

Tallinna Polütehniline Instituut

---

# Kõrgepingetehnika

## LABORATOORSETE TÖÖDE JUHEND

I

KOOSTAS

O. TAPURERE

TALLINN, 1963



TALLINNA POLÜTEHNILINE INSTITUUT

Elektrisüsteemide kateeder

K Ü R G E P I N G E T E H N I K A

LABORATOORSETE TÖÖDE JUHENDID

I

Koostas O. Tapupere

Tallinn  
1963

Таллинский политехнический институт  
Кафедра электрических систем

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИИ  
Руководство к лабораторным работам

I

Составил О. Таупере

S i s u k o r d

lk.

Sissejuhatus .....	3
T õ õ nr. 1. Kõrgepinge mõõtmine .....	4
T õ õ nr. 2. Alalispinge lahendus õhus .....	10
T õ õ nr. 3. Tõöstusliku sagedusega pinge lahendus õhus .....	17
T õ õ nr. 4. Lahendus dielektriku pinnal .....	20
T õ õ nr. 5. Koroonalahendus tõöstusliku sagedusega pingel .....	25
T õ õ nr. 6. Isolaatorite proovimine tõöstusliku sa- gedusega pingel .....	30
T õ õ nr. 7. Trafoõli läbilõök .....	36
T õ õ nr. 8. Kadude mõõtmine dielektrikus .....	40
T õ õ nr. 9. Tahke dielektriku elektrilise tugevuse määramine .....	46
T õ õ nr. 10. Impulssvoolu generaator .....	49
L i s a 1. Lahenduspingete taandamine normaalingimas- tele .....	54
L i s a 2. Kuullahendite läbilõögipinged .....	57

Vastutav toimetaja T. Metusala

TPI rotaprint, 1963. Trükipg. 4, o.

Tiraaž 500 eks. Tell. nr. 108

Hind 12 kop.

Tartu Ülikooli Raamatukogu  
ARHIIVKOGU

Kõrgetehnika kursus kuulub eridistsipliinide hulka, mida loetakse energeetikateaduskonna üliõpilastele elektrijaa-  
made, elektrivõrkude ja -süsteemide ning elektrimasinate ja  
-aparaatide erialal. Peale loengute kuuluvad nimetatud kursu-  
sesse ka TPI kõrgepingelaboratooriumis sooritatavad labora-  
toorseteks töödeks, on koostatud käesolevad juhendid, mis sisal-  
davad peale tööprogrammi ka lühikese töö selgituse, s.o. töö  
teoreetilisi aluseid ja meetoodilisi juhendeid.

Käesolevate juhendite koostamisel olid aluseks järgmised  
materjalid:

1. МВССО СССР, Программа курса "Техника высоких напряжений"  
для высших учебных заведений по энергетическим и электрома-  
шиностроительским специальностям, 1961 г.
2. МВССО СССР, Ленинградский политехнический институт, каф.  
ТВН, Руководство к лабораторным работам по технике высоких  
напряжений, разделы I, II, III, 1957, 1959, 1960 г.
3. МВССО СССР, Харьковский политехнический институт, каф. пе-  
редачи электрической энергии, Руководство к лабораторным ра-  
ботам по курсу техники высоких напряжений, 1959 г.

Laboratoorsetel töödel kõrgepingelaboratooriumis jälgida  
rangelt kehtivaid ohutustehnika eeskirju ja üksikute tööde  
ohutustehnika konstruktsioone.

## KÕRGEPIINGE MÕÖTMINE

Töö eesmärk. Tutvustada lihtsamaid kõrgepinge prooviseadmeid ja seal kasutatavaid kõrgepinge mõõtmismeetodeid.

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida baromeetri ja termomeetri näidud.
4. Gradueerida proovitrafo kuullahendi abil, s.o. leida  $U_2 = f(U_1)$ .
5. Gradueerida elektrostaatiline voltmeeter
  - a) voltmeetri ja kondensaatori järjestiklülituses;
  - b) mahtuvusliku pingejagajaga.
6. Määrata proovitrafo pinge kuju elektronostsillograafi abil.
7. Koostada aruanne, kus peavad olema:
  - a) prooviseadme põhimõtteline skeem,
  - b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri koos nende tehniliste näitajatega,
  - c) katsetulemused, taandatud normaalingimustele (tabeli kujul),
  - d) gradueerimiskõverad,
  - e) pingekõvera ostsillogramm ja moonutuste hinnang;
  - f) tulemuste analüüs.

Töö selgitus.

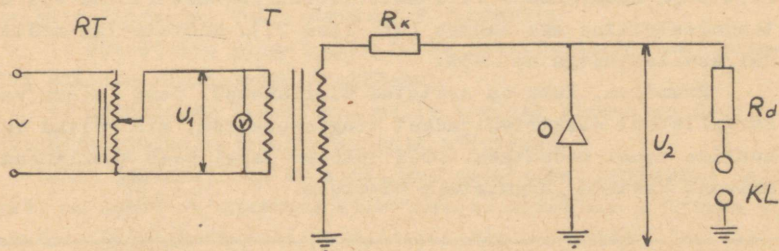
Kõrgepinge mõõtmisi liigitatakse:

1. Elektromeetrilised mõõtmised, s.o. mõõtmised, kus kasutatakse elektroodide vahel mõõdetava pinge mõjul tekkivaid mehaanilisi jõude. Mõõdetatakse elektrostaatilise voltmeetriga.
2. Mõõtmised pingejagajate abil. Mõõteriistaks on elektro-

staatiline voltmeeter või ostsillograaf.

3. Mõõtmised lahendite abil. Mõõdetav pinge tekitab lahenduse elektroodide vahel, tavaliselt kuullahendi.

Kõige levinum kõrgepinge mõõtmisviis on mõõtmine kuullahendiga, kuna ta on kõige lihtsam ja praktikas küllaldaselt täpne. Kuullahendi lülitatakse mõõteskeemi vastavalt joonisele 1.



Joon. 1. Kõrgepinge mõõtmine kuullahendiga.

RT - reguleerimistrafo; T - kõrgepingetrafo;  
Rk - trafo kaitsetakisti; O - proovitav objekt;  
KL - kuullahendi;  $R_d$  - kuullahendi kaitsetakisti.

Kuullahendiga järjestikku lülitada takisti  $R_d$ . Selle takistus piirab voolu lahenduse momendil (kaitseb kuule voolu termilise mõju eest) ja summutab kõrgsageduslikke võnkumisi, mis võivad tekkida mõõteahelas (kuullahendi, proovitav objekt, ühendusjuhtmed) objektil osalahenduste puhul. Need võnkumised võivad kutsuda esile mitteõigeaegse lahenduse kuulide vahel. Eriti oluline on  $R_d$  ülikõrgete pingete mõõtmisel.  $R_d$  takistus ei tohi olla väga suur, et ei tekiks tuntav pingelang mahtvuslikust voolust läbi kuullahendi. Sagedusel 50 Hz valitakse tavaliselt  $R_d$  suurus 20 oomi mõõdetava pinge amplituudväärtuse iga voldi kohta. Takisti  $R_d$  on tavaliselt vesitakisti (destilleeritud veega täidetud klaastoru) ja lülitatakse võimalikult kuullahendi lähedale.

Pinge mõõtmisel kuullahendiga on 2 moodsust:

1. Reguleerimistrafo abil seatakse objektile fikseeritud pinge väärtus ja kuullahendi elektroode lähendatakse teineteisele kuni lahenduse tekkimiseni, fikseerides sel momendil kuulide vahekauguse s.

2. Kuullahendi elektroodide vahekaugus seatakse kindlale väärtusele  $s$  ja pinget tõstetakse kuni tekib lahendus kuulide vahel.

Mõõdetava pinge suurus (pinge amplituudiväärtus), mille tekkis lahendus, määratakse spetsiaalsete, rahvusvaheliselt kinnitatud tabelite alusel (K. 1, lk. 287-290, K. 3, lk. 563-570) funktsioonina kuulide vahekaugusest  $s$ , kuulide diameetrist  $D$  ja kuullahendi lülitamisviisist (sümmeetriline või mitesümmeetriline maa suhtes (vt. lisa 2)). Mõõtmisviga mõõtmisel kuullahendiga on  $\pm 3\%$ .

Ruumiosa, kuhu on asetatud kuullahendi, peab olema vaba kõrvalistest elektriväljadest ning esemetest, mis võivad välja kuulide vahel moonutada. ГОСТ 1516-60 järgi peab kuullahendi asukoht vastama järgmistele nõuetele.

Kuulide diameeter $D$ , cm	Maast isoleeritud kuul lahenduspunkti kaugus horisontaalsest maandatud tasapinnast	
	mitte vähem	mitte rohkem
10 + 15	6 D	8 D
25	5 D	7 D
50 + 75	4 D	6 D

Vähikseim lubatud kaugus  $a$  (ühe kuuli maandamisel) isoleeritud kuuli lahenduspunktiast maandatud tasapindadeni või juhtivate kehadeni:

Kuulide diameeter $D$ , cm	Vähikseim lubatud kaugus $a$	
	S 0,5 D	S 0,5 D
10 + 15	14 S	7 D
25	10 S	5 D
50 + 75	8 S	4 D

Enne kuullahendiga mõõtmiste alustamist viiakse läbi paar-kolm lahendust, et puhastada elektroode ja nendevahelist ruumi tolmust ja prügist.

Pinge tõstmise kiirus kuni 40%-ni läbilöögipingest on meelevaldne. Edasi tõsta pinget sujuvalt, kiirusega  $\sim 3\%$  läbilöögipingest 1 sek-s.

Sooritatakse 3 lahendust. Nende aritmeetiline keskmine

võetakse aluseks läbilöögipinge määramisel tabeli järgi.

Kui mõõdetakse standardist erinevatel atmosfääritingimustel, taandada tabelist leitud suurused antud tingimustele (vt. lisa 1.).

Üksikute mõõtmiste hajuvuse vähendamiseks kasutatakse elektroodide vahe kiiritamist, et tekitada lahenduse alguseks vajalikke vabu elektrone. Tabelis antud lahenduspinged on saadud kiiritamiseta, välja arvatud 2 juhtumit:

- 1) mõõdetakse pinget alla 50 kV (amplituudväärtus) ükskõik millise diameetriga kuulidega;
- 2) mõõdetakse lahendiga, mille kuulide diameeter  $D < 12,5$  cm, sõltumata pingest (tabeliväärtuste piirides).

Neil juhtumel ja ka siis, kui soovitakse väiksemat hajuvust, on soovitatav kasutada kiiritamist. Kiirituse allikana võib kasutada radioaktiivseid preparaate, mis asetatakse isoleeritud kuuli lahenduspunkti lähedale või kvartslampi.

Real juhtumel ei ole soovitatav kõrgepinge mõõtmiseks kuulilahendeid kasutada:

- 1) kui mõõteskeemi ei tohi välja lülitada ja uuesti sisse lülitada;
- 2) kui on vaja sooritada suur arv mõõtmisi.

Neil juhtumel kasutatakse kõrgepinge mõõtmiseks proovitrafo primaarpoolel olevat voltmeetrit, gradueerides selle eelnevalt kuullahendaja abil. Gradueerimine seisneb primaarpinge  $U_1$  ja objektil oleva pinge  $U_2$  vahelise sõltuvuse määramises. See sõltuvus oleneb proovitavast objektist, sest objekti mahutuvuse muutumisel muutub pingelang trafo puistetakistusel. Seetõttu gradueerida koos skeemi lülitatud objektiga tingimustel, mis on analoogilised edasiste mõõtetingimustega.

Lahenduse puhul mõõteahelas proovitrafo mähise mõned osad võivad alluda ohtlikele liigpingetele. Nende liigpingete piiramiseks, samuti lühisvoolu piiramiseks, lülitatakse trafoga järjestikku kaitsetakisti  $R_k$ . Selle takistus valitakse nii, et seadme (proovitrafo, pingeregulaator ja kaitsetakisti) taandatud kogutakistus  $Z$  ei ületaks 2 oomi seadme nimipinge voldi kohta.

Isolatsioonikonstruktsioonide elektrilised näitajad tunduvalt sõltuvad real juhtumel pingekõvera kujust. Seetõttu nor-

meeritakse mitte üksnes proovipinge suurused, vaid ka pinge kuju, mis peab praktiliselt siinuseline olema. Moonutused ei tohi Rahvusvahelise Elektrotehnika Komisjoni normides ületada 10% ja määratakse seosega

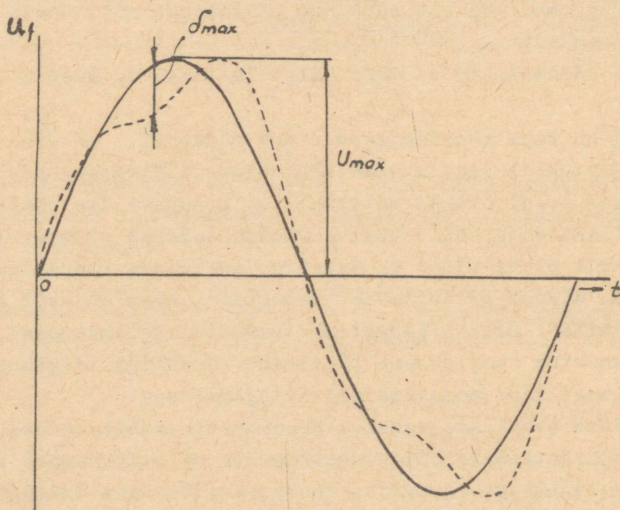
$$\Delta = \frac{\sqrt{U_3^2 + U_5^2 + \dots}}{U_1},$$

kus  $U_1, U_3, U_5$  on vastavad harmoonilised.

Kuna praktikas pingekõvera harmooniline analüüs on aegaviitev töö, võib moonutuste hindamiseks kasutada lihtsustatud meetodit.

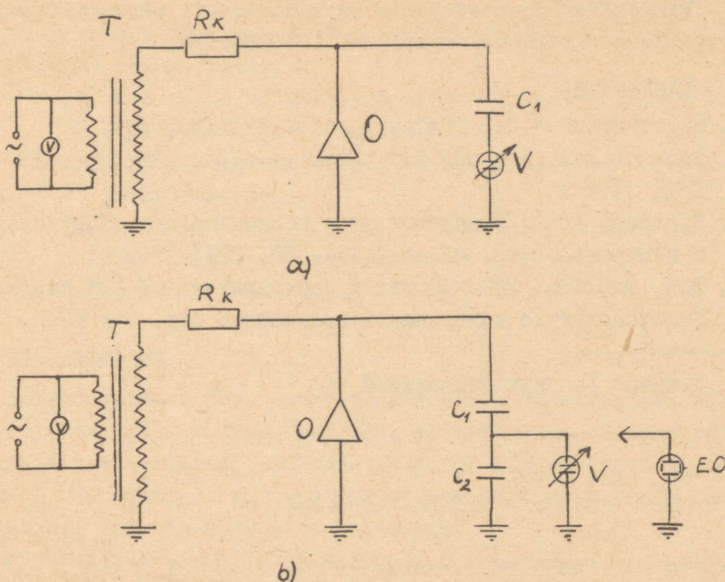
Konstrueeritakse moonutatud pingekõveraga võrdse amplituudiga siinus läbi selle kõvera 0-punktide (vt. joon. 2). Nende kahe kõvera maksimaalne vahe  $\delta_{\max}$  võimaldab määrata moonutuse seosega

$$\Delta \approx 0,6 \frac{\delta_{\max}}{U_{\max}}.$$



Joon. 2. Pingekõvera moonutuste määramine.

Pingekõvera ülesvõtmiseks kasutatakse elektronostsillograafi, mis lülitatakse skeemi mahtuvusliku pingejagaja abil (vt. joon. 3).



Joon. 3. Kõrgpinge mõõtmine elektrostaatiliselt vultmeetriga.  
 a) järjestikmahtuvusega, b) mahtuvusliku pingeljagajaga; T - proovitrafo,  $R_k$  - kaitsetakistus, O - objekt,  $C_1, C_2$  pingeljagaja mahtuvused, V - el.staat. vultmeeter, EO - elektromonostsillograaf.

Kuna gradueerimiskõver sõltub objekti mahtuvusest ja takistusest, on tülikas sooritada tema abil mõõtmisi, kui koormus muutub laiades piirides.

Neil juhtumel kasutatakse laialdaselt elektrostaatiliselt vultmeetreid, mis lülitatakse mõõteskeemi kas vahetult või pingeljagajate abil, kui on vaja mõõtepiirkonda laiendada (vt. joon. 3). Mahtuvusliku pingeljagaja asemel võib kasutada vultmeetriga järjestikku lülitatud kondensaatorit, kui vultmeetri enda mahtvus ei muutu väga laiades piirides tema liikuva osa ümberpaiknemisel.

#### Metoodilisi juhendeid.

Enne kuullahendiga mõõtmisele asumist kontrollida kuulide nullasendit ja vesitakistit  $R_d$ . Mahtuvusliku pingeljagajana võib kasutada ümardatud servadega metallkettaid. Vahekaugused ketaste vahel määratakse katseliselt.

Pingeõver joonistatakse ostsillograafi ekraanilt pauspa-berile ja sealt kantakse millimeetripaberile.

Kirjandus:

1. Сиротинский Л.И., ТВН<sup>I</sup>, ч. I, стр. 171-176, 1951 г.
2. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. 197-200, ГЭИ, 1954 г.
3. Воробьев А.А., Высоковольтное испытательное оборудование и измерения, стр. 422-426, 444-450, ГЭИ, 1960 г.
4. ЛПИ, каф. ТВН, Руководство к лаб. занятиям по ТВН, раздел I, Высоковольтные измерения и испытания, стр. 4 ÷ 10.

I Техника высоких напряжений.

T Õ Õ N R. 2

ALALISPINGE LAHENDUS ÕHUS

Tõõ eesmärk. Määrata alalispinge lahenduspinged õhus.

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida baromeetri, termomeetri ja niiskusemõõt-ja näidud.
4. Määrata koroona alguspinge ostsillograafi abil ning läbilõõgipinge elektrodide teravik-tasapind süsteemis funktsioonina elektrodidevahelisest kaugusest:
  - a) positiivne teravik,
  - b) negatiivne teravik.
5. Määrata läbilõõgipinge sõltuvus elektrodide teravik-tasapind süsteemis barjääriga funktsioonina teraviku ja barjääri vahelisest kaugusest (elektroodide vahekaugus on konstantne).

6. Koostada aruanne, milles peavad olema:

- a) seadme skeem,
- b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri koos nende tehniliste näitajatega,
- c) katsetulemused tabeli kujul, taandatud normaaltingimustele,
- d) graafikud  $U_{kor}$  ja  $U_{tt} = f(s)$  p. 4 alusel ja  $U_{tt} = f(b)$  p. 5 alusel,
- e) tulemuste analüüs.

### Töö selgitus.

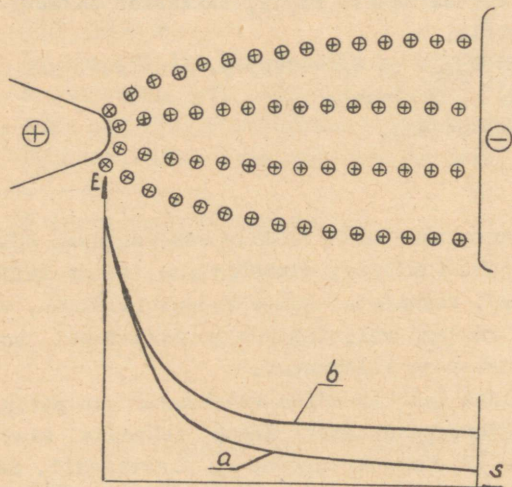
Lahenduspinged õhus antud elektroodide vahekaugusel sõltuvad elektrivälja kujust (ühtlane, mitteühtlane, sümmeetriline, mittesümmeetriline), rakendatud pinge kujust (alalis-, vahelduv-, tõukepinge), suurema väljatugevusega elektroodi polarsusest, õhu tihedusest ja niiskusest.

Mitteühtlases väljas (elektroodide vahekaugus on palju suurem elektroodide kõverusraadiusest) algab lahendus alati elektroodi juures, kus on suurema tugevusega elektriväli. Seal tekib nn. koroonalahendus - õhu osaline läbilööök. Mitteühtlases väljas lahenduspinge (läbilöögipinge) sõltub elektroodide kujust vähe. Iga tüüpi elektroodide puhul võib ligikaudu hinnata lahenduspinge väärtust, teades vastavaid suurusid nn. tüüp-elektroodide teravik-tasapind ja teravik-teravik kohta.

Elektroodide teravik-tasapind süsteemis, kui teravik on positiivne, tekib elektroodidevahelises ruumis positiivne ruumilaeng (vt. joon. 4), mis suurendab väljatugevust väljaspool ionisatsioonitsooni, lües seega soodsad tingimused striimeri tekkimiseks teraviku juures ja selle liikumiseks elektroodidevahelisse ruumi.

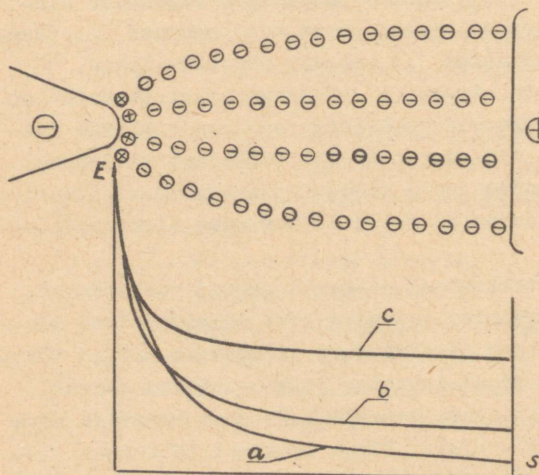
Koroonalahenduse tekkimisel esinevad järsud voolutõuked, mida on võimalik elektroostsillograafi abil jälgida. Need tõuked esinevad ainult kitsas pingemuutuse piirkonnas. Pinge tõstmisel tekib stabiilne koroonalahendus ja voolutõuked kaovad. Koroonalahendusega positiivsel teravikul kaasneb teraviku nõrk helendamine ja heliefekt - sisin. Pinge edasisel tõstmisel tekkivad enne sädelahenduspinget voolutõuked, mis kaasnevad mit-

tetäieliku lahenduse striimerite tekkimisega. Need voolutõuked on tunduvalt suuremad kui koroona tekkimisel ja silmaga võib näha helendavaid teravikult eralduvaid niite. Nende niitide pikkus suureneb pinge tõstmisel kuni sädelahenduse tekkimiseni.



Joon. 4. Positiivse teraviku elektriväli:

- a) enne koroonalahenduse tekkimist;
- b) enne sädelahendust.



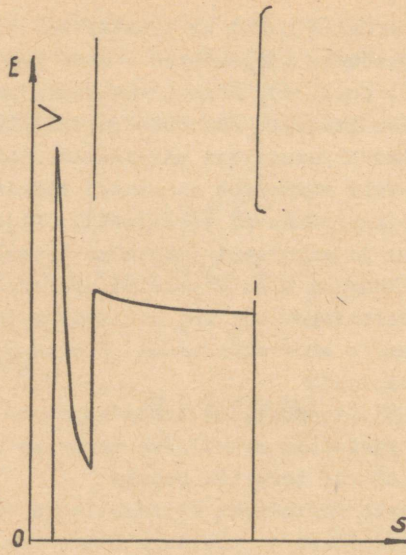
Joon. 5. Negatiivse teraviku elektriväli:

- a) enne koroonalahendust;
- b) pingel veidi üle koroona alguspinge;
- c) enne sädelahendust.

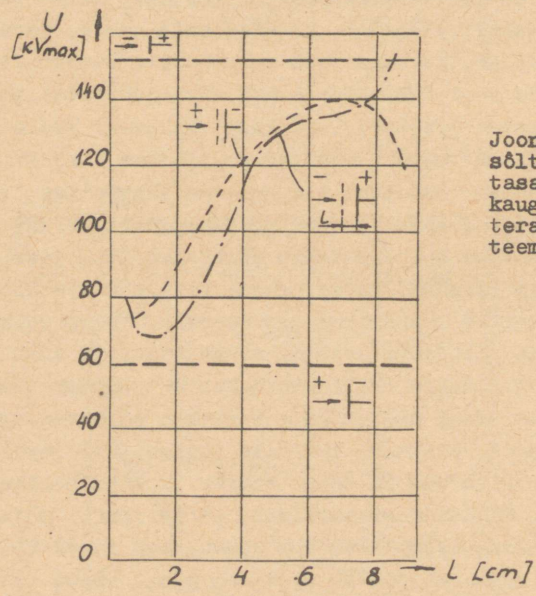
Negatiivse teraviku puhul on elektrivälja ionisatsioonitsoonid vahetus läheduses kõrgendatud - seda põhjustab positiivne ruumilaeng (vt. joon. 5). Negatiivne ruumilaeng tekib väljaspool ionisatsioonitsooni, suurendades väljatugevust välispiirkonnas. Elektriväljatugevuse nõrgenemine ionisatsioonitsooni piiiril märgatavalt raskendab striimeri tekkimist (see on võimalik ainult pinge tunduvalt tõstmisel). Väljatugevus suureneb kogu vahemikus ja striimeri tekkimine teraviku juures läheb otsekohe läbilõõgiks üle. Nimetatud protsess toimub tunduvalt suuremal väljatugevusel kui positiivse teraviku puhul ja teravik koroneerib sädelahenduseni. Mingisuguseid mittetäielikke läbilõõke ei teki.

Nagu nähtub ülaltoodust, on lahenduspinged elektroodide teravik-tasapind süsteemis negatiivse teraviku puhul tunduvalt suuremad kui positiivse teraviku puhul.

Lahenduspingete tõstmiseks mitteühtlases väljas kasutatakse barjääre. Barjäärideks e. tõketeks nimetatakse õhukesi tahkest isoleermaterjalist kihte, mis asetatakse elektroodide vahele (soovitav mõõda ekvipotentsiaaljooni). Barjäär, olles teraviku ja tasapinna vahel, pidurdab, kogudes enda peale, teravikuga samanimelisi ioone. Koroonavool on seetõttu tunduvalt väiksem kui barjäärita vool (määratakse barjääri juhtivuse ja ioonide liikuvusega ümber barjääri). Sellest väikesest voolutihedusest on tingitud ka väike ruumilaengu tihedus barjääri ja tasapinna vahel. Pinge tõstmisel üle koroonavoolu suurendavad barjäärile kogunenud ioonid väljatugevust barjääri ja tasapinna vahel, muutes selle peaaegu ühtlaseks (vt. joon.6). Samal ajal teraviku ja barjääri vahel muutub ainult välja konfiguratsioon. Pinge selles vahemikus muutub vähe. Väike ruumilaengutihedus takistab striimeri arengut teravikult. Ta saab areneda väikese mitteühtlusega väljas barjääri ja tasapinna vahel. On ilmne, et lahenduse areng sõltub vähe teraviku polaarsusest. Suurim mõju on barjääril, mis asub teraviku juures. Sel juhul ühtlasele ligilähedase välja osa on kõige suurem ja läbilõõgiks on vaja suurim pinge. Ülalõeldust järeldub, et barjääri mõju lahenduspingele on suurem vahemikes, kus ruumilaeng soodustab striimeri tekkimist, s.o. positiivse teraviku puhul vastu tasapinda (vt. joon. 7).



Joon. 6. Barjääriga teraviku elektriväli.



Joon. 7. Lahenduspinge sõltuvus barjääri ja tasapinna vahelisest kaugusest elektrodide teravik-tasapind süsteemis.

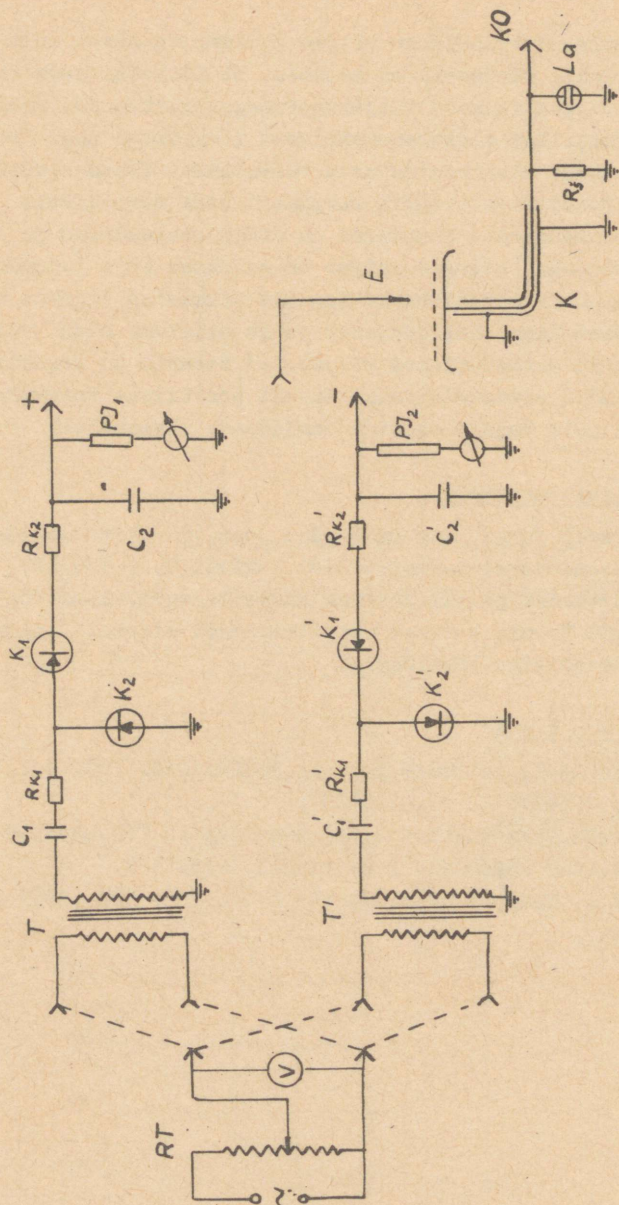
Lahendusele mitteühtlases väljas avaldab tunduvalt mõju õhu niiskus. Selle põhjuseks on asjaolu, et mitteühtlases väljas areneb striimer väikese väljatugevusega piirkonnas. Sealjuures veeaurud, olles elektronegatiivsed (tekivad neg. ioone), soodustavad vabade elektronide arvu vähenemist. Vabad elektronid tekkisid fotoionisatsioonil striimeri peas suhteliselt nõrgas väljas. Lahenduse arenemine on seega raskendatud ja lahenduspinge tõuseb. Ühtlases väljas on niiskuse mõju lahenduspingele väike, kuna negatiivsete ionide tekkimine tugevas väljas on vähetõenäoline. Sel põhjusel on ka niiskuse mõju väike teravik-tasapind mitteühtlases väljas, kui teravik on negatiivne. Niiskuse mõju arvestada seega ainult positiivse teraviku puhul. Samuti pole vaja arvestada barjääride olemasolul.

#### Metoodilisi juhendeid.

Mõõta skeemi järgi, mis on toodud joon. 8. Koroonavoolu jälgimiseks maandatakse tasapind läbi takisti  $R_1$  ( $\sim 100$  k $\Omega$ ). Paralleelselt takistiga lülitatakse kaitselahendi, läbilöögipinge  $\sim 100 + 300$  V, mis kaitseb ostsillograafi sisendit liigpingete eest sädevahemiku läbilöögil.

#### K i r j a n d u s:

1. Сиротинский Л.И., Техника высоких напряжений, ГЭИ, ч. I, 1951, стр. 71-73, 70-81, 105-107.
2. ЛПИ, каф. ТВН, Руководство к лаб. занятиям по ТВН, раздел II, Высоковольтные измерения и испытания, стр. 3-9.
3. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, ГЭИ, 1955 г., стр. 45-48.



Joon. 8. Skeem lahenduspingete määramiseks alalispingel.

RT - reguleerimistrafo; T, T' - kõrgepingetrafo;  $R_{k1}, R_{k2}, R_{k3}, R_{k4}$  - kaitsetakistid;  $C_1, C_2, C_3, C_4$  - kõrgepingekondensaatorid;  $K_1, K_2, K_3, K_4$  - kõrgepingekenotronid;  $PI_1, PI_2$  - pingesajajad;  $R = 100 \text{ M}\Omega$ ; E - elektroodide teravik-tasapind süsteem; K - koaksiaalkaabel;  $R_f$  - takistiti;  $R \sim 100 \text{ k}\Omega$ ;  $L_a$  - lahendi.

## TÖÖSTUSLIKU SAGEDUSEGA PINGE LAHENDUS ÕHUS

Töö eesmärk. Määrata tööstusliku sagedusega pinge lahenduspinged õhus mitmesuguse kujuga elektrodide vahel.

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida baromeetri, termomeetri ja niiskussõõtja näidud.
4. Määrata lahenduspinged funktsioonina elektrodidevahelisest kaugusest  $U = f(S)$ .
  - a) tasapinnalised elektrodid,
  - b) varraselektrodid,
  - c) tasapind - varras,
  - d) kaks paralleelset juhet.
5. Koostada aruanne, kus peavad olema:
  - a) seadme põhimõtteline skeem ja elektrodide skitsid,
  - b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri,
  - c) katseandmed, taandatud normaalingimustele (tabelis),
  - d) graafikud: 1) läbilõõgipinge funktsioonina elektrodidevahelisest kaugusest, s.o.  $U_1 = f(S)$ ;  
2) keskmine läbilõõgitugevus funktsioonina elektrodide vahekaugusest  $E_1 = f(S)$ .
  - e) tulemuste analüüs.

### Töö selgitus.

Antud elektrootide vahekaugusel  $s$  sõltub lahenduspinge elektrivälja kujust. Ühtlases väljas tekib sãde- või kaar-lahendus sõltuvalt toiteallika võimsusest, väljatugevusel

$30 \frac{kV}{cm}$ . Mitteühtlases väljas keskmine lahendusväljatugevus, s.o. lahenduspinge ja elektrootide vahekauguse jagatis on tunduvalt väiksem. Keskmise lahendusväljatugevuse vähenemine mitteühtlases väljas on tingitud asjaolust, et striimeri tekkimine suure väljatugevusega piirkonnas (mis tunduvalt ületab keskmise väljatugevuse) loob soodsad tingimused lahenduse arenemiseks ka väikese väljatugevusega piirkonnas.

### Tasapinnalised elektrootid.

Lahenduse uurimiseks ühtlases väljas kasutatakse erikujulisi, nn. Rogowski elektrootide. Elektrooti põiklõige on valitud selline, et ta ühtuks tasapinnalise kondensaatori elektrivälja ekvipotentsiaaljoonega. Selline elektrootide kuju likvideerib peaaegu täielikult nn. Märeefekti, s.o. väljatugevuse suurenemise elektrootide Märtel ja kindlustab kõigjal ühtlase välja. Seda aga ainult juhtumil, kui  $s < \frac{D}{4}$ , kus  $s$  on elektrootide vahekaugus,

$D$  - elektrooti diameeter.

Kui  $s > \frac{D}{4}$ , tekib lahendus elektrooti Märtel.

Varraselektrootid ja varras-tasapind elektrootid.

Mitteühtlases väljas lahenduspinged sõltuvad vähe elektrootide kujust elektrootide suurte vahekaugustel. Seetõttu võib lahenduspingete hindamisel kasutada lahenduspingeid nn. tüüpelektrootide puhul. Sellisteks tüüpelektrootideks on varras-elektrootid (teravik - teravik) ja varras-tasapind elektrootid (teravik - tasapind). Varraselektrootid on tavaliselt ruudukujulise põiklõikega (rundu serv 1 cm). Ühesugustel elektrootide vahekaugustel on lahenduspinged varraselektrootide puhul suuremad kui varras-tasapind elektrootidel, sest viimasel juhul elektrootide süsteemi suurema mahtuvuse tõttu laeng striimeri tipus ning seega ka väljatugevus on suurem ja lahenduse arenemine kergem. Varraselektrootide puhul kui  $s < 4$  m, keskmine lahendusväljatugevus on  $\sim 5 \frac{kV}{cm}$ . Sãdelahendus vahel-

duvpingel toimub alati positiivsel poolperioodil (lahenduspinge positiivsel alalispingel on tunduvalt väiksem kui negatiivsel!) ja sädelahendusele eelneb alati koroonalahendus. Vahetult enne sädelahendust tekivad ka mittetäielikud läbilöögid, niidid.

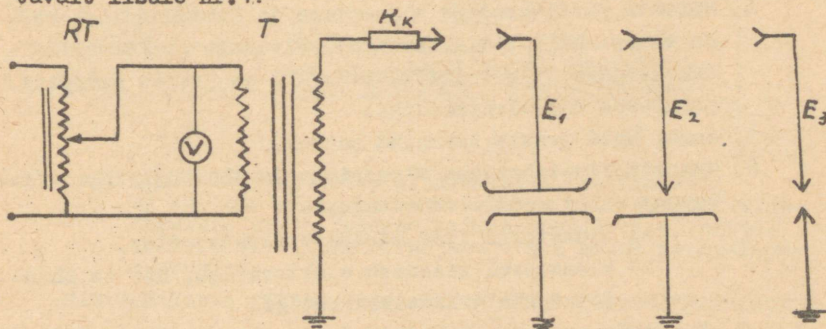
Paralleelsed juhtmed.

Paralleelsete juhtmete puhul, kui suhe  $\frac{s}{r} < 30$ , kus  $s$  on juhtmetevaheline kaugus,  $r$  - juhtme raadius, tekib ainsa lahendusena sädelahendus, kui pinge on tõusnud küllalt kõrgele. Kui  $\frac{s}{r} > 30$ , eelneb sädelahendusele koroonalahendus. Keskmise sädelahendus-väljatugevus on suurem kui varraselektroodide puhul.

Kui teravik-tasapind elektroodidega kasutada ekraani, on tulemused analoogilised positiivse alalispingega - barjäär suurendab lahenduspinget.

#### Metoodilisi juhendeid.

Mõõta skeemi järgi, mis on toodud joonisel 9. Varras-tasapind elektroodide puhul maandada tasapind. Igale elektroodide vahekaugusel teostada 3 lahendust, arvutada aritmeetiline keskmine. Mõõtmistulemused taandada normaalingimustele vastavalt lisale nr.1.



Joon. 9. Lahenduspingete määramine vahelduvpingel.

RT - reguleerimistrafo, T - kõrgepingetrafo,  
R<sub>k</sub> - kaitsetakisti, E<sub>1</sub>, E<sub>2</sub>, E<sub>3</sub> - elektroodid.

## Kirjandus:

1. Сиротинский Л.И., ТВН<sup>I</sup>, ч. I, стр. 71-73, ГЭИ, 1951 г.
2. Бабинов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. 41-47.
3. ЛПИ, каф.ТВН, Руководство к лаб.работам по ТВН, раздел П, физические основы ТВН, стр. 10-14.

I Техника высоких напряжений.

T Ö Ö N R. 4

## LAHENDUS DIELEKTRIKU PINNAL

Töö eesmärk. Tutvuda lahendusega tahke dielektriku pinnal mitmesuguse kujuga elektriväljas.

### Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Määrata pindlahenduse alguspinge ja ülelöögipinge mõõda silindrilist dielektrikut homogeenses väljas.
4. Määrata pindlahenduse alguspinge ja lahenduspinge mõõda tasapinnalist dielektrikut sõltuvalt elektrootide vahemaugusest, kui dielektriku all on juhtiv tasapind ühendatud ühe elektrootiga.
5. Sama, kuid juhtiv tasapind puudub.
6. Määrata liuglahenduse alguspinge ja ülelöögipinge sõltuvana elektrootide vahemaugusest:
  - a) klaastorul ilma sisemise elektrootita,
  - b) klaastorul sisemise elektrootiga, mis on ühendatud ühe väliselektrootiga.
7. Koostada aruanne, kus peavad olema:
  - a) seadme põhioletteline skeem,
  - b) kasutatud proovikehade skitsid,
  - c) katseandmed tabelis,
  - d) graafikud pindlahenduse ja ülelöögipinge funktsioonina elektrootidevahelisest kaugusest,

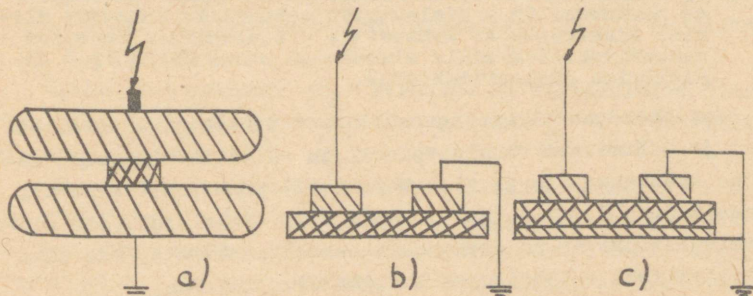
- e) pindlahenduse alguspinge arvutus p. 4 ja 6 andmete alusel,
- f) tulemuste analüüs,
- g) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri.

### Töö selgitus.

Praktikas esineb rida isolatsioonikonstruktsioone, kus elektroodid on eraldatud tahke dielektrikuga vedelas või gaasilises keskkonnas. Pinge tõstmisel toimub kas tahke dielektriku läbilõhk või lahendus mööda dielektriku pinda - pindlahendus.

Ühtlases väljas (joon. 10a) toimub lahendus mööda tahke dielektriku pinda (ülelõhk) alati madalamal pingeväärtusel kui lahendus sama elektroodide vahekauguse puhul õhus või vedelikus.

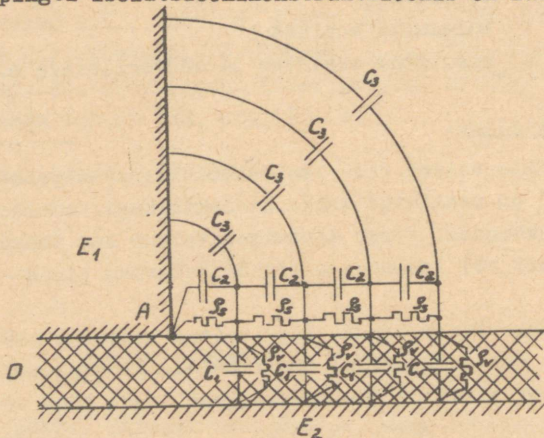
Mitteühtlases väljas, kus elektrivälja tangentsiaalkomponent on suur (joon. 10 b), eelneb ülelõögile korona pingestatud elektroodi serval sinaka helendusena.



Joon. 10. Elektroodide asetus pindlahenduse tekkimisel. a) ühtlane väli; b) mitteühtlane väli elektriväljatugevuse suure tangentsiaalkomponendiga; c) mitteühtlane väli elektriväljatugevuse suure normaalkomponendiga.

Mitteühtlases väljas, kus elektrivälja normaalkomponent on suur (joon. 10 c), algab teatud pingeväärtusel pingestatud elektroodi serval korona sinaka helendusena. Pinge tõstmisel muutub korona intensiivsemaks ja teatud pingel korona foonist eralduvad üksikud niitjad harud - algab liuglahendus (niidid nagu liugleksid mööda pinda). Pinge tõstmisel pikenevad niidid kiiresti ja, jõudes vastaselektroodini, toimub sädelahendus - ülelõhk. Termilise ja elektrokeemilise mõju tõttu vanan-

dab liuglahendus isolatsiooni kiiresti. Liuglahenduse tekki-  
mine tööpingel isolatsioonikonstruktsioonis on lubamatu.



Joon. 11. Dielektriku aseskeem elektroodi serval.  
 $E_1$ ,  $E_2$  - elektroodid;  $D$  - dielektrik;  $C_1$  - dielektriku pinnatõhiku mahtuvus alumise elektroodi  $E_2$  suhtes;  $C_2$  - dielektriku pinnatõhikute vastastikune omavaheline mahtuvus;  $C_3$  - dielektriku pinnatõhiku mahtuvus ülelise elektroodi  $E_1$  suhtes;  $\rho_v$  - dielektriku ruumiosa mahueritakistus, mille aluseks on pinna õhik;  $\rho_s$  - dielektriku pinnaeritakistus.

Liuglahenduse alguspinge sõltuvust dielektriku parameetritest ja mõõtetest vahelduvpingel on võimalik tuletada, kasutades aseskeemi (joon. 11.) Tavaliselt praktikas esinevaid juhtumel  $C_2 \ll C_1 \gg C_3$  ja  $\rho_v \gg \rho_s$ . Sel juhtumil suurim elektriväljatugevus on elektroodi serval punktis  $A$ , kus teatud kriitilisel väljatugevusel algab liuglahendus.

Vool liuglahenduse kanalis sulgub läbi tahke dielektriku nihkevooluna (mahtuvuse  $C_1$  ümberlaadimine). Kui pinnatõhiku mahtuvus vastaselektroodi suhtes ( $C_1$ ) on suur, on ka voolutihedus liuglahenduse kanalis suur. Võib esineda terminaalne ionisatsioon ja sellest tingituna väike pingelang piki lahenduse kanalit. See põhjustab suure väljatugevuse kanali lõpus ja kanali pikenevise vastaselektroodi suunas. Kui mahtuvus  $C_1$  ja seega ka nihkevool on väikesed, siis liuglahenduse alguspinge on kõrge, lähenedes ülelõõgipingele. Ka pinnatakistuse  $\rho_s$  vähenemine suurendab liuglahenduse alguspinget, kuna põhjustab ühtlasema pingejaotuse piki dielektriku pinda.

Liuglahenduse alguspinge praktiliselt ei sõltu elektroodide vahekaugusest piki dielektriku pinda sagedustel, mis on lähedased tööstuslikule sagedusele. Kui  $\rho_s \leq 10^{13} \Omega$ , siis liuglahenduse alguspinge on määratud peamiselt dielektriku pakusega  $d$ , tema dielektrilise läbitavusega  $\epsilon$  ja pinna eritakistusega  $\rho_s$ .

$$U_{\text{liug}} = A \sqrt{\frac{1}{C_1 \cdot \rho_s}} = A \sqrt{\frac{d}{\epsilon \rho_s}},$$

kus  $A$  on tegur, mis sõltub rakendatud pinge sagedusest.

Tööstusliku sagedusega pingel, kui tahke dielektrik on tasapinnaline klaas või portselan, võib liuglahenduse alguspinge arvutada empiirilise valemiga

$$U_{\text{liug}} = \frac{1,36}{C_1} \cdot 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ kV},$$

milles  $C_1$  on dielektriku pinnatühiku mahtuvus ja avaldatav seosega

$$C_1 = \frac{\epsilon_r \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{d} \text{ F/cm}^2,$$

kus  $\epsilon_r$  on dielektriku suhteline dielektriline läbitavus,  $d$  - dielektriku paksus cm (klaasil  $\epsilon_r = 7 \div 8$ ; portselanil  $\epsilon_r = 5,5 - 6$ ).

Ülaltoodud valemid võib kasutada ka silindrilise dielektriku puhul, kui silindri seina paksus  $d \ll r_s \cdot r_s$  on silindri sisemine raadius.

Nagu näitavad katsed, suureneb liuglahenduse niitude pikkus võrdeliselt rakendatud pinge viienda astmega. Ülelöötk tekib kui liuglahendus jõuab vastaselektroodini. Lahenduspinge elektroodide vahel  $e$ . ülelöötk vahelduvpingel on avaldatav seosega (Toepleri valem):

$$U_{\text{ül}} = k \sqrt{\frac{5}{C_1}},$$

kus  $l$  on elektroodidevaheline kaugus,

$C_1$  - dielektriku pinnatühiku mahtuvus,

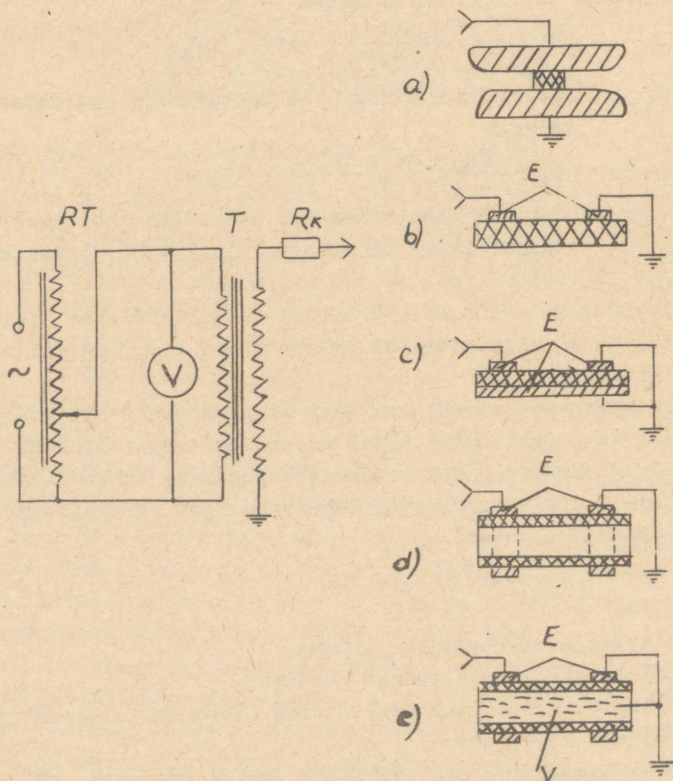
$k$  - tegur, mis sõltub dielektriku pinna takistusest ja pinge sagedusest.

Alalispingel, kus mahtuvuslikud voolud puuduvad, võivad liuglahendused tekkida väga mustunud või märgunud ja suure pinnajuhtivusega pindadel.

### Metoodilisi juhendeid.

Mõõta joonisel toodud skeemi järgi. Juhtumel b ja d on dielektriku pinnatühiku mahtuvus väike ja liuglahendus praktiliselt puudub kuni ülelöögi tekkimiseni. Juhtumel c ja e aga on pinnatühiku mahtvus suur ja teatud pingel tekib liuglahendus. Liuglahenduse alguspinge praktiliselt ei sõltu elektrootide vahekaugusest dielektriku pinnal.

Toiteallika väikese võimsuse tõttu ei teki ülelöögil kaarlahendust. Ülelöögiks lageda esimest sädet ühelt elektrootdilt teiseni.



Joon. 12. Skeem lahenduse uurimiseks dielektriku pinnal.  
RT - reguleerimistrafo; T - kõrgepingetrafo;  
R<sub>k</sub> - katsetakisti; E - elektrootid; V - vesi.

Vaatlused korraldada pimendatud ruumis.

Lahenduspinge  $U_{il}$  arvutamisel määratakse tegur  $k$  katseliselt ühe elektroodide vahekauguse puhul ja kasutatakse siis arvutamiseks teistel juhtudel.

### Kirjandus:

1. Сиротинский Л.И., ТВН, ч.І, стр. 126-136, ГЭИ, 1951 г.
2. ЛПИ, каф. ТВН, Руководство к лаб. работам по ТВН, раздел III, Высоковольтная изоляция, стр. 3-7, 1959 г.
3. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. 62-65.

### T Ö Ö N R. 5

#### KOROONALAHENDUS TÖÖSTUSLIKU SAGEDUSEGA PINGEL

Töö eesmärk. Tutvuda koroonalahendusega tööstusliku sagedusega pingel ja koroonalahenduse registreerimise meetoditega.

#### Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida termomeetri ja baromeetri näidud.
4. Määrata koroonalahenduse alguspinge kolmel erineva diametriga juhtmel silindris
  - a) koroonavoolu kuju järgi,
  - b) volt/amper karakteristikute järgi,
  - c) volt/kulon karakteristikute järgi.
5. Fikseerida volt/kulon karakteristikud mitmel erineval pingel.
6. Gradueerida seade
  - a) pinge järgi,
  - b) laengu järgi.
7. Punktide 5. ja 6. alusel dešifreerida ostsillogrammid ja väljendada koroonakaod funktsioonina pingest.
8. Koostada aruanne, kus peavad olema

- a) seadme põhimõtteline skeem,
- b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri,
- c) katseandmed tabelis taandatud normaaltingimustele,
- d) graafikud - koroonakaod funktsioonina pingest,
- e) koroonalahenduse alguspinge ja algusväljatugevuse arvutus Peek'i valemi järgi ja võrdlemine katsetulemustega,
- f) katsetulemuste analüüs.

### Töö selgitus.

Koroonalahendus tekib mitteühtlases elektriväljas, piirkonnas, kus on suur elektriväljatugevus. Gaasikihi paksus koroneeruva elektroodi ümber, kus esineb ionisatsioon, ehk nn. koroneeruva kihi paksus on vaid mõni millimeeter. Välises piirkonnas ionisatsiooni ei ole. Koroonalahendusega kaasneb nõrk sinakas helendus ja spetsiifiline sisisev heli - selle tekitab nn. elektriline tuul e. gaasi vool, mis on seotudioonide suunatud liikumisega koroneeruvas piirkonnas. Koroneeruva elektroodi pinna olukorral on suur tähtsus koroonalahenduse tekkimisel ja edasisel kulgemisel. Siledal, poleeritud üksikjuhtmel tekib koroonalahendus ühtlaselt kogu juhtme ulatuses, ümbritsedes juhet sinaka krooniga. Juhtmete puhul, kus esinevad ebatasasused, mustus, tolm, algab koroonalahendus neis üksikuis punktides, olles katkev. Ka alguspinge on madalam.

Katsed on näidanud, et koroonalahendus algab väljatugevusel, mis sõltub juhtme raadiusest ja juhtmetevahelisest kaugusest ja on koaksiaalse silindri puhul avaldatav Peek'i valemi-ga:

$$E_k = 31 \left( 1 + \frac{0,30}{r} \right),$$

kus  $E_k$  on koroonala algusväljatugevus  $kV_{max}$ ,

- suhteline õhutihedus,

$r$  - juhtme raadius.

Koroonala alguspinge on avaldatav seosega:

$$U_k = E_k \cdot r \ln \frac{R}{r} = 31 \cdot r \ln \frac{R}{r} \left( 1 + \frac{0,308}{r} \right),$$

kus  $R$  on silindri siseraadius.

Ülaltoodud valemid on kehtivad ideaalselt sileda juhtme ja kuiva atmosfääri puhul. Juhtme pinna mustumisel ja atmosfääritingimuste erinevusel normaalsetest väheneb  $U_k$ .  $U_k$  arvestatakse vastavate tegurite  $m_1$  ja  $m_2$  abil.

$m_1$  on juhtme sileduse tegur (0,98 + 0,83),

$m_2$  - ilmastiku tegur (vihma puhul 0,8).

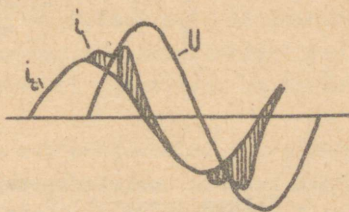
Koroona alguspinge, arvestades ülalnimetatud faktoreid, avaldatakse seosega:

$$U_k = m_1 \cdot m_2 \cdot E_k \cdot r \ln \frac{R}{r} = m_1 \cdot m_2 \cdot 31 \cdot r \cdot \ln \frac{R}{r} \left(1 + \frac{0,308}{r}\right).$$

Koroona alguspinge vähendamiseks suurendatakse juhtme raadiust. Kasutada kas õõnesjuhtmeid (AII -500 - õõnesjuhe alumiiniumist, põiklõikega 500 mm<sup>2</sup>, MII -240) või lõhestatud juhtmeid (ühe faasi juhe jaotatakse mitmeks).

Kõrgepingele elektrivõrkandeliinidel tekitab koroonalahendus energiakadusid ja raadiohäireid. Kaod on peamiselt soojuskaod, mis on seotud ionide põrkumisega gaasi molekulidega nende liikumisel koroneerivas piirkonnas. Ionisatsioon- ja kiirguskaod on väikesed ja moodustavad koroona kadudest ainult kümnendikke protsente.

Vahelduvpingel koroneerivas elektroodide vahemikus on pidevalt positiivseid ja negatiivseid ioone, mis liiguvad vastassuunas. Iga poolperioodi vältel tekkinud ioonid, mille märk ühtub juhtme laenguga, liiguvad juhtmest eemale. Vastasmärgilised ioonid, mis tekkisid eelneval poolperioodil, liiguvad juhtme suunas. Koroona tekkimise momendil esineb voolukõvera moonutamine - mahtvuslikule voolule lisandub aktiivne



Jeon. 13 Koroonavool vahelduvpingel.  
 $u$  - rakendatud pinge;  $i_0$  - mahtvuslik vool;  
 $i$  - summaarne vool, s.o. mahtvuslik+koroonavool.

koroonavool (vt. joon. 13). Seega saab koroonalahenduse alguspinget määrata voolukõvera või volt-amper karakteristiku moodutuse järgi ostsillograafi ekraanil.

Vaadeldes volt-kulon karakteristikut (enne koroona tekkimist on see sirge, koroona tekkimisel muutub aga ellipsiks), saame määrata koroona alguspinge. Volt-kulon karakteristiku pind on proportsionaalne koroonakadude tiheduse perioodi vältel.

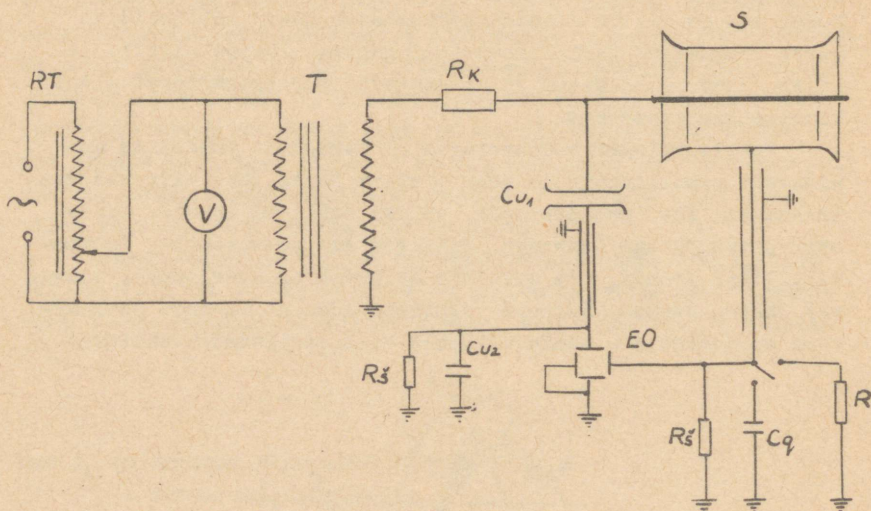
$$W = \oint u dq = \int_0^T u i dt.$$

See võimaldab määrata koroonakadude sõltuvuse rakendatud vahelduvpingest

$$P = Wf.$$

### Metoodilisi juhendeid.

Koroonalahenduse uurimise skeem on toodud joonisel 14.



Joon. 14. Skeem koroona uurimiseks vahelduvpingel.  
 $C_{u1}$  - õhkkondensaator;  $C_{u2}$ ,  $C_q$  - vilgukivikondensaatorid  $0,01 - 0,1 \mu F$ ;  $R$  - takisti  $\sim 100 k\Omega$ ;  
 $R_3$  - takisti  $3 + 10 M\Omega$ ;  $EO$  - elektronostsillograaf;  $S$  - silinder.

Pingejagaja  $C_{u1} - C_{u2}$  kondensaatorilt  $C_{u2}$  antakse ostsillograafi vertikaalplaatidele koroneerivas vahemikus oleva pingega võrdeline pinge. Maandades lülitiga  $L_u$  silindri läbi takisti  $R$ , antakse ostsillograafi horisontaalplaatidele pinge, mis on võrdeline vooluga koroneerivas vahemikus ( $u = iR$ ). Maandades aga silindri läbi kondensaatori  $C_q$ , antakse neile plaatidele pinge, mis on võrdeline kogu laenguga koroneerivas vahemikus  $u = \frac{q}{C_q}$ . Vaadeldes koroonavoolu, antakse pinge takistilt  $R$  ostsillograafi vertikaalplaatidele. (Ostsillograafi plaadid peavad olema šunteeritud suurte takistustega  $R_g = 3 + 10 \text{ M}\Omega$ , et vältida kiire nullasendi nihkumist plaatide laadumisel kiire elektronide ja koroonavoolu alaliskomponendi poolt.) Seade gradueeritakse pinge järgi kuullahendi abil. Määratakse ostsillograafi kiire kõrvalekalde sõltuvus pingest koroneerivas vahemikus  $S_u = f_1(u)$ . Ostsillogrammide pingemastaap leitakse, kui sirge  $S_u = f_1(u)$  kaldenurga kotangens:

$$m_u = \frac{u}{S_u}.$$

Gradueeritakse laengu järgi, andes plaatidele fikseeritud vahelduvpinge ja määrates kiire kõrvalekalde sõltuvuse rakendatud pingest  $S_q = f_2(u)$ . Ostsillogrammide laengu mastaaap leitakse seosest

$$m_q = \frac{u(C_q + C_E)}{S_q},$$

kus  $C_E$  on silindri ja kaabli mahtuvus maa suhtes ( $\sim 1000 \text{ pF}$ ). Pidada silmas, et ostsillograafides volt-kulon karakteristikuid ja andes mõlematele plaatidele mittesümmeetrilise pingega, võivad elektrontorus esineda trapetsoidaalsed moonutused. See tõttu anda gradueerimisel plaatidele ka mittesümmeetriline pinge.

Koroonalahendusest põhjustatud energiakaod ühe perioodi vältel avalduvad seosega:

$$W = S \cdot m_u \cdot m_q,$$

kus  $S$  on volt-kulon karakteristiku pindala.

Sagedusel  $f$  koroonakadude võimsus:

$$P = Wf = S m_u \cdot m_q \cdot f.$$

Volt - kulon karakteristikud joonistatakse pauspaberile ostsillograafi ekraanilt.

K i r j a n d u s:

1. Сиротинский Л.И., ТВН, ч.1, стр. 97-120, ГЭИ, 1951 г.
2. Бабинов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. 41-43, 48-53, ГЭИ, 1954 г.
3. ЛПИ, каф. ТВН, Руководство к лаб. работам по ТВН, раздел II, Физические основы ТВН.

Т Ö Ö N R. 6

ISOLAATORITE PROOVIMINE TÖÖSTUSLIKU SAGEDUSEGA  
PINGEL

Töö eesmärk. Tutvuda isolaatorite proovimise metoodikaga  
tööstusliku sagedusega pingel

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida baromeetri, termomeetri ja niiskusemõõtja näidud.
4. Määrata pingajaotus rippisolaatorite ketis.
5. Määrata isolaatorite peamised mõõtmed:
  - a) rippisolaator (II - 4,5),
  - b) poltisolaator (III C - 10),
  - c) poltisolaator (III D - 35),
  - d) tugiisolaatorid (OA - 6,0 A - 10),
  - e) läbiviikisolaator.
6. Määrata koroona alguspinge ja kuivlahenduspinge ülalnimetatud isolaatoritel.

7. Määrata märglahenduspinge ülalnimetatud isolaatoritel.
8. Koostada aruanne, kus peavad olema:
  - a) prooviseadme põhimõtteline skeem,
  - b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri koos nende tehniliste näitajatega,
  - c) katsetulemused tabelis, taandatud normaaltin-gimustele koos standardlahenduspingetega,
  - d) keskmiste elektriväljatugevuste  $E_k$  arvutus ja nende võrdlemine standardiga,
  - e) tulemuste analüüs.

### Töö selgitus.

Isolaatoreid kasutatakse kõrgepingeseadmeis voolujuhtiva-te osade isoleerimiseks ja mehaaniliseks toestamiseks. Et kind-lustada antud nimipingele vastav isoltasiooninivoo, tuleb iso-laatoreid tihti järjestikku ühendada, moodustades rippisolaatorite kette või tugiisolaatorite kolonne (sambaid).

Sellistes rippisolaatorite kettides ja tugiisolaatorite kolonnides esineb mitteühtlane pingajaotus. Isolaatorite ketti võib vaadelda kui järjestikku ühendatud isolaatori mahtuvusi  $C_1$  ( $30 + 70$  pF) koos mahtuvustega maa  $C_1$  ( $4 + 5$  pF) ja juhtme suhtes  $C_2$  ( $0,5 + 1$  pF) (vt. joon. 15a). Voolud, mis läbivad mahtuvusi  $C_1$  ja  $C_2$ , moonutavad tunduvalt lineaarset pingejao-tust, mis on määratud järjestikku ühendatud ühesuguste mahtu-vustega  $C_0$ . Kuna isolaatorite mahtuvus maa suhtes  $C_1$  on suurem kui mahtuvus juhtme suhtes, langeb suurim pinge juhtme esimese-le isolaatorile (vt. joon. 15 b). Mitteühtlane pingejajaotus ripp-isolaatorite ketis või tugiisolaatorite kolonnis võib põhjusta-da isolaatori koroneerumise juba tööpingel. See on aga lubama-tu, kuna koroona põhjustab isolaatorite terasosade antikorro-sioonikatte purunemise, vaskjuhtmete oksüdeerimise ning tekitab raadiohäireid ja häireid kõrgsagedus-sidel ja sideliinidel. Pin-gejaotuse ühtlustamiseks kasutatakse pingestatud juhtme juures oleval isolaatoril kaitsearmatuuri rõngaste, sarvede ja muul kujul. Peale selle soodustab kaitsearmatuur kaare ärajuhtimist isolaatoritelt isolaatoriketi üleböögil.

Pingejajaotus rippisolaatorite ketis määratakse spetsiaalse mõõtekepi abil, mille tipus on väike kuullahendaja. Hoides kuul-

lahendaja elektroodide vahekauguse konstantsena ja asetades mõõtekepi järjekorras kõkidele isolaatoritele numbritega 1, 2 ... n, võib leida pinged isolaatoriketil  $U_1, U_2 \dots U_n$ , mil pinge antud isolaatoril on võrdne kuullahendaja lahenduspingega  $u$ . On ilmne, et antud isolaatoril oleva pinge (kogu aeg konstantne  $u$ ) suhe ketil olevasse pingesse  $U_1, U_2 \dots U_n$  annabki otsitava pingejaotuse. See pingejaotus on määratav ka ilma pinge  $u$  arvulise määramiseta. Tähistades pingete suhted üksikutel isolaatoritel vastavalt ülaltoodule  $a_1, a_2 \dots a_n$ , kus

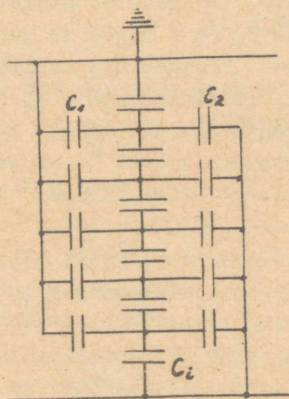
$$a_1 = \frac{u}{U_1}, a_2 = \frac{u}{U_2}, \dots a_n = \frac{u}{U_n}, \quad (1)$$

summeerides need ja pidades silmas, et  $\sum_{k=1}^{k=n} a_k = 1$ , saame

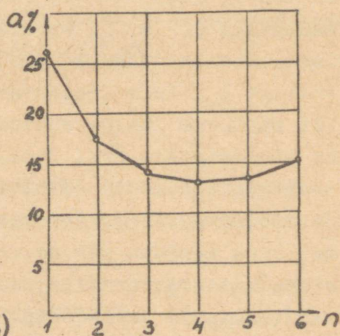
$$U \sum_{k=1}^n \frac{1}{U_k} = 1, \quad (2)$$

kust

$$u = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{U_k}}. \quad (3)$$



a)



b)

Joon. 15. Pingejaotuse rippisolaatorite ketis.  
a) aseskeem; b) pingejaotus, a %-pinge isolaatoril %-s kogupingest isolaatorketil.

Asetades seose (3) seosesse (1), saame üksiklik millise isolaatori jaoks

$$a_1 = \frac{1}{n} \cdot 100\% . \quad (4)$$
$$U_1 \sum_{k=1} \frac{1}{U_k}$$

Suuruste  $U_1$  ja  $U_k$  asemel võib kasutada ka primaarpingeväärtusi (kui ülekanalategur on konstantne), kuna valemis (4) on ainult pingete suhted.

Ülaltoodud mõõtemetoodika on õige ainult juhtumil, kui kuullahendaja elektroodidevaheline mahtivus on väike, võrreldes isolaatori mahtuvusega ja katse teostatakse koroonata juhtmeil ja isolaatoreil.

Kõrgpingeseadmete isolatsioonivoo valikul on oluline isolaatorite elektrilisi näitajaid teada:

- 1) kuivlahenduspinge tööstusliku sagedusega pingel,
- 2) märglahenduspinge tööstusliku sagedusega pingel,
- 3) impulsslahenduspinge (standardlainega ja lõigatud lainega),
- 4) läbilöögipinge tööstusliku sagedusega pingel.

Isolaatorite proovimisel määratakse isolaatoril tihti ka veel koroonal alguspinge.

Kuivlahenduspinge - kuiva ja puhta isolaatori ülelöögipinge tööstusliku sagedusega pingel pingel sujuval tõstmisel.

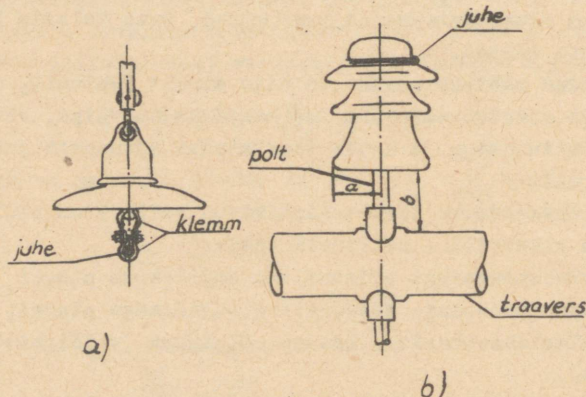
Märglahenduspinge - puhta ja märja isolaatori ülelöögipinge tööstusliku sagedusega pingel pingel sujuval tõstmisel. Isolaatorit proovitakse kunstliku vihma all (vihma intensiivsus 3 mm/min, vee eritakistus  $\rho_v = 9500 \pm 10500 \Omega \cdot \text{cm}$  vihma kaldenurk  $45^\circ$ ).

Läbilöögipinge - isolaatori läbilöögipinge elektroodide vahel. Kuna ülelöögipinge on alati väiksem kui läbilöögipinge õhus, saab viimast määrata ainult vedelas dielektrikus (trafoõlis), kus lahendus mõõda pinda on raskendatud.

Nii kuiv- kui ka märglahenduspinged antud isolaatoritüübile ja antud pingeklassile peavad standardi nõuetele vastama. Isolaatorite proovimisel, vastavalt POCT-ile, peavad olema järgmised nõuded täidetud:

- 1) proovipingete moonutused ei tohi olla üle 5 %,

- 2) proovipinge sagedus 50 Hz,
- 3) isolaatori pind olgu puhas ja kuiv,
- 4) kõrvalised seadmed peavad olema isolaatorist vähemalt 1 m kaugusel,
- 5) isolaatorid peavad olema nõuetekohaselt kinnitatud (vt. joon. 16).



Joon. 16. Isolaatorite kinnitamine proovimisel.  
a) rippisolaator; b) poltisolaator.

Rippisolaator riputatakse maandatud metalltoru külge, isolaatori klemmle kinnitatakse metalltoru (juhe), pikkusega 2 m, välisdiameetriga  $10 \pm 12$  mm.

Poltisolaator olgu kindlalt metallpoldile kinnitatud ja maandatud traaversile asetatud, suhe  $\frac{a}{b} = 1,5$  (vt. joon. 16). Isolaatori kaelale kinnitatakse traaversi suhtes  $90^\circ$  nurga all juhe, pikkusega 1,5 m, välisdiameetriga 11 - 13 mm.

Kuivlahenduspinged taandada normaaltingimustele vastavalt lisas antud nõuetele.

Keskmine lahendusväljatugevus  $E_k$ , mis iseloomustab isolaatori elektrivälja ja järelikult tema konstruktsiooni, määratakse seosega

$$E_k = \frac{U_1}{l},$$

kus  $U_1$  on kuivlahenduspinge kU,  $l$  - lahendustee pikkus (määratakse pingutatud niidi abil isolaatori peast või kaelast poldi või flanšini.)

## Metoodilisi juhendeid.

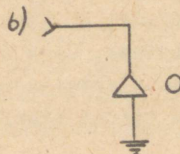
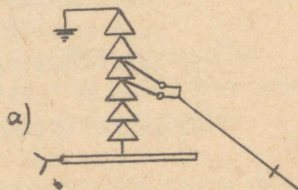
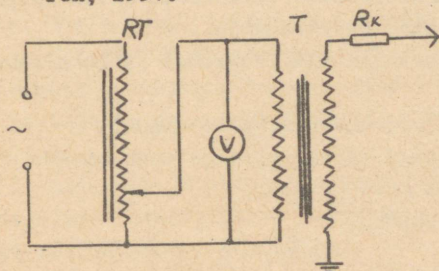
Pingejaotus määratakse ja isolaatorid proovitakse skeemi järgi, mis on toodud joonisel 17. Enne pingejaotuse määramist teha katseliselt kindlaks maksimaalne pinge, mille puhul seadmes ei ole koroonat. Mõõtekepi kuullahendaja elektroodide vahekaugus reguleeritakse nii, et keskmiste isolaatorite proovimisel tekiks lahendus. Koroonat alguspinge on parem määrata pinge vähendamisel - algul tõsta pinget selgelt nähtava koroonani, siis pinge vähendamisega fikseerida koroonat kustumine.

Kuivlahenduspinge määramisel võib pinget tõsta meelevaldse kiirusega kuni 50%-ni oodatavast lahenduspingest, kuid edasi kiirusega 1 + 2% sekundis. Teostatakse 3 proovimist ja määratakse keskmine.

Märghlahenduspinge määramisel on soovitatav kasutada suure võimsusega proovitrafot, kuna väikse võimsuse puhul vool sädekanalis on väike ja kaarlahendust ei teki. Prooviseadme taandatud kogutakistus (proovitrafo, toitesead, takisti lahendus ahelas) märghlahenduspinge määramisel ei tohi olla üle 2  $\Omega$  1 V märghlahenduspinge kohta.

### Kirjandus:

1. Сиротинский Л.И., ТВН, ч. П, стр. 25-45, 60-63, 232-233, ГЭИ, 1953 г.
2. Бабииков М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. 152-156, ГЭИ, 1954.



Joon. 17. Skeem isolaatorite proovimisel. a) pingejaotuse määramine rippisolaatorite ketil; b) isolaatorite kuiv- ja märghlahenduspingete määramisel. RT - reguleerimistransformaator; T - proovitransformaator; R<sub>k</sub> - takisti; 0 - proovitav isolaator.

## TRAFOÖLI LÄBILÖÖK

Töö eesmärk. Tutvuda trafoöli elektrilise tugevuse määramise meetodikaga.

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Määrata trafoöli elektriline tugevus vastavalt standardile (trafoöli kvaliteedi määramine).
4. Määrata trafoöli läbilöögipinge funktsioonina elektrootadidevahelisest kaugusest:
  - a) standardelektrootadid,
  - b) teravik-tasapind elektrootadid.
5. Määrata trafoöli läbilöögipinge statistiline jaotumine standardelektrootadide puhul.
6. Koostada aruanne, kus peab olema:
  - a) seadme põhimõtteline skeem,
  - b) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri,
  - c) katseandmed tabelis,
  - d) graafikud.
- 1) Läbilöögipinge funktsioonina elektrootadide vahelise kaugusest standardelektrootadide puhul.
- 2) Läbilöögipinge funktsioonina elektrootadide vahelise kaugusest teravik-tasapind elektrootadidel.
- 3) Läbilöögipinge funktsioonina läbilöögi järjekorranumbri p. 5 alusel.
- 4) Läbilöögipingete jaotuskõverad p. 5 alusel.
  - e) Antud täpsusega läbilöögipinge määramiseks vajaliku katsete arvu arvutus.
  - f) Tulemuste analüüs.

Töö selgitus.

Trafoöli on kõige levinumaid vedelaid dielektrikuid kõrgepingetehnikas. Seda kasutatakse trafode, kaablite, kondensaatrite ja elektriaparaatide isolatsiooniks. Oli põhilised näitajad on toodud tabelis.

Trafoõli põhilisi näitajaid:

Näitaja	Mõõt- ühik	Suurus
1. Värvus	-	kollane, kollakas-roheline
2. Erikaal temp-l 20°C	g/cm <sup>3</sup>	0,85 + 0,87
3. Viskoossus Engler'i jär- gi temp-l 50°C	°E	< 1,8
4. Süttimistemperatuur	°C	> 140
5. Külmutistemperatuur	"	< -20
6. Keemistemperatuur	"	170 + 200
7. Mahueritakistus $\rho_v$	$\Omega$ cm	10 <sup>12</sup> + 10 <sup>13</sup>
8. Dielektriline läbita- vus $\epsilon_r$	-	2,2 + 2,3
9. Tg $\delta$ temp-l 20°C	-	0,003
10. Elektriline tugevus stan- dardlahendajas	kV	> 20

Trafoõli läbilöökk allub statistika seadustele: üksikud läbilöögipinged väärtused erinevad palju keskväertusest, mis on antud õlisordi jaoks küllalt stabiilne.

Nähtused õli läbilöögil on sarnased analoogiliste nähtus-  
tega õhus, kuid on ka erinevusi: tõstes pinget astmeliselt,  
tekivad real juhtumel teatud pingeastmel üksikud sädemed, mis  
pinge tõstmisel kaovad. Sädemed esinevad sagedamini, kaar-lahen-  
dus tekib aga tunduvalt kõrgemal pingel.

Õli elektrilisele tugevusele avaldavad väga suurt mõju  
lisandid - niiskus, mehaanilised lisandid (kiud). Õli elektri-  
line tugevus ongi praktiliselt määratud lisandite hulgaga  
õlis.

Lisanditega õlis orienteeruvad lisandid elektrivälja suu-  
nas ning võivad tekkida juhtivad sillakesed elektroodide vahel,  
mis põhjustavadki läbilöögi.

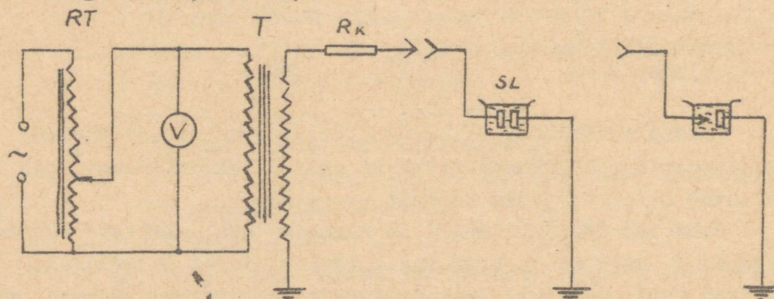
Õli elektriline tugevus sõltub ka temperatuurist: tempe-  
ratuuri tõustes üle toatemperatuuri kuni +60 + +70° C-ni  
elektriline tugevus tõuseb, siis hakkab langema. See on sele-  
tatav õlis oleva niiskuse kahe erineva faasi (molekulaarne -  
lahustatud ja emulsioon) erineva käitumisega temp. tõusul.

Kvantitatiivne niiskuse määramine õlis on raske, seetõtt-

tu õli niiskumise aste (ja ka teiste lisandite olemasolu) kontrollitakse õli läbilöögipinge määramisega standardelektroodide vahel - õli kvaliteedi määramine. See on kokkuleppeline kvaliteet, et määrata õli tugevus teiste elektroodide puhul. Vastavalt NSVL-is kehtivale standardile on elektroodideks katse-elektroodid, läbimõõduga 25 mm, elektroodide vahekaugus 2,5 mm, serva ümardusraadius 2,0 mm.

### Metoodilisi juhendeid.

Õli läbilöögipinge määratakse standardse prooviseadmega AMM-70. See seade koosneb pingereguleerimisest, proovitrafost ja standardlahendajast - 500 cm<sup>3</sup>-ne nõu standardelektroodidega (vt. joon. 18).



Joon. 18. Skeem trafoõli proovimiseks vahelduvpingel. RT - reguleerimistrafo, T - kõrgepinge proovitrafo, R<sub>k</sub> - kaitsetakisti, SL - standardlahendaja.

Õli proov standardlahendajas proovimiseks võtta väga korralikult, et vältida lisandite sattumist õlisse. Enne proovimist kontrollitakse elektroodide vahekaugus kalibri abil ja loputatakse nõu 2 korda proovitava õliga. Siis kallatakse nõusse 400 + 450 g õli ja lastakse seista 10 + 15 min. Seejärel tõstetakse pinget sujuvalt kuni läbilöögini (üksikuid isekustuvaid sädemeid ei arvestata). Teostatakse 6 läbilööki. Iga läbilöögi järel puhastatakse elektroodide vahemikku klaaspulgaga. Arvesse läheb viie viimase läbilöögi keskmine. Ajavahe mik üksikute läbilöökidest vahel 2 + 3 min.

Läbilöögipinge statistilise jaotumise määramiseks teostada 50 proovimist standardlahendis ja ehitada läbilöögipinge diferentsiaal- ja integraaljaotuskõverad.

Suhteline katsete arv, mille puhul läbilõhk toimus pingel  $U_k$ , on

$$p_k = \frac{n_k}{N}, \quad (1)$$

$n_k$  on läbilõhkide arv pingel  $U_k$ ,

$N$  - üldine läbilõhkide arv ( $N = 50$ ).

Kui  $N$  on küllalt suur, siis  $p_k$  on ligikaudselt läbilõhk-tõenäosus pingel  $U_k$ . Sõltuvust  $p_k = p_k(U_k)$  nimetatakse läbilõhkipinge diferentsiaalseks jaotusfunktsiooniks.

Läbilõhki tõenäosus pingel, mis on võrdne või väiksem kui  $U_k$ , on

$$\psi_k = \sum_{i=1}^k p_i = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{N}. \quad (2)$$

Sõltuvust  $\psi_k = \psi_k(U_k)$  nimetatakse läbilõhkipinge integraalseks jaotusfunktsiooniks.

Keskmise läbilõhkipinge määramisel antud katsete arvu juures tehtud vea või etteantud vea juures vajalike katsete arvu määramiseks on vajalik leida:

1) keskmine läbilõhkipinge

$$U_{\text{kesk}} = \frac{\sum_{k=1}^q n_k U_k}{N}, \quad (3)$$

kus  $q$  on suurim katsenumber, mis vastab kõrgeimale läbilõhkipingele;

2) ruutkeskmine kõrvalekalle

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^q (U_k - U_{\text{kesk}})^2 n_k}{N}}. \quad (4)$$

Viga keskmise läbilõhkipinge määramisel  $n$  katse puhul on:

$$\varepsilon = \frac{\sigma \cdot \delta}{\sqrt{n}}. \quad (5)$$

Vajalik katsete arv keskmise läbilõhkipinge määramiseks etteantud veaga :

$$n = \left( \frac{\sigma \cdot \delta}{\varepsilon} \right)^2. \quad (6)$$

$\delta$  suurus leitakse Krampi funktsioonist  $\overline{\Phi}(\delta) = \alpha$ , andes ette usaldatavuse (kindluse)  $\alpha$ . Tavaliselt võetakse  $\alpha_1 = 0,95$  või  $\alpha_2 = 0,99$ . Nendele vastavalt  $\delta_1 = 1,96$  ja  $\delta_2 = 2,58$ .

#### K i r j a n d u s:

1. Сиротинский Л.И., ТВН, Ч.П, стр. 146-156, ГЭИ, 1954 г.
2. ЛПИ, каф. ТВН, Руководство лаб. раб. по ТВН, раздел III, Высоковольтная изоляция, стр. 40-41, 1959 г.
3. Бурьянов Б.П., Трансформаторное масло, ГЭИ, 1955 г., стр. 46-49.

### T Ö Ö N R. 8

#### KADUDE MÕOTMINE DIELEKTRIKUS

Töö eesmärk. Tutvuda dielektriliste kadude kaonurga tangensi  $tg \delta$  ja mahtuvuse mõõtmisega vahelduvvoolu silla abil ning määrata katseliselt  $tg \delta$  ja mahtuvuse sõltuvus pingest.

#### Programm.

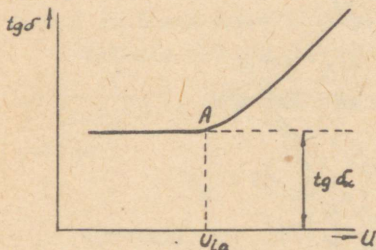
1. Tutvuda kadude mõõtmise katseseadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Määrata mahtuvuse ja  $tg \delta$  sõltuvus pingest:
  - a) dielektrikus esineva õhutühemiku maketil,
  - b) elektrimasina isolatsiooni maketil,
  - c) bakeliitisolaatoril.
4. Määrata ionisatsiooniprotsesside alguspinge p. 3 nimeetatud objektidel ionisatsiooniprotsesside indikaatori abil.
5. Koostada aruanne, milles peavad esinema:
  - a) seadme skeem,
  - b) katsetatavate objektide skitsid,
  - c) graafikud  $C = f(u)$  ja  $tg \delta = f(u)$  p. 3 alusel,

- d) punktide 3 ja 4 alusel määratud ionisatsiooniprot-  
sesside alguspinge võrdlemine,
- e) tulemuste analüüs,
- f) kasutatud mõõteriistade ja seadmete nimekiri.

### Töö selgitus.

Isolatsioonikonstruktsioonide ja materjalide  $tg \delta$  ja mah-  
tuvuse mõõtmist kasutatakse teaduslikel uurimistöodel, tehas-  
tes toodangu kontrollimisel ja eksploatatsioonis profülaktilis-  
tel proovimistel.  $tg \delta$  mõõtmisel selgitatakse välja isolat-  
siooni jaotatud defektid, mis võtavad enda alla enamuse dielekt-  
riku mahust või pinnast: niiskumine, õhutühemike ionisatsioon,  
mustumine jne. Väikese mahuvusega objektidel  $tg \delta$  mõõtmisel  
võib välja selgitada ka koondatud defekte.

Määrates  $tg \delta$  sõltuvuse pingest, võib üldised kaod dielekt-  
rikus jagada kadudeks dielektrikus endas ja kadudeks gaasitühe-  
mikes.



Joon. 19.  $tg \delta$  sõltuvus pin-  
gest gaasitühemi-  
kega tahkes dielekt-  
rikus.

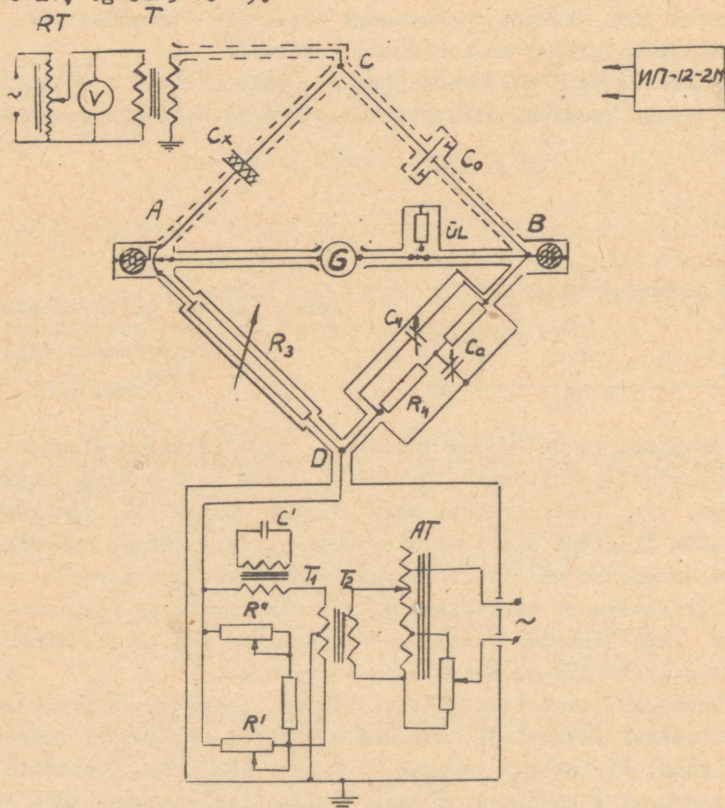
Joonisel 19 on toodud tüüpiline  $tg \delta$  sõltuvus pingest  $U$   
( $U$  on ionisatsioonikõver). Pinget  $U_{1a}$ , mil  $tg \delta$  hakkab järsku  
kasvama, nim. ionisatsiooni alguspingeks (punkt 1).  $tg \delta$  kasv  
võib olla tingitud nii ionisatsioonist gaasi- (õhu-) tühemikes  
kui ka koroonaast või liuglahendusest dielektriku pinnal.

Ionisatsiooni tekkimisel dielektriku mahtuvus tavaliselt  
kasvab, kuna lahenduse tõttu gaasitühemikes osa järjestikmah-  
tuvusi dielektriku asesseemis šunteeritakse.

Enamusele isolatsiooniliikidele on ionisatsiooniprotses-  
sid tööpingel lubamatud, kuna nende kestval esinemisel suure-  
nevad kaod, dielektrik laguneb ja toimub läbilõhk. Seetõttu  
ionisatsiooni alguspinge on väga oluline isolatsiooni töö- ja

prooviväljatugevuste määramisel.

Laboratoorne vahelduvvoolusild MDΠ on ette nähtud tahkete ja vedelate dielektrikute, kondensaatorite ja isolatsioonikonstruktsioonide  $\text{tg } \delta$  ja mahtuvuse määramiseks. Seadme põhimõtteline skeem on joonisel 20. Skeemis on proovitav objekt  $C_x$ , kõrgepinge etalonkondensaator  $C_0$ , takistusmagasin  $R_3$ , mahtuvuste magasin  $C_4$ , millega paralleelselt on takisti  $R_3$  (konstantne). Silda toidetakse trafost ИОМ-10 (pingetrafo,  $U_1/U_2 = 100/10000 \text{ V}$ ), pinget reguleeritakse autotrafoga. Silla diagonaali lülitatakse vibratsioonigalvanomeeter läbi võimendi. Etalonkondensaatoriks on õhkkondensaator P-51 ( $C_0 \approx 100 \text{ pF}$ ,  $U_N = 10 \text{ kV}$ ,  $\text{tg } \delta_0 \leq 5 \cdot 10^{-5}$ ).



Joon. 20. Vahelduvvoolu silla MDΠ põhimõtteline skeem.

Proovitava objekti  $tg\delta$  ja mahtuvus  $C_x$  määratakse seoste-  
ga

$$tg\delta = \omega R_4 C_4, \quad (1)$$

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \left( \frac{1}{1 + tg^2\delta} \right) \quad (2)$$

Mõõdetakse suuruste  $R_3$  ja  $C_4$  valikuga väärtustel, mil sild tasakaalustub. Silla õlg  $R_3$  on takistusmagasin  $10(1000 + 100 + 10 + 1 + 0,1) \Omega$ , millega järjestikku on potentsiomeeter  $0 + 1 \Omega$ . Takisti  $R_4$  antud sillal on  $\frac{1000}{\pi} = 3183 \Omega$ . Kui mõõtmise toimub tööstuslikul sagedusel (50 Hz), siis saame seosest (1)

$$tg\delta = \omega C_4 R_4 = 2\pi f C_4 R_4 = 2\pi \cdot 50 \frac{1000C}{\pi} C_4 = 10^6 C_4. \quad (3)$$

Seetõttu arvud mahtuvuste magasinini  $C_4$  käepidemetal, mis näitavad mahtuvust mikrofaradites, näitavad samaaegselt ka  $tg\delta$  väärtust. Kui mõõtmise toimub sagedusel  $f'$ , mis erineb 50 Hz, siis

$$tg\delta = N \frac{f'}{f},$$

kus  $N$  on lugem mahtuvusmagasini käepidemel.

Valemis (2) juhtumil, kui  $tg\delta \leq 0,03$ , võib ära jätta kordaja  $\left( \frac{1}{1 + tg^2\delta} \right)$ , kuna sellest tingitud viga ei ületa 0,1%. Sel juhtumil

$$C_x \approx C_0 \frac{R_4}{R_3}. \quad (4)$$

Juhtumil, kui mõõdetakse mahtuvust, mis on suurem kui 100 pF, ja  $tg\delta \leq 10^{-4}$ , on vajalik arvestada etalonkondensaatori  $tg\delta_0$  ja viia sisse parandus  $N$  väärtusesse, kasutades silla passiandmeid.

$$tg\delta = tg\delta_0 + \frac{f'}{f} N', \quad (5)$$

kus

$$N' = N + \Delta N.$$

$\Delta N$  on parandus pF-s, antud seadme passiandmeis funktsioonina  $N(C_4)$ -st.

$tg\delta$  mõõtmise piirid sillaga MDN on  $1 \cdot 10^{-4} \leq tg\delta \leq 1,0$ . Takisti  $R_4$  valik 3183  $\Omega$  võimaldab küllaldase täpsusega mõõta väikseid  $tg\delta$  väärtusi, kuid sellise  $R_4$  väärtuse juures toimub mõõtmise suhteliselt suurteil pingetel silla mõõteõlgades AD ja BD. See võib tekitada mõõtevea, mis on tingitud parasitsetest

mahtuvusvooludest ja kaovooludest läbi isolatsiooni (mõõteõl-  
gade isolatsioon ja kaablite isolatsioon, mis ühendab  $C_x$  ja  $C_o$   
punktidega A ja B). Et vältida nimetatud vea tekkimist, on sil-  
la skeemi ette nähtud seade kaitsepinge saamiseks. See pinge  
lülitatakse punkti D ja maa vahele ja oma suuruselt peab  
olema võrdne pingelanguga takistil  $R_4$  ja kondensaatoril  $C_4$ ,  
kuid vastufaasis. Sel juhtumil punkt B ja tasakaalustatud sil-  
lal punkt A omavad läbi galvanomeetri maa potentsiaali.

Silla skeemis on ette nähtud ümberlülitit ÜL (vt. joon.20),  
millega saab ühe galvanomeetri G otsa lülitada kas skeemi  
punkti B või maasse (ekraani). Tasakaalustatud silla puhul  
ja õige kaitsepinge valikul (nii suurus kui ka faas!) ümber-  
lülitit asendi muutus ei mõjuta galvanomeetri näitu. Kuid kait-  
sepinge kasutamine ei võimalda mõõta  $t_g$  ja  $C_x$  objektidel, mil-  
le üks elektrood on jäigalt maandatud.

Silla elemendid (takistusmagasini  $R_3$  takistid) omavad  
mahtuvuse silla ekraani suhtes. Et vältida vigu, mis on tingi-  
tud neist mahtuvustest, sümmetreeritakse sild ekraani suhtes  
muutuva mahtuvuse  $C_a$  abil. Sümmetreeritakse silla ümberpaigu-  
tamisel uude kohta ja perioodiliselt rea mõõteseriade vahel.

#### Metoodilisi juhendeid.

Seadme õigeks tööks ja mõõtmiste küllaldase täpsuse kind-  
lustamiseks peavad olema kindlustatud toitepinge ja sageduse  
stabiilsus, samuti toitepinge siinuselisus. Pingekõveras kõr-  
gemate harmooniliste olemasolul on silla tasakaalustamine prak-  
tiliselt võimatu. Mõõta saab vaid ligikaudselt.

Ekraaneeritud ühendusjuhtmed peavad olema töökorras - eri-  
ti juhtmed, mis ühendavad  $C_o$  ja  $C_x$  sillaga. Nende isolatsioo-  
nitakistus peab olema vähemalt 10 M $\Omega$ , kuna kaovoolud läbi iso-  
latsiooni tekitavad mõõtevea. Ekraanid peavad olema jäigalt  
maandatud.

Töö läbiviimise järjekord:

1. Ühendada skeem vastavalt joonisele 20.
2. Viia galvanomeetri tundlikkus ja võimendi võimendus  
minimaalseks.
3. Asetada ümberlülitit ÜL keskmisse asendisse.

4. Kontrollida, et autotrafo, mis reguleerib toitepinget, oleks nullasendis.
5. Asetada magasinide  $R_3$  ja  $C_4$  käepidemed nullasendisse.
6. Lülitada sisse silla, võimendi ja galvanomeetri toide, seejärel kõrgepingetrafo toide ja tõsta pinget sillal vajaliku väärtuseni.
7. Teostada eelnev mõõtmine, milleks asetada ümberlüüti asendisse "sild", galvanomeetri regulaator asendisse 2 ja võimendi käepide keskasendisse. Vaheldumisi  $R_3$  ja  $C_4$  reguleerides tasakaalustada sild, suurendades aeg-ajalt galvanomeetri tundlikkust ja võimendi võimendust. Pärast tasakaalustamist viia galvanomeetri tundlikkus tagasi asendisse 1.
8. Reguleerida kaitsepinge, milleks viia ümberlüüti asendisse "ekraanid" ning potentsiomeetritega "jāme" („рyбo") saavutada minimaalne kiire laius galvanomeetri ekraanil, seejuures järjest galvanomeetri tundlikkust suurendades. Edasi reguleerida potentsiomeetritega "peen" (ТОНКО) kuni minimaalse kiire laiuseni maksimaalse tundlikkuse juures. Pärast seda viia galvanomeetri tundlikkus asendisse 1.
9. Teostada täpsustatud mõõtmine, milleks viia ümberlüüti asendisse "sild" („МОСТ") ja edasi toimida nii, nagu on kirjeldatud punktis 7. Silla täielikus tasakaalulukorras ümberlüüti asendi muutmine ei mõjuta kiire laius galvanomeetri ekraanil ja mõõtmine loetakse lõpetatuks, fikseerides  $R_3$  ja  $C_4$  ( $tg \delta$ ) ning arvutades  $C_x$  seosest (2) või (4).

Ionisatsiooniprotsesside alguspinge määramisel indikaator lülitatakse kas paralleelselt takistiga  $R_3$  või silla diagonaali AB. Indikaatorina kasutatakse raadiohäirete mõõtjat III -12 2M.

#### Kirjandus:

1. Сиротинский Л.М., Техника высоких напряжений, ч. П, ГЭИ, 1953 г., стр. 216-218.
2. Тареев Б.М., Казарновский Д.М., Испытания электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959 г., стр. 34-44.

3. Справочник по электротехническим материалам, том I, часть II, стр. 25-29.

T Ö Ö N R. 9.

TAHKE DIELEKTRIKU ELEKTRILISE TUGEVUSE MÄÄRAMINE

Töö eesmärk. Tutvuda tahke dielektriku elektrilise tugevuse määramisega.

Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Määrata kuiva paberi läbilöögipinge funktsioonina kihtide arvust  $n$ .
4. Määrata õlis immutatud paberi läbilöögipinge funktsioonina kihtide arvust  $n$ .
5. Määrata kondensaatoripaberi läbilöögipinge funktsioonina kihtide arvust  $n$ .
6. Määrata klaasi 1-min. tugevus.
7. Koostada aruanne, milles peavad olema:
  - a) seadme skeem,
  - b) katseandmete tabelid,
  - c) graafikud  $U_{gg} = f(n)$  punktide 3, 4 ja 5 alusel,
  - d) tulemuste analüüs,
  - e) kasutatud seadmete ja mõõteriistade nimekiri koos nende tehniliste näitajatega.

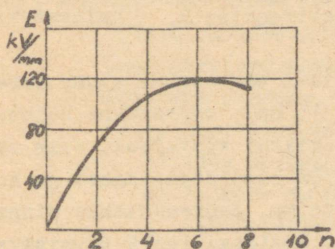
Töö selgitus.

Kõrgpingetehnikas enam levinenud tahked dielektrikud on paber, portselan ja klaas. Paberit kasutatakse peamiselt

kaablite, kondensaatorite ja elektriaparaatide isolatsiooni valmistamisel. Immutamata paber on väikese elektrilise tugevusega - paberis olevates õhutühemikes algab ionisatsioon, mis põhjustab läbilöögi. Et suurendada paberi elektrilist tugevust, immutatakse paber vedela dielektrikuga, tavaliselt trafoõliga, kuid kasutatakse ka sünteetilisi vedelikke (sovool) või vase-liini. Immutamisel täidab vedel dielektrik paberis õhutühemikud ja poorid, suurendades nii paberi elektrilist tugevust kui ka niiskusekindlust ja mehaanilist tugevust.

Erinevatest paberiliikidest on enam levinemud kaablipaber ja kondensaatoripaber. Kaablipaber on valmistatud sulfaattselluloosist, erikaal  $\gamma = 0,8 + 1,25 \text{ g/cm}^3$ , paksus  $20 + 200 \mu$ . Kondensaatoripaber on samuti sulfaattselluloosist valmistatud, erikaal  $0,9 + 1,25 \text{ g/cm}^3$ , paksus  $6 + 20 \mu$ .

Õhukesekihilise immutatud paberi isolatsiooni läbilöögil on iseloomulik läbilöögipingete suur hajuvus ja läbilöögipingete vähenemine proovikeha pinna suurenemisel. Seletatav on see paberi suure mitteühtlusega - alati leidub paberis juhtivaid osakesi, mille arv pinnatühiku kohta suureneb paberi paksuse vähenemisega (kümnetest kuni sadadeni  $1 \text{ m}^2$  kohta). On pindala suurem kui mõni  $\text{cm}^2$ , siis alati esineb mõni juhtiv osake, mis šunteerib selle paberilehe. Seega proovikehal, mis koosneb 2-st lehest, määrab elektrilise tugevuse praktiliselt 1 leht, kolme lehe puhul - 2 lehte jne. Väikeste lehtede arvu puhul ( $1 + 8$ ) esineb läbilöögi ühtlases väljaosas, kuna juhtivate osakeste esinemise tõenäosus on seal suurem kui servadel. Lehtede arvul üle  $6 + 8$  mõjub ääreefekt - läbilöögid toimuvad elektroodi serval ja läbilöögiväljatugevus väheneb (vt. joon. 21).



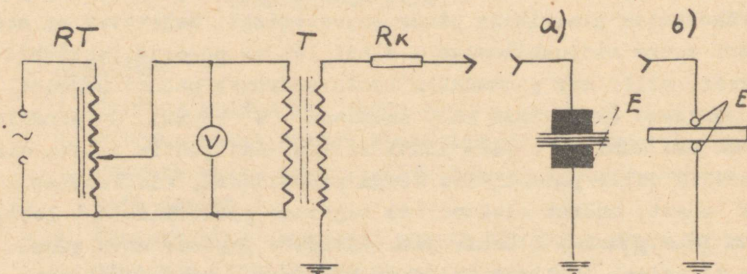
Joon. 21. Keskmise läbilöögi elektriväljatugevuse sõltuvus paberilehtede arvust n.

## Metoodilisi juhendeid.

Tahke dielektriku elektriline tugevus määratakse joonisel 22 esineva skeemi järgi. Proovikehaks oleva paberi paksus mõõdetakse mikromeetriga. Elektroodidevahelise dielektriku paksumust reguleeritakse paberilehtede arvu muutmiselega. Elektroodideks on silindrilised vaskelektroodid, läbimõlduga 50 mm. Iga lehtede arvu  $n$  juures määratakse kolm läbilõõgipinget ja arvutatakse keskmine. Keskmine läbilõõgiväljatugevus arvutatakse seosega:

$$E_{\text{kesk}} = \frac{U_{11}}{(n-1)d} \text{ kv/mm,}$$

kus  $U_{11}$  on läbilõõgipinge antud lehtede arvu  $n$  juures,  
 $n$  - lehtede arv,  
 $d$  - üksiku lehe paksus.



Joon. 22. Skeem tahke dielektriku elektrilise tugevuse määramiseks: a) paberi elektrilise tugevuse määramiseks; b) klaasi 1-min. tugevuse määramiseks. RT - reguleerimistrafo; T - kõrgepinge proovitrafo; E - elektroodid; R<sub>k</sub> - kaitsetakisti.

Klaasi 1-min. tugevuse määramisel asetatakse klaas kerakujuliste elektroodide vahele ( $\phi = 15$  mm), määratakse eelnevalt läbilõõgipinge pinge sujuval kiirel tõstmisel. Siis rakendatakse klaasile pinge, mis on 50% läbilõõgipingest ja hoitakse nii 1 min. Kui läbilõõki ei toimu, suurendatakse pinget 5 kV võrra ja hoitakse jälle 1 min. Analoomiliselt toimitakse kuni läbilõõgini. Klaasi 1 min. tugevuseks loetakse suurimat pinget, mida klaas talus 1 min. vältel.

## K i r j a n d u s:

1. Справочник по электрическим материалам, том I, часть II, стр. 56-59, ГЭИ, 1959 г.
2. Тареев Б.М., Казарновский Д.Н., Испытание электроизоляционных материалов, ГЭИ, 1959 г., стр. 67-82.

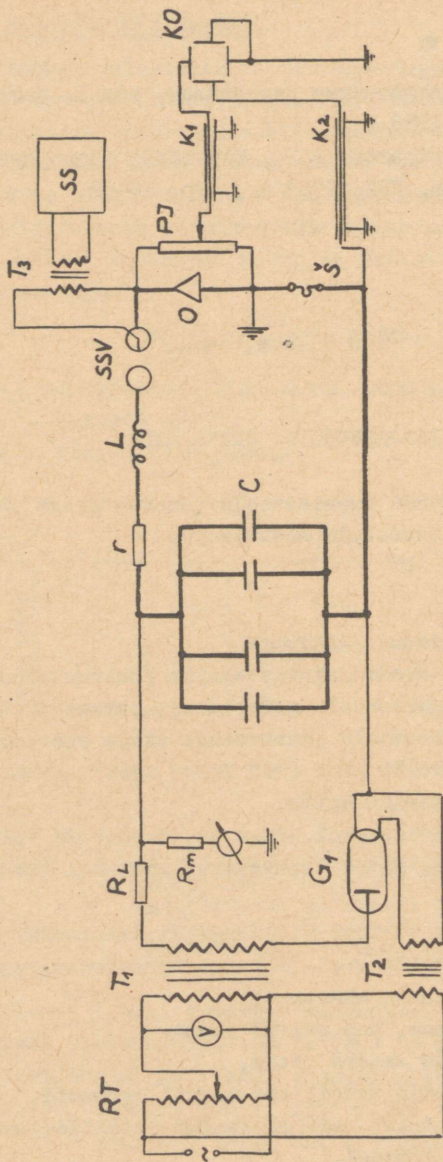
## T Õ Õ N R. 10

### IMPULSSVOOLU GENERAATOR

Töö eesmärk. Tutvuda impulssvoolu generaatoriga ja impulssvoolude mõõtmisega.

#### Programm.

1. Tutvuda kasutatava seadmega.
2. Tutvuda antud seadme ohutustehnika instruksiooniga.
3. Fikseerida impulssvoolu generaatori parameetrid.
4. Koostada impulssvoolu generaatori skeem aperioidilise vooluimpulsi  $10/20 \mu\text{sec}$  (või  $20/40 \mu\text{sec}$ ) saamiseks läbi ventiillahendi ketta.
5. Ostsillografeerida vool, pinge ja fikseerida volt-ampere karakteristikud mitmel kondensaatorpatarei laadimispingel vahetusel.
6. Koostada skeem võnkuva vooluimpulsi saamiseks.
7. Ostsillografeerida vool ja pinge kondensaatorpatarei laadimispingel ühel vahetusel.
8. Koostada aruanne, kus peavad olema:
  - a) kasutatud seadme skeem,
  - b) töös saadud tüüpilised ostsillogrammid,
  - c) andmete tabel, mis on saadud ostsillogrammide dešifreerimisel,
  - d) saadud tulemuste analüüs,
  - e) kasutatud mõõteriistade nimekiri.



Joon. 23. Impulssvoolu generaatori skeem.

RT - reguleerimistrafo, T<sub>1</sub> - kõrgepingetrafo, T<sub>2</sub> - kütetrafo, T<sub>3</sub> - suüte-  
seadme isoleerimise trafo, G<sub>1</sub> - gasotron, R<sub>L</sub> - laadimistakistus, C - kon-  
densaatorpatarei, r - vooluringi aktiivtakistus, L - vooluringi induktiivsus;  
SSV - süütesõdevahe, O - objekt, S - sünt, PI - pingesajaja, K<sub>1</sub>, K<sub>2</sub> - koak-  
siaalsed kaablid, K<sub>0</sub> - katoodostisillograaf, SS - süüteseade, R<sub>m</sub> - mõõtetakis-  
ti järjestikku mõõteriistaga laadimispinge mõõtmiseks.

## Töö selgitus.

Impulssvoolu generaator on seade, millega saadakse lühiajalisi tugevaid vooluimpulsse välguvoolu imiteerimiseks või tugevate magnetväljade loomiseks. Välguvoolude imiteerimine on vajalik maanduskontuuride karakteristikute määramisel, välguvoolude termilise ja elektrodünaamilise mõju kindlakstegemisel juhtmeil ning ventiillahendajate kaitsekarakteristikute määramisel. Tugevaid magnetvälju on vaja eelkõige tuumafüüsikas juhitavate termotuumaprotsesside teostamiseks.

Põhimõtteliselt impulssvoolugeneraator on suure mahtuvusega kondensaatorpatarei, mis laetakse läbi suhteliselt suure takisti ja tühjendatakse läbi sädevahe väikese takistusega vooluringi. Impulssvoolu generaatori skeem on toodud joon. 23. Reguleerimistrafo RT, kõrgepinge proovitrafo  $T_1$  ja gasotroni  $G_1$  abil laetakse kondensaatorpatarei C läbi laadimistakisti  $R_L$ . Laadimispinget mõõdetakse milliampermeetriga, mis on järjestikku suure takistiga  $R_m$ . Kui kondensaatorpatarei on täis laetud, saadetakse sütteseadetest SS süüteimpulss läbi isoleertrafo süütesädevahesse SSV ja patarei tühjeneb läbi vooluringi aktiivtakistuse r, induktiivsuse  $L$ , objekti O ja mõõtesundi š. Suurus-tega r ja L reguleeritakse vooluimpulsi kuju.

Vooluimpulsi registreerimiseks kasutatakse šunti, millele tekviv pingelang fikseeritakse ostsillograafil. Voolu õige registreerimine on ainult siis võimalik, kui pingelang šundil on võrdeline vooluga, s.t. tuleb vältida induktiivset pingelangu šundil. See on võimalik spetsiaalse konstruktsiooniga induktiivsusvaba šundi kasutamisega.

Vooluimpulsi kuju täpne arvutus on raskendatud, kuna arvutuses on vajalikud ligikaudselt hinnatavad seadme parasitinduktiivsus  $L_{par}$  ( $L_{par} = L_{juhtme} + L_{sädevahe} + L_{objekt} + \frac{L_{kond}}{n}$ ) ja juhtmete aktiivtakistus ning objekti volt-amperkarakteristik on tihti mittelineaarne (viliittakisti). Seetõttu parameetrid L ja r määratakse ligikaudsete valemite abil ja hiljem täpsustatakse saadud ostsillogrammide alusel.

Et antud kondensaatorpatarei mahtuvusel C saada vooluimpulsi, mille frondi pikkus oleks  $t_f$ , lahendusringi induktiivsus L, peab olema

$$L = \frac{4 t_F^2}{\pi^2 C} \quad (1)$$

Lahendusvooluringi üldine takistus  $r$ , et lahendus oleks aperioidiline, peab olema:

$$r \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (2)$$

kusjuures takistuse  $r$  kriitiline väärtus  $r_{kr}$  vastab impulsile, mille pikkus on kaks korda suurem frondi pikkusest (näit. 10/20, 20/40  $\mu\text{sec.}$ ).

Kõrvaldades vooluringist lisaaktiivtakistuse, saame võnkuva vooluimpulsi.

Ligikaudne vooluimpulsi amplituud määratakse seostega:

a) kriitiline aperioidiline impulss:

$$I = \frac{2 U}{e r_{kr}} = 0,76 \frac{U}{r_{kr}}, \quad (3)$$

b) võnkuv vooluimpulss:

$$I = \frac{U}{\sqrt{\frac{L}{C}}}, \quad (4)$$

kus  $U$  on kondensaatorpatarei laadimispinge.

#### Metoodilisi juhendeid.

Vastavalt skeemile joon. 23 teostada parameetrite  $r$  ja  $L$  valik valemite (1) ja (2) abil. Teostada vajalikud ühendused, lülitada sisse gasotroni küte ja ca 1 min. pärast lülitada sisse kõrgepingetrafo. Tõstes laadimispinge vajaliku kõrguseni, võib süüteseadme käivitusnupule vajutamine tekitada lahenduse, mida saab jälgida ostsillograafi ekraanil. Vooluimpulsside registreerimiseks fotografeeritakse need. Kiire heledus valida väike, et saada fotol suuremat teravust. Vooluimpulsi aja- ja voolumastaabi määramiseks kasutatakse vahelduvpingegeneraatorit (näit. FCC - 6). Kui pinge  $U_{gr} = 100$  V, tekitab kõrvalkalde  $h_g$  (kõrvalekalle max-st max-ni),

siis tegur  $k_1 = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot 100}{h_g} \text{ V/m}$

ja voolutugevus

$$I = \frac{k_1 \cdot h_2}{r_{\text{Sunt}}} \cdot 10^{-3} \text{ kA,}$$

kus  $h_2$  on vooluimpulsi kõrgus.

Ka pingemastaabi määramisel kasutada analoogilist metoodikat:

kui pinge objektil on  $U$ , siis pinge ostsillograafi plaatidel on

$$u = kU,$$

kus  $k$  on pingejagaja jagamistegur.

Samal ajal

$$u = \frac{U_g}{h_g} h,$$

kus  $U_g$  on gradueerimispinge voltides,

$h_g$  - sellele pingele vastav kõrvalekalle,

$h$  - kõrvalekalle pingel  $U$  objektil.

Seega

$$U = \frac{U_g \cdot h}{h_g \cdot k}.$$

### K i r j a n d u s:

1. Сиротинский Л.И., ТВН, ч. I, стр. 278-281, ГЭИ, 1951 г.
2. Воробьев А.А., Высоковольтное испытательное оборудование и измерения, стр. 349-355, ГЭИ, 1960 г.
3. Бабилов М.А., Комаров Н.С., Сергеев А.С., ТВН, стр. II2-II3, ГЭИ, 1955 г.
4. МВ и ССО РСФСР ЛПИ, каф. ТВН, Руководство к лабораторным работам по ТВН, раздел I, Высоковольтные измерения и испытания, 1960 г.

## LAHENDUSPINGETE TAANDAMINE NORMAALTINGIMUSTELE

Et võrrelda omavahel lahenduspingeid, mis on erinevatel atmosfäärilistel tingimustel fikseeritud (rõhk  $p$ , temperatuur  $\varrho$ , õhuniiskus  $\chi$ ), on vaja need pinged taandada võrdsetele, nn. normaaltingimustele. Vastavalt NSVL-is kehtivale standardile on atmosfääri normaaltingimused järgmised:

- 1) Õhutemperatuur  $\varrho = 20^{\circ}\text{C}$  ( $293^{\circ}\text{K}$ );
- 2) Õhurõhk  $p = 760$  mm Hg;
- 3) Õhu absoluutne niiskusk  $\chi = 11$  g/m<sup>3</sup> (veeauru rõhk  $D = 11,15$  mm Hg).

Lahenduspinged taandatakse normaaltingimustele seosega:

$$U_1 = U_1' \frac{k}{\sigma}, \quad (1)$$

kus  $U_1$  on lahenduspinge normaaltingimustel,

$U_1'$  - lahenduspinge antud atmosfääritingimustel,

$\sigma$  - suhteline õhutihedus,

$k$  - õhu niiskust arvestav tegur.

Suhteline õhu tihedus avaldub valemiga:

$$\sigma = \frac{p(273 + 20)}{760(273 + \varrho)} = 0,386 \frac{p}{(273 + \varrho)}. \quad (2)$$

Õhu niiskust arvestatakse teguriga  $k$  või protsentuaalse parandusteguriga  $H = (k - 1) \cdot 100\%$ , mis sõltuvad rakendatud pinge liigist ja kasutatud isolatsiooni tüübist ning määratakse vastavatest kõveratest (vt. joon. 24).

Õhu niiskuse mõju lahenduspingele väheneb keskmise elektroottevahelise lahendusväljatugevuse suurenemisega. Seega ühtlases ja suhteliselt väikese ebahütlusega (mõõtekuulide vahel!) väljas, kus keskmine lahendusväljatugevus on suur, niiskuse mõju lahenduspingele ei arvestata. Mitteühtlases väljas (teravik-teravik, teravik-tasapind) on kõige suurem mõju niiskusel tõstusliku sagedusega vahelduvpingel (vt. joon. 24, kõverad A, B).

Niiskuse mõju positiivsele tõukepingele (standardlaine,  $1,5/40 \mu\text{sec}$ ) on väiksem kui vahelduvpingel seoses keskmise väljatugevuse suurenemisega.

Impulsi pikkuse vähenemine suurendab keskmist lahendusväljatugevust, järelkult väheneb niiskuse mõju impulsi lühenedes (vt. joon. 24, kõver F).

Kõverad C, D E ja F joonisel 24 on ehitatud 50%-ste lahenduspingete alusel. Lahenduseelne aeg sellistel mõõtmistel on suur. Kui isolatsioonile mõjuvad pinged on suuremad kui 50%-ne lahenduspinge, suureneb keskmine lahendusväljatugevus. Seega väheneb niiskuse mõju lahenduspingele. Samal ajal väheneb ka lahenduseelne aeg. On kindlaks tehtud, et impulsspingetel, mis ületavad 50% lahenduspinge kui lahenduseelne aeg  $\tau < 10 \mu\text{sec}$ , niiskust arvestav parandustegur  $H$ -s (H) väheneb võrdeliselt lahenduseelse ajaga:

$$H' = H \frac{\tau}{10}, \quad (3)$$

kus  $\tau$  on lahenduseelne aeg,

H - parandus 50 %-se lahenduspinge puhul joon. 24.

Väikestel elektroodide vahekaugustel lahendusväljatugevus sõltub tunduvalt elektroodide vahekaugusest, suurenedes vahekauguse vähenedes. Vastavalt väheneb ka niiskuse mõju. Samal ajal vahekauguse vähenedes väheneb lahenduspinge. On kindlaks tehtud, et pinge amplituudil alla 141 kV (impulss, vahelduvpinge) väheneb niiskuse parandustegur H võrdeliselt pingega

$$H'' = H \frac{U_m}{141}, \quad (4)$$

kus

$U_m$  on lahenduspinge amplituud ( $U_m < 141$  kV),

H - parandus pingel  $U_m \geq 141$  kV (vastavalt joonisele 24).

Niiskuse mõjust alalispingele on vähe andmeid. Positiivse alalispinge jaoks võib kasutada joon. 24 kõverat positiivse standardpingeimpulsi kohta. Negatiivsel alalispingel võib niiskuse mõju mitte arvestada.

Õhu niiskus määratakse psühromeetri abil (tüüp Ashman).

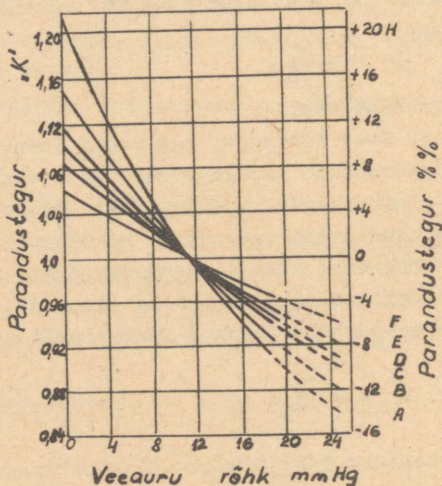
Selle psühromeetriga määratakse kuiva ja märja termomeetri näitude vahe, nn. psühromeetiline vahe  $\Delta\vartheta = \vartheta_k - \vartheta_m$ . Mida suurem on psühromeetiline vahe, seda kuivem on õhk, s.t. seda väiksem on õhu suhteline niiskus, s.o. õhus ruumiühikus oleva veeauru massi suhe õhku küllastava veeauru massi samal temperatuuril.

Tabelist 1 leitakse kuiva termomeetri näidu ja psühromeet-  
rilise vahe abil õhu suhteline niiskuse protsentides B%.

Tabelist 2 leitakse veeauru rõhk  $D_0$ , mis küllastab õhku  
antud temperatuuril (mõõdetud kuiva termomeetriga). Veeauru  
rõhk katsetingimustel D leitakse suhtelise niiskuse ja õhku  
küllastava veeauru rõhu korrutisena:

$$D = \frac{D_0 \cdot B\%}{100} \quad (5)$$

Saadud D abil määratakse joon. 24 niiskuse parandustegur  
k või H.



Isolatsiooni tüüp	SOHz	Impulsspinge		
		+	-	+
		1,5/40	1,5/40	1,5
Varras sädevahed	B	C	D	F
Rippisolaatorid	B	C	D	F
Tugiisolaatorid	A	D	E	-
Aparaatide läbiviigud	B	D	E	-
Sädevahedega läbiviigud	B	C	D	-

Joon. 24. Graafik õhu niiskust arvestava paranduteguri  
määramiseks



Таблица 2

## Давление насыщающего водяного пара (мм рт. ст.)

$t^{\circ}$	$D_0$	$t^{\circ}$	$D_0$	$t^{\circ}$	$D_0$
0	4,58	11	9,84	21	18,65
1	4,93	12	10,52	22	19,83
2	5,29	13	11,23	23	21,07
3	5,69	14	11,99	24	22,38
4	6,10	15	12,79	25	23,76
5	6,54	16	13,68	26	25,21
6	7,01	17	14,53	27	26,74
7	7,51	18	15,48	28	28,35
8	8,05	19	16,48	29	30,04
9	8,61	20	17,54	30	31,82
10	9,21				

## KUULLAHENDITE LÄBILÖÖGIPINGED

Таблица 1

## Пробивные напряжения шаровых разрядников в кв

Симметричное распределение напряжения. 1. Переменное напряжение низкой частоты.  
2. Импульсы положительной и отрицательной полярности. 3. Постоянное напряжение положительной и отрицательной полярности. Атмосферное давление 760 мм рт. ст., температура 20°С.

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	2	5	6,25	10	12,5	15	25
0,05	2,4	—	—	—	—	—	—
0,1	4,4	—	—	—	—	—	—
0,15	6,3	—	—	—	—	—	—
0,2	8,2	8,0	—	—	—	—	—
0,3	11,6	—	—	—	—	—	—
0,4	14,9	14,3	14,2	—	—	—	—
0,5	18,1	—	—	16,9	16,7	16,5	—
0,6	21,2	20,4	20,2	—	—	—	—
0,7	24,1	—	—	—	—	—	—
0,8	26,9	26,4	26,2	—	—	—	—
0,9	29,5	—	—	—	—	—	—
1,0	32,0	32,2	32,0	31,6	31,5	31,3	31
1,2	36,7	37,8	37,6	—	—	—	—
1,4	41,2	43,3	43,2	—	—	—	—
1,5	—	—	—	45,8	45,7	45,5	45
1,6	(44,2)	48,5	48,6	—	—	—	—
1,8	(48,7)	53,5	53,9	—	—	—	—
2,0	(51,8)	58,3	59,0	59,3	59,4	59,2	59
2,2	—	62,8	63,9	—	—	—	—
2,4	—	67,3	68,6	—	—	—	—
2,5	—	69,4	70,9	72,4	72,6	72,9	72
3,0	—	79,3	81,8	84,9	85,4	85,8	86
3,5	—	88,3	91,8	96,5	97,7	98,4	—
4	—	(96,4)	101	107	110	111	113
4,5	—	(104)	109	118	121	123	—
5	—	(111)	(117)	128	132	134	138
5,5	—	—	(124)	137	142	145	—
6	—	—	(131)	146	152	155	162
6,5	—	—	—	155	161	165	—
7	—	—	—	163	170	175	185
7,5	—	—	—	170	179	185	—
8	—	—	—	(177)	187	194	207
9	—	—	—	(191)	203	211	228
10	—	—	—	(203)	(217)	227	248
11	—	—	—	—	(229)	242	267
12	—	—	—	—	(241)	(256)	286
13	—	—	—	—	—	(268)	303
14	—	—	—	—	—	(280)	320
15	—	—	—	—	—	(292)	336
16	—	—	—	—	—	—	352
18	—	—	—	—	—	—	381
20	—	—	—	—	—	—	(407)
22	—	—	—	—	—	—	(431)
24	—	—	—	—	—	—	(452)
25	—	—	—	—	—	—	(463)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	50	75	100	125	150	175	200
2	58	58	—	—	—	—	—
2,5	—	—	71	—	—	—	—
4	112	112	—	—	—	—	—
5	—	—	137	137	137	137	137
6	164	164	—	—	—	—	—
8	214	215	—	—	—	—	—
10	263	265	266	266	267	266	265
12	309	314	—	—	—	—	—
14	353	362	—	—	—	—	—
15	—	—	388	388	389	389	389
16	394	408	—	—	—	—	—
18	434	452	—	—	—	—	—
20	472	495	504	508	511	511	511
22	507	535	—	—	—	—	—
24	542	576	—	—	—	—	—
25	—	—	613	624	628	630	632
26	575	615	—	—	—	—	—
28	607	652	—	—	—	—	—
30	638	689	714	732	741	745	747
32	666	725	—	—	—	—	—
34	693	759	—	—	—	—	—
35	—	—	812	835	848	857	860
36	718	793	—	—	—	—	—
38	(742)	825	—	—	—	—	—
40	(767)	856	902	932	950	964	972
45	(823)	929	986	1020	1050	1070	1080
50	(874)	997	1070	1110	1140	1170	1180
55	—	1060	1140	1200	1230	—	—
60	—	(1120)	1210	1280	1320	1350	1380
65	—	(1170)	1280	1350	1410	—	—
70	—	(1220)	1340	1420	1490	1530	1560
75	—	(1270)	1400	1500	1560	—	—
80	—	—	(1460)	1570	1640	1690	1730
90	—	—	(1560)	1690	1780	1840	1900
100	—	—	(1660)	(1800)	1910	1990	2050
110	—	—	—	(1900)	2030	2120	2190
120	—	—	—	(2000)	(2140)	2240	2330
130	—	—	—	—	(2240)	(2360)	2460
140	—	—	—	—	(2340)	(2470)	2580
150	—	—	—	—	(2420)	(2570)	2690
160	—	—	—	—	—	(2670)	(2800)
180	—	—	—	—	—	—	(3000)
200	—	—	—	—	—	—	(3180)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.

Таблица 2

## Пробивные напряжения шаровых разрядников в кВ

Один шар заземлен. 1. Переменное напряжение низкой частоты. 2. Импульсы отрицательной полярности. 3. Постоянное напряжение отрицательной полярности. Атмосферное давление 760 мм рт. ст., температура 20°C.

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	2	5	6,25	10	12,5	15	25
0,05	2,4	—	—	—	—	—	—
0,1	4,4	—	—	—	—	—	—
0,15	6,3	—	—	—	—	—	—
0,2	8,2	8,0	—	—	—	—	—
0,3	11,8	—	—	—	—	—	—
0,4	14,8	14,3	14,2	—	—	—	—
0,5	18,0	—	—	16,9	16,7	16,5	—
0,6	21,0	20,4	20,2	—	—	—	—
0,7	23,9	—	—	—	—	—	—
0,8	26,6	26,3	26,2	—	—	—	—
0,9	29,0	—	—	—	—	—	—
1,0	31,2	32,0	31,9	31,6	31,5	31,3	31
1,2	35,1	37,6	37,5	—	—	—	—
1,4	38,5	43,0	43,0	—	—	—	—
1,5	40,0	—	—	45,6	45,6	45,5	45
1,6	(41,4)	48,1	48,4	—	—	—	—
1,8	(44,0)	53,0	53,6	—	—	—	—
2	(46,2)	57,4	58,2	59,1	59,2	59,2	59
2,2	—	61,5	63,1	—	—	—	—
2,4	—	65,3	67,4	—	—	—	—
2,5	—	67,2	69,6	72,0	72,0	72,6	72
3,0	—	75,4	79,1	84,1	85,2	85,5	86
3,5	—	82,4	87,5	95,2	97,2	98,1	—
4	—	(88,4)	94,8	105	109	110	112
4,5	—	(93,5)	101	115	119	122	—
5	—	(98,0)	(107)	123	129	132	137
5,5	—	—	(112)	131	138	143	—
6	—	—	(116)	138	146	152	161
6,5	—	—	—	144	154	161	—
7	—	—	—	150	162	169	184
7,5	—	—	—	155	168	177	—
8	—	—	—	(160)	174	185	205
9	—	—	—	(169)	186	198	225
10	—	—	—	(177)	(196)	209	243
11	—	—	—	—	(204)	219	260
12	—	—	—	—	(212)	(229)	275
13	—	—	—	—	—	(238)	289
14	—	—	—	—	—	(245)	302
15	—	—	—	—	—	(252)	314
16	—	—	—	—	—	—	325
18	—	—	—	—	—	—	345
20	—	—	—	—	—	—	(363)
22	—	—	—	—	—	—	(378)
24	—	—	—	—	—	—	(391)
25	—	—	—	—	—	—	(396)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	50	75	100	125	150	175	200
2	58	58	—	—	—	—	—
2,5	—	—	71	—	—	—	—
4	112	112	—	—	—	—	—
5	—	—	137	137	—	—	—
6	164	164	—	—	137	137	137
8	214	215	—	—	—	—	—
10	262	265	266	266	267	266	265
12	308	313	—	—	—	—	—
14	352	360	—	—	—	—	—
15	—	—	387	387	388	389	389
16	392	406	—	—	—	—	—
18	428	450	—	—	—	—	—
20	461	492	503	506	508	510	510
22	491	532	—	—	—	—	—
24	520	570	—	—	—	—	—
25	—	—	611	622	626	628	630
26	545	606	—	—	—	—	—
28	570	640	—	—	—	—	—
30	591	670	709	729	739	743	745
32	611	702	—	—	—	—	—
34	630	731	—	—	—	—	—
35	—	—	797	830	846	855	858
36	647	756	—	—	—	—	—
38	(663)	783	—	—	—	—	—
40	(679)	806	876	921	947	961	965
45	(710)	858	949	1000	1040	1060	1075
50	(738)	904	1010	1080	1130	1160	1180
55	—	(945)	1070	1150	1210	—	—
60	—	(981)	1120	1220	1280	1330	1360
65	—	(1012)	1170	1280	1350	—	—
70	—	(1040)	1210	1330	1420	1480	1530
75	—	(1060)	1240	1380	1470	—	—
80	—	—	(1280)	1430	1530	1610	1680
90	—	—	(1330)	1500	1630	1730	1810
100	—	—	(1370)	(1560)	1710	1830	1930
110	—	—	—	(1620)	1790	1920	2030
120	—	—	—	(1660)	(1850)	2000	2120
130	—	—	—	—	(1900)	2070	2200
140	—	—	—	—	(1950)	(2140)	2280
150	—	—	—	—	(1980)	(2190)	2350
160	—	—	—	—	—	(2240)	(2410)
180	—	—	—	—	—	—	(2500)
200	—	—	—	—	—	—	(2530)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.

## Пробивные напряжения шаровых промежутков в км

Один шар заземлен. 1. Импульсы положительной полярности. 2. Постоянное напряжение положительной полярности. Атмосферное давление 760 мм рт. ст., температура 20°С.

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	2	5	6,25	10	12,5	15	25
0,4	—	14,3	14,2	—	—	—	—
0,5	—	—	—	16,9	16,7	16,5	—
0,6	—	20,4	20,2	—	—	—	—
0,8	—	26,3	26,2	—	—	—	—
1,0	—	32,0	31,9	31,6	31,6	31,3	31
1,2	—	37,8	37,6	—	—	—	—
1,4	—	43,3	43,1	—	—	—	—
1,5	—	—	—	45,6	45,6	45,5	—
1,6	—	49,0	49,0	—	—	—	—
1,8	—	54,4	54,6	—	—	—	—
2,0	—	59,4	60,0	59,1	59,2	59,2	59
2,2	—	64,2	65,0	—	—	—	—
2,4	—	68,8	69,7	—	—	—	—
2,5	—	71,0	72,3	72,8	72,5	72,6	—
3,0	—	81,1	83,4	85,6	85,7	85,6	86
3,5	—	90,0	93,4	97,4	98,6	98,7	—
4,0	—	(97,5)	103	109	111	111	112
4,5	—	(104)	110	120	123	124	—
5,0	—	(109)	(117)	130	134	136	138
5,5	—	—	(123)	139	144	147	—
6	—	—	(128)	148	154	158	162
6,5	—	—	—	156	163	168	—
7	—	—	—	163	172	178	187
7,5	—	—	—	170	180	187	—
8	—	—	—	(176)	188	196	210
9	—	—	—	(186)	202	212	232
10	—	—	—	(195)	(214)	226	252
11	—	—	—	—	(224)	238	272
12	—	—	—	—	(232)	(249)	290
13	—	—	—	—	—	(260)	306
14	—	—	—	—	—	(269)	321
15	—	—	—	—	—	(276)	335
16	—	—	—	—	—	—	348
18	—	—	—	—	—	—	372
20	—	—	—	—	—	—	(393)
22	—	—	—	—	—	—	(410)
24	—	—	—	—	—	—	(424)
25	—	—	—	—	—	—	(430)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.

Продолжение таблицы 3

Расстояние, см	Диаметр шаров, см						
	50	75	100	125	150	175	200
2	58	58	—	—	—	—	—
4	112	112	—	—	—	—	—
5	—	—	137	137	137	137	137
6	164	164	—	—	—	—	—
8	214	215	—	—	—	—	—
10	262	265	266	266	267	266	265
12	310	313	—	—	—	—	—
14	356	360	—	—	—	—	—
15	—	—	388	387	388	389	389
16	401	407	—	—	—	—	—
18	440	452	—	—	—	—	—
20	478	499	505	506	509	510	510
22	511	541	—	—	—	—	—
24	543	582	—	—	—	—	—
25	—	—	616	624	626	628	630
26	572	621	—	—	—	—	—
28	600	659	—	—	—	—	—
30	625	694	719	735	740	743	745
32	646	727	—	—	—	—	—
34	669	759	—	—	—	—	—
35	—	—	816	841	850	856	860
36	687	788	—	—	—	—	—
38	(705)	816	—	—	—	—	—
40	(721)	841	900	937	957	963	967
45	(756)	899	979	1020	1060	1070	1080
50	(785)	940	1000	1110	1150	1170	1180
55	—	994	1110	1190	1240	—	—
60	—	(1030)	1160	1260	1310	1350	1380
65	—	(1070)	1210	1320	1390	—	—
70	—	(1100)	1260	1380	1460	1510	1560
75	—	(1120)	1300	1430	1520	—	—
80	—	—	(1330)	1480	1580	1650	1710
90	—	—	(1390)	1560	1680	1770	1850
100	—	—	(1430)	(1620)	1770	1880	1980
110	—	—	—	(1680)	1850	1980	2080
120	—	—	—	(1720)	(1920)	2060	2180
130	—	—	—	—	(1970)	2140	2270
140	—	—	—	—	(2020)	(2210)	2350
150	—	—	—	—	(2060)	(2260)	2420
160	—	—	—	—	—	(2310)	(2480)
180	—	—	—	—	—	—	(2580)
200	—	—	—	—	—	—	(2650)

Примечание. Значения в скобках даны с меньшей точностью.



Hind 12 kop.