi, sõltuvalt temperatuurist.
5. Koostada töö aruanne, mis peab sisaldama:
 - a) katseriistade skitsid,

- b) mõõtmismeetodite lühikese kirjelduse,
- c) proovitavate materjalide lühikese kirjelduse,
- d) mõõtmisel saadud andmed,
- e) vajalikud arvutused koos valemitega,
- f) viskoossuse ümberarvestuse Engleri kraadidest Stokesidesse,
- g) saadud andmete kokkuvõtte tabelina,
- h) tulemuste graafiku ning
- i) töö analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

Töö seletus

Isoleermaterjalide füüsikalised omadused võib jagada kahte gruppi.

Esimesse gruppi kuuluvad omadused, mis on omased kõigile või enamusele dielektrikutele, nagu tihedus (erikaal), ruumpaisumistegur, soojusjuhtivustegur, kuumuskindlus, hügrooskoopsus.

Teise gruppi kuuluvad omadused, mis iseloomustavad ainult üksikuid materjale. Siia kuuluvad viskoossus, leektäpp, poorsus, sulamistemperatuur, pehmenemistäpp jt.

Antud töös määratakse erinevate ainete jahtumiskõver, pehmenemistäpp ja viskoossus.

Kristalsetel ainetel on täpselt määratud sulamis- ja tahkumistemperatuur, sellel temperatuuril toimub aine agregaatoleku järsk muutumine, kusjuures temperatuur on selle protsessi vältel konstantne.

Amorfsetel ainetel ei ole kindlalt määratud sulamis- ja tahkumistemperatuuri, aine läheb järk-järgult ühest olekust teise teatud temperatuurivahemikus. Neil ainetel asendatakse sulamistemperatuuri mõiste pehmenemistäppiga.

Pehmenemistäpp amorfsetel ainetel on tinglik suurus, mille arvuline väärtus oleneb meetodist, mida kasutatakse pehmenemistäpi määramisel. Laboratooriumis määratakse pehmenemistäpp nn. rõnga ja kuuli meetodil. Rõngas täidetakse uuritava ainega, asetatakse tema pinnale terasest kuulike ja soojendatakse

aeglaselt. Temperatuuril, mille juures aine pehmeneb sedavõrd, et kuul vajub temast läbi ja puudutab kontrollplaati, loetaksegi antud aine pehmenemistäpiks.

Viskoossus ehk sisehõõrdumine omab erilist tähtsust trafoõli juures, kuna trafoõli paljudes seadmetes, eelkõige trafodes, ei ole ainult isoleerivaks aineks, vaid ka seadme jahutamise toimub õli vahendusel. Soojusülekandeprotsessid sõltuvad trafoõli viskoossusest, seega on trafo soojuslikul arvutamisel vaja teada erinevate õli sortide viskoossust ja selle sõltuvust temperatuurist.

Viskoossusel on suur tähtsus ka õlilülitite juures, kus õli moodustab nii isoleeriva kui ka kaart kustutava keskkonna. Õli viskoossuse suurenemine vähendab kontaktide liikumise kiirust, suurendades seega kaare põlemise aega võimsuslülitis, mis võib põhjustada avariid.

Üheks levinumaks viskoossuse määramise meetodiks on Engleri meetod, mis annab tingliku viskoossuse Engleri kraadides (E°).

Viskoossuseks Engleri järgi nimetatakse 200 milliliitri, temperatuuriga t , uuritava vedeliku Engleri viskosimeetrist väljavoolamise aja (τ_t) suhet sama hulga destilleeritud vee väljavoolamise aega ($\tau_v = 50 - 52$ sek.) temperatuuril 20° C.

$$E^{\circ} = \frac{\tau_t}{\tau_v} \quad (4.1)$$

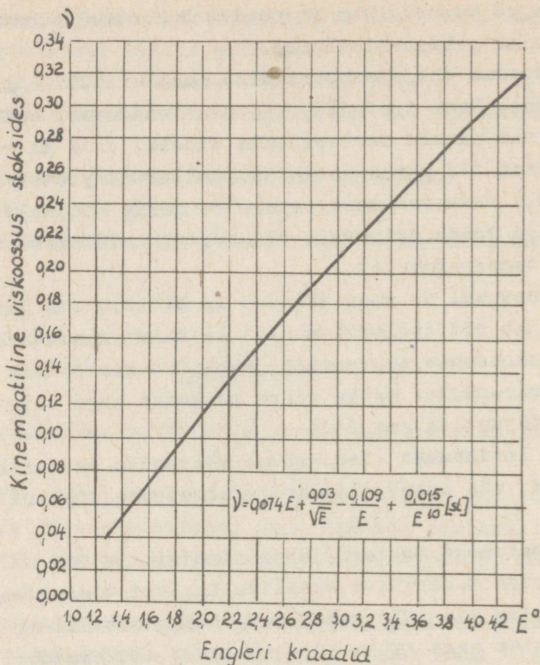
Teades viskoossust Engleri järgi, on võimalik arvutada uuritava aine kinemaatiline viskoossus järgmise empiirilise valemi abil:

$$\nu = 0,074E^{\circ} + \frac{0,03}{\sqrt{E^{\circ}}} - \frac{0,109}{E^{\circ}} + \frac{0,015}{E^{10}} [\text{stoks}] \quad (4.2)$$

Selle valemi järgi on koostatud graafik üleminekuks Engleri kraadidelt stoksidesse (vt. joon. 7).

Metoodilisi juhendeid

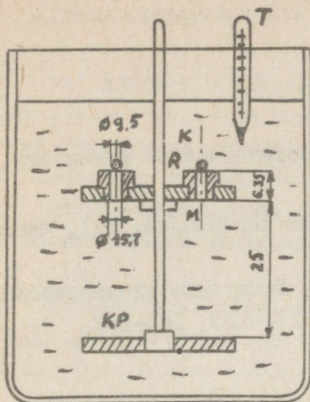
Dielektrikute pehmenemistäpi määramiseks kasutatakse joo-nisel nr. 8 toodud seadet. Nõu, millesse on asetatud seade,



Joon. 7. Viskoossuse ümberarvutamine Engleri kraadidest stoksidesse.

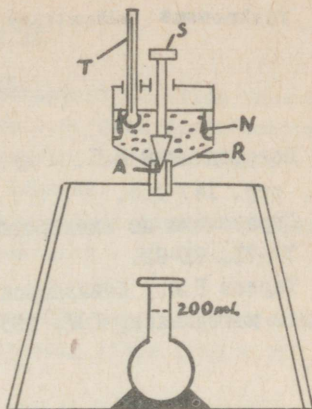
täidetakse veega. Soojendatakse kiirusega 5° C/min. Pehmene-
mistäpiks loetakse temperatuuri, mille juures kuulike või te-
ma poolt väljatõrjutav uuritav materjal puudutab kontrollplaa-
ti.

Trafoõli viskoossuse määramiseks kasutatakse BY-tüüpi viskosimeetrit (joon. 9). Viskosimeeter koosneb sfäärilise põhjaga reservuaarist (R), kuhu valatakse uuritav vedelik. Reservuaari põhjas asub silindriline väljavooluava (A) diameetriga 2,8 mm ja pikkusega 20 mm. Väljavooluava on suletav sulguriga (S). Reservuaari siseseinal on vedelikunivoo näitajateks kolm teravikku (N), millede järgi saab kontrollida ka seadme horisontaalsust. Väljavooluava alla asetatakse mõõte-
kolb.



Joon. 8. Pehmenemistäpi määramise seade.

K - teraskuulike; R - valgevasest rõngas; KP - kontrollplaat; T - termomeeter; M - uuritav materjal.



Joon. 9. Viskosimeeter, tüüp BY.

A - väljavooluava; T - termomeeter; S - sulgur; N - teravikud; R - reservuaar.

Reservuaari valatakse uuritav vedelik nii, et vedeliku pind langeks kokku teravikega. 2 - 3 minuti möödumisel mõõdetakse temperatuuri ja määratakse õli viskoossus toatemperatuuril. Selleks asetatakse mõõtekolb väljavooluava alla, avatakse sulgur ja samal ajal käivitatakse sekundimõõtja. Kui 200 ml vedelikku on reservuaarist välja voolanud, seisatakse sekundimõõtja ja suletakse väljavooluava sulguriga. Lugem mõõtekolvi jaotustelt tehakse meniski alumise ääre järgi.

Täpse tulemuse saamiseks mõõdetagu vähemalt kaks korda ja arvutatagu väljavooluaja aritmeetiline keskmine antud temperatuuril. Pärast viskoossuse määramist toatemperatuuril, määratakse viskoossus kõrgematel temperatuuridel.

Selleks lülitatakse sisse soojendus. Ühtlase soojenemise tagamiseks segatakse vedelikku välimises reservuaaris.

Temperatuuril, mis on 2 - 3° madalam etteantud temperatuurist, vähendatakse (või lülitatakse täielikult välja) soojendust ja oodatakse 2 - 3 minutit, mille vältel uuritava vedeliku temperatuur tõuseb paari kraadi võrra välimisest reservuaarist edasiantava soojuse tõttu.

Viskoossus määratakse samuti kui toatemperatuuril.

Kirjandus:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 147-158.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, стр. 70-71, 81-82.

Тареев Б.М., Казарновский Д.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959, стр. 131-133, 165-169.

T Õ Õ nr. 5

SENJETTELEKTRIKUD

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Gradueerida mõõteseadme ekraani teljed.
3. Mõõta senjettkondensaatori Curie' täpp.
4. Fikseerida senjettkondensaatori hüstereesisilmus toatemperatuuril (dielektriliste kadude leidmiseks).
5. Mõõta vajalikud andmed senjettkondensaatori kõverate $q = f(U)$, $D = f(E)$ ja $\epsilon_r = f(E)$ kujundamiseks.
6. Koostada paberkondensaatori kadude ellipsoid mitmesugustel temperatuuridel (dielektriliste kadude leidmiseks).
7. Koostada aruanne, mis peab sisaldama:
 - a) mõõteseadme skeemi ja kirjelduse,
 - b) mõõtmisviiside kirjeldused,
 - c) proovitavate materjalide ja esemete kirjelduse välisvaatluste alusel,
 - d) mõõtmisel saadud andmed,
 - e) andmete läbitöötamise koos valemitega,
 - f) arvuliste andmete kokkuvõtte tabelina,
 - g) töö tulemuste graafiku ning
 - h) töö analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

Töö seletus

Kui pinge all oleva õhkkondensaatori plaatide vahele asetada dielektrik, siis see polariseerub. Polariseerimisprotsessi tulemusena suureneb kondensaatori mahtuvus, kuna tema elektroodidel tekivad täiendavad laengud.

Polariseerimise nähtus kutsutakse enamikel dielektrikutel esile kondensaatori mahtuvuse suurenemise 2 - 10 korda ($\epsilon = 2 + 10$).

Erilise grupi dielektrikuid moodustavad nn. senjettelektrikud. Siia kuuluvad näit. senjetteool, tibar ($\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$) ja strontsiumtitanaat ($\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$).

Senjettelektrikute dielektriline läbitavus sõltub mitte-lineaarselt elektrivälja tugevusest ja temperatuurist.

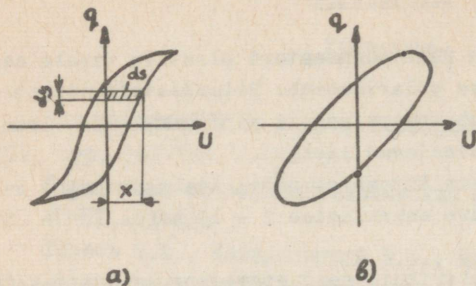
Senjettelektrikute dielektriline läbitavus on väga suur, ulatudes mõnedel materjalidel kuni 40000. See on tingitud nendes dielektrikutes esinevast spontaansest polariseerimisest.

Oma suure dielektrilise läbitavuse tõttu võimaldavad senjettelektrikud ehitada väikeste gabariitidega suure mahtuvusega kondensaatoreid.

Elektrivälja tugevuse ja dielektrilise läbitavuse (s.t. kondensaatorile rakendatud pinge ja mahtuvuse) mittelineaarne sõltuvus võimaldab senjettelektrikuid kasutada elektronlampide asemel dielektrilistes võimendites, sageduse kordistajates, stabilisaatorites, impulssgeneraatorites. Senjettelektrikud on neis seadmes elektronlampidest töökindlamad.

Temperatuuri tõusuga kasvab senjettelektrikute dielektriline läbitavus kuni nn. Curie' täpini. Temperatuuri tõustes üle Curie' täpi senjettelektrikute dielektriline läbitavus langeb järsult. Dielektrilise läbitavuse, seega ka mahtuvuse sõltuvus temperatuurist võimaldab kasutada senjettelektrikuid temperatuuri mõõtmise ja automaatse reguleerimise seadmes.

Vahelduvas väljas esineb senjettelektrikutel hüstereesinähtus, s.o. elektrilise nihke mahajäämine elektrivälja tugevusest, mis näitab lisakadude olemasolu (doomenite orientatsiooniks kulutatud energia). Nende kadude suurust iseloomustab hüstereesisilmuse pind (vt. joon. 10-a).

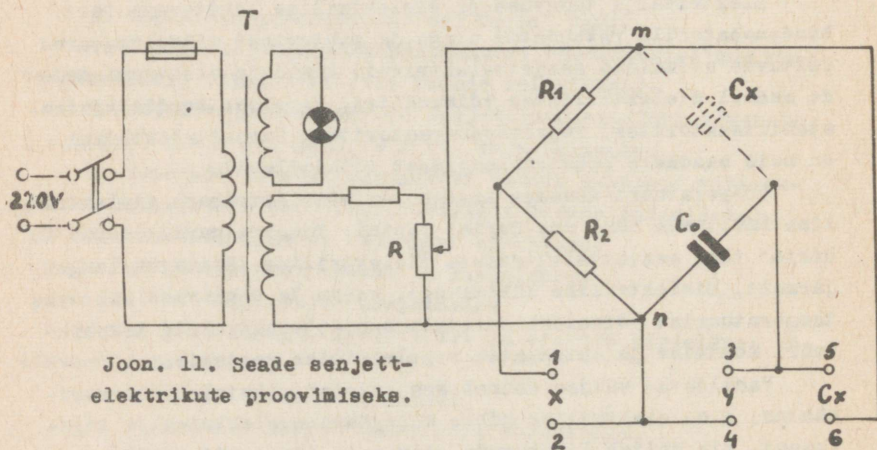


Joon. 10. Laengu ja pinge sõltuvus
a) tibarkondensaatoril ja b) paber-
kondensaatoril.

Energiakadudega seotud polarisatsiooniga dielektrikutel (näit. paber-õli isolatsioon) on laengu- ja pingekõver ellipsikujuline (joon. 10-b), kus ellipsi pind on proportsionaalne kadudega ühe perioodi vältel.

Metoodilisi juhendeid

Senjettelektrikute proovimiseks kasutatakse joon. 11 toodud skeemi koos elektronostsillograafiga. Seade koos-



Joon. 11. Seade senjettelektrikute proovimiseks.

neb kahest takistist R_1 ja R_2 , etaloonkondensaatorist $C_0 = 0,25 \mu\text{F}$, reostaadist R ja trafost T . Klemmide 1, 2 ja 3, 4 abil ühendatakse seadmega ostsillograafi X- ja Y-plaadid ning

klemmide 5 ja 6 abil uuritav objekt.

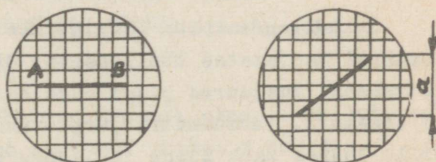
a. Ostsillograafi telgede gradueerimine

Gradueerimisel ühendatakse voltmeeter klemmidele 4 ja 6 ning kasutatakse tuntud mahtuvusega kondensaatoreid C_1 ja C_2 , mis ühendatakse kordamööda uuritava objekti asemel klemmidele 5 ja 6. Ostsillograafi horisontaalplaatidele antakse pinge aktiivtakistuselt R_2 , mis on proportsionaalne voltmeetriga mõõdetava pingega punktide mn vahel.

Pingemastaap leitakse ilma kondensaatoriteta C_1 ja C_2 , pingemastaabi m_u leidmiseks jagatakse voltmeetriga mõõdetud pinge max. väärtus U_{max} ostsillograafil saadud sirglõigu AB (vt. joon. 12 a) poole pikkusega.

$$m_u = \frac{2 U_{max}}{AB} \left[\frac{V}{cm} \right] \quad (5.1)$$

Ostsillograafi vertikaalplaatidele antakse potentsiaalide vahe etaloonkondensaatori C_0 plaatidelt. Et tema mahtuvus on teada, siis gradueeritakse vertikaaltelg laengu ühikutes. Selleks ühendatakse klemmidele 5 ja 6 teadaoleva mahtuvusega kondensaatorid C_1 ja C_2 . Nüüd on võimalik arvutada kondensaatorile C_0 langeva pinge max väärtus U_{01} ja laeng temal q_0 , teades kondensaatorite C_0 ja C_1 mahtuvust ja pinget U_{max} punktide mn vahel.



Joon. 12. Ostsillograafi telgede gradueerimine:

- a) pingemastaabi leidmine, b) laengumastaabi leidmine.

$$U_{01} = U_{max} \frac{C_1}{C_0 + C_1} \quad (5.2)$$

$$q_0 = C_0 U_{01} = q_1. \quad (5.3)$$

Sama laeng on ka uuritava objekti C_x asemele ühendatud

kondensaatori C_1 plaatidel, kuna need kondensaatorid on lülitatud järjestikku.

Analoogilise arvutusega leiame ka laengu q_2 , ühendades nüüd klemmidele 5 ja 6 kondensaatori C_2 .

Laengumastaap leitakse mõlemal juhul arvatud laengu (q_1 või q_2) jagamisel ostsillograafi ekraanilt mõõdetud pikkusega $a/2$ (vt. joon. 12-b).

$$mq = \frac{2q}{a} \left[C/cm \right] . \quad (5.4)$$

Suurema täpsuse saavutamiseks arvutatakse kahe leitava laengumastaabi keskmine.

Etaloonkondensaatori C_0 mahtuvus valitakse tunduvalt suurem kui C_x , seega võib edaspidi pingelangu etaloonkondensaatoril jätta arvestamata.

Pidada silmas, et kondensaatorid võib lülitada klemmidele 5 ja 6 ainult siis, kui seade on välja lülitatud!

b. Senjettkondensaatori Curie' täpi määramine

Senjettkondensaator lülitatakse seadme klemmidele 5 ja 6, seejärel asetatakse kondensaator Olivanni ja lülitatakse sisse küttekeha, kusjuures jälgitakse hüstereesisilmust ostsillograafi ekraanil. Termomeetri järgi tehakse kindlaks temperatuur, mille juures kaob pinge ja laengu ebalineaarne sõltuvus. Seda temperatuuri nimetataksegi Curie' täpiks.

c. Senjettkondensaatori dielektriliste kadude

määramine toatemperatuuril

Senjettkondensaatori dielektriliste kadude leidmiseks joonestatakse üles tema hüstereesisilmus (vt. joon. 10-a).

Hüstereesisilmuse pindala vastavas mastaabis annab aktiivenergia kaod ühe perioodi vältel:

$$W = \int_0^T u_x i dt , \quad (5.5)$$

kus u_x ja i on pinge ja voolu hetkväärtused.

Hüstereesisilmuse pindala element (joon. 10-a):

$$dS = xdy,$$

kus

$$x = \frac{U_x}{m_u},$$

$$dy = \frac{dq}{m_q} = \frac{idt}{m_q}.$$

Seega

$$dS = xdy = \frac{u_x}{m_u} \cdot \frac{idt}{m_q}.$$

Hüstereesisilmuse kogu pindala:

$$S = \frac{1}{m_u \cdot m_q} \int_0^T u_x idt.$$

Võrreldes seda energiakao valemiga, saame

$$W = m_u \cdot m_q S. \quad (5.6)$$

Kui m_u ühikuks on V/cm, m_q ühikuks C/cm ja pindala ühikuks cm^2 , siis saame aktiivenergia kaod perioodi vältel W sek-tes.

Arvestades, et võimsuse kaod:

$$P = U_x^2 \omega C_x \operatorname{tg} \delta \quad (5.7)$$

ja

$$W = PT; \quad T = \frac{1}{f}; \quad \omega = 2\pi f,$$

saame valemi uuritava dielektriku $\operatorname{tg} \delta$ määramiseks:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{W}{2\pi U_x^2 C_x}, \quad (5.8)$$

kus U_x on pinge efektiivväärtus C_x -l voltides,

C_x - uuritava kondensaatori mahtuvus faradites,

W - energia vattsekundites.

Samal viisil leitakse dielektrilised kaod paber-kondensaatori kadude ellipsist.

d. Kõverate $q = f(U)$, $D = f(E)$ ja $\epsilon = f(E)$ kujundamiseks joonestatakse üles senjettkondensaatori hüstereesisilmus mitmesugustel pingetel.

Senjettkondensaatori mahtuvuse leiame hüstereesisilmuse laengu ja pinge maksimaalväärtuste järgi:

$$C_x = \frac{Q_x \max}{U_x \max} \quad (5.9)$$

Teades kondensaatori mõõtmeid, saab arvutada suhtelise dielektrilise läbitavuse, väljatugevuse ja dielektrilise nihke valemitest:

$$\epsilon = \frac{C_x d}{\epsilon_0 S} \quad (5.10)$$

$$E = \frac{U}{d} \quad (5.11)$$

$$D = \epsilon_a E, \quad (5.11)$$

kus: C_x on proovitava kondensaatori mahtuvus F,
 d - kondensaatori dielektriku paksus m,
 S - kondensaatori plaadi pind m²,
 U - rakendatud pinge V.

Kirjandus:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 51-55, 83-95, 105-106, 337-339.
 Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, ГЭИ, 1959, стр. 54-56.

TRAFOÖLI

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Tutvuda katseseadmetega.
3. Määrata trafoöli leektäpp.
4. Määrata trafoöli elektriline tugevus vastavalt standardile.
5. Koostada aruanne, mis peab sisaldama:
 - a) seadme skeemi ja kirjelduse,
 - b) mõõtemetodi lühikese kirjelduse,
 - c) mõõtetulemused ja
 - d) tulemuste analüüsi.

Töö seletus

Trafoölikas nimetatakse väikese viskoossusega läbipaistvat hästi puhastatud õli, mis on saadud nafta utteproduktina.

Trafoöli heade isoleerivate omaduste tõttu kasutatakse teda laialt trafodes, võimsuslülitites, kondensaatorites, läbiviikisolaatorites jm.

Trafoöli elektrilist tugevust ei määra ainult õli enda omadused, vaid see sõltub tugevasti temas leiduvate lisandite hulgast ja liigist. Eriti tugevasti halvendab trafoöli kvaliteeti õlis olev niiskus.

Trafoöli hoidmisel, transportimisel ja eksploatatsioonis niiskuse hulk õlis suureneb, mis vähendab tema elektrilist tugevust.

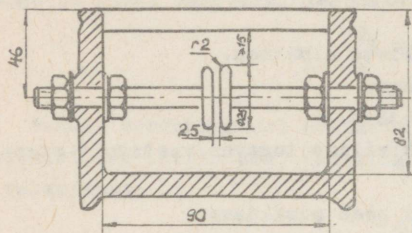
Eksploatatsioonis elektrivälja, kuumenemise ja õhuhapniku mõjul trafoöli "vananeb" ja tema elektriline tugevus väheneb järjest.

Enne trafoöli valamist seadmesse ja eksploatatsioonis kontrollitagu tema elektrilist tugevust.

Trafoöli elektrilise tugevuse näitaja, s.o. tema kokkuleppeline kvaliteet, määratakse õli proovimisel läbilöögile stan-

dardses lahendajates vastavalt GOST 6581-53.

Trafoöli elektriline tugevus määratakse messingelektroodidega portselannõus (joon. 13).



Joon. 13. Anum trafoöli elektrilise tugevuse määramiseks.

Trafoöli elektrilise tugevuse määramisel tehakse kuus läbilööki. Arvestatakse viimase viie katse läbilöögi pingete aritmeetilist keskmist. Esimene läbilööki ei lähe arvesse, kuna elektroodidel võis olla tolmukübemeid, mis moonutavad katse tulemusi. Läbilöögipingete aritmeetilise keskmise järgi, vastavalt ГОСТ-10121-62 (tab.1), otsustatakse kas antud trafoöli on kõlblik kasutamiseks antud pingega seadmeis.

T a b e l 1

Seadme tööpinge	Minimaalne õli läbilöögipinge [kV] standardses lahendis vahetult pärast õli seadmesse valamist
60 kuni 220 kV	40
15 kuni 35 kV	30
kuni 15 kV	25

Läbilöögi väljatugevus arvutatakse valemist

$$E = \frac{U}{d} \left[\frac{\text{kV}}{\text{cm}} \right],$$

kus: U on läbilöögipinge kV,

d - elektroodide vahekaugus cm.

Peale trafoöli elektrilise tugevuse on üheks trafoöli isoleerimustavaks suuruseks tema leektäpp. Trafoöliga täidetud sead-

meis oli kuumeneb ja juhusliku sädeme või kaare tõttu (näiteks halva kontaktühenduse puhul) võivad oli aurud süttida. Seega trafo oli leektäpp iseloomustab tema tuleohtlikkust. Trafo oli leektäpp ei või olla alla $+135^{\circ}$ C.

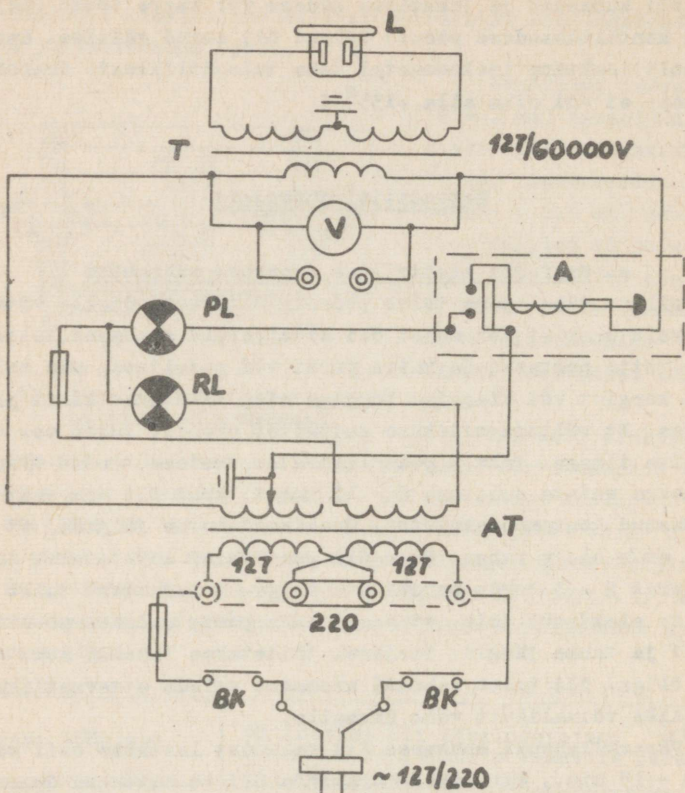
Metoodilisi juhendeid

a. Trafo oli elektrilise tugevuse määramine

Erilist tähelepanu tuleb pöörata oli proovi õigele võtmisele. Trafo paagist või muust oli sisaldavast seadmest tuleb oli proov võtta puhtasse ja kuiva purki või pudelisse, mis suletakse korgist või klaasist korgiga ning valatakse kinni parafiiniga. Et vältida niiskuse sattumist proovi, tuleb see võtta kuiva ilmaga. Talvel peab laboratooriumisse toodud oli proovi laskma seista suletuna 8 - 12 tundi, kuni oli temperatuur on tõusnud toatemperatuurini. Hoolikalt tuleb jälgida, et lahendi anum oleks puhas. Enne oli proovimist loputatakse lahendi anum 2 - 3 korda proovitava õliga. Loputamisel tuleb oli suunata elektrodidele, et sealt maha pesta eelmise proovimise oli ja tahma jäägid. Seejärel täidetakse lahendi anum uuritava õliga. Oli tuleb lahendi anumasse valada ettevaatlikult, et tekiks võimalikult vähe õhumulle.

Pärast lahendi anumasse oli valamist lastakse õlil seista 10 - 15 min., et saaksid eralduda õlisse sattunud õhumullid.

Trafo oli proovitakse aparaadis ANM-60 (vt. joon. 14). Lahendi anum asetatakse aparati, pööratakse autotrafo käepide äärmisse vasakusse asendisse (pinge miinimum) ja suletakse aparadi kaas. Seejärel lülitatakse aparaat võrku pistiku abil, süttib roheline signaallamp. Pärast seda lülitatakse sisse maksimaalvoolu automaat (süttib punane signaallamp), millega antakse pinge kõrgepingetrafole. Tõstetakse sujuvalt pinget, kiirusega 2 - 5 kV sekundis. Pinget tõstetakse seni, kuni toimub täielik läbilöötk ja automaat lülitab kõrgepingetrafo välja. Läbilöögipingeks loetakse voltmeetri maksimaalne näit. Pärast läbilööki lülitatakse seade kohe võrgust välja ja pööratakse autotrafo nullasendisse. Pärast iga läbilööki lastakse oli seista ca 5 minutit, et läbilöögi produktid eemalduks.



Joon. 14. Trafoõli proovimise aparaadi AMH-60 skeem.

L - lahendi, T - kõrgepingetrafo, A - maksimumvoolu automaat, PL - punane signaallamp, RL - roheline signaallamp, AT - autotrafo, BK - plokk-kontaktid.

sid elektroodide vahelt. Soovitav on peale seadme võrgust väljalülitamist ettevaatlikult klaaspulga abil eemaldada elektroodide vahelt läbilöögil tekkinud söeosakesed.

b. Trafoõli leektäpi määramine

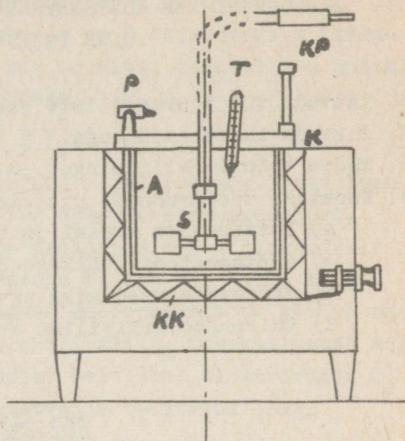
Trafoõli leektäpp määratakse seadme МПЭ (Martens-Penski aparaat) abil (vt. joon. 15). Seade koosneb anumast A, mis

täidetakse õliga kuni anum seinal oleva märgini. Anum on suletud kaanega K, millest ulatub läbi termomeeter T. Kaanele on kinnitatud ka käepide KP, mille pööramisel avaneb kaanes ava, millesse automaatselt laskub põletit P, võimaldades õliaurudele kokkupuute leegiga.

Oli soojendamiseks on seade varustatud küttekeha-ga KK, õli soojenemise ühtlustamiseks asub anum as-gaja S.

Pärast elekterkütte sisselülitamist jälgitakse õli temperatuuri tõusu termomeetrilt. Alates temperatuurist 120°C soojendatakse õli edasi kiirusega 4°C minutis, kusjuures õli hoolikalt segatakse. Õliaurude süttimist proovitakse algul iga 2°C tagant, 5°C enne eeldatavat õliaurude süttimist aga iga 1°C tagant. Minimaalset temperatuuri, mille juures õliaurud süttivad, loetakse trafoõli leektäpiks.

Trafoõli ise süttib tunduvalt kõrgemal temperatuuril kui õliaurud. Oli süttimistemperatuuri ei normeerita, sest trafoõli leektäpp annab juba küllaldase ettekujutuse õli tuleohtlikkusest.



Joon. 15. Trafoõli leektäpi määramise seade МПЭ.

Kirjandus:

Богородицкий Н.П. и др., Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 122-124, 173-182.

Справочник по электротехническим материалам, т. I, часть II, ГЭИ, 1959, стр. 56-59, 73-74.

Тареев Б.М., Казарновский Д.М., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959, стр. 136-138, 67-82.

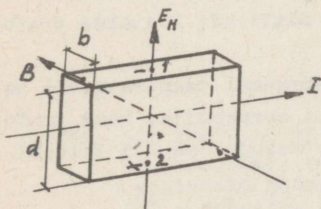
Бурьянов Б.П., Трансформаторное масло, ГЭИ, 1955, стр. 20-22, 46-49.

LAENGUKANDJATE KONTSESTRATSIOONI JA LIIKUVUSE MÄÄRAMINE POOLJUHTIDES

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Tutvuda katseseadmetega.
3. Mõõta anduri Halli pinge ja sisendjuhtivus.
4. Koostada töö aruanne, mis sisaldagu:
 - a) katseseadme skeemi ja kirjelduse,
 - b) mõõtemetodi lühikese kirjelduse,
 - c) mõõtetulemused ning arvutused,
 - d) tulemuste kriitilise analüüsi.

Töö seletus

Laengukandjate kontsentratsioon pooljuhtides ja nende liikuvus on tähtsamad füüsikalised suurused, mis võimaldavad määrata pooljuhtide omadusi.



Joon. 16.

välja tekib punktide 1 ja 2 vahel potentsiaalide vahe. Seda nähtust nimetatakse Halli efektiks ning tekkinud potentsiaalide vahet Halli pingeks.

Pooljuhti läbiva voolu I , magnetilise induktsiooni B , plaadi paksuse b ja tekkinud pinge U_H vahel on järgmine seos:

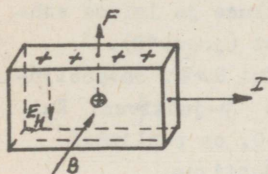
Käesolevas töös kasutatakse laengukandjate kontsentratsiooni määramiseks Halli efekti. Ristkülikukujulist pooljuhtmaterjalist plaati läbib vool I (vt. joon. 16). Potentsiaalide vahe ekvipotentsiaal-pindadel asetsevate punktide 1 ja 2 vahel välise magnetvälja puudumisel võrdub nulliga. Pooljuhi paigutamisel vooluga ristuvasse magnet-

$$U_H = R \frac{IB}{b}.$$

Proportsionaalsuse koefitsient R , mida nimetatakse Halli konstandiks, sõltub pooljuhtmaterjalist.

Magnetväljas, mille induktsioon on B , kiirusega v liikuvale laengule q_e mõjub jõud F , mis on risti magnetilise induktsiooniga ja laengu liikumise suunaga.

$$\vec{F} = q_e [\vec{v} \times \vec{B}]. \quad (1)$$



Joon. 17.

Selle jõu mõjul erimärgilised laengud paiknevad ümber vastassuunas (vt. joon. 17) ja pooljuhis tekib elektrivälja väljatugevusega E_H ehk nn. Halli emj.

Laengute ümberpaiknemine kestab seni, kuni elektrivälja E_H tasakaalustab magnetvälja mõju. Sel juhul elektrivälja E_H poolt tekitatud jõud võrdub magnetvälja tekitatud jõuga

$$E_H \cdot q_e = q_e \cdot v \cdot B. \quad (2)$$

Korrutades mõlemad pooli laengukandjate arvuga 1 cm^3 -s, s.o. nende kontsentratsiooniga n , saame:

$$E_H q_e n = q_e n v B. \quad (3)$$

Korrutis $q_e n v$ on voolutihedus J . Teiselt poolt voolutihedus

$$J = \frac{I}{d \cdot b}, \quad (4)$$

kus b on plaadi paksus ja d plaadi laius.

Seega

$$E_H = \frac{1}{n q_e} \frac{IB}{bd}. \quad (5)$$

Et $E_H = \frac{U_H}{d}$, siis $U_H = E_H d = \frac{1}{n q_e} \cdot \frac{IB}{b} = R \frac{IB}{b}$

ja

$$R = \frac{U_H b}{I \cdot B}. \quad (6)$$

Samal ajal

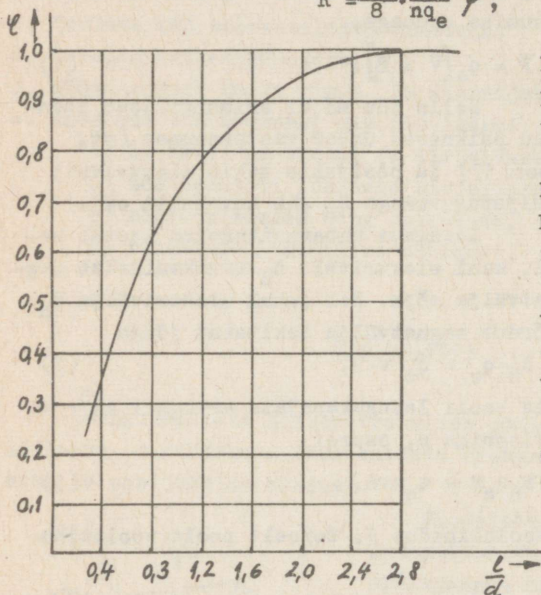
$$R = \frac{1}{n \cdot q_e}, \quad (7)$$

s.t. teades Halli konstandi R väärtust, saame leida laengukandjate kontsentratsiooni n .

Viimane valem kehtib lõpmatult pika plaadi puhul.

Laboratoorsetel tingimustel Halli konstant on avaldatav valemiga:

$$R = \frac{3\varphi}{8} \cdot \frac{1}{nq_e} \varphi, \quad (8)$$



kus φ on funktsioon pikkuse ja laiuse suhtest (joon.18).

Kui $R > 0$, on pooljuhil p-juhtivus. Kui $R < 0$, on pooljuhil n-juhtivus.

Teades Halli konstanti R ning pooljuhi sisenderijuhtivust γ , võib leida laengukandjate liikuvuse u . Laengukandjate liikuvus u on arvatav seosega:

$$u = \frac{8}{3\pi\varphi} R\gamma. \quad (9)$$

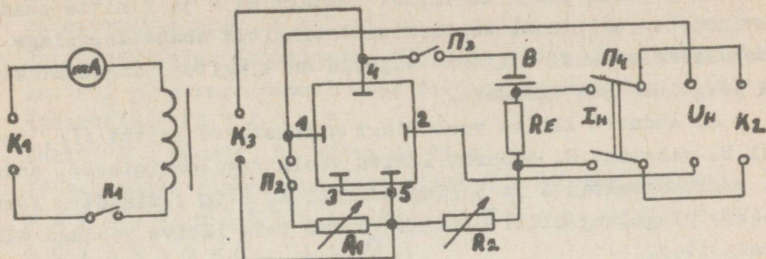
Joon. 18.

Metoodilisi juhendeid

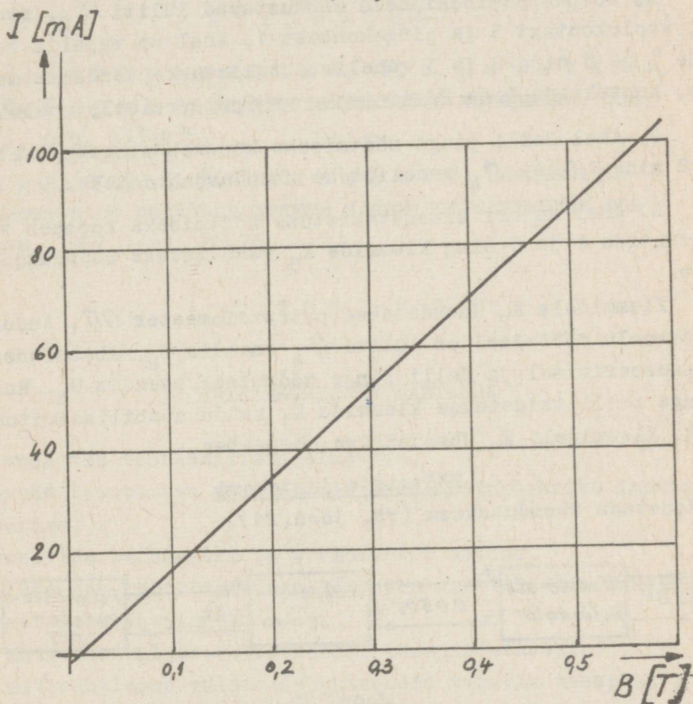
Käesolevas töös mõõdetakse laengukandjate kontsentratsiooni ja liikuvust un . Halli anduris, mis antud juhtumil on valmistatud elavhõbeseleniidist (HgSe). Andur kujutab endast õhukest vilkplaati, millele on aurustatud õhuke HgSe-kiht. HgSe-kihi paksus on $10 \mu\text{m}$, pikkus 1,45 cm ja laius 1,0 cm. Kihi külgede keskkohadelt on tehtud väljaviigud voolu- ja pinge kontaktidele. Voolukontaktideks on skeemil (vt. joon. 19) kontaktid 4 ja 5 ning pingekontaktideks kontaktid 1 ja 2.

Katseseade on konstrueeritud Halli pinge mõõtmiseks magnetvälja induksioonil kuni 0,5 T ja andurit läbival voolul kuni 10 mA.

Katseseade koosneb järgmistest põhielementidest:



Joon. 19.



Joon. 20.

1. Vooluring püsiva magnetilise induksiooni tekitamiseks õhupilus. Vooluring koosneb klemmidest K_1 (kuhu ühendatakse stabiliseeritud alaldi), lülitist Π_1 , õhupiluga raudsüdamik-poolist ja milliampermeetrist. Viimase näitude järgi määratakse graafikust (vt. joon. 20) induksioon B õhupilus.

2. Süsteem pooljuhti läbiva voolu ja Halli pinge mõõtmiseks ning Halli pinge mõõtmisel kontaktide 1 ja 2 mitte samal ekvipotentsiaalpinnal asetsemisest tingitud ebabalansspinge kompenseerimiseks. Viimane asjaolu on tingitud pingekontaktide paigutuse ebatäpsusest.

A. Andurit läbiva vooluringi moodustavad lüliti Π_3 , patarei B, reostaat R_2 andurit läbiva voolu reguleerimiseks, anduri voolukontaktid 4 ja 5 ning takisti $R_E = 1\Omega$, mistõttu temal tekki pingelang millivoltides võrdub teda läbiva vooluga milliamprites.

B. Kompensatsiooniahela moodustavad lüliti Π_2 , reostaat R_1 , voolukontakt 5 ja pingekontakt 1. Ahel on vajalik kontaktide 1 ja 5 ning 2 ja 5 vaheliste takistuste võrdsustamiseks, s.t. kontaktide 1 ja 2 viimiseks ekvipotentsiaalpinnaile.

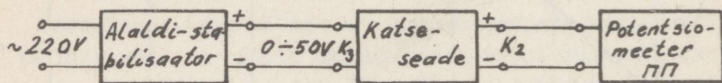
C. Ahel Halli pinge mõõtmiseks koosneb pingekontaktide 1 ja 2 ning lüliti Π_4 vahelistest ühendusjuhtmetest.

D. Ahel anduri sisendtakistuse mõõtmiseks koosneb voolukontaktide 4 ja 5 ning klemmide K_3 vahelistest ühendusjuhtmetest.

Klemmidele K_2 ühendatakse potentsiomeeter $\Pi\Pi$. Andurit läbiva voolu mõõtmisel on lüliti Π_4 asendis I_H , ebabalansspinge kompenseerimisel ja Halli pinge mõõtmisel asendis U_H . Raudsüdamikuga pooli toidetakse klemmide K_1 kaudu stabiliseeritud alaldist. Klemmidele K_3 ühendatakse oommeeter.

Mõõtmiste järjekord

1. Koostada ühendusskeem (vt. joon.21).



Joon. 21.

2. Võtta andur õhupilust välja.
3. Reguleerida vajaliku suuruseni potentsiomeetri töövool.
4. Lülida sisse lülitid Π_2 ja Π_3 ning lüliti Π_4 asendis U_H viia reostaadi R_1 abil potentsiomeetri näit nulli.

5. Lülitada Π_4 asendisse I_H ning reostaadi R_2 abil fikseerida etteantud vool ($4 + 7 \text{ mA}$).
6. Paigutada andur õhupilusse, lülitada sisse Π_1 ning stabilisaatori pingeregulaatori abil fikseerida õhupilus etteantud induktsioon ($0,3 + 0,5 \text{ T}$).
7. Lüliti Π_4 asendis U_H mõõta Halli pinge.
8. Mõõta anduri sisendtakistus lüliti Π_3 neutraalasendis.
9. P ä r a s t m õ õ t m i s t e l õ p p u v ä l j a l u l i t a d a Π_1 j a Π_3 .

K i r j a n d u s

1. Н. П. Богородицкий, В. В. Пасынков, Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, ГЭИ, 1961, стр. 433-435.
2. Под ред. проф. К. В. Шалимовой, Специальный практикум по полупроводникам и полупроводниковым приборам, 1962, стр. 20-25.

T õ õ n r . 8

DIELEKTRIKUTE LÄBILÖÖK

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Tutvuda kasutatava seadmega ja tema ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida baromeetri ja termomeetri näidud.
4. Määrata õhu läbilöögipinge sõltuvus elektroodide vahakaugusest vahelduvpingel:
 - a) ühtlases väljas (elektroodid tasapind-tasapind),
 - b) mitteühtlases väljas (elektroodid teravik-tasapind).
5. Määrata kuiva paberi läbilöögipinge funktsioonina kihtide arvust.
6. Määrata immutatud paberi läbilöögipinge funktsioonina kihtide arvust.
7. Koostada töö aruanne, mis sisaldagu:

- a) kasutatud seadme lühikese kirjelduse ja skeemi ning elektrootodide skitsid,
- b) katseandmed tabeli kujul, õhu puhul taandatuna normaaltingimustele,
- c) graafikud: 1) õhu läbilõõgipingete kohta funktsioonina elektrootodide vahakaugusest ($U = f(s)$) erinevate elektrootodisüsteemide puhul,
 - 2) õhu keskmise läbilõõgi väljatugevuse kohta funktsioonina elektrootodide vahakaugusest ($E = f(s)$),
 - 3) paberi läbilõõgipingete ja läbilõõgi väljatugevuse sõltuvuse kohta kihtide arvust punktide 5 ja 6 alusel;
- d) tulemuste analüüsi.

Töö seletus

Dielektriku elektriline tugevus on üheks põhiliseks isoleermaterjali iseloomustavaks suuruseks.

Iga dielektrik, asudes elektriväljas, kaotab oma isoleerivad omadused, kui väljatugevus ületab teatud kriitilise väärtuse. Seda nähtust nimetatakse dielektriku läbilõõgiks. Pinget, mille juures toimub dielektriku läbilõõk, nimetatakse läbilõõgipingeks, ja vastavat väljatugevust läbilõõgi väljatugevuseks ehk dielektriku elektriliseks tugevuseks. Ühtlases elektriväljas on elektriline tugevus arvutatav seosega:

$$E_{11} = \frac{U_{11}}{h} \left[\frac{kV}{mm} \right]. \quad (1)$$

Dielektriku läbilõõgi mehhanism on erinev dielektriku erinevate agregaatolekute puhul, kuid kõigil neil juhtudel dielektriku elektriline tugevus sõltub:

- 1) dielektrikule mõjuva elektrivälja kujust (ühtlane, mitteühtlane),
- 2) rakendatud pingete kujust (alalis-, vahelduv-, impulss- või kõrgsageduspinge),

3) atmosfääri tingimustest (temperatuurist, niiskusest, gaasilistel dielektrikutel ka rõhust).

Gaasi läbilöögi põhjuseks on ionisatsiooniprotsessid gaasis (nii pörke- kui ka fotoionisatsioon). Sõltuvalt elektrivälja kujust kulgeb läbilöögi protsess erinevalt. Ühtlases väljas toimub kohe gaasi läbilööki (olenevalt pingeallika võimsusest, kas säd- või kaarlahendus), ilma et sellele eelneks koroonanähtus. Ühtlases väljas (elektroodide vahekaugusel ca 0,5 - 10 cm) loetakse õhu keskmiseks läbilöögi väljatugevuseks ca $30 \text{ kV}_{\text{max}}/\text{cm}$.

Mitteühtlases väljas on gaasi elektriline tugevus alati madalam kui ühtlases väljas. Enne läbilööki tekib mitteühtlases väljas väikese kõverusraadiusega elektroodi juures koroonalahendus.

Vahelduvpingel toimub sädelahendus positiivsel poolperioodil, sest läbilöögi pinge positiivsel alalispingel on tunduvalt väiksem kui negatiivsel.

Gaasi läbilöögi pinge sõltub ka rõhust ja temperatuurist. Et oleks võimalik võrrelda üksikute katsete tulemusi, taandatakse lahenduspinged normaaltingimustele (õhurõhk $p_0 = 760 \text{ mmHg}$ ja temperatuur $t_0 = 20^\circ \text{ C}$):

$$U_{10} = \frac{U_{11}}{\delta}, \quad (2)$$

kus δ on õhu suhteline tihedus

$$\delta = \frac{0,386 p}{273 + t},$$

U_{10} - läbilöögi pinge normaaltingimustel,

U_{11} - läbilöögi pinge õhurõhu p (mmHg) ja temperatuuri t ($^\circ\text{C}$) juures.

Tahketes dielektrikutes on läbilöögi peamiseks põhjusteks kas pörkeionisatsioon (elektriline läbilööki) või termilised protsessid (elektrosoojuslik läbilööki).

Üheks väga laialdaselt levinud tahkeks dielektrikuks on paber. Paberit kasutatakse peamiselt kaablite, kondensaatorite ja elektriaparaatide isolatsiooni valmistamisel. Immutamata paber on väikese elektrilise tugevusega - õhutühemikes algavad

osalahendused (gaasi elektriline tugevus on tunduvalt väiksem kui vedelal või tahkel dielektrikul!), mis põhjustab läbilöögi. Et suurendada paberi elektrilist tugevust, immutatakse paber vedela dielektrikuga. Immutamisel täidab vedel dielektrik paberi õhutühemikud ja poorid, suurendades nii paberi elektrilist tugevust.

Õhukesekihilise paber-õli isolatsiooni läbilöögile on iseloomulik läbilöögipinge suur hajuvus ja läbilöögipinge vähenemine elektrootide pinna suurendamisel. See on seletatav paberi ebaühtlusega, paberis leidub juhtivaid osakesi, mis õun- teerivad paberilehe. Seega proovikehal, mis koosneb kahest lehest, määrab elektrilise tugevuse praktiliselt üks, kolme lehe puhul kaks lehte jne. Seepärast arvutatakse ka keskmine läbilöögi väljatugevus paber-õli isolatsioonis seosega:

$$E_{\text{kesk}} = \frac{U_{11}}{(n-1)d} \left[\frac{\text{kV}}{\text{mm}} \right], \quad (3)$$

kus U_{11} - läbilöögipinge n lehe puhul kV,

n - lehtede arv,

d - ühe lehe paksus mm.

Suure lehtede arvu juures hakkab läbilöögi väljatugevus vähenema, kuna suure elektrootide vahekauguse juures muutub väli mitteühtlasemaks - mõjub ääreefekt.

Metoodilisi juhendeid

Töös kasutatava universaalse läbilöögiseadme (YNY-IM) skeem on joonisel nr. 22.

Seade lülitatakse võrku sisselülimisvõtme SLV abil.

Trafod T1 ja T2 on määratud lampide L2 ja L3 kütteks ning signaallampide RL ja PL toiteks. Trafodega T1 ja T2 on lülitatud järjestikku barretter L1, mis on ette nähtud lampide L2 ja L3 küttevoolu stabiliseerimiseks.

Sujuvalt reguleeritakse kõrgepinget autotrafo T3 abil, kusjuures autotrafo liikuv kontakt on ühendatud kõrgepingetrafo (KPT) läbi blokk-kontaktide RBK2 ja ümberlülititi ÜL.

Autotrafo T3 lülitatakse võrku läbi blokk-kontaktide UBK, mis sulguvad katseväljaku piirde sulgemisel, ja läbi rele R normaalselt avatud kontaktide R1.

Kõrge vahelduvpinge (olenevalt ümberlülitati ÜL asendist 1, 3 või 10 kV) saadakse otse kõrgepingetrafo sekundaarmähisest pistikupesa "∞" ja klemmi $\frac{+}{-}$ kaudu. Töötamisel vahelduvpingega on milliampermeeter mA lühistatud kontaktide PBK abil. Blokk-kontaktid RBK sulguvad reguleerimisnupule "Выходное напряжение: больше-меньше" vajutamisel.

Osalt kõrgepingetrafo KPT sekundaarmähiselt antakse pinge poolperioodalaldile, mis koosneb lambist L2 ja silumiskon- densaatorist C2. Kõrge alalispinge saadakse lambi L2 katoodilt pistikupesa "=" ja klemmi $\frac{+}{-}$ kaudu.

Alalispinget mõõdetakse kilovoltmeetri kV abil, mis tege- likult kujutab endast milliampermeetrit. Kõrgepingetrafo KPT väljavõtte alalispinge jaoks on valitud selliselt, et sama ki- lovoltmeetri näit vastab ka vahelduvpinge efektiivväärtusele. Milliampermeetriga on järjestikku lülitatud takistid, mis või- maldavad milliampermeetrit kasutada kilovoltmeetrina piirkon- nas 1 kV. Mõõtepiirkondades 3kV ja 10kV lülitatakse mõõte- riistaga paralleelselt vastavalt kas kaks järjestikku lülita- tud takistit või üks takisti. Kilovoltmeetri mõõtepiirkonnad lülitatakse ümber ümberlülitati ÜL abil samaaegselt tööpinge diapasoone muutmiseks.

Kaovoolu mõõtmiseks katsetamisel alalispingega on katse- objektiga järjestikku lülitatud milliampermeeter mA (blokk- kontaktid PBK avanevad pistiku asetamisel pessa "=").

Milliampermeetri gradueerimiseks on ette nähtud eri skeem. Gradueeritakse kõrgepinget sisse lülitamata, kusjuures lülitatakse ümber kontaktid K ning muudetakse takistuste P1 ja P2 suurust. Seadme kaitseks ülekoormuste vastu on relee R. Relee R suleb oma kontaktid siis, kui autotrafo T3 on viidud minimum-asendisse (sulguvad blokk-kontaktid RBK1). Kontakti- de R2 kaudu jääb relee end hoidma ja kontaktid R1 annavad pin- ge autotrafole T3. Relee R mähist 3-4 läbib koormusvool, mil- le magnetvoog on suunatud vastupidi mähise 1-2 magnetvoole. Kui koormusvool ületab 100mA, siis mähise 3-4 magnetvoog vä- hendab mähise 1-2 magnetvoogu niivõrd, et relee kontaktid ava- nevad ja kõrgepinge lülitatakse välja. Et kõrgepinget uuesti sisse lülitada, tuleb autotrafo T3 viia miinimumi, s.t. sulge- da blokk-kontaktid RBK1. Et skeemis on kasutatud alalisvoolu

releed, on viimane lülitatud alaldite S1 ja S2 diagonaali.

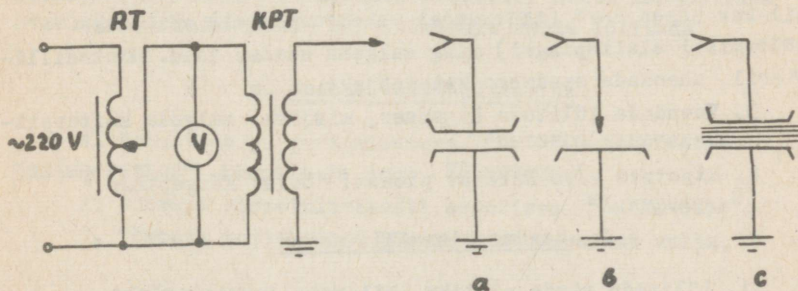
Diiod L3 on kondensaatori C2 ja ka alalispingel katsetatava katseobjekti (kui see kujutab endast kondensaatorit) tühjakslaadimiseks. Tühjakslaadimine algab pärast kõrgepinge väljalülitamist - sisselülitimisnupu kontaktid SLN_1 lülitavad sisse lambi L3 kütte. Samal momendil sulguvad kontaktid SLN_2 , mis kaitsevad silda S2 suurte tühjenemisvoolude eest.

Neonlahendi NL on silla S2 ja rele R kaitseks ülekoormuse eest.

Seadme kaane blokk-kontaktid KBK on ette nähtud kaitseks: kaane avamisel katkestavad kontaktid KBK silla S1 toite, rele R mähis 1-2 jääb pingeta, rele avab oma kontaktid R_1 , millega katkestab autotrafo T3 toite.

Seadme YIN-IM sisse- ja väljalülitamise kord on toodud seadme ohutustehnika instruksioonis.

Antud töös kasutame ainult vahelduvpinget. Mõõtmisteks ühendada elektroodid seadmega vastavalt joonisele nr. 23. Igal elektroodide vahekaugusel teha 3 läbilööki, arvutada aritmeetiline keskmine. Ühu läbilöögipinged taandada normaaltingimustele.



Joon. 23. Põhimõtteline skeem läbilöögipingete määramiseks.

Seadme JNY-1M ohutustehnika instruksioon

Universaalne läbilöögiseade JNY-1M võimaldab saada nii tõstusliku sagedusega vahelduvpinget kui ka positiivset alalispinget kuni 10 kV.

Enne kui antud seadmel tööle asuda, tutvutagu põhjalikult seadme kirjeldusega (mis on toodud eespool) ja antud ohutustehnika instruksiooniga. Instruksioon tuleb väga rangelt täita, sest seadme poolt antav pinge on ELUOHTLIK!

Rangelt on keelatud seadmel töötamine õppejõu juuresolekuta.

Töö tegemiseks jaguneb brigaad operaatoriks ja lülituse koostajaks, kusjuures operaator teeb kõik lülitusoperatsioonid kummikinnastega.

a. Seadme tööks ettevalmistamine

1. Kontrollida seadme maandust.
2. Koostada lülitusskeem. Selleks ühendada "krokodillidega" varustatud juhtmetest üks klemmiga "⚡" ja teine pistiku abil kas pessa "~" (töötamisel vahelduvpingel) või pessa "-" (töötamisel alalispingel) ning sulgeda seadme kaas. "Krokodillide" abil ühendada seadmega katseobjekt.
3. Veenduda lülituse õigsuses, misjärel sulgeda kaitsepiire.
4. Riputada üles hoiatav plakat: "Seis! Kõrgepinge!"

b. Seadme sisselülitamine

1. Lülitada seade pistiku abil vahelduvvooluvõrku.
2. Pöörata lülitusvõti asendisse "BKЛ". Süttib roheline signaallamp.
2. Kui katse juures on vaja mõõta kaovoolu, kalibreerida milliampermeeter. Selleks on vaja asetada pistik pessa "-" (tavaliselt see juba asetsebki seal) ja vajutada nupule "КОНТРОЛЬ" kilovoltmeetri osuti peab näitama täisväljalööki, vastasel korral reguleerida takistit P_1 , mille telg on toodud välja esiplaadile kilovoltmeetri alla. Seejuures peab milliampermeetri näit olema täpselt 0,1 mA, vastasel juhul reguleeritagu

takistit P2, mille telg on toodud välja milliampermeetri alla.

4. Lülitada ümberlülititi "Выходное напряжение" vajalikku asendisse.

5. Vajutada vasaku käega alla nupp "Включение". Suttib punane signaallamp ja roheline kustub.

6. Viia pingeregulaator "Выходное напряжение: больше-меньше" äärmisse vasakpoolsesse asendisse.

7. Vajutades pingeregulaatori "Выходное напряжение: больше-меньше" käepidemele ja pöörates samaaegselt seda paremale, tõsta sujuvalt pinget.

c. Töötamine seadmel

Töötamisel peab arvestama:

a) töötamisel vahelduvpingel langeb läbilöögimomendil kilovoltmeetri osuti nulli - automaat lülitab seadme välja,

b) töötamisel alalispingel saab läbilöögimomendi üle otsustada ka ampermeetri näidu järgi,

c) töötades diapsoonis 1kV ja 3kV, võib automaat läbilöögi puhul mitte töötada ja ka kilovoltmeetri osuti langeb vähe - sel juhul tuleb seade viivitamatult välja lülitada.

d. Seadme väljalülitamine

1. Vabastada pingeregulaatori "Высокое напряжение: больше-меньше" käepide ja nupp "Включение".

2. Pöörata sisselülimisvõti asendisse "Выключение".

3. Tõmmata toitekaabli pistik pistikupesast välja.

К и з а ч а с

1. Н. П. Богорядицкий, В. В. Пасников, Б. М. Тареев, Электротехнические материалы, ГЭИ, 1963, стр. I09-I29 и I60-I69.

2. Д. М. Казарновский, Б. М. Тареев, Испытания электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1963, стр. I50-I66.

MAGNETMATERJALIDE KARAKTERISTIKUTE MÄÄRAMINE

1. Tutvuda töö teoreetiliste alustega.
2. Tutvuda mõõteseadmega.
3. Mõõta vajalikud andmed magnetmaterjale iseloomustavate kõverate $B=f(H)$ ja $\mu_n = f(H)$ kujundamiseks.
4. Kalkeerida ostsillograafi ekraanilt hüstereesisilmus magnetvälja antud tugevuse juures erikadude ja koertsitiivjõu leidmiseks.

Koostada aruanne, mis peab sisaldama:

- a) mõõteseadme skeemi ja kirjelduse,
- b) proovitavate materjalide kirjelduse,
- c) mõõtmisel saadud andmed,
- d) andmete läbitõõtluse koos valemitega,
- e) arvuliste andmete kokkuvõtte tabelina,
- f) töö tulemuste graafikud ning
- g) töö tulemuste analüüsi ja saadud andmete võrdluse kirjanduse andmetega.

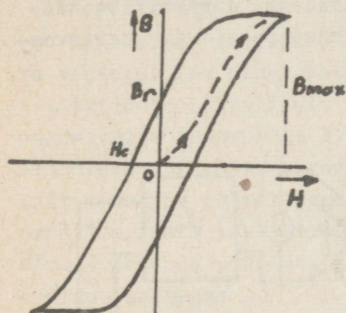
Töö seletus

Elektrimasinares ja mitmesugustes aparaatides kasutatakse väga laialdaselt erinevaid magnetmaterjale. Et nimetatud seadmeid õigesti ja kõige ökonoomsemalt konstrueerida, on vaja tunda magnetmaterjale iseloomustavaid karakteristikuid.

Põhiliseks magnetmaterjale iseloomustavaks karakteristikuks on magneetimiskõver, s.o. magnetilise induktsiooni sõltuvus magnetvälja tugevusest — $B=f(H)$. Magnetilise läbitavuse μ_n saame magneetimiskõverast magnetilise induktsiooni B ja magnetvälja tugevuse suhtena antud kõvera punktis:

$$\mu_n = \frac{B}{H} \quad (1)$$

Kui ferromagnetilist materjali ümber magneetida välises magnetväljas, siis alustades magnetväljatugevuse vähendamist mingist magneetimiskõvera punktist, väheneb ka magnetiline induktsioon, kuid mitte mõõda magneetimiskõverat, vaid aeglasemalt. See on tingitud hüstereesinähtusest. Suurendades vastassuunalist magnetvälja tugevust, võib katsekeha lahti magneetida ja ümber magneetida ning muutes uuesti rakendatava magnetvälja suunda, võib magnetiline induktsioon saavutada jälle oma esialgse väärtuse. Seega saame kinnise kõvera, mis iseloomustab ümbermagneetimise tsüklit ja mida nimetatakse hüstereesisilmuseks.



Joon. 24. Hüsteresisilmus magnetilise küllastuse olukorras.

netvälja tugevust H_0 nimetatakse koertsitiivjõuks.

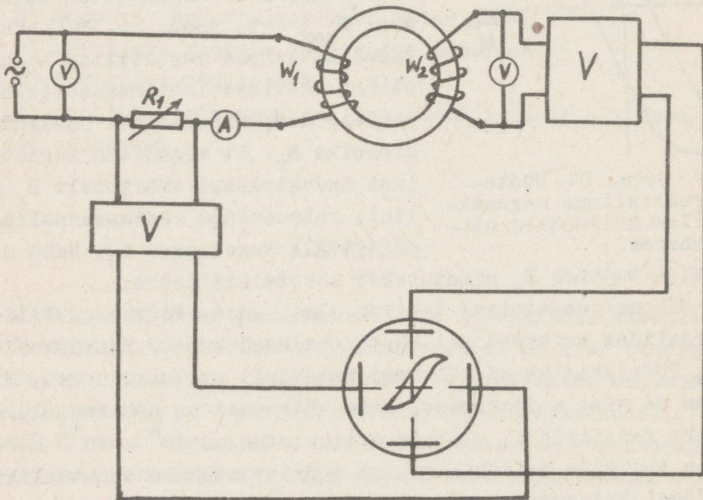
Ümbermagneetimisel tekivad alati kaod. Ferromagnetilistes materjalides esinevad nii hüstereesikaod kui ka pöörisvoolukaod. Pöörisvoolukaod sõltuvad materjali eritakistusest. Mida suurem on aine eritakistus, seda väiksemad on pöörisvoolukaod. Näiteks ferriitidel, millede eritakistus on $10^6 - 10^{11}$ korda suurem kui raua eritakistus, on pöörisvoolukaod tööstuslikul sagedusel kaduvväikesed.

Olenevalt välise magnetvälja tugevuse suuruselt võime saada terve hüstereesisilmuste parve. Valime nendest kõige suurema, s.t. sellise, kus materjal on magneeditud küllastuseni B_{max} (vt. joon. nr. 24). Küllastatud katsekeha magnetilise induktsiooni väärtust lahtimagneetimisel, punktis $H=0$, nimetatakse jääinduktsiooniks B_r . Et vähendada magnetilist induktsiooni väärtuselt B_r nullini, rakendatagu vastassuunaline magnetväli tugevusega H_0 . Seda mag-

Metoodilisi juhendeid

Magnetmaterjalide karakteristikuid võib määrata ballistilise meetodiga, magnetomeetriga, sillameetoditega ja ka ostsillograafiga. Viimane meetod jääb küll teistest meetoditest maha täpsuse poolest, see-eest aga võimaldab kiiresti määrata ja võrrelda erinevate materjalide karakteristikuid.

Lülitusskeem ostsillograafiga, mis töötab vahelduvpingel, annab meile nn. dünaamilise hüstereesisilmuse. See erineb tunduvalt staatilisest hüstereesisilmusest, mis tekib magnetvälja tugevuse aeglasel muutumisel. Staatilise hüstereesisilmuse pind on proportsionaalne hüstereesikadudega, dünaamilise hüstereesisilmuse pindala aga võrdeline hüstereesi- ja pöörisvoolukadudega.



Joon. 25. Skeem magnetmaterjalide karakteristikute määramiseks.

Skeem magnetmaterjalide karakteristikute määramiseks on toodud joonisel 25. Rõngakujulisele katsekehale on mähitud kaks mähist, keerdude arvuga vastavalt w_1 ja w_2 . Primaarmähisele antakse vahelduvpinge 3-4 V, mähist läbivat voolu reguleeritakse reostaadiga. Primaarmähist läbiv vool määrab magnetvälja tugevuse H_{\max} katsekehas:

$$H_{\max} = \frac{2 I_1 w_1}{l} \left[\frac{A}{m} \right], \quad (2)$$

kus l - keskmine magnetringi pikkus m ,

w_1 - primaarmähise keerdude arv,

I_1 - primaarvoolu efektiivväärtus A .

Pingelang takistusel R_1 on võrdeline primaarmähist läbi-va vooluga. See pinge antakse läbi võimendi ostsillograafi x -plaatidele. Järelikult x -plaatidel olev pinge on võrdeline magnetvälja tugevusega H . y -plaatidele on tarvis anda pinge, mis oleks võrdeline magnetilise induktsiooniga katsekehas, siis saaksime ostsillograafi ekraanil hüstereesisilmuse $B=f(H)$. Ostsillograafi y -plaatidele antav pinge u_2 on praktiliselt võrdne sekundaarmähises tekkiva elektromotoorse jõuga e_2 , mis avaldub seosega:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -w_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (3)$$

Et y -plaatidele antav pinge oleks võrdeline magnetilise induktsiooniga, tuleb e_2 integreerida aja järgi. Selleks on sekundaarahelasse lülitatud integreeriv kontuur, mis tagab u_2 ja B võrdelisuse.

Ostsillograafi antavate pingete faaside reguleerimiseks on seade varustatud faasikorrektoritega.

Maksimaalse induktsiooni väärtuse määramiseks katsekehas võib kasutada avaldist:

$$U_2 = 4,44 f w_2 \Phi_{\max} [V], \quad (4)$$

kus U_2 - sekundaarpinge efektiivväärtus V ,

f - sagedus Hz ,

Φ_{\max} - maksimaalne magnetvoog Wb ,

w_2 - sekundaarmähise keerdude arv.

Kuna $\Phi_{\max} = B_{\max} S$, siis

$$B_{\max} = \frac{U_2}{4,44 f w_2 S} \quad [T], \quad (5)$$

kus S - katsekeha ristlõike pindala m^2 .

Järelikult on magneetimiskõvera kujutamiseks vaja fikseerida primaarvool ja sekundaarpinge mitmel erineval primaarvoolu väärtusel.

Erikadude ja koertsitiivjõu leidmiseks on vaja kalkeerida ostsillograafi ekraanilt hüstereesisilmus. Muutes horisontaal- ja vertikaalvõimendust, muutub B ja H mastaap ja me saame ostsillograafi ekraanil sobivad (võimalikult suured) hüstereesisilmuse mõõtmised. Enne kalkale joonestamist märkida kalkale koordinaatide alguspunkt. Selleks määrata helenduva punkti asukoht ostsillograafi ekraanil olukorras, kus ostsillograafi mingit signaali ei tule.

Magnetvälja tugevuse ja magnetilise induksiooni väärtused hüstereesisilmuse äärmistes punktides (H_{\max} ja B_{\max}) arvutatakse valemite (2) ja (5). See võimaldab määrata vastavad mastaabid ostsillograafi ekraanil:

$$m_x = \frac{H_{\max}}{x} \quad \left[\frac{A \cdot m^{-1}}{mm} \right], \quad (6)$$

$$m_y = \frac{B_{\max}}{y} \quad \left[\frac{T}{mm} \right], \quad (7)$$

kus x ja y on hüstereesisilmuse äärmise punkti koordinaadid. Kujutise mastaabi ja silmuse pindala kaudu saab määrata kadusid proovikehas. Erikaod magnetilistel materjalidel arvutatakse tavaliselt võimsusühikutes massiühiku kohta. Erikaod leitakse valemist:

$$P_{\text{eri}} = \frac{S m_x m_y f}{\gamma} \quad \left[\frac{W}{kg} \right], \quad (8)$$

kus S - silmuse pindala mm^2 ,

f - sagedus Hz,

γ - materjali tihedus $\frac{kg}{m^3}$.

Erikadusid võib arvutada ka lihtsustatud valemiga, milles hüstereesisilmus asendatakse ristkülikuga:

$$P_{\text{eri}} = \frac{4 H_c B_{\text{max}} f}{\gamma} \left[\frac{W}{\text{kg}} \right], \quad (9)$$

kus H_c - koertsitiivjõud A/m,

B_{max} - maksimaalne induktsioon T.

K i r j a n d u s

1. И. И. К и ф е р, В. С. П а н т ю ш и н, Испытание ферромагнитных материалов, ГЭИ, 1955 .

2. Д. М. К а з а р н о в с к и й, Испытание радиотехнических материалов и деталей , 1953 .

Heaks kiidetud kateedri koosolekul
9. XI 66.a.

S i s u k o r d

	Lk.
Sissejuhatus	2
+ Töö nr. 1. Dielektrikute elektrijuhtivus	3
Töö nr. 2. Dielektrilise läbitavuse ja dielektrilise kaonurga mõõtmine Scheringisillaga	9
+ Töö nr. 3. Dielektrilise läbitavuse ja dielektrilise kaonurga mõõtmine Q-meetriga	15
+ Töö nr. 4. Dielektrikute füüsikalised omadused ..	19
Töö nr. 5. Senjettelektrikud	24
Töö nr. 6. Trafoõli	31

Töö nr. 7. Laengukandjate kontsentratsioon ja liikuvuse määramine pooljuhtides	36
+ Töö nr. 8. Dielektrikute läbilõhk	41
Töö nr. 9. Magnetmaterjalide karakteristikute määramine	50

N. V. Gogoli nim. Tartu
 Linna Keskraamatukogu
 (Tehnika)

Таллинский политехнический институт
 Кафедра электрических систем
 ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
 РУКОВОДСТВО ДЛЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Составитель Т. Метусала

На эстонском языке

Kordustrükk
 Vastutav toimetaja O. Tapupere

Trükkida antud 18. IX 1970. Paber 60x84/16
 Trükipg.3,5.Tingpg.3,26. Tiraaz 500.Tell.420
 TPI rotaprint, Tallinn, Koskla 2/9.

Hind 10 kop.

Hind 10 kop.

1.
A
31024

TO RAAMATUKOGU



1 0300 00877542 3