

HANS R. VÕRK

**ÕHULIINID  
RAUDJUHTMEIST**



R. K. „TEADUSLIK KIRJANDUS“

UNIVERSITY OF TORONTO LIBRARY

HANS R. VÖRK

ÕHULIINID  
RAUDJUHTMEIST



Kohustuslik kontrollkoemajal



RK „TEADUSLIK KIRJANDUS“  
TARTU, 1947



12476

A-16276

University of Tartu

## 1. Üldised kaalutlused.

Õhuliiniks nimetatakse elektrienergia ülekandmiseks määratud juhtmeid ühes tarvilike kande- ja kinnituseadistega.

Sõjast tingitud värviliste metallide, eriti vase nappuse tõttu on tulnud õhuliini juhtmeiks paratamatult tarvitada ka rauda, kuigi sel on mitmeid negatiivseid omadusi, nagu suur elektriline eritakistus ja vähene roostekindlus. Aastate järel võib raudjuhe muutuda ilmastikuolude tõttu sõna otseses mõttes vanarauaks, kuna vasktraat näiteks säilitab oma väärtuse ka peale pikemaajalist tarvitamist. Seepärast peaks raudjuhtmeid tsinkima ja õhuliini ehitamisel hoolitsema, et tsingikihti ei vigastaks.

Olgu tähendatud, et õhuliinides kasutatavate tsinkimata raudjuhtmete roostetamine ei toimu mitte väga kiiresti. Seda asjaolu pole seni lähemalt uuritud, kuid nähtavasti on õhuliinid suhteliselt soodsas olukorras, sest elektrivoolu läbimisel on juhtmete temperatuur veidi kõrgem ümbruskonna temperatuurist ja juhtmed on tavaliselt kuivad või kuivad ruttu peale märjaks saamist.

Raudjuhtmete kasutamine õhuliinides on paljudel juhtumitel õigustatud ka rahuaja oludes. Mehhaanilise tugevuse seisukohast ei või lubada õhujuhtmeks tarvitada traate alla teatavate minimaalsete ristlõigete. Näiteks vaskjuhtmete puhul on minimaalseks ristlõikeks madalpingevõrkudes  $6 \text{ mm}^2$  ja kõrgepingevõrkudes  $10 \text{ mm}^2$ . Alumiiniumist juhtmete puhul, mida lubatakse kasutada ainult köisjuhtmetena, on vastavad minimaalsed ristlõiked  $16$  ja  $25 \text{ mm}^2$ . Kõrgepinge õhuliinide juhtmed linnade ja alade piirides peavad olema veel suurema ristlõikega. Kui ülekantav võimsus on väike või tarbija asub alajaama või toitepunkti läheduses, siis võiks elektrilisest seisukohast leppida vask- või alumiiniumjuhtme palju väiksema ristlõikega. Tihti on koguni soovitatav, et alajaama läheduses asuvate tarbijate ühendusjuhtmeis oleks teatav pingelang, sest vastasel korral saaksid nad liiga kõrge pinge. Seepärast ja väljudes majanduslikust seisukohast, kuid ka soovist säästa defitsiitseid värvilisi metalle, on ka Nõukogude Liidus raudjuhtmed levinud.

Raudjuhtmeist õhuliini nagu iga elektriliini kavandamisel ja ehitamisel tuleb täita mitmesuguseid tehnilisi nõudeid. Eeskätt peab õhuliin oma teatavat töökindlust, rahuldama mehhaanilise tugevuse nõudeid, sest pinge all olev katkenud juhe on elukardetav nii koduloomadele kui ka inimestele.

Teiseks tuleb juhtmete ristlõige valida nii, et teatava koormuse puhul pingemuutus või võimsuskadu elektriliinis ei ületaks lubatavat piiri.

Tuleb ka kontrollida, kas elektrivoolu toimel juhtmed liigselt ei soojene. Pikkadel liinidel lubatav pingelang tingib tavaliselt juba nii suure ristlõike, et juhtmete liigne soojenemine ei tule kõne alla. Kuid lühikestel liinidel pole ses küsimuses selgust ja meil puuduvad ka ametlikud andmed või standardid lubatava koormuse kohta raudjuhtmete jaoks.

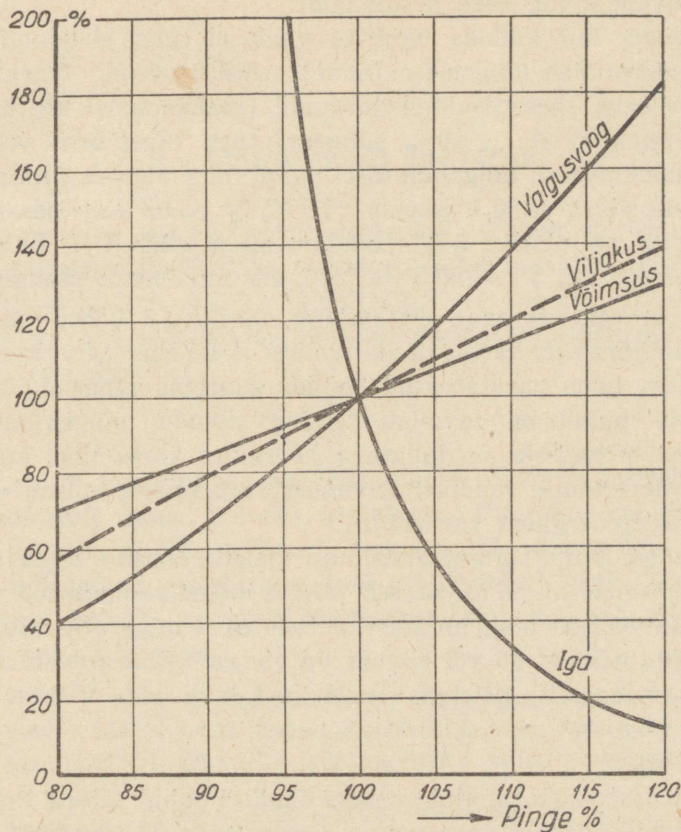
Lubatava pingemuutuse suurus on määratud voolutarbijate — hõõglampide ja mootorite — nõudmistega. Hõõglampide valgusvoog näiteks sõltub väga suurel määral pingest. Nagu nähtub joonisest 1, langeb pinge vähenemisel 10% võrra (võrreldes nimipingega) hõõglambi valgusvoog märksa rohkem, nimelt üle 30%.

Võiks arvata, et kui valida liini alguses (jõujaamas või trafo-alajaa-  
mas) pinge vastavalt pingelangule kõrgem, olekski tarbijaile liini lõpus antud neile sobiv pinge. Kuid tavaliselt on madalpingevõrgus tarbijaid mitte ainult liini lõpus, vaid ka alguses ja vahepeal. Pealegi tekib suurim pingelang liini lõpus ainult terve liini maksimaalsel koormusel. Kui tarbija asub liini alguses või väga väikese koormuse ajal ka liini lõpus, siis saab ta normaalsest pingest suurema pinge. Seejuures suureneb 10%-lise pingetõusu puhul küll hõõglambi valgusvoog u. 40% võrra, kuid ühtlasi langeb hõõglambi iga u.  $\frac{1}{3}$  peale.

Elektrimootorid vajavad samuti võimalikult püsivat (konstantset) pinget. Koormatud elektrimootor vajab suurema pingelangu, s. o. madalama võrgupinge puhul teatava võimsuse arendamiseks suuremat voolutugevust kui nimipinge puhul. Suurem voolutugevus tingib suuremat vaseskadu (suuremat energiakadu mähise vases) ja seega teatavate elektrimasina osade suuremat temperatuuri tõusu, mis võib ületada isegi lubatava piiri. Niisiis ei või madalama võrgupinge puhul elektrimootorit koormata nimivõimsuseni, või tuleb soovitud võimsuse arendamiseks hankida suurema nimivõimsusega mootor.

Nimipingest ülemääraselt kõrgema pinge puhul suureneb energiakadu aktiivses rauas (rauaskadu) ka siis, kui mootor polegi koormatud. Omaette probleemiks jääb anormaalse pinge mõju mootorit iseloomustavatele

suurustele — pöördemomendi ja pöörete karakteristikule, mida me siin ei hakka käsitlema.



Joon. 1. Hõõglambi iseloomustavad suurused: valgusvoog, valguse viljakus (kasutegur), lambi poolt tarvitatav võimsus ja lambi iga sõltuvalt pingest. Joonisel on näidatud suhtelised suurused, võrreldes nimisuurustega, mis on tähistatud 100 %-ga.

On ilmne, et nii hõõglampide kui ka mootorite seisukohast oleks kõige tulusam, kui võrgupinge oleks ikka võimalikult lähedane nimipingele (näit. 220 V). See nõue eeldab väga väikest pingemuutust elektriliinis ja vastavalt sellele elektriliini väikest oomilist takistust; teiste sõnadega: hea juhtivusega juhtmaterjali ja suure ristlõikega juhtmeid. Väikese pingemuutusega elektriliselt jäik liin tingib seega suurt ehituskulu. On selge, et juhtme materjali ja ristlõike valik on mitte ainult tehniline, vaid ka majanduslik probleem.

Pingelanguga koos käib ka võimsuse kadu. Ehitades väikese pingelanguga ja väikese võimsuskaoga elektriliini säästame küll elektrienergiat,

hõõglampe ja elektrimootoreid, kuid peame inestveerima jälle rohkem kapitali. Inseneri ülesanne on leida lahendus, milles kõikide kulude summa teatavas ajavahemikus oleks minimaalne.

Enne sõda, kui kõikide tegurite valik oli vaba, ei teinud elektriliini mõõtmete määramine (dimensioonimine) erilisi raskusi. Tavaliselt lubati madalpingevõrgus ebasoodsaimal juhtumil (maksimaalse koormusega liini kaugemas punktis) 5... 10% pingemuutust. Seejuures valiti näiteks 10%-lise maksimaalse pingemuutuse puhul liini alguses nimipingest 5% võrra kõrgem pinge (220 V asemel 231 V) ja saadi ebasoodsaimal juhtumil liini lõpus nimipingest 5% madalam pinge (209 V). Suurim pingemuutus oli seega  $231\text{ V} - 209\text{ V} = 22\text{ V}$ , mis moodustab nimipingest 10%.

Võttes arvesse, et raua erijuhtivus on 7... 8 korda väiksem vase omast ja raudjuhtmete vastavalt suuremate ristlõigete tarvitamine on vaevalt teostatav, tuleb paratamatult leppida suurema pingelanguga, kui see vaskjuhtmete puhul on tavaline. Teine abinõu pingemuutuse teatavais piirides hoidmiseks on lubatava koormuse kärpimine, kui ei taheta vähendada varustamise raadiust (kaugust alajaamast, milleni on võimalik tarbijaid elektrienergiaga varustada).

Maaoludes, kus valgustuseküsimus pimedal aastaajal on väga terav, peab raudjuhtmete puhul tarvitusele võtma mõlemad mainitud võimalused, lubades maksimaalset pingemuutust näiteks 20% ja piirates võimsuse tarvitust talu kohta näiteks 65 või koguni 50 vatiga. Säärasel juhtumil tohiks igas talus samaaegselt „põletada“ vaid kaht kuni nelja väikest hõõglampi. Selline hädavalgustus on siiski märksa parem kui kunstliku valgustuse täielik puudumine.

Pimedal ajal tuleb raudjuhtmetega õhuliini puhul täiesti loobuda tarvitamast elektri-küttekehi (praepanne, keeduplaate, keedunõusid, triikraudu jne.), sest nende võimsusetarvitus on suhteliselt suur — 400... 2000 W. Samuti on täiesti väär ja üldsuse huvidega mitte kooskõlas tarvitada liiga suure võimsusega hõõglampe, sest siis võidakse ebaloomulikult suure pingelangu tõttu õhuliinis saada suuremast volukulust hoolimata vähem valgust kui tarvitades väikese võimsusega hõõglampe.

Need talundid, mis viimaste aastate jooksul on meil saanud elektervalgustuse, on oma õhuliinid pidanud ehitama peamiselt raudjuhtmeist. Ka lähemas tulevikus tuleb madalpinge õhuliinide ehitamisel tarvitada raudtraati. Vaatleme seepärast lähemalt, kuidas meie oludes teostada elektriliini ehitamist sellest materjalist.

Algame raudjuhtmete hindamisega soojenemise seisukohast elektrivoolu läbimise tagajärjel ja selgitame eeskätt juhtme takistuse probleemi.

## 2. Raudtraadi takistus.

Alalisvoolu puhul, kui elektrivool  $J$  jaguneb ühtlaselt tervele juhtme ristlõikele, võib elektrilist takistust  $R$  oomides ( $\Omega$ ) arvutada juhtme mõõtmetest — pikkusest  $l$  (m), ristlõikest  $q$  ( $\text{mm}^2$ ) ja erijuhtivusest  $\lambda$  ( $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$ ) või selle pöördvõrdelisest väärtusest — eritakistusest  $\rho$  ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) — valemi kohaselt:

$$R = \frac{l}{\lambda q} = \rho \frac{l}{q}. \quad (1)$$

Raudtraadi erijuhtivus (või eritakistus) kõigub suhteliselt suurtes piirides, sõltuvalt raua (terase) koostisest. Puhtal raual temperatuuril  $20^\circ\text{C}$  on erijuhtivus  $10 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ , terastraadil vähem kui  $5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ . Peamiselt mõjutavad erijuhtivust (või eritakistust) räni (Si) ja süsiniku (C) sisaldus. Näiteks suureneb eritakistus temperatuuril  $20^\circ\text{C}$  ränisisalduse tõttu valemi kohaselt

$$\rho_{20} = (0,096 + 0,184 \cdot \text{Si}) \Omega\text{mm}^2/\text{m}$$

ja temperatuuril  $25^\circ\text{C}$  süsinikusisalduse tõttu valemi kohaselt

$$\rho_{25} = (0,100 + 0,037 \cdot \text{C}) \Omega\text{mm}^2/\text{m}.$$

Et tavaline raudtraat harilikult sisaldab nii räni kui ka süsinikku, siis on paratamatu raudtraadi eritakistuse või erijuhtivuse määramine katse teel.

Tallinna metallitehastes valmistatud traatide omaduste kindlaksmääramiseks toimetati mõõtmisi Tallinna Polütehnilise Instituudi Elektrotehnika-laboratooriumis; lähem kirjeldus leidub 5. peatükis. Nende katsete tulemused on võetud kokku tabelis 1, lk. 32.

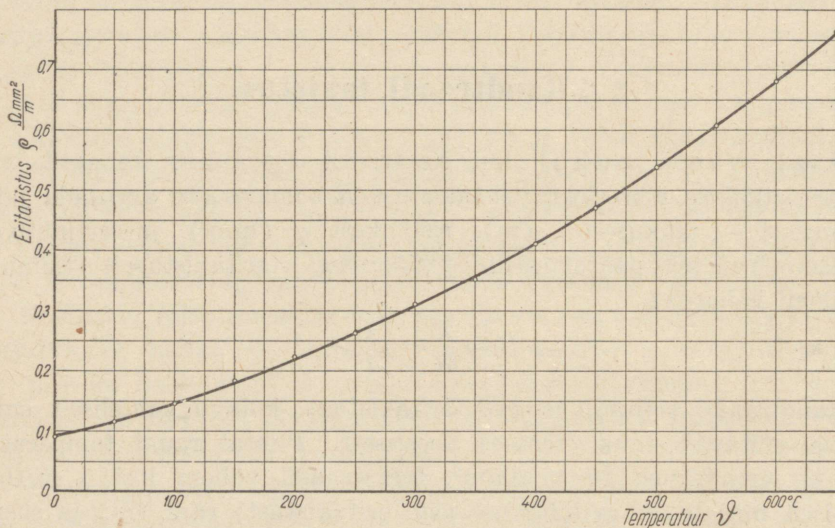
Allpool on tehtud arvutusi erijuhtivusega  $7,50 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$  või eritakistusega  $0,1335 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ , mõlemad temperatuuril  $20^\circ\text{C}$ .

Metallist juhtmeil suureneb eritakistus (väheneb erijuhtivus) temperatuuri tõusuga. Seepärast peavad koos takistuse (ja ka eritakistuse või erijuhtivuse) andmetega esinema ka temperatuuri andmed.

Takistus temperatuuril  $\vartheta_2$  arvutatakse tavaliselt valemist:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(\vartheta_2 - \vartheta_1)], \quad (2)$$

kus  $\alpha_1$  on juhtme temperatuuritegur vastavalt temperatuurile  $\vartheta_1$ .



Joon. 2. Puhta raua eritakistus sõltuvalt temperatuurist.

Raua jaoks õieti ei tohiks kasutada viimast valemit, sest selle takistus ei muutu sirgjooneliselt temperatuuriga (joon. 2) nagu värviliste metallide oma. Suurtes temperatuuri piirides (mõnesaja °C ulatuses) oleks juba parem kasutada valemit

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(\vartheta_2 - \vartheta_1) + \beta_1(\vartheta_2 - \vartheta_1)^2]. \quad (3)$$

Temperatuuri mõõdukates piirides, näiteks  $+20^\circ\text{C}$  kuni  $+70^\circ\text{C}$ , võib lihtsuse mõttes ka raudjuhtmete puhul arvutada küllaldase täpsusega valemi 2 järgi.

Prof. Glazunovi andmeil Nõukogude Liidus standardi järgi valmistatava raudtraadi temperatuuritegur  $\alpha_{20} = 0,00455^1$ .

Saksamaal valmistatud raudtraadi temperatuuriteguriks soovitatakse võtta  $0,0045$  kuni  $0,0046^2$ ).

<sup>1</sup>) A. A. Глазунов, Электрические сети и системы I, Москва, 1939.

<sup>2</sup>) „Elektrotechnische Zeitschrift“, lühendatult „ETZ“, 1914, lk. 1109; „ETZ“ 1943, lk. 455.

Edaspidistes arvutustes kasutamegi viimast väärtust, mis pealegi on eelmiste aritmeetiline keskmine.

Eespool-toodud andmed erijuhtivuse ja eritakistuse jaoks kehtivad temperatuuril  $\vartheta_1 = 20^\circ \text{C}$ . Valemi 2 võib seega kirjutada ka järgmiselt:

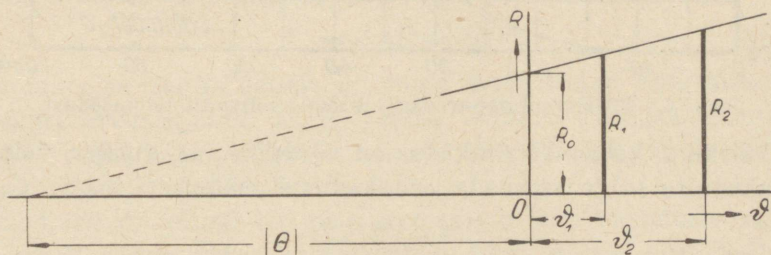
$$R_2 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\vartheta_2 - 20)]. \quad (2a)$$

Vastavalt mõnele teisele algtemperatuurile on temperatuuriteguril teisugune väärtus. Kui seda uut väärtust pole teada, siis tuleb enne leida takistus temperatuuril  $20^\circ \text{C}$  valemist:

$$R_{20} = \frac{R_1}{1 + \alpha_{20}(\vartheta_1 - 20)} \quad (2b)$$

ja saadud väärtus asetada valemisse 2a.

Igakordse  $20^\circ \text{C}$  peale ümberarvutamise asemel on otstarbekas kasutada Emde poolt antud viisi, mis on näidatud joonisel 3.



Joon. 3. Takistuse määramine sõltuvalt temperatuurist Emde järgi.

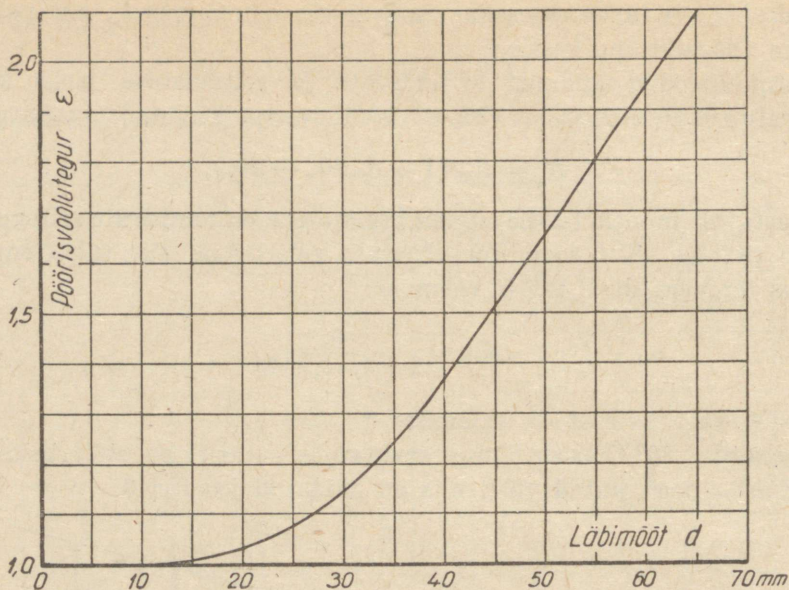
Oletades, et takistus sõltub sirgjooneliselt temperatuurist — valemi 2 kohaselt, mis raua suhtes on kehtiv temperatuuri mõõdukais piires, pikendame sirget  $R = f(\vartheta)$  vasakule, kuni see lõikab abstsissitelge nn. karakteristikul temperatuuril. Vasel näiteks on  $\theta = -235^\circ \text{C}$ , raual  $-200^\circ \text{C}$ . Jooniselt 3 saame tuletada proportsiooni:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{|\theta| + \vartheta_2}{|\theta| + \vartheta_1}. \quad (4)$$

Samalt jooniselt on näha, et temperatuuritegurit  $\alpha_1$ , mis on ju suhteline takistuse juurdekasv vastavalt algtemperatuurile  $\vartheta_1$ , on võimalik leida valemist:

$$\alpha_1 = \frac{1}{|\theta| + \vartheta_1}. \quad (5)$$

Asetades nii leitud temperatuuriteguri valemisse 2, on võimalik otsekohe leida takistus uuel temperatuuril, kuigi algtemperatuur ei ole  $20^\circ \text{C}$ .



Joon. 4. Pöörisvoolutegur vaskjuhtmele sõltuvalt lähimõõdust.

Et valemi 1 kohaselt eritakistus on võrdeline takistusega, võime valemis 4 takistuste suhte asendada eritakistuste suhtega:

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{|\theta| + \vartheta_2}{|\theta| + \vartheta_1} \quad (4a)$$

või silmas pidades, et  $|\theta| + \vartheta_1$  ja  $|\theta| + \vartheta_2$  õigupoolest tähendavad temperatuurivahesid  $\vartheta_1 - \theta$  ja  $\vartheta_2 - \theta$ , kirjutada:

$$\frac{\varrho_2}{\varrho_1} = \frac{\vartheta_2 - \theta}{\vartheta_1 - \theta}. \quad (4b)$$

Seega, teades eritakistust  $\varrho_1$  temperatuuril  $\vartheta_1$ , on lihtne leida uut eritakistust  $\varrho_2$  teisel temperatuuril  $\vartheta_2$ , kui teame karakteristikliku temperatuuri  $\theta$ . See asjaolu võimaldab samuti arvutada juhtme takistust uuel temperatuuril, asetades vastava eritakistuse valemisse 1.

Vahelduvvoolu puhul ei jagune elektrivool ühtlaselt tervele juhtme ristlõikele, sest vooluga aheldatud magnetvoog tekitab juhtme sisemuses pöörisvoolusi, mis on ajaliselt nihutatud pea- ehk koormusvoolu suhtes. Tulemuseks on ebahütlane voolutihedus — juhtme välispinna läheduses on voolutihedus suurem ja sisemuses väiksem — ning suurem energiakadu võrreldes alalisvooluga. Alalisvoolu juhtumil arvutatakse soojuseks muundunud elektrivõimsust (vattides) valemist

$$V = J^2 R, \quad (6)$$

kus  $R$  on juhtme takistus alalisvooluga (oomides).

Vahelduvvooluga toimub pöörivoolude mõjul elektrivoolu nihutamine juhtme välispinna poole (pinnanähtus ehk skin-efekt). Seda nähtust võib ka nii tõlgitseda, et vahelduvvooluga on juhtme oomiline ehk tegevtaakistus (aktiivtaakistus) suurem kui alalisvooluga. Takistuse suurenemine sõltub peale muu vahelduvvoolu sagedusest  $f$  (perioodi sekundis, lühendatult p/s ehk Hz).

Tugevvoolu tehnikas tarvitatavate suhteliselt madalate sageduste puhul (15 ... 60 p/s) omab pinnanähtus praktilist tähtsust õhuga ümbritsetud mittemagnetilisel juhtmel ainult suure ristlõike korral (üle 100 mm<sup>2</sup>). Raudjuhtmete puhul on tegevtaakistus vahelduvvooluga standardsagedusel 50 p/s märkimisväärne juba palju väiksemal ristlõikeil.

Suurem tegevtaakistus vahelduvvooluga  $R_v$ , võrreldes alalisvoolu takistusega  $R$ , võetakse tavaliselt arvesse teguri abil, mida nimetatakse pöörivooluteguriks  $\varepsilon$ , mõnikord ka takistuste suhteks. Ilmselt  $R_v = \varepsilon R$ . Soojuseks muundunud võimsus vahelduvvoolu puhul on seega

$$V_v = R_v J^2 = \varepsilon R J^2. \quad (7)$$

Ümmarguse läbimõõduga ja õhuga ümbritsetud vaskjuhtme pöörivooluteguri arvutas juba 1890. aastal William Thomson (Lord Kelvin), kelle tööde najal on toodud joonis 4, kus  $\varepsilon$  on kujutatud sagedusel  $f = 50$  p/s sõltuvalt traadi läbimõõdust  $d$ .

Raudtraatide puhul on pöörivoolutegur ehk takistuste suhe sõltuv mitte ainult sagedusest  $f$ , traadi läbimõõdust  $d$  (või ristlõikest  $q$ ), vaid ka aine permeaablusest  $\mu$ . Soojuseks muundunud võimsus on ka sellepärast suurem, et raua ümbermagnetimise puhul tekib juhtmes hüstereesikadu.

Raudjuhtme takistuse probleemiga on tegelnud mitmed väga nimekad teadlased, nagu Rayleigh, Stefan, Thomson, Zennek, Kennely, Archard ja Dana.

Pöörivoolutegur raudtraadile pidi olema nende uurimuste kohaselt:

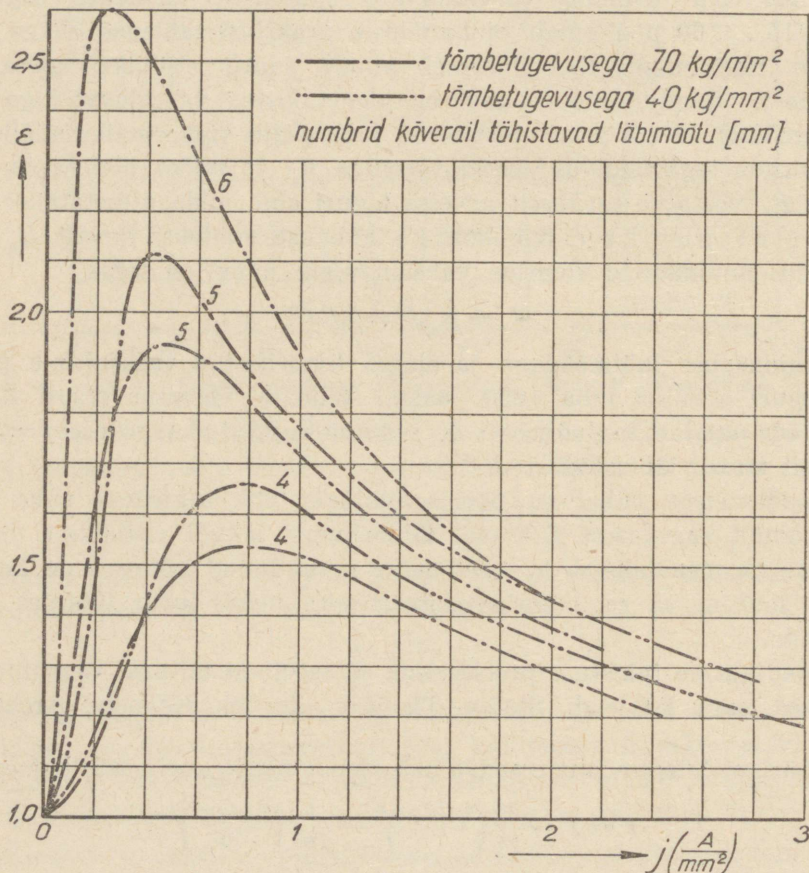
$$\varepsilon = 1 + \frac{1}{12} \left( \frac{2\pi f \mu q \lambda}{10} \right)^2 - \frac{1}{180} \left( \frac{2\pi f \mu q \lambda}{10} \right)^4, \quad (8)$$

kus  $q$  on juhtme ristlõike pindala (cm<sup>2</sup>).

Valem 8 on tuletatud oletusel, et permeaablus  $\mu$  on ühtlane traadi ristlõike kõikides punktides. Nagu näeme allpool, ei pea see oletus paika.

Esimese Maailmasõja ajal oldi eeskätt Saksamaal sunnitud värvilise metalli asemel juhtmeteks tarvitusele võtma raua (terast). Siis püüti selgusele jõuda ka raudjuhtmete tegevtaakistuse kohta vahelduvvoolu puhul. Juba 1914. aasta lõpul ilmusid Saksa Elektrotehnikute Liidu. (*Verband Deutscher Elektrotechniker*, lühendatult VDE) esimesed teadaanded õhuli-

nide ehitamise kohta raudtraadist<sup>3)</sup>, milles toodi katselised andmed ja näidati, et raudtraatide lisatakistus vahelduvvooluga on suurel määral sõltuv voolutihedusest  $j$  juhtmes, nagu see on näidatud pöörisevooluteguri  $\epsilon$  abil joonisel 5 raudtraatide kohta läbimõõduga 4 ja 5 mm, tõmbetugevusega 40 kg/mm<sup>2</sup>.



Joon. 5. Pöörisevoolutegur raudtraatidele sõltuvalt voolutihedusest (Saksa andmed).

Hiljem täiendati andmeid ning määrati pöörisevoolutegur ka traatidele tõmbetugevusega 70 kg/mm<sup>2</sup> ja köitele, kusjuures traadi läbimõõt oli 4 kuni 6 mm. Tulemused on toodud samuti joonisel 5.

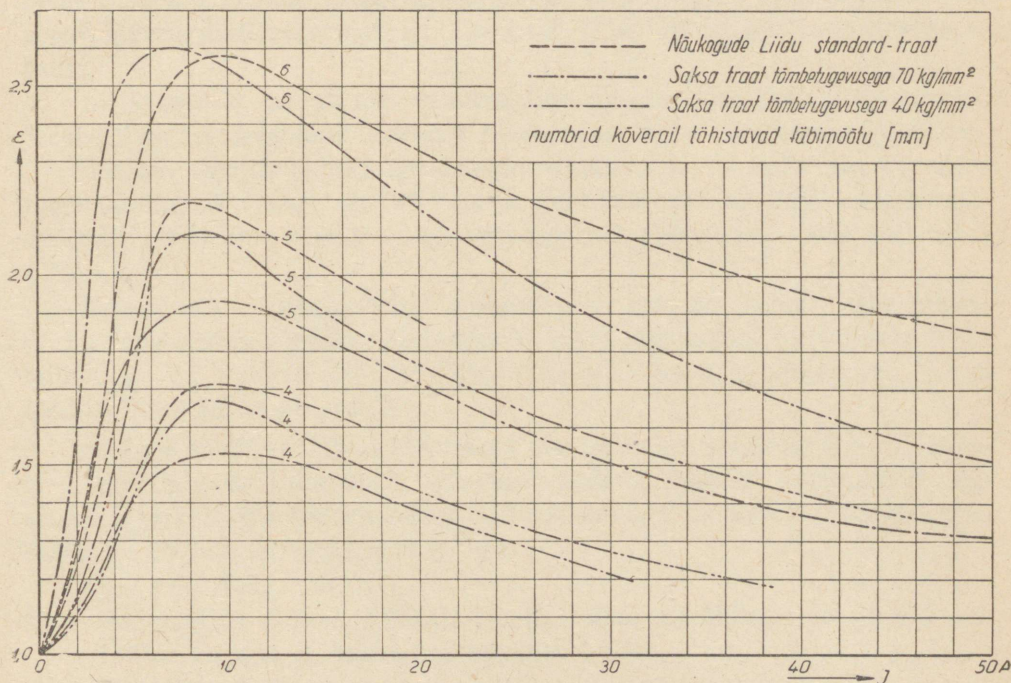
<sup>3)</sup> „ETZ“ 1914, lk. 1109.

Pärast Esimest Maailmasõda juhtis K. Zickler<sup>4)</sup> tähelepanu asjaolule, et permeaablus  $\mu$  ei ole ühtlane traadi ristlõike kõikides punktides. Ta tuletas ka lihtsustatud valemid massiivsete raudtraatide takistuse kohta vahelduvvooluga, millede kohaselt ümmartraatidele pidi arvutama abisuuruse

$$\alpha = \frac{r}{100} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho}}, \quad (9)$$

kus  $\mu$  tähendas antava materjali permeaablust vastavalt keskmisele efektiivsele väljatugevusele traadi välispinnal (täheb kaugusel  $r$  traadi keskpäigast):

$$H_r = \frac{0,2J}{r}.$$



Joon. 6. Pöörisvoolutegur raudtraatidele sõltuvalt voolutugevusest.

<sup>4)</sup> „Elektrotechnik u. Maschinenbau“ 1919, lk. 449 ja 1920, lk. 165; kokkuvõtte avaldatud „ETZ“ 1920, lk. 698.

Pöörisvoolutegurit võis arvutada ühest järgnevast valemist:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= 1 + 0,84 \kappa^4, \text{ kui } \kappa < 1; \\ \varepsilon &= 0,758 + \sqrt{1,343 \kappa^2 - 0,183}, \text{ kui } 1 \leq \kappa < 3; \\ \varepsilon &= 0,758 + 1,159 \kappa, \text{ kui } \kappa \geq 3. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Õhuliinide arvutamisel on väga tülikas määrata takistust vahelduvvoolu puhul isegi nende lihtsustatud valemite järgi, sest permeaabluse  $\mu$  määramiseks on vaja vastava raudtraadi magnetimiskõverat, mis võimaldaks arvutada abisuurust  $\kappa$ . Tuleks eelistada kõveraid, mis on saadud katseliste andmete najal ja võimaldaksid otseselt määrata pöörisvoolutegurit või tegev takistust vahelduvvooluga, sõltuvalt voolutihedusest  $j$  või voolutugevusest  $J$ , nagu seda on tehtud joonisel 6 Nõukogude Liidu ja Saksamaa traatide kohta ning 4. peatüki joonistel Tallinna tehastes valmistatud raudjuhtmeile.

### 3. Raudjuhtme soojenemine kestval koormusel.

Nagu nägime eelmises peatükis, toimub elektriliselt koormatud juhtmes, tähendab sellises, mida läbib elektrivool, elektrienergia osaline muundumine soojuseks, mille tulemuseks on juhtme temperatuuri tõus, võrreldes ümbruskonna temperatuuriga.

Niipea kui juhtme temperatuur ületab ümbruskonna temperatuuri, algab soojuse siirdumine ümbruskonda. Juhtme temperatuur tõuseb sellest hoolimata, kuid juba aeglasemalt, ja nagu näitab kogemus, tekib pika-peale tasakaal juhtmes tekkiva soojuse ja väljasiirduva soojuse vahel. Kui volutugevus jääb muutmatuks, saavutab juhe lõpuks püsiva ületemperatuuri.

Alljärgnevalt arvutame raudtraatide soojenemise kestval koormusel. Sisuliselt on see seesmiselt köetava homogeense keha soojenemise probleem.

Soojuse (soojusehulga) praktiliseks ühikuks on kilokalor (kcal), mille mehhaaniline ekvivalent on 427 mkg ja elektriline  $= 9,81 \cdot 427 = 4189$  vattsekundit (Ws) ehk džauli  $= 69,8$  vatt-minutit ( $W_{min}$ )  $= 1,164$  vatt-tundi (Wh).

Erisoojuseks  $c$  nimetatakse soojusehulka, mis on vajalik keha massiühiku temperatuuri muutmiseks ühe  $^{\circ}C$  võrra. Erisoojuse praktiliseks mõõteühikuks on kcal/kg $\cdot^{\circ}C$  või  $W_{min}/kg\cdot^{\circ}C$ . Raua erisoojus on 0,115 kcal/kg $^{\circ}C = 8,0$   $W_{min}/kg\cdot^{\circ}C$ .

Soojuse siirdeteguriks  $h$  nimetame energiahulka ajaühikus, s. o. võimsust, mis lahkub keha ühelt välispinna ühikult, näiteks ruutmeetrilt, kui selle temperatuuri vahe võrreldes ümbruskonnaga on üks  $^{\circ}C$ . Soojuse siirdeteguri ühikuks kasutame  $W/^{\circ}C m^2$ .

Olgu veel märgitud:

$Q$  — soojusehulk, mis on tekitatud kehas ühes ajaühikus; see olgu konstantne suurus ja mõõdetud vattides (W);

$\vartheta$  — keha temperatuur ( $^{\circ}C$ );

$\vartheta_0$  — ümbruskonna ( $\delta$ hu) temperatuur ( $^{\circ}C$ ), samuti konstantne suurus;

$t$  — aeg, mõõdetud minutites (min);

$S$  — ühe km pikkuse juhtme jahtumispindala ( $m^2$ );

$G$  — ühe km pikkuse juhtme mass (kg).

Soojenemise algusel olgu homogeense keha (käesoleval juhtumil raudtraadi) temperatuur võrdne ümbritseva õhu temperatuuriga. Soojenemise (kütmise) alates hakkab keha temperatuur tõusma, seega toimub kehas soojuste salvestumine, kuid ühtlasi algab soojuste lahkumine ümbruskonda.

Igal hetkel kehtib järgmine soojusbilanss: tekitatud soojusehulk = salvestunud soojusehulk + väljasiirdunud soojusehulk, mis on matemaatiliselt väljendatav järgmiselt:

$$Q dt = Gcd\vartheta + Sh(\vartheta - \vartheta_o) dt. \quad (11)$$

Püsiva olukorra saavutamisel, kui keha temperatuur enam ei muutu, s. t.  $d\vartheta = 0$  ja soojust enam ei salvestu, seega ka  $Gcd\vartheta = 0$ , võrdub ühes ajaühikus tekitatud soojusehulk ehk soojuseks muundunud energia  $Qdt$  kehast väljasiirdunud soojusehulgaga  $Sh(\vartheta - \vartheta_o)dt$ .

Piirjuhtumil, kui keha temperatuur on saavutanud oma maksimaalse väärtuse  $\vartheta_m$ , võtab valem 11 kuju

$$Qdt = Sh(\vartheta_m - \vartheta_o)dt, \quad (12)$$

millest leiame keha maksimaalse ületemperatuuri:

$$\vartheta_m - \vartheta_o = \frac{Q}{Sh}. \quad (12a)$$

Viimane valem võimaldab väga lihtsalt arvutada seesmiselt kätava keha lõpptemperatuuri, kui teame soojuste siirdegiir  $h$  suurust.

Kui keha temperatuur tõuseb ümbritseva ruumi temperatuurist kõrgemale, siis lahkub soojus temast tavaliselt kahel või kolmel teel: kiirgamise ja konvektsiooni või juhtivuse toimel.

Kiirgamine toimub ka vaakuumis ja õhk seda oluliselt ei sega. Konvektsioon saab toimuda ainult gaasis või vedelikus — vaakuumis konvektsiooni ei ole. Otsene soojuste juhtimine õhuliini traadilt õhku on viimase väga väikese soojuste juhtivuse tõttu praktiliselt tähtsusetu.

Stefan-Boltzmanni seaduse kohaselt toimub absoluutses vaakuumis kogu energia kiirgamine võrdeliselt absoluutse temperatuuri 4. astmega.

Soojuste voog (vattides) kiirgamisest ühes sekundis igalt ruutmeetrilt on:

$$\frac{Q_k}{S} = 5,7 \cdot 10^{-8} \nu (T^4 - T_{\ddot{u}}^4), \quad (13)$$

kus  $T$  — kiirgava keha absoluutne temperatuur ( $^{\circ}\text{K}$ );

$T_{\ddot{u}}$  — ümbruskonna absoluutne temperatuur ( $^{\circ}\text{K}$ );

$5,7 \cdot 10^{-8}$  — katseliselt määratud absoluutselt musta keha kiirgamisegiir;

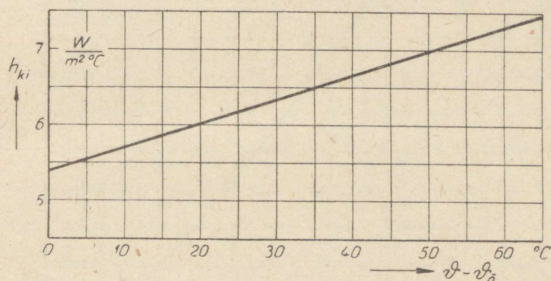
$\nu$  — tegur, mis võtab arvesse kiirgava pinna omadusi; tuhmi pinnaga rauale on  $\nu = 0,95$ .

Juhtmete puhul on tegemist mõõdukate temperatuuridega. Kui võtta õhu temperatuuriks  $\vartheta_{\delta} = 20^{\circ}\text{C}$ , siis võiks juhtme lubatav ületemperatuur olla  $= 50^{\circ}\text{C}$ , tähendab juhte tohiks soojeneda kuni  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Kui taandada soojusvoogu ajaühikus ühe  $\text{m}^2$  pinnalt ületemperatuuri ühele  $^{\circ}\text{C}$ -le, saame soojuse siirde teguri kiirgamise osa:

$$h_{ki} = \frac{5,7 \cdot 0,95 \cdot 10^{-8} (T^4 - T_{ii}^4)}{\vartheta - \vartheta_{\delta}} \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C m}^2}. \quad (14)$$

Ümbruskonna õhu temperatuurile  $\vartheta_{\delta} = 20^{\circ}\text{C}$  on  $h_{ki}$  antud sõltuvalt ületemperatuurist  $\vartheta - \vartheta_{\delta}$  joonisel 7. Sellest nähtub, et siirde tegur kiirgamise osas muutub ületemperatuuriga vähe.



Joon. 7. Siirde teguri kiirgamise osa raudtraatidel sõltuvalt ületemperatuurist.

Konvektsiooni teel siirdub soojus juhtmest õhku sõltuvalt paljudest teguritest: õhu soojusejuhtivusest, paisumistegurist, erikaalust, seega ka rõhumisest, niiskusesisaldusest, temperatuurist, kuid ka jahutatava pinna asendist ja suurusest. Ümmartraatide kohta kehtib empiiriline (katsete teel saadud) valem õhu normaalrõhumisel:

$$h_{ko} = 90 \sqrt{\frac{v}{d}} \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C m}^2}. \quad (15)$$

kus  $v$  — õhu liikumise kiirus ( $\text{m/s}$ ),

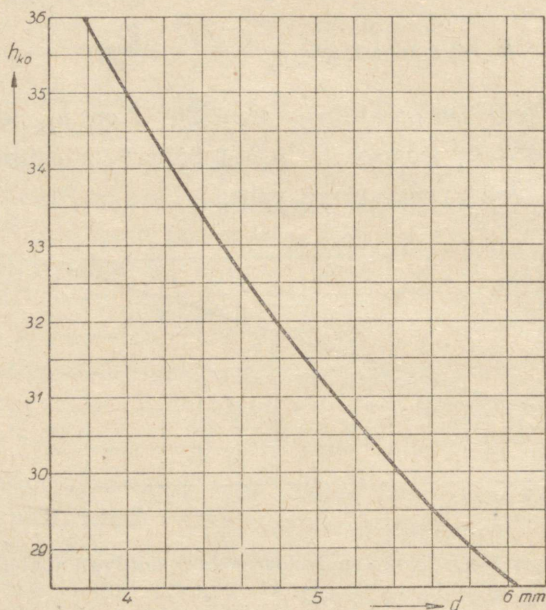
$d$  — juhtme läbimõõt ( $\text{mm}$ ).

Kinnises ruumis on õhu kiirus tingitud õhu osakeste tõusust  $0,1 \dots 0,15 \text{ m/s}$ . Väljaspool kinnisi ruume on õhu kiirus suurem, ameerika katsete kohaselt vähemalt  $0,6 \text{ m/s}$ . Seega õhuliinidel võime siirde teguri konvektsiooni osa arvutada valemist:

$$h_{ko} \approx 90 \sqrt{\frac{0,6}{d}} \approx \frac{70}{\sqrt{d}} \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C m}^2}. \quad (15a)$$

Joonisel 8 on näidatud  $h_{ko}$  väärtus sõltuvalt raudtraadi läbimõõdust  $d$ . Liites sellega siirde teguri kiirgamise osa  $h_{ki}$ , saame üldise soojuse siirde teguri  $h$ :

$$h = h_{ki} + h_{ko}. \quad (16)$$



Joon. 8. Siirde teguri konvektsiooni osa raudtraatidel sõltuvalt läbimõõdust. ■

Soovides määrata vahelduvvoolu tugevust  $J$ , millega raudjuhtmed saavutavad maksimaalse temperatuuri  $\vartheta_m$ , õhu temperatuuri olles  $\vartheta_\delta$ , asetame soojusbilansi piirväärtuse valemisse (12) soojuseks muunduva võimsuse valemi 7 kohaselt, kasutades ka valemit 2:

$$\varepsilon R [1 + \alpha (\vartheta_m - \vartheta_\delta)] J^2 = h (\vartheta_m - \vartheta_\delta) S;$$

traadi ristlõige  $q = \frac{\pi d^2}{4} \text{ mm}^2$ ;

traadi takistus  $R = \frac{l}{\lambda q} = \frac{4l}{\lambda \pi d^2} (\Omega)$ ;

traadi välispindala  $S = \pi d l \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ , kui  $d$  on läbimõõt mm-tes ja  $l$  — pikkus meetrites.

Asetades  $R$  ja  $S$  soojusbilansi piirväärtuse valemisse saame:

$$\frac{4\varepsilon l}{\lambda \pi d^2} [1 + \alpha (\vartheta_m - \vartheta_\delta)] J^2 = h (\vartheta_m - \vartheta_\delta) \pi d l \cdot 10^{-3},$$

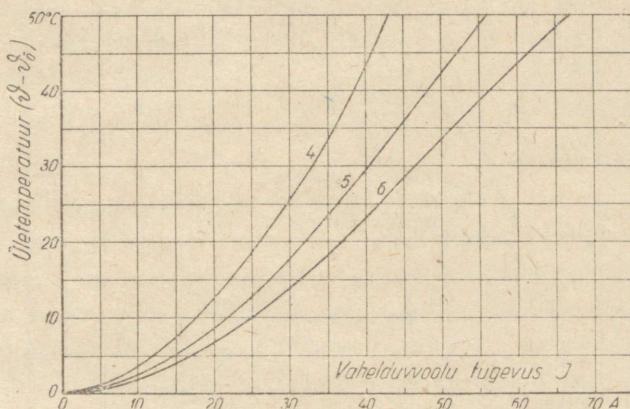
millest saame otsitava voolutugevuse:

$$J = \sqrt{\frac{h\lambda\pi^2 d^3 (\vartheta_m - \vartheta_\delta)}{4000\varepsilon [1 + \alpha(\vartheta_m - \vartheta_\delta)]}} \quad (17)$$

Raudtraadi puhul  $\lambda = 7,5 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$  ja, võttes arvesse, et  $\pi^2 = 9,87$ , saame veidi lihtsama valemi:

$$J = \sqrt{\frac{0,0185 h d^3 (\vartheta_m - \vartheta_\delta)}{\varepsilon [1 + \alpha(\vartheta_m - \vartheta_\delta)]}} \quad (17a)$$

Et raudjuhtmeis pöörivoolutegur  $\varepsilon$  ise sõltub voolutugevusest  $J$  (joon. 6), siis tuleb  $\varepsilon$  esialgu hinnata ja siis asetada ta valemisse 17a ning proovida, kas hinnang oli õige. Mõne katsetamise järel leiame sobivad suurused, mis rahuldavad nii valemit 17a kui ka joonisel 6 kujutatud pöörivooluteguri  $\varepsilon$  sõltuvust voolutugevusest.



Joon. 9. Raudtraatide ületemperatuurid välisõhus sõltuvalt vahelduvvoolust  $J$ .  
Numbrid kõverail tähistavad traadi läbimõõtu [mm].

Joonisel 9 on toodud 4-, 5- ja 6-mm-lise läbimõõduga raudtraatide ületemperatuurid sõltuvalt voolutugevusest, õhutemperatuuri olles  $+20^\circ \text{C}$ . Sellest nähtub, et kui lubame maksimaalse ületemperatuuri  $50^\circ \text{C}$ , tähendab juhtme maksimaalse temperatuuri  $\vartheta_m = 70^\circ \text{C}$ , siis tohib 4-mm-list raudtraati koormata ümmarguselt 40 ampriga, 5-mm-list traati — 50 ampriga ja 6-mm-list traati — 60 ampriga. Vahepealsete läbimõõtudega traatide maksimaalset koormusvoolu saab jooniselt 9 interpoleerimise teel.

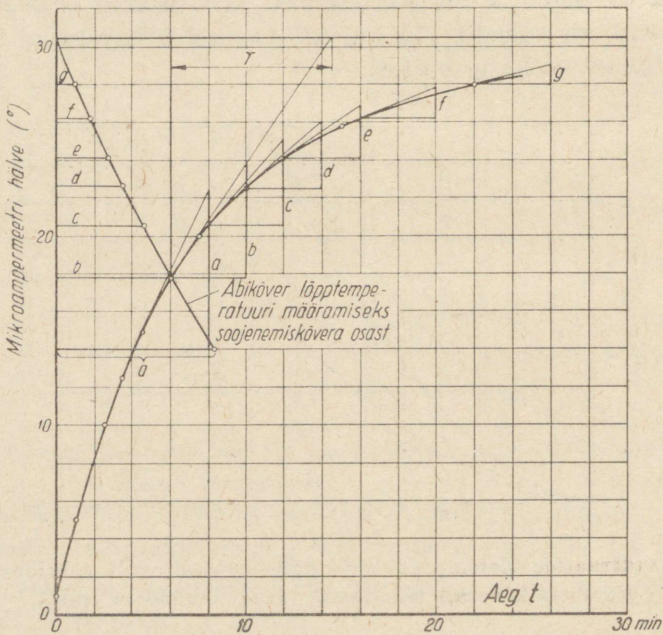
Selgitame veel küsimuse, missuguse aja vältel saavutab juhe maksimaalse voolutugevuse korral lõpptemperatuuri. Selleks peame leidma juhtme soojenemise ajakonstandi.

Jagades valemi 11 mõlemad pooled avaldisega  $Shdt$  saame:

$$\frac{Q}{Sh} = \frac{Gc}{Sh} \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta,$$

millest leiame soojenemise tõusu (soojenemiskõvera tõusu  $d\vartheta/dt$ ), võttes arvesse, et viimase valemi vasak pool võrdub maksimaalse ületemperatuuriga  $\vartheta_m$ :

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{\vartheta_m - \vartheta}{\frac{Gc}{Sh}} = \frac{\vartheta_m - \vartheta}{T}. \quad (18)$$



Joon. 10. Soojenemiskõver raudtraadile  $d = 5,86$  mm voolutugevusel 50 A.

Suurust  $T = Gc/Sh$  nimetataksegi ajakonstandiks. Ta omab aja dimensiooni ja käesoleval juhtumil mõõdetakse teda minutitega. Ajakonstant, olles keha soojusemahtuvuse ja soojusekaotuse suhe, iseloomustab juhtme soojenemise või jahtumise kiirust.

Nagu nähtub valemist 18, on temperatuuri tuletisfunktsioon  $d\vartheta/dt$ , mis on võrdeline kõvera tõusunurga tangensiga, ühtlasi võrdeline kaugusega lõpptemperatuurist. Ületemperatuuri tõus on seda aeglasem, mida

rohkem läheneb köetava keha temperatuur maksimaalsele ehk lõpptemperatuurile  $\vartheta_m$ . Diferentsiaalvõrrandi 18 üldlahend on teatavasti

$$\vartheta = \vartheta_m - \exp \frac{t_0 - t}{T}.$$

Teoreetiliselt saavutatakse lõpptemperatuur alles väga pika aja vältel, praktiliselt aga juba viie ajakonstandi möödumisel (99,32<sup>o</sup>/<sub>o</sub>-liselt).

Ajakonstandi arvutamiseks tuleme meelde, et raua erikaal  $e = 7,8 \text{ kg dm}^3$  ja erisoojus  $c = 8 \text{ Wmin/kg } ^\circ\text{C}$ .

$$\text{Traadi kaal } G = eql10^{-3} = \frac{e\pi d^2 l}{4 \cdot 10^3} \text{ kg},$$

traadi välispindala  $S = \pi dl \cdot 10^{-3} \text{ (m}^2\text{)}$ , kui  $d$  on läbimõõt mm-tes ja  $l$  — pikkus m-tes. Seega ajakonstant

$$T = \frac{Gc}{Sh} = \frac{e\pi d^2 l c}{4\pi d l h} = \frac{ecd}{4h} = \frac{7,8 \cdot 8,0 \cdot d}{4h} = \frac{15,6d}{h}.$$

Raudtraatidele läbimõõduga $d =$	4	5	6	mm
Soojuse siirdetegur				
(kui $\vartheta_m = 70^\circ \text{C}$ )	$h = 42$	38,3	35,6	$\frac{\text{W}}{^\circ\text{Cm}^2}$
Ajakonstant	$T = 1,49$	2,04	2,63	min
Aeg lõpptemperatuuri saavutamiseks	$5T \approx 7,5$	10	13	min

Väiksemate ületemperatuuride puhul kui  $50^\circ \text{C}$  on ajakonstant vastavalt veidi väiksemale soojuse siirdetegurile natuke pikem — ületemperatuuri puhul  $10^\circ \text{C}$  näiteks ainult 3...4<sup>o</sup>/<sub>o</sub> võrra pikem. Seega tuleks raudjuhtmeid läbimõõduga 4...6 mm koormata ümmarguselt 8...15 minutit, kuni saavutatakse statsionaarne olukord välisõhus.

Kinnises ruumis, kus soojuse siirdetegur  $h$  on väiksem, toimub juhtmete soojenemine küll ägedamini, kuid lõpptemperatuur saabub märksa pikema ajaga. Tallinna Polütehnilise Instituudi Elektrotehnika-laboratooriumis teostatud katsetel oli näiteks 5,86-mm-lise läbimõõduga traadi ajakonstant  $T = 8,5 \text{ min}$  (vaata joon. 10). Seega kulus selle traadi lõpptemperatuuri saavutamiseks vähemalt 40 minutit. Arvutusest selgus, et õhu liikumise kiirus laboratooriumi suhteliselt suures ruumis oli 0,315 m/s.

#### 4. Raudjuhtmete tegev- ja induktiivtakistuse määramine vahelduvvooluga.

Raudjuhtmete tegev- ja induktiivtakistuse määramine sõltuvalt voolutugevusest pole just lihtne ülesanne. Kõige sobivam oleks sellist mõõtmist teostada Maxwelli silla abil, kusjuures juhtme induktiivsust saaks määrata reguleeritava mahtuvuse ja tegev- ja induktiivtakistust reguleeritava oomtakistuse abil. Kuid säärase sillameetod nõuab väga tundlikku vahelduvvoolu galvanomeetrit, näiteks vibratsioon-galvanomeetrit, mille mikroskoobiga vaadeldavat võnkuvat osa saab elektromagneti ergutusvoolu tugevuse reguleerimisega seada resonantsi vahelduvvoolu sagedusega, millega toidetakse tervet silda.

Et vibratsioon-galvanomeetrit polnud meil sõjalaoludes kuskilt saada<sup>5)</sup>, siis kasutati Tallinna Polütehnilise Instituudi Elektrotehnika-laboratooriumis algul Maxwelli silla lülituses null-riistana Siemens & Halske suursageduse silla maagilist silma.

Uuritav raudjuhe, pikkusega u. 20 m, pingutati ümber kahe tugi-isolaatori kahel teisel tugi-isolaatoril asetsevate klemmide külge nii, et tekkis sale U-kujuline silmus praktiliselt paralleelsete juhtmete vahemaa olles u. 40 cm.

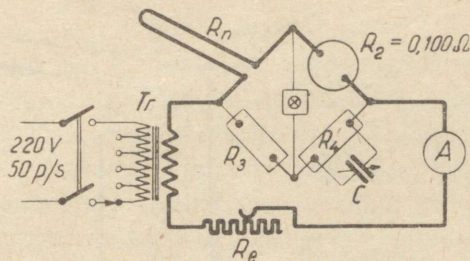
Silla teiseks õlaks oli silmusekujuline võrdlustakistus, mis koosnes kolmest u. 1 m pikkusest 2,02 mm läbimõõduga kokkukeeratud takistustraadist, mis ei sisaldanud rauda. Silmuse paralleelsete osade vahe oli u. 2 cm.

Elmõõtmised Maxwelli silla lülituses (joon. 11), kusjuures tuntud takistuseks oli induktiivsuvaba Siemens & Halske normaaltakistus 0,100  $\Omega$ , näitasid, et võrdlustakistuse oomtakistus voolutugevusel 0,5 A oli 0,1305  $\Omega$  ja induktiivsus  $L_n = 3,96 \mu\text{H}$ . Sagedusel  $f = 50$  p/s oli seega võrdlustakistuse induktiivtakistus ( $X_n = 2\pi fL$ ) ainult 0,00125  $\Omega$ . Võrdlustakistus oli seega praktiliselt induktiivsuvaba, sest et nurk näiv- ja tegev- ja induktiivtakistuse vahel oli ainult 3,1 minutit.

Nagu näitasid pärastised katsed, ei muutunud võrdlustakistuse aktiivkomponent nimetamisväärselt ka voolutugevuse suurenemisel. Võrdlustakistus talus voolutugevusi kuni 50 A; temperatuur tõusis seejuures paarisaja Celsiuse kraadini, kuid oomtakistus ei muutunud rohkem kui 0,1% võrra, mida arvutustes võis pealegi arvesse võtta.

<sup>5)</sup> Autor teostas mõõtmisi 1945. a. varakevadel.

Maxwelli silla kolmandaks õlaks oli täpne ja induktiivsuvaba topp-  
takistuste kast ja neljandaks — samasugune topptakistuste kast, rööbiti  
ühendatud vilgukivist dielektrikuga dekaadidena astendatud kondensaato-  
rite kast.



Joon. 11. Võrdlustakistuse mõõtmine Maxwelli silla lülituses.

Vahelduvvool silla toitmiseks saadi ühefaasisest trafost, mille primaar-  
osas oli ülekande suhte muutmiseks kümnekond haruühendust. Ühendades  
primaarklemmid üle liug- ehk nihketakistuse 220 V võrguga, võis trafo  
sekundaarpoolel saada pinget 2...12 volti voolutugevusteni soovi korral  
kuni 200 amprit. Voolutugevust võis pidevalt reguleerida (eriti väikse-  
matel voolutugevustel kui 20 A) ka sekundaarpoolele lülitatud nihketakis-  
tuse abil.

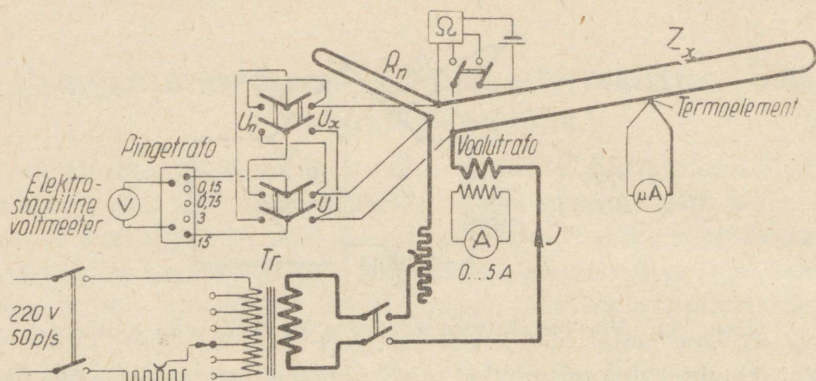
Voolutugevust, millega toideti uuritavat juhet ja võrdlustakistust, võis  
mõõta kas otseselt vahelduvvoolu ampermeetriga (voolutugevusteni kuni  
10 A) või üle täpse voolutrafo ülekandega kas 25/5 või 50/5.

Eelkatsetest selgus, et raudtraatide tegev- ja induktiivsust ei  
olnud siiski võimalik määrata küllaldase täpsusega, kasutades null-riistaks  
maagilist silma, sest uuritavad raudtraadid moodustasid, eriti suuritel voo-  
lutugevustel, selliselt segava magnetilise välja, et maagiline silm näitas  
hälvet igasuguse reguleerimise puhul. Ei aidanud ka silla osaline varja-  
mine. Vahelduvvoolu kõrgemad harmoonilised lained võisid pääseda maa-  
gilise silmani ka juhtmete kaudu ja tulemuseks oli, et miinimum osutus  
ebamääraseks ja tegev- ja induktiivsuse määramisel tekkis viga  
u. 10% ulatuses, millega ei võinud leppida.

Ei jäänud muud üle, kui arvutada raudjuhtmete tegev- ja induktiiv-  
takistus näivtakistuse kaudu, mis on määratud voolutugevuse ja pinge  
mõõtmise abil nn. kolme voltmeetri meetodiga. Selleks koostati skeem  
joon. 12 kohaselt.

Laboratooriumis oli olemas Hartmann & Brauni täpne, peegelskaalaga  
varustatud staatiline voltmeeter pingeteni kuni 150 V, mille juurde kuulus  
haruühendustega pingetrafo, millega oli võimalik mõõta vahelduvaid pingeid

0,01 ... 0,15 V, 0,05 ... 0,75 V, 0,2 ... 3 V ja 1 ... 15 V. Seda pingemõõtjat oli ümberlülitite abil võimalik ühendada nii, et saadi määrata pingesooitud klemmide vahel.

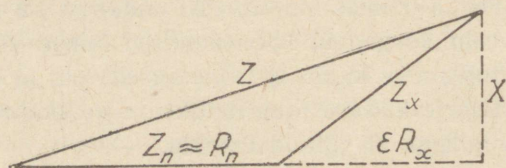


Joon. 12. Lülituskava raudtraadi näivtakistuse määramiseks.

Võrdlustakistuseks kasutati eespool-kirjeldatud praktiliselt induktiivsuvaba takistust, mis talus voolutugevusi kuni 50 A. Sellega järjestikku oli lülitatud uuritav raudjuhe.

Reguleeritud voolutugevusel, pärast seda kui uuritava traadi temperatuur oli saavutanud püsiva väärtuse, mida kontrolliti traadi külge kinnitatud termoelemendi ja mikroampermeetri abil, mõõdeti üheaegselt voolutugevus  $J$  ja pinge  $U_n$  võrdlustakistuse klemmidel, siis pinge  $U_x$  uuritava raudtraadi külge ühendatud klemmidel ja lõpuks mõlema pinges vektoriinne summa  $U$ .

Jagades pinged vastava voolutugevusega saadi näivtakistused  $Z_n$  ja  $Z_x$  ning nende geomeetriline summa  $Z$ .



Joon. 13. Takistuste kolmnurgad tegev- ja induktiivtakistuste määramiseks.

Takistuse kolmnurgast oli lihtne arvutada näivtakistuse  $Z_x$  komponente — tegev- ja induktiivtakistus ( $X = 2\pi fL$ ) — täisnurksetest kolmnurkadest (joon. 13):

$$X = \sqrt{Z_x^2 - (\varepsilon R_x)^2}, \quad (19)$$

$$(Z_n + \varepsilon R_x)^2 + X^2 = Z^2,$$

$$Z_n^2 + 2 Z_n \varepsilon R_x + (\varepsilon R_x)^2 + Z_x^2 - (\varepsilon R_x)^2 = Z^2,$$

$$\varepsilon R_x = \frac{Z^2 - Z_n^2 - Z_x^2}{2Z_n}. \quad (20)$$

Raudtraadi nävtakistus  $Z_x$  suureneb voolutugevusega mitte ainult pinnanähtuse ja muutlikust permeaablusest tingitud muutliku induktiivtakistuse tõttu, vaid ka tõusva temperatuuri toimet. Et pöörivooluteguri  $\varepsilon$  arvutamisel elimineerida tõusva temperatuuri mõju, tuli määrata oomtakistus ka alalisvooluga samal temperatuuril, nagu see oli vahelduvvooluga reguleeritud voolutugevusel pärast seda, kui oli saavutatud statsionaarne olukord.

Selleks kasutati Hartmann & Brauni ristpooli-oommeetrit, millega oli võimalik mõõta piirkonnas  $0,05 \dots 0,3 \Omega$  alalisvoo'u takistust täpsusega  $0,1\%$ .

Alalisvoolu takistuse mõõtmist toimetati järgmiselt: üheaegselt vahelduvvoolu ringi katkestamisega vinnaklüüti abil pandi käima sekundimõõtja ja hetk hiljem lülitati raudtraadi klemmide külge vinnaklüüti abil ristpooli-oommeeter, mille osuti mõni sekund hiljem näitas peegliga varustatud astmikul otseselt mõõdetavat takistust oomides. Takistuse mõõtmisi toimetati teatavate vaheaegade, tavaliselt iga 10 sekundi järel, saades sellega võimaluse hiljem joonestada takistuse kõverad sõltuvalt ajast  $R=f(t)$ , mida võis pikendada ettepoole kuni vahelduvvoolu väljalülitamise momendini, kui  $t=0$ . Ühendusjuhtme ja vinnaklüüti üleminekutakistus võeti arvesse erimõõtmisega ja lahutati mõõdetud takistuse väärtusest.

Määrates niiviisi alalisvoolu takistused  $R_x$  pärast mitmesuguste voolutugevuste katkestamist, võidi joonestada alalisvoolu takistus sõltuvalt voolutugevusest  $R_x=f(J)$ . See kõver on parabolitaoline. Voolutugevusel  $J=0$  oli takistus määratav enne või pärast katsete seeriat sama ristpooli-oommeetriga. Saadud kõverast  $R_x=f(J)$  oli võimalik määrata alalisvoolu takistusi vastavalt igale vahepealsele voolutugevusele (joon. 14).

Raudjuhtme nävtakistuse aktiivkomponenti ehk tegevtakistust  $\varepsilon R_x$  jagades sama temperatuuri juures kehtiva alalisvoolu takistusega  $R_x$  saadigi pöörivoolutegur  $\varepsilon$ .

Korrutades 1 km pikkuse raudjuhtme takistuse  $R_0$  pöörivooluteguriga  $\varepsilon$  saame tegevtakistuse  $\varepsilon R_0$  ( $\Omega$  km), taandatud traadi teatavale temperatuurile, mille puhul alalisvoolu takistus oli  $R_0$ .

Raudjuhtmetega õhuliinil on see omapära, et liini induktiivtakistus  $X$  ei sõltu mitte ainult juhtmete mõõtmeist ja vahemaast juhtmete vahel,

vaid ka juhtmaterjali permeaablausest  $\mu$ , vastvalt juhtmes valitsevale väljatugevusele.

Ühe- või kolmefaasise õhuliini ühe km pikkuse ühe juhtme induktiivsus henrides (H) on

$$L_0 = \left( 2 \ln \frac{a}{r} + 0,5 \mu \right) 10^{-4} = \left( 4,6 \lg \frac{a}{r} + 0,5 \mu \right) 10^{-4} \text{ [H/km]}, \quad (21)$$

kus  $a$  on keskmine juhtmete vahemaa (ühefaasisel liinil juhtmetevaheline kaugus); kolmefaasisel liinil  $a = \sqrt{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}$ ;  $r = d/2$  on juhtme raadius, mõõdetud samades ühikutes kui  $a$ .

Ühe km pikkuse juhtme induktiivtakistus sagedusel  $f = 50$  p/s on:

$$\begin{aligned} X_0 &= 2 \pi f 4,6 \lg \frac{a}{r} 10^{-4} + 2 \pi f 0,5 \mu \cdot 10^{-4} = \\ &= 0,145 \lg \frac{a}{r} + 0,0157 \mu \text{ [\Omega/km]}. \end{aligned} \quad (22)$$

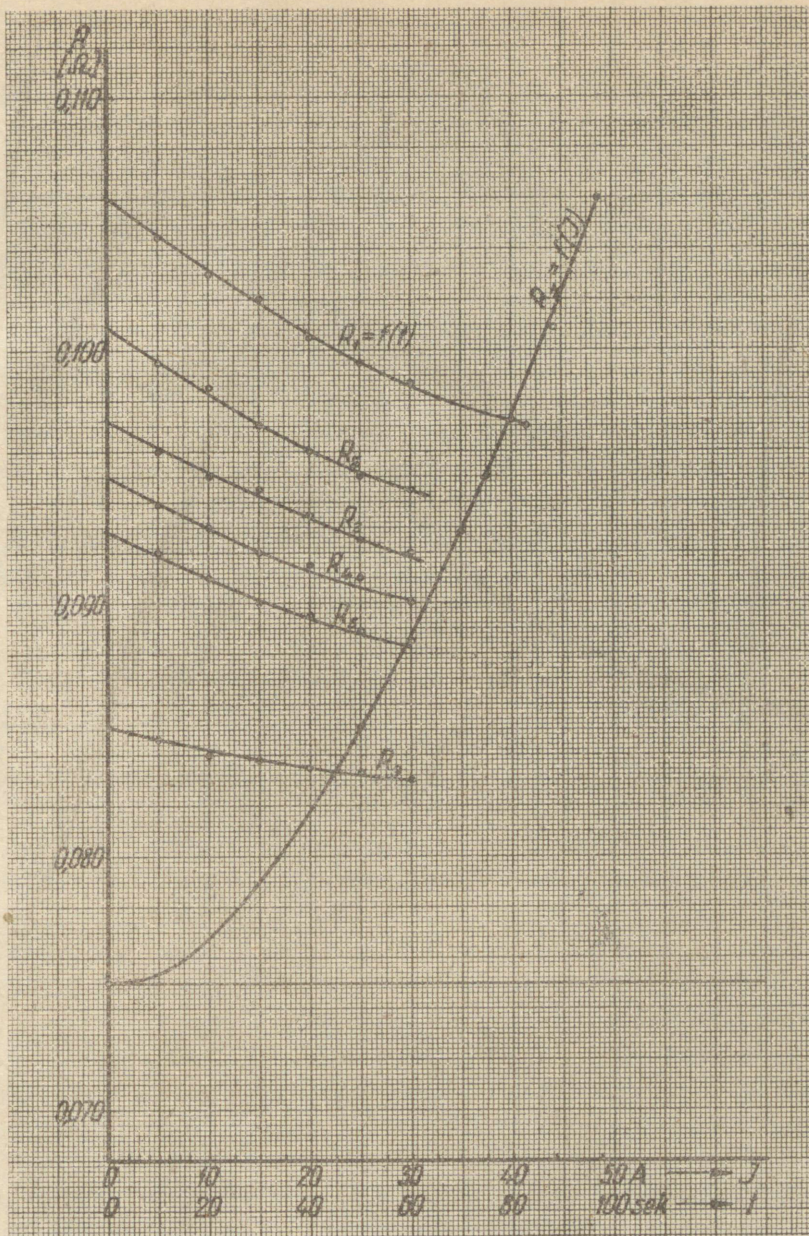
Induktiivtakistus  $X_0$  koosneb seega kahest osast; esimene neist on tingitud magnetvoost väljaspool juhet ja seda nimetame väliseks induktiivtakistuseks  $X_{0e}$ , kuna teine on tingitud magnetvoost juhtme sisemuses ja seda viimast nimetame sisemiseks induktiivtakistuseks  $X_{0s}$ .

Väline induktiivtakistus  $X_{0e}$  on lihtne arvutada; ta ei sõltu juhtme materjalist ja 4...6-mm-lise läbimõõduga traatide vahemaa olles 40...60 cm, muutub piirides 0,308...0,360  $\Omega$ /km. Sama läbimõõduga raudtraatide tegev takistus on (joon. 18 kohaselt) 5...17,2  $\Omega$ /km. Seega moodustab väline induktiivtakistus  $X_{0e}$  ainult 2...7,6% tegev takistusest ja võiks paljudel juhtmeil arvutamisel tähele panemata jääda.

Sisemine induktiivtakistus  $X_{0s}$ , mis vask- või alumiiniumjuhtmeis moodustab ainult mõne % välisest induktiivtakistusest, on raudtraadis seevastu märksa suurem ja väga keeruline arvutada, sest pinnanähtuse tõttu pole voolutihedus juhtmes ühtlane ja seepärast on raske määrata väljatiheduse kulgu juhtme sisemuses, samuti ka permeaabluse kulgu, mis sõltub raua magnetilistest omadustest. Sisemine induktiivtakistus raudtraadis on pealegi muutuv suurus, sest väljatugevus ja permeaablus sõltuvad ka voolutugevusest juhtmes.

Tegelikult ei jää muud üle, kui raudtraadi sisemine induktiivtakistus  $X_{0s}$ , samuti nagu tegev takistus  $\varepsilon R_0$ , võtta tabeleist või kõveraist, mis on saadud hoolikate laboratoorsete katsete tulemusena.

Raudtraatide induktiivsuse katselisel määramisel tuleb esialgu nii väline kui ka sisemine induktiivsus arvutada koos. Kuid lahutades saadud suuru-



Joon. 14. Raudtraadi ( $d=5,04$  mm,  $l=11,0$  m, tõmbetugevus =  $62,9$  kg/mm<sup>2</sup>, venivus =  $3\%$ ) oomtakistuse määramine sõltuvalt voolutugevusest. (Näide katseseeriast nr. 11.)

sest lihtsalt arvatava välise induktiivtakistuse, saamegi otsitava sisemise induktiivtakistuse.

Katse tegelikul teostamisel ilmnes, et laboratooriumis olevad täpsed mõõteriistad, nende seas ka Siemens & Halske ning Hartmann & Brauni peegelskaalaga dünamomeetrilised ampermeetrid, milledega mõõdeti vahelduvvoolu tugevust, ja Hartmann & Brauni staatiline voltmeeter, millega mõõdeti pingeid, omasid siiski nii suurt viga, et lõpptulemused induktiivtakistuse määramisel olid algul peaaegu niisama ebatäpsed kui mõõtmised silla lülituses.

Tuli uuesti normida kõik mõõteriistad ja valmistada neile weakõverad (korrektsioonikõverad), nii et lõpuks oli võimalik sooritada üksikuid mõõtmisi täpsusega 0,2 . . . 0,5%.

Dünamomeetrilisi ampermeetreid võrreldi alalisvooluga täpsete pöördepooli-mõõteriistadega. Staatilist voltmeetrit koos pingetrafo, mis kõrgendas mõõdetavat pinget, võis normida, mõõtes sellega pinget täpse takistuse (takistuse normaali) klemmidel, millest juhiti läbi vahelduvvoolu, mille tugevust mõõdeti täpse dünamomeetrilise ampermeetriga täishälbel, kus suhteline viga on väiksem. Viimast riista võis jällegi kontrollida alalisvooluga täpse pöördepooli-mõõteriista abil.

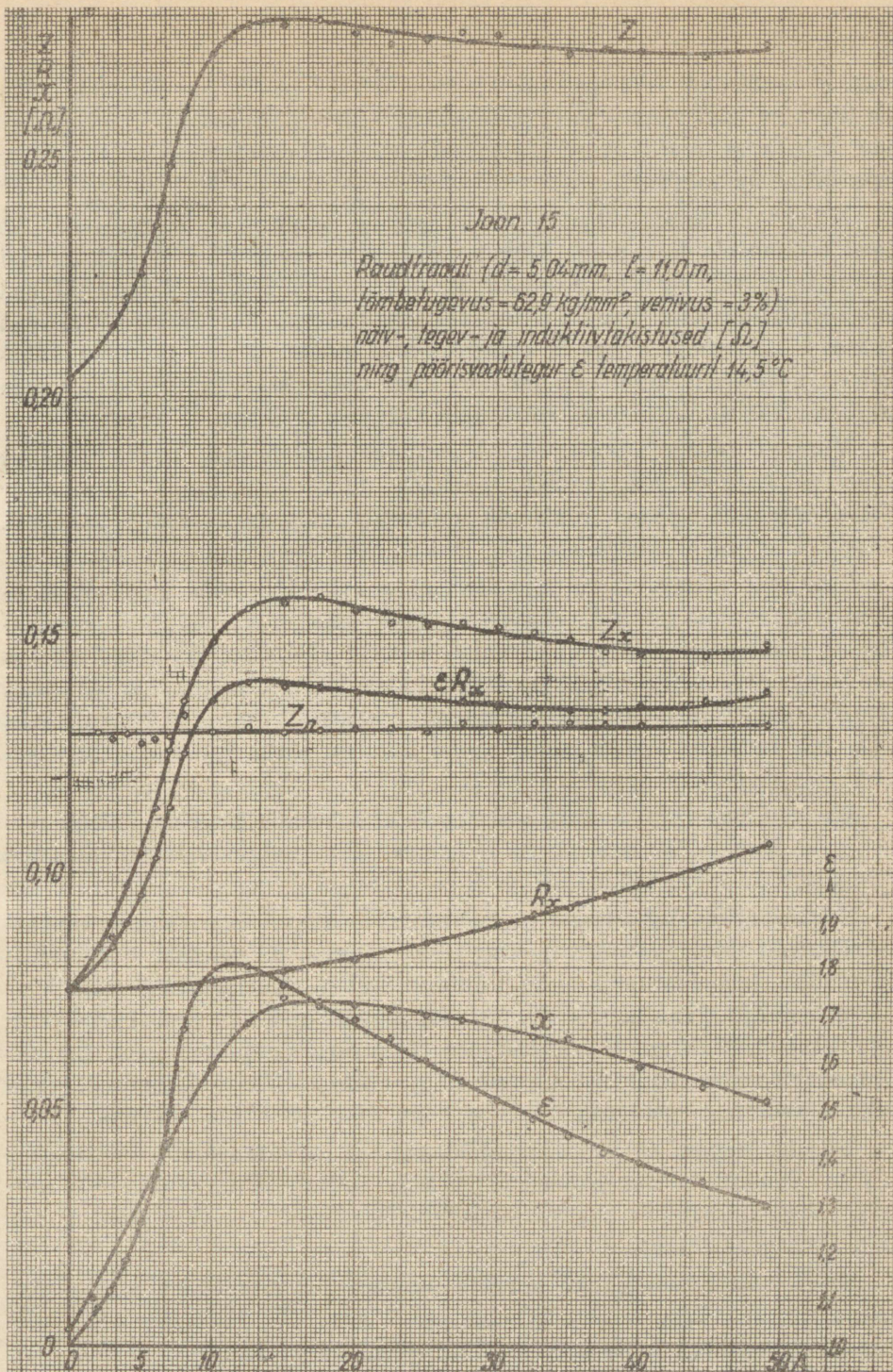
Staatilise voltmeetri pingetrafo voolutarvitus osutus katsetel niivõrd väikeseks, et voolutugevuse mõõtmisel ei olnud tarvis selle korrektsiooni ette võtta.

Katse raudtraatide tegev- ja induktiivtakistuse määramiseks toimus järgmiselt.

Kõigepealt pingutati üles uuritav juhe ja tugevate klemmide abil kinnitati külge ühelt poolt võrdlustakistus  $R_n$  ja teiselt poolt voolutrafo (joon. 12). Siis mõõdeti teraslindiga traadi klemmidevaheline pikkus, rööbiti olevate juhtmeosade kaugus  $a$  ning täpse, poolemillimeetrilise keermega mikromeetri abil traadi läbimõõt  $d$ , toimetades mõõtmisi paarikümnelt kohas ikka kahes risti asetsevas suunas.

Siis mõõdeti ristpooli-oommeetriga traadi takistus toatemperatuuril mis määrati jeena klaasist termomeetriga, mille astmik oli kümnendik °C jaotustega. Saadud andmeist võis juba arvutada uuritava traadi erijuhtivuse  $\lambda$ .

Järgmiseks tegevuseks oli uuritava traadi ja sellega järjestikku lülitatud võrdlustakistuse koormamine maksimaalse voolutugevusega (olenevalt traadi ristlõikest — 25 kuni 50 A), kuni see saavutas statsionaarse olukorra, mida võis järeldada raudtraadi külge ühendatud termoelemendi hälbest (termoelemendiga ühendatud Cambridge Instrument Co. Ltd mikroampermeetri hälve enam ei muutunud). Voolutugevus valiti tavaliselt sää-



Joon. 15. Raudtraadi näiv-, tegev- ja induktiivtakistused [ $\Omega$ ] ning pöörivoolutegur  $\epsilon$  temperatuuril  $14,5^\circ \text{C}$ .

rane, et raudtraadi temperatuur tõusis u. 100° C-ni. Et raudjuhtme takistus temperatuuri tõustes järjest suurenes, tuli voolutugevust järelreguleerida, nihutades liugtakistust. Tavaliselt võttis püsiva o'ukorra saavutamine aega 30...40 minutit.

Nüüd võis asuda pinge ja voolutugevuse mõõtmise teostamisele. Et Kopli poolsaarel võrgu pinge kõigub võrdlemisi suurtes piirides, tuli mõnigi mõõtmine uuesti korrata ja oodata, kuni saabus rahulikum olukord. Mõned katseseeriad toimetati koguni õhtuti või puhkepäeval, kui ümbruses asuvad tehased ei töötanud. Pinge ja voolutugevuse mõõtmisi pidi tehtama kahekesi, et üheaegselt toimetada mõõteriistade lugemist. Seejuures oli autorile väärtuslikuks abiliseks Elektrotehnika Kateedri assistent P. Plakk.

Viimaks teostati peale vahelduvvooluga katsetamist traadi takistuse mõõtmine ristpooli oommeetriga, märkides ühtlasi aja, millal oommeetri näitas teatavaid hälbeid. Ka seda mõõtmist võis teha ainult kahekesi. Sellega oli esimene mõõtmiste rida läbi ja võis asuda teise juurde.

Tuli jälle sisse lülitada vahelduvvool, reguleerides selle tugevuse järgneval (madalamal) astmel. Takistuse mõõtmise ajal ristpooli oommeetriga oli traat veidi jahtunud ja vahelduvvoolu jälle sisse lülitades õnnestus mõnikord, eriti teiskordselt teostatud katse puhul, tabada temperatuur, mis oli võrdlemisi lähedane soovitavale, vastavalt uuele voolutugevusele. Siiski tuli tavaliselt oodata kümnekond minutit, kuni saavutati püsiv olukord.

Iga raudtraadiga teostati keskmiselt 17 mõõtmisrida. Iga katsete seeria võttis koos eeltöödega terve tööpäeva. Iga protokollil läbiarvutamine nõudis samuti terve tööpäeva.

Esimese kuue katseseeria läbiarvutamisel selgus, et mõõtmise täpsust saab tõhusalt tõsta, kui võtta uuritav traat säärase pikkusega, et ta takistus toaõhu temperatuuril oleks väiksem kui võrdlustakistuse oma, kusjuures traadi takistus suureneva voolutugevusega muutus suuremaks võrdlustakistusest. Vastasel korral kujunes takistuste kolmnurk (joon. 13) niivõrd ebasoodsaks induktiivtakistuse  $X$  arvutamisel, eriti suurte ja väga väikeste voolutugevuste väärtustel, et viga läks jälle liiga suureks.

Teiseks selgus, et juhuslike mõõtmis- ja arvutusvigade vältimiseks on tulus joonestada mm-paberil välja kõik arvutatud näivtakistuste suurused. Viga ilmneb siis tugeva kõrvalekaldumisena voolavast joonest, mis läbib arvutatud punkte.

Seega osutus vajalikuks korrata suuremat osa katseist sobiva pikkusega raudtraadiga, saades katseseeriad 7 kuni 13. Katseseeria 11 tulemustest on esitatud näitena kaks lehte (joon. 14 ja 15).

Tallinna kahelt tehase<sup>6)</sup> lahkelt katsetamiseks antud raudtraatidest läbimõõduga 3,5 kuni 6 mm saadeti proovid ka Tall. Polüt. Instituudi Ehitusmehhaanika ja Konstruksioonide Kateedrile, et materjalide tugevuslaboratooriumis määrata nende tõmbetugevus ja venivus. Igast traadist tehti kaks katset, millede tulemused on toodud tabelis 1 (lk. 32).

Juba enne traatide tugevusomaduste määramist oli selge, et on tegemist väga ebaühtlase materjaliga: mõni traat oli üllatavalt painduv, teine jälle võrdlemisi jäik. Üks sellistest traatidest oli kas halva koostise või ebasoodsa tehnoloogilise protsessi tõttu mitte ainult väga jäik, vaid koguni täis piki-pragusid ja pinde.

Tugevuslaboratooriumi katsetest selgus, et „väga pehme“ traadi tõmbetugevus oli ainult 34 kg/mm<sup>2</sup>, kuid venivus koguni 26,5%, kuna viimati mainitud „väga kõva“ traadi tõmbetugevus oli 78,3 kg/mm<sup>2</sup> ja venivus ainult 3%.

Elektrilistest mõõtmistest ja arvutustest selgus, et „pehme“ traat omab suhteliselt head juhtivust (7,44 m/Ω mm<sup>2</sup>), kuna uuritud traatidest oli „väga kõva“ traat kõige halvema juhtivusega (6,24 m Ωmm<sup>2</sup>). Veel suuremad olid vahed pöörisvoolutegurite ja sisemiste induktiivtakistuste vahel (vt. tab. 1, pos. nr. 5 ja 7).

Õieti peaks pöörisvoolutegurit ja induktiivtakistust võrdlema ainult võrdsete läbimõõtudega traatide juures. Tabelis 1 on pos. 3 all toodud traadil praktiliselt sama läbimõõt, mis „väga pehmel“ traadil nr. 7. Pos. 3 all toodud traadi eritakistus on 7,17 m/Ω mm<sup>2</sup> ja oma tõmbetugevuselt (62,9 kg/mm<sup>2</sup>) kuulub ta siiski „keskmiste“ traatide liiki. See 5,04 mm läbimõõduga traat omab maksimaalset pöörisvoolutegurit  $\epsilon_{\max} = 1,8$  voolutugevusel 12 A ning maksimaalset sisemist induktiivsust  $X_{\max} = 6,3$  Ω/km voolutugevusel 17,5 A, kuna „eriti pehme“ traat nr. 7 (veidi väiksema läbimõõduga = 4,95 mm) omab  $\epsilon_{\max} = 2,8$  voolutugevusel ainult 4 A, ja  $X_{\max} = 11,9$  Ω/km voolutugevusel samuti 4 A.

Tabelis 1 pos. 2 all toodud traadil on sama läbimõõt kui „väga kõval“ traadil, mis on toodud pos. 5 all. Esimese tõmbetugevus on kõigest 52,1 kg/mm<sup>2</sup>, venivus 4%. Seega kuulub ta keskmisest pehmemate traatide liiki; maksimaalne pöörisvoolutegur  $\epsilon_{\max} = 1,84$  voolutugevusel 7 A on üllatavalt suur, samuti maksimaalne sisemine induktiivtakistus  $X_{\max} = 9,15$  Ω/km voolutugevusel 8 A. „Eriti kõva“ traat nr. 5 omab  $\epsilon_{\max} = 1,48$  ja  $X_{\max} = 5,25$  Ω/km voolutugevusel üle 12 A.

Sääraste suurte lahkuminekute puhul praktiliselt võrdsete läbimõõtudega traatidel ei saa nende traatide omadusi kõrvutada mujal uuritud standard-traatide omadustega.

<sup>6)</sup> „Metallist“ ja „ETKVL“ naelatehas.

Tabel 1.

## Uuritud raudtraatide mehhaanilisi ja elektrilisi omadusi.

Pos. nr.	Läbi- mõõt	Rist- löige	Tõmbe- tugevus	Veni- vus	Eri- juhti- vus	Suurim pöörisvoolu- tegur	voolu- tugevusel	Suurim sisem. in- dukt.- takis- tus	voolu- tugevusel
	$d$ mm	$q$ mm <sup>2</sup>	$R$ kg/mm <sup>2</sup>	$i$ %	$\lambda_{20}$ $\frac{m}{\Omega\text{mm}^2}$	$\epsilon_{\max}$ 1	$J$ A	$X_{os}$ $\Omega/\text{km}$	$J$ A
1	3,52	9,73	65,6	3,5	7,29	1,41	11	6,5	11
2	4,21	13,93	52,1	4,0	7,53	1,84	7	9,1	8
3	5,04	19,96	62,9	3,0	7,17	1,80	12	6,3	17,5
4	5,86	26,96	71,6	2,5	7,72	1,95	15	5,2	19
5	4,21	13,86	78,3	3,0	6,24	1,48	12	5,25	üle 12
6	4,21	13,86	48,7	20,5	6,27	1,52	10	7,4	11
7	4,95	19,22	34,0	26,5	7,44	2,82	4	11,9	4

Märkus: Pos. nr. 1...4 on pärit ühest ja nr. 5...7 teisest tehast.

Pos. nr. 5 on tekstis mainitud „eriti kõva“ traat enne hõõgutamist.

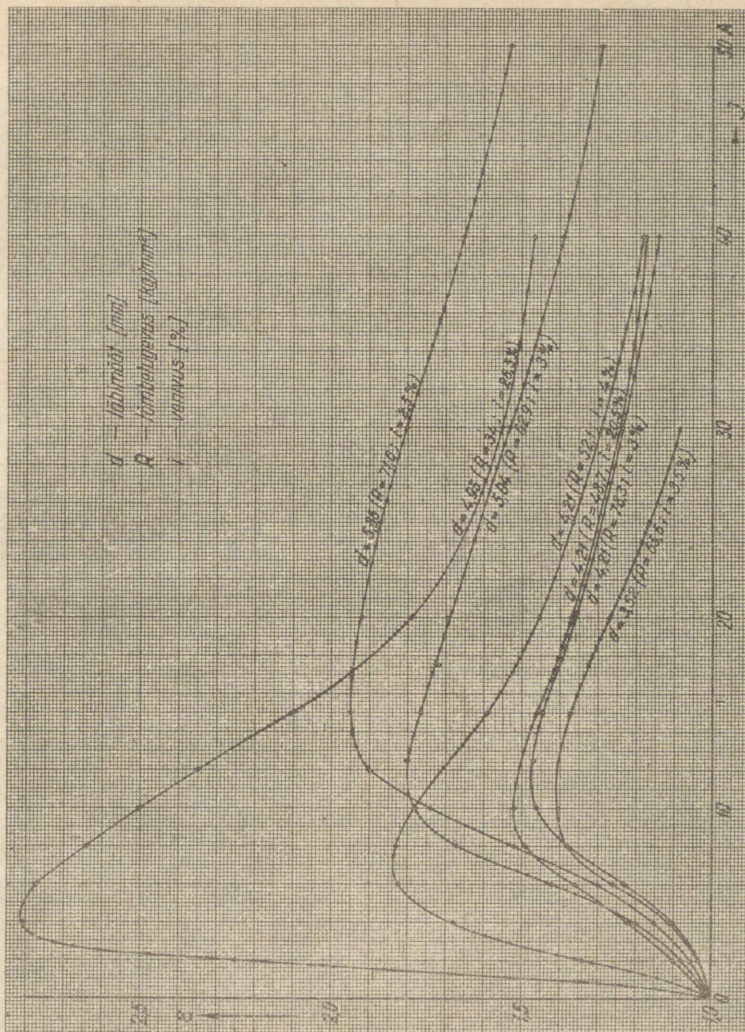
Pos. nr. 6 on sama traat peale hõõgutamist.

Pos. nr. 7 on tekstis mainitud „eriti pehme“ traat.

Viimati mainitud „eriti kõva“ traati uuriti huvi pärast veel peale hõõgutamist helepunase värvuseni, mida muide teostati elektrivooluga. Nagu nähtub vastavatest protokollidest ja nende tulemuste kokkuvõttest tabelis 1 pos. 6 all, langes selle traadi tõmbetugevus 48,7 kg/mm<sup>2</sup> ja venivus suurenes 20,5% peale; erijuhtivus jäi praktiliselt samasuguseks (6,25 m/Ωmm<sup>2</sup>) nagu enne hõõgutamist, maksimaalne pöörisvoolutegur muutus samuti väga vähe (1,48 pealt 1,52 peale), kuid nihkus siiski väiksema<sup>2</sup> voolutugevuse poole (12 A pealt 10 A peale). Tublisti muutus sise-mine induktiivtakistus: see näitas nüüd tavalist maksimumi voolutugevusel u. 11 A ja oli 7,4 Ω/km.

Seega hõõgutamine helepunase värvuseni mõne minuti jooksul ei muutnud „väga kõva“ traadi elektrilisi omadusi ligilähedaltki sarnaseks „väga pehme“ traadi elektriliste omadustega, kuigi mõlemad traadid olid pärit samast tehast.

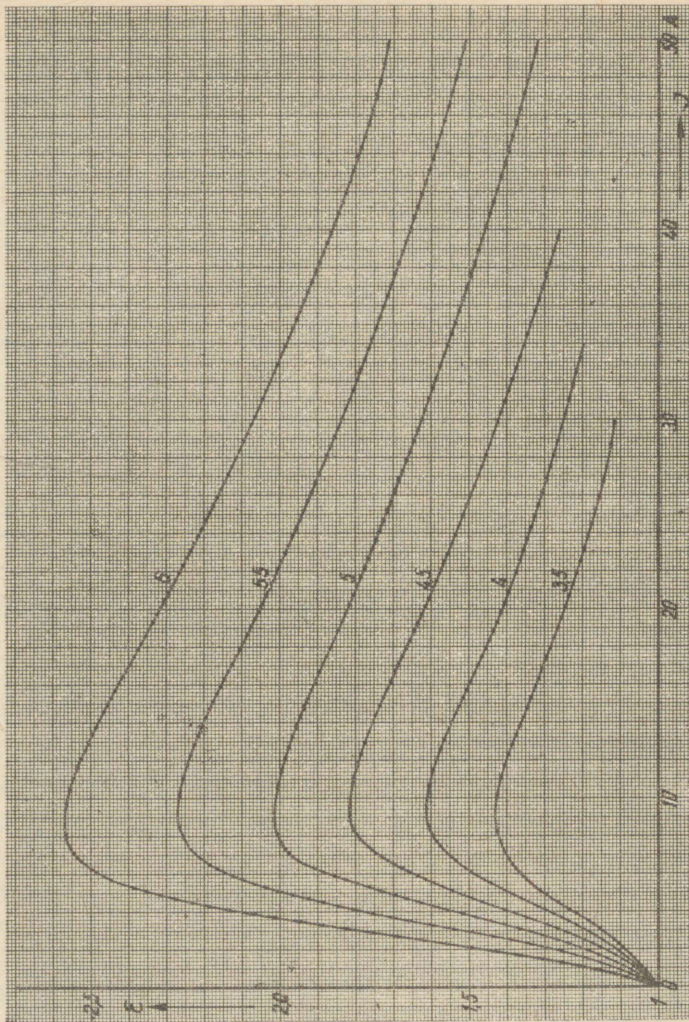
Katsetatud omamaa tehaste traatide pöörisvoolutegurid on toodud sõltuvalt voolutugevusest joonisel 16; 3,5- kuni 6-mm-liste traatide pöörisvoolutegurite keskmised väärtused — joonisel 17; tegev takistused traadi ühe km pikkuse kohta — joonisel 18.



Joon. 16. Tallinna tehaste traatide mõõdetud pöörivoolutegur.

Võrreldes neid andmeid Nõukogude Liidus ja Saksamaal valmistatud traatide andmetega võib nentida, et autori mõõdetud tavaliste või „keskmiste“ traatide pöörivoolutegurid ja seega ka tegevtahtused on üldiselt väiksemad.

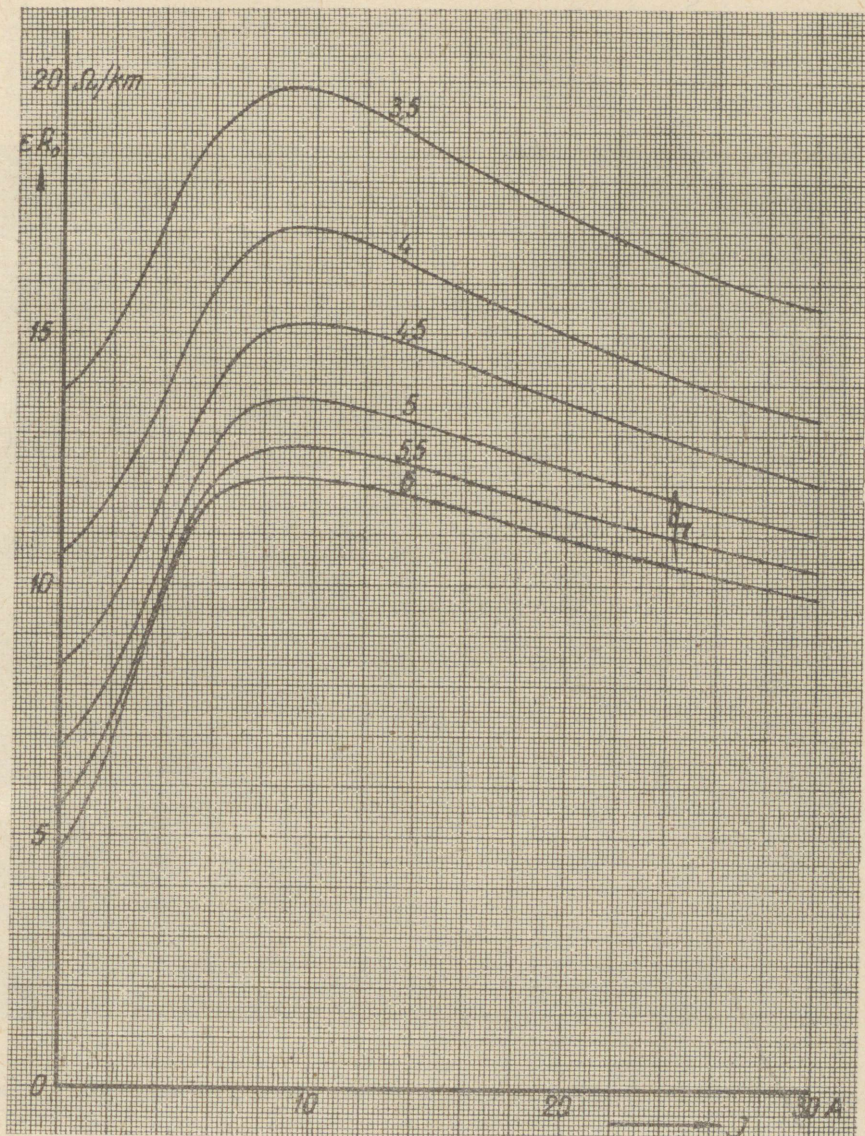
Mujal Nõukogude Liidus valmistatavate standard-traatide sisemiste induktiivtahtuste väärtused on läbimõõtudele 3,5, 4,5 ja 6 mm toodud prof. A. A. Glazunovi raamatus „Электрические сети и системы I“ tabeli kujul. Kuigi selles tabelis leiduvad mõningad trükivead, võib siiski



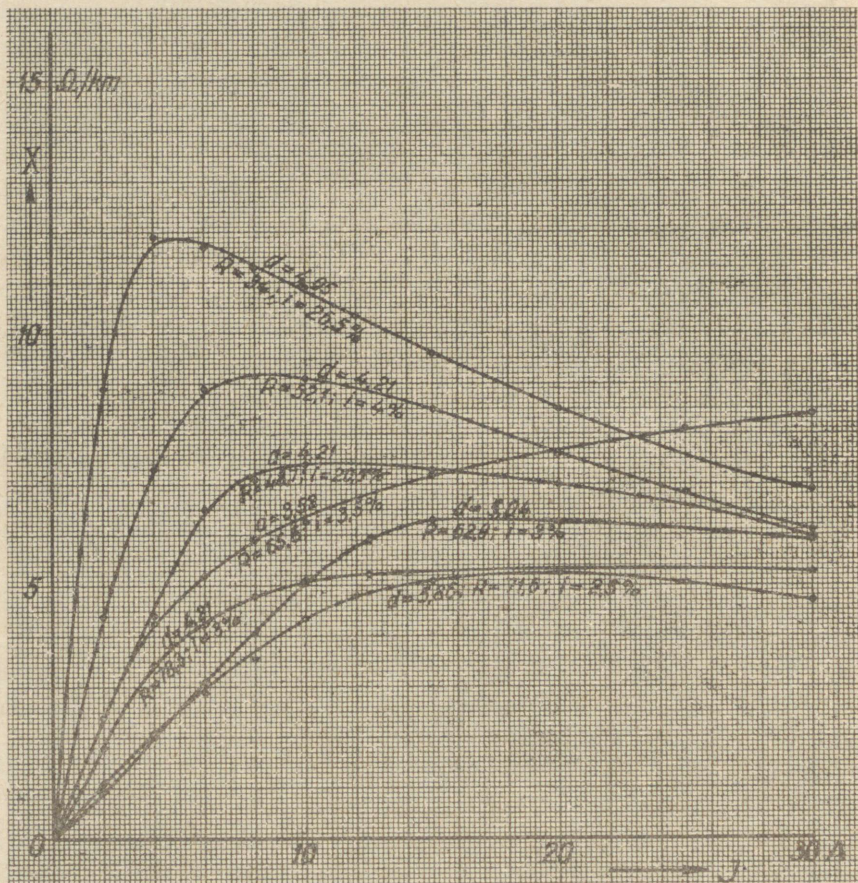
Joon. 17. 3,5- kuni 6-mm-lise läbimõõduga raudtraatide pöörivooluteguri keskmised väärtused.

ütelda, et Tallinna tehastes valmistatud traatide sisemised induktiivtakistused km kohta on märksa väiksemad kui Nõukogude Liidu standard-traatidel (võrdle joon. 19 ja 20).

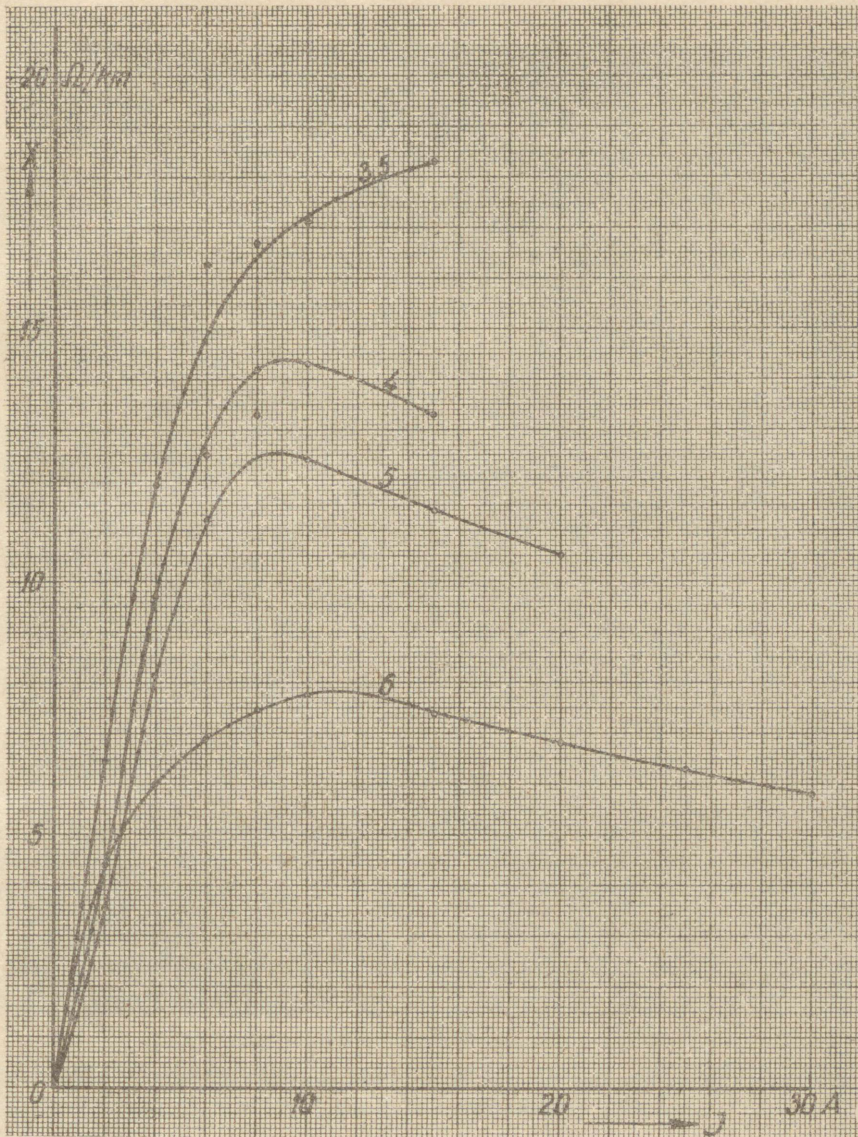
Joonisel 21 on toodud 3,5- kuni 6-mm-liste raudtraatide sisemiste induktiivtakistuste keskmised väärtused, mida on kasutatud edaspidistes arvutustes, eriti pingemuutuse määramiseks koostatud nomogrammi ehitamisel.



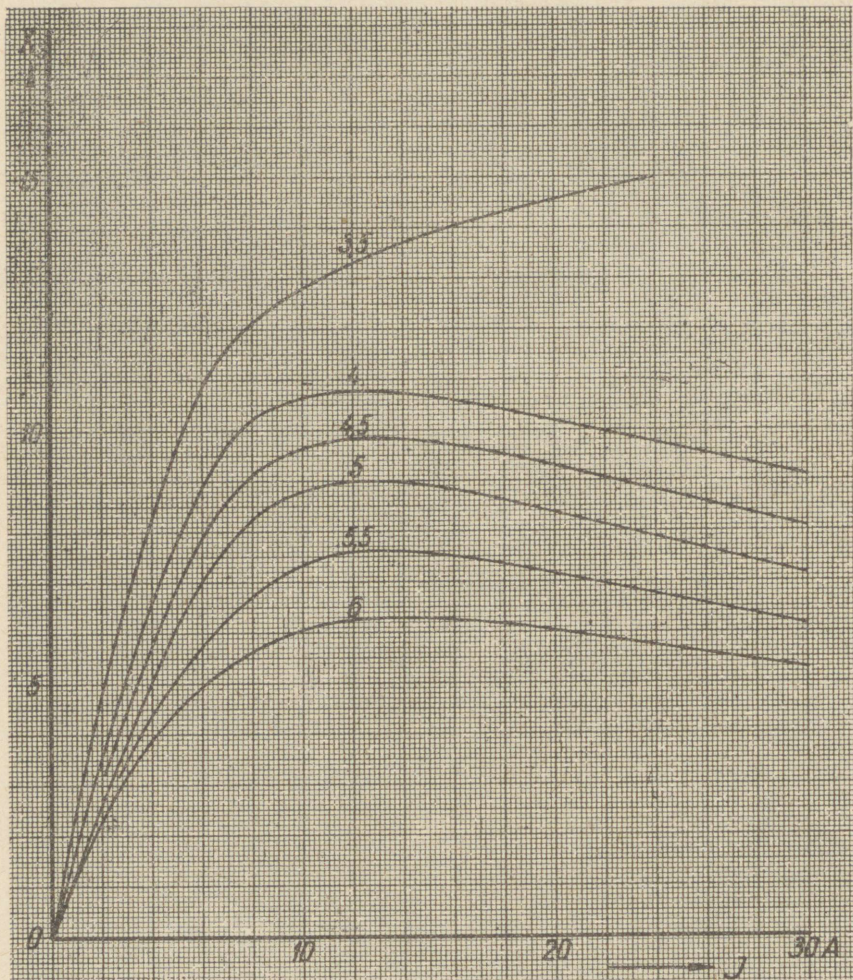
Joon. 18. 3,5- kuni 6-mm-lise läbimõõduga raudtraatide tegevtaakistuse keskmised väärtused.



Joon. 19. Tallinna tehaste raudtraatide mõõdetud sisemised induktiivtakistused.



Joon. 20. Nõukogude Liidu standard-raudtraatide sisemised induktiivtakistused.

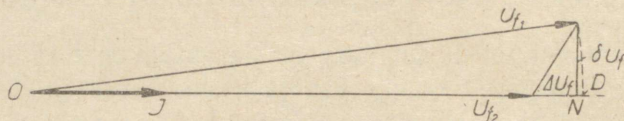


Joon. 21. 3,5- kuni 6-mm-lise läbimõõduga raudtraatide sisemiste induktiivsuste keskmised väärtused.

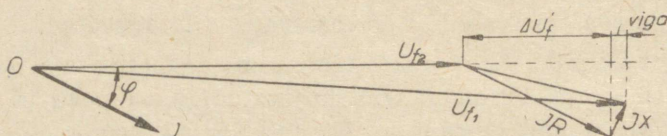


Erijuhtumil, kui pingelangu suund satub ühte faasipinge  $U_{f_2}$  suunaga, on pingete  $U_{f_1}$  ja  $U_{f_2}$  geomeetriline vahe võrdne samade pingete algebralise vahega ning pingelang võrdub pingemuutusega.

Pingemuutuse  $\overline{AD}$  asemel madalpingevõrkudes tavaliselt arvutatakse suurusega  $\overline{AN}$ , mida nimetatakse faasi pingelangu pikikomponendiks  $\Delta U_f$ . Komponenti  $\overline{CN}$ , mis on risti pinge  $U_{f_2}$  pikendusega, nimeta-



Joon. 23. Pingelang ja pingemuutus oomilise koormuse puhul.



Joon. 24. Pingemuutuse ligikaudne määramine.

takse faasi pingelangu ristikomponendiks  $\delta U_f$ . Viimase abil saab arvutada nurka  $\alpha$ , mille võrra on liini tegev- ja induktiivtakistuse tõttu pöördunud pingevektor, kasutades valemit:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{CN}}{\overline{OA} + \overline{AN}} = \frac{\delta U_f}{U_{f_2} + \Delta U_f}. \quad (24)$$

Nurk  $\alpha$  pingete vahel liini alguses ja lõpus on väikese ulatusega liinidel niivõrd väike, et seda tavaliselt arvesse ei võeta.

Vahe pingelangu pikikomponendi ja pingemuutuse vahel on ainult mõni %/0. Pidades silmas, et faasi pingemuutus ise on ainult 5...10%0/0 faasipingest, võib küllaldase täpsusega kirjutada, et

$$U_{f_1} = U_{f_2} + \Delta U_f. \quad (25)$$

Pingemuutus ühe- või kolmefaasilis liinil on tõeliselt suurem kui ühe faasi pingemuutus, sest et on tegemist pingemuutusega kahes või kolmes juhtmes. Pingemuutus ühefaasilis liinil:

$$\Delta U_1 = 2 \cdot \Delta U_f. \quad (26)$$

Pingemuutus kolmefaasilis liinil:

$$\Delta U_3 = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f. \quad (26a)$$

Juhtumil, kui koormuse võimsustegur praktiliselt võrdub ühega ( $\cos \varphi \approx 1$ ), nagu see on tavaline madalpingeliinides elektervalgustuse ots-tärbeks, on pingelangu pikikomponent ühtlasi pingelangu aktiivkomponen-diks (joon. 23) ja me võime üldiselt kirjutada:

$$\Delta U_1 = 2 \sum_1^n JR; \quad (27)$$

$$\Delta U_3 = \sqrt{3} \sum_1^n JR. \quad (27a)$$

Väikese ulatusega madalpinge-õhuliinides on pingelangu reaktiivne ehk induktiivne komponent tavaliselt neli-viis korda väiksem kui aktiivne ehk oomiline komponent. See asjaolu võimaldab pingemuutuse määramisel ar-vutada ainult õhuliini tegev-takistusega  $R$  ka siis, kui võimsustegur ei ole võrdne ühega (joon. 24).

Tekkivat viga võib tarbe korral arvesse võtta korrektsiooniteguri abil. Pingemuutust (pingelangu pikikomponenti) on seega ligikaudselt võimalik arvutada üldiste valemitega:

$$\Delta U_1 = 2 \sum_1^n JR \cos \varphi = 2 \sum_1^n \frac{Jl \cos \varphi}{\lambda q} = 2 \sum_1^n \frac{Nl}{\lambda q U}; \quad (28)$$

$$\Delta U_3 = \sqrt{3} \sum_1^n JR \cos \varphi = \sqrt{3} \sum_1^n \frac{Jl \cos \varphi}{\lambda q} = \sum_1^n \frac{Nl}{\lambda q U}. \quad (28a)$$

Ülaltoodud valemis tähistab  $N$  tarbija võimsust. Ühe faasi puhul  $N_1 = JU \cos \varphi$  ja  $J = N_1/U \cos \varphi$ ; kolme faasi puhul

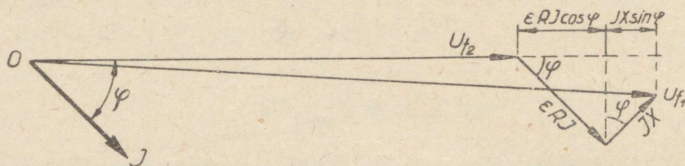
$$N_3 = \sqrt{3} JU \cos \varphi \text{ ja } J = N_3/\sqrt{3}U \cos \varphi.$$

Valemid 28 ja 28a on tavaliselt toodud ka käsiraamatuis, ilma et oleks selgitatud nende tõelist tähendust ja täpsust. Mõnikord esineb ka vigu, nagu näiteks teose „*AEG Hilfsbuch für elektrische Licht- und Kraftanlagen*“ neljandas väljaandes, mis ilmus 1939. aastal, kus pingemuutuse (käsiraa-matus pingelanguks nimetatud) arvutamise valemis ühe faasi puhul võimsuse kaudu on jäetud sisse  $\cos \varphi$ .

Pingemuutuse arvutamisel raudtraadist õhuliinis on see omapära, et traadi takistus ei sõltu mitte ainult aine erijuhtivusest, traadi ristlõikest ja pikkusest, vaid ka juhett läbiva voolu tugevusest. Teiseks, raudliini induk-tiivtakistus on märksa suurem kui mittemagnetilisest aimest liini oma ja sisemise induktiivtakistuse suurus sõltub samuti voolutugevusest.

Puht-oomilise koormuse korral (näit. elektervalgustus, soojendusriis-tad) ei ole raudjuhtmete puhul ka sisemisel induktiivtakistusel määravat tähtsust pingemuutuse arvutamisel, kõnelemata välisest induktiivtakistu-

sest. Kuid kui koormus on induktiivse iseloomuga (näit. asünkroonmootorid), siis on vähegi täpsemaks pinge määramiseks liini lõpus paratamatu pingemuutuse arvutus liini sisemise ja välise induktiivtakistuse arvessevõtmisega.



Joon. 25. Pingemuutuse määramine raudtraadist õhuliinis.

Pingemuutuse määramiseks raudtraadides läbimõõduga 3,5 kuni 6 mm, võimsusteguriga ( $\cos \varphi$ ) 0,5 kuni 1 on koostatud nomogramm (joon. 26) järgmise põhimõtte kohaselt:

Pingemuutus faasi kohta  $\Delta U_f$  koosneb kahest osast: pingelangu aktiivkomponendi projektsioonist  $U_{f2}$  pikendusele, mis võrdub  $\varepsilon R J \cos \varphi$ , ja pingelangu reaktiivkomponendi projektsioonist samale joonele —  $J X \sin \varphi$  (joon. 25). Seega pingemuutus faasi kohta:

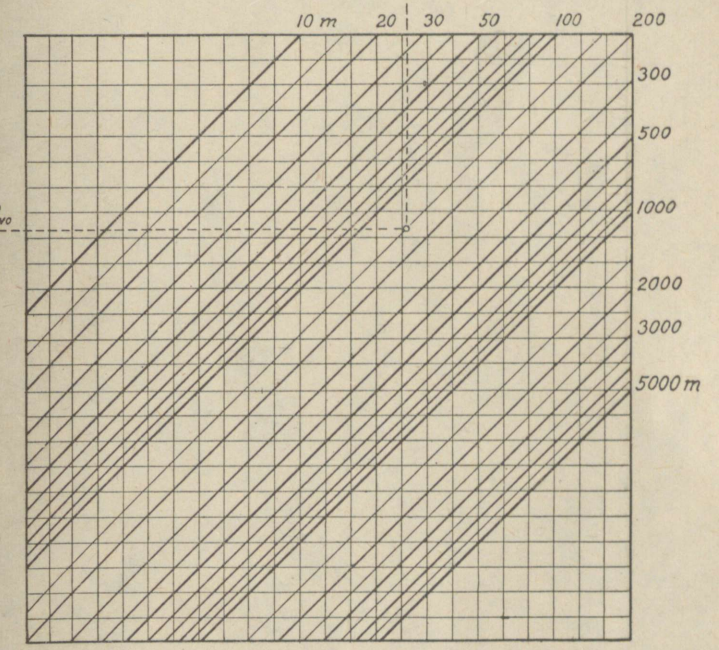
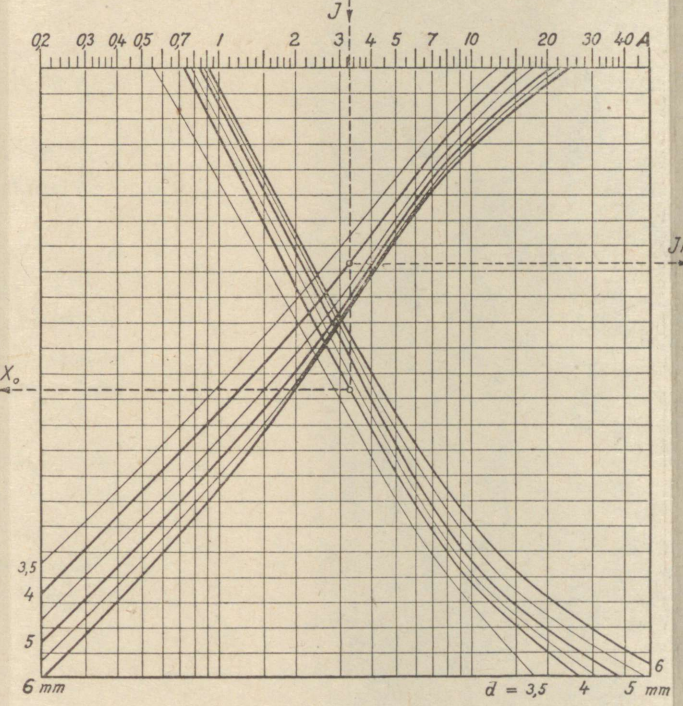
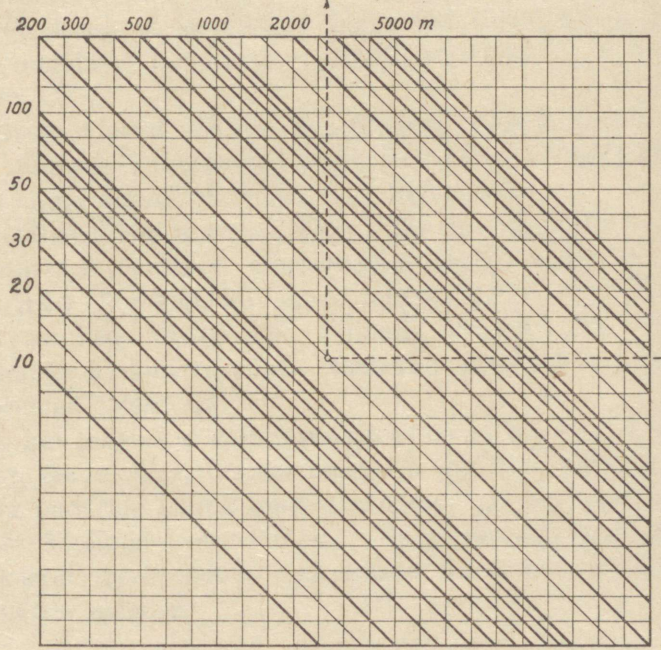
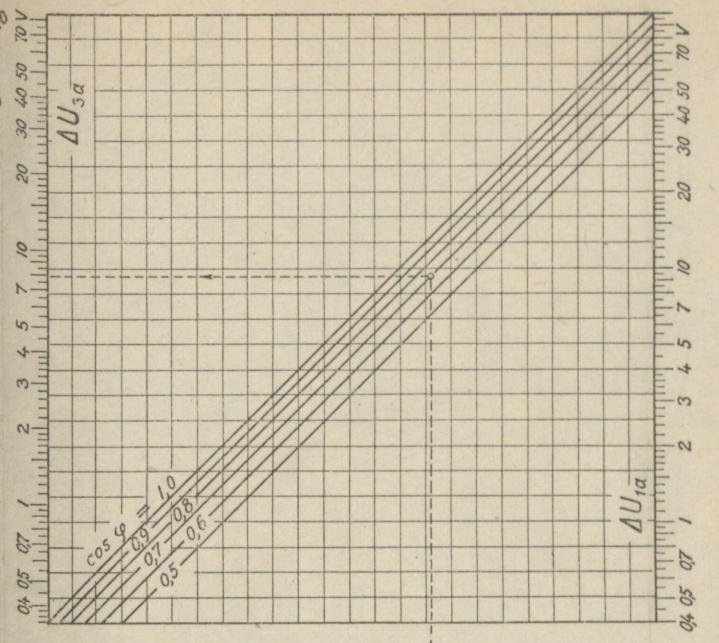
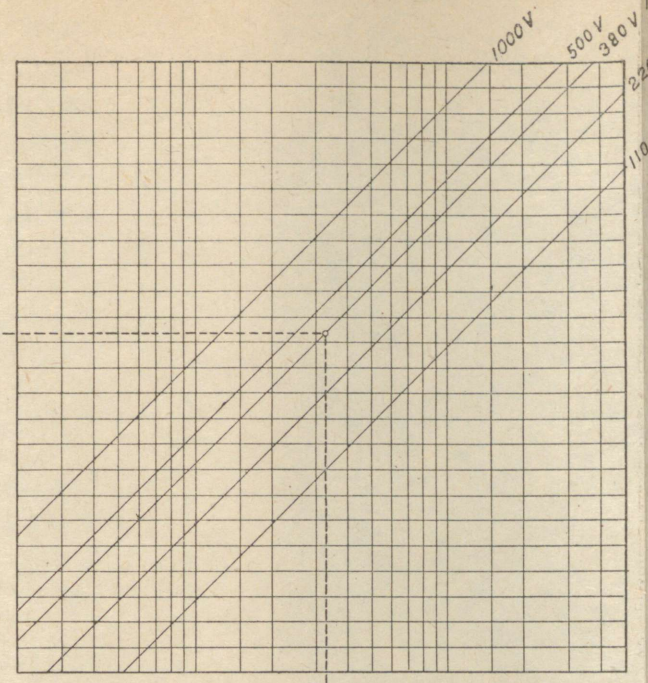
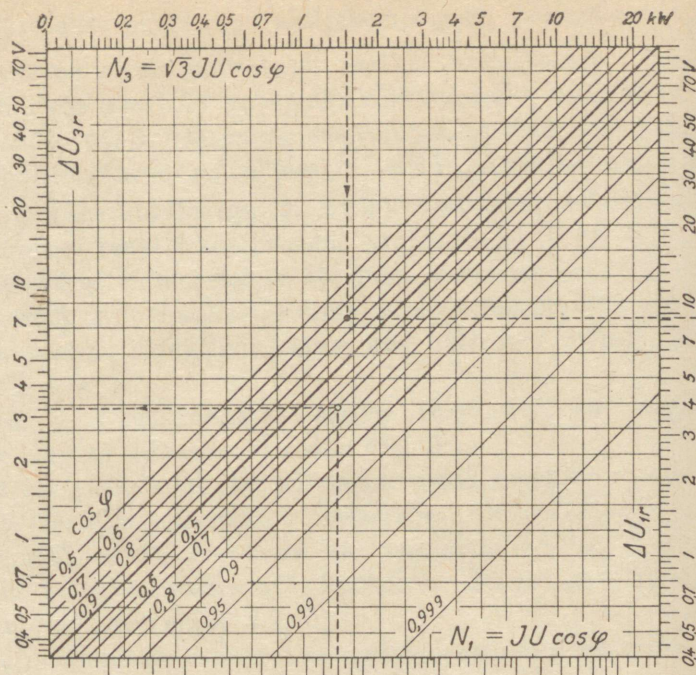
$$\begin{aligned} \Delta U_f &= \Delta U_a + \Delta U_r = \varepsilon R J \cos \varphi + J X \sin \varphi = \\ &= \frac{\varepsilon l}{\lambda q} J \cos \varphi + X_0 l J \sin \varphi. \end{aligned} \quad (29)$$

Pingemuutuse komponentide määramiseks on eeskätt vaja teada voolutugevust  $J$ . Teades tarbija võimsust saab voolutugevust määrata valemist  $J = N_1 / U \cos \varphi$  ühe faasi puhul ja valemist  $J = N_3 / \sqrt{3} U \cos \varphi$  kolme faasi puhul, kuid, nagu on näidatud joonisel 26, seda saab teha ka graafiliselt.

Vasakul üleval olevas ruudus on võimsuseastmik kolme faasi jaoks ruudu ülemisel serval ja ühe faasi jaoks — ruudu alumisel serval. Jälgides teatavat võimsust (näitel 1,5 kW) püstloodis sihis kuni vastava võimsusteguri (näitel  $\cos \varphi = 0,7$ ) jooneni, sealt paremale kuni valitud pinge jooneni (näitel 380 V) ja viimasest alla kuni keskmise alumise ruudu ülemise servani, saamegi otsitava voolutugevuse 3,25 A.

Järgmiseks ülesandeks on korrutise  $\frac{\varepsilon}{\lambda q} J$  määramine. Joonisel 26 minnakse selleks voolutugevuse astmikult alla vastava läbimõõduga raudtraadi kõverani (näit.  $d = 4$  mm), mis suundub alt vasakult paremale üles.

Kolmandaks määratakse korrutis  $\frac{\varepsilon l}{\lambda q} J$ , mis on pingelangu aktiivkomponendiks; selleks jälgitakse joont raudtraadi kõverast paremale kuni liini pikkuse jooneni (näitel 150 m).



Joon. 26. Nomogramm pingemuutuse määramiseks raudtraadiist õhuliinis



Siis määratakse pingelangu aktiivkomponendi projektsioon  $\frac{\varepsilon l}{\lambda q} J \cos \varphi$ :  
tulles liini pikkuse joonelt pööratakse tarbija võimsusteguri sirgelt (käesoleval juhtumil  $\cos \varphi = 0,7$ ) paremale või vasakule vastavalt sellele, kas on tegemist ühe- või kolmefaasise süsteemiga, et astmikult lugeda pingemuutuse aktiivkomponendi osa voltides (näitel 8 V). Astmikelt saame pingemuutused faasi kohta korrutatud teguriga 2 või  $\sqrt{3}$  vastavalt valemitele 26 ja 26a.

Pingemuutuse reaktiivkomponendi projektsiooni  $X_0 l J \sin \varphi$  määramiseks väljume jällegi võimsusest  $N$  või juba teatavast voolutugevusest  $J$  ja leiame kõigepealt  $X_0 J$ . Selleks siirdume vooluastmikult alla kuni vastava läbimõõduga juhtme induktiivtakistuse kõverani, mis kulgeb ülevalt vasakult paremale alla.

Korrutise  $X_0 l J$  määramiseks jälgime rõhtloodis joont vasakule kuni liini pikkuse sirgeni (käesoleval näitel 150 m).

Et määrata pingelangu reaktiivkomponendi projektsiooni, läheme pikkuse joonelt üles kuni vastava võimsusteguri jooneni (näitel 0,7) allpool ruudu diagonaali, et siis pöörduda kas paremale või vasakule vastavalt sellele, kas on tegemist kolme- või ühefaasise liiniga, et astmikult lugeda otsitav suurus voltides (näitel 3,2 V).

Üldise pingemuutuse saame, liites leitud pingemuutuse aktiiv- ja reaktiivkomponendid.

Olgu tähendatud, et joonisel 26 kujutatud nomogramm on koostatud raudtraatide omaduste keskmiste väärtuste alusel ja kehtib traadi temperatuuril  $+20^\circ \text{C}$ .

Tegelikuses võivad esineda raudtraadid, millede omadused lähevad keskmistest väärtustest mõnevõrra lahku. Seepärast on raudjuhtmetega õhuliinide arvutamine üldiselt võimalik vaid ligikaudselt.

Kuid kasutades nomogrammi (joon. 26) on siiski võimalik saada selget ettekujutust, missuguses suuruseastmes asub otsitav suurus (pingelang, ulatus jne.). Muidugi, kui mõne juhtme kohta on antud või määratud kindlad andmed, siis on neid võimalik ära kasutada, kandes nomogrammi alumisse keskmisse ruutu vastavad abikõverad ja saades juba märksa täpsemad tulemused.

Samuti, kui tahetakse määrata näiteks pingelang rauast köisjuhtmega õhuliinil, siis, teades köisjuhtmete tegev- ja induktiivtakistusi, võib nende abil koostada punktide kaupa uued abikõverad ja kasutada joonist 26 ka köisjuhtmeist õhuliinide arvutamiseks. Nomogrammi kasutamise ulatust saab soovi korral meelevaldselt suurendada, kuna kõik astmikud on tehtud logaritmilises mõõdus.

## 6. Raudjuhtmetega õhuliini lubatav ulatus pingel 220 ja 380 V.

Raudjuhtmetega õhuliini ulatuse selgitamisel on tegemist peamiselt kolme probleemiga: lubatavate pingemuutuse, energiakao ja lühisvoolu suurustega. Et neid küsimusi selgitada meie olude kohaselt, võtame aluseks tüüpilise skeemi, mis esineb meil maal ühe elektriühistu piirkonnas.

Tavaliselt asetseb küla, mida tahetakse elektrienergiaga varustada, piki teed. Seejuures ei ole talundid mitte väga lähestikku, vaid nad on tavaliselt ümbritsetud aia ja põldudega.

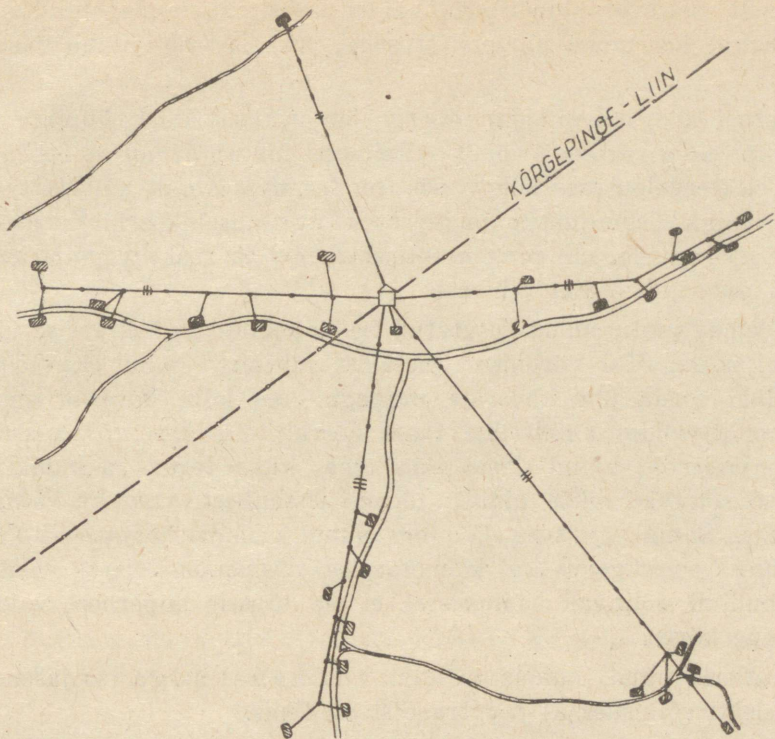
Üksik talu ei ole majanduslikult võimeline ehitama trafo-alajaama, rääkimata kõrgepingeliini harust. Ainult ühistegelikul alusel moodustatud ühistu võib ületada majanduslikud raskused. Meil on sääraseid elektriühistuid juba üle kaheksa.

Elektrivõrgu projekti koostamisel püütakse võimalust mööda asetada trafo-alajaam tarbijate koormuse raskuskeskpunkti lähedale, et pingemuutus ja energiakadu oleksid minimaalsed. Alajaamast tõmmatakse siis kolmefaasised magistraalid, milledest hargnevad ühe- või kolmefaasised liinid (haruliinid) üksikute talunditeni.

On paratamatu, et teatav rühm tarbijaid asetseb siiski eraldi ja trafo-alajaamast eemal. Sellise talundite rühma jaoks tuleb vedada kolmefaasine liin selle rühma koormuse raskuskeskpunkti suunas, kust liin saab hargneda üksikute talunditeni.

On ka sääraseid talundeid, mis on peateest ja magistraalidest suhteliselt kaugel (näiteks üksikud metsatalud). Kui tahetakse ka niisuguseid üksik talusid varustada elektrienergiaga, siis tuleb neile ehitada eraldi liin (tavaliselt ühefaasine). Elektriühistud ei taha harilikult selliseid eraldi asetsevaid talundeid oma liikmeks võtta, sest erilise liini ehitamine on suhteliselt kulukas.

Olukord on seega tavaliselt sarnane sellega, nagu see on skemaatiliselt kujutatud joonisel 27. Alajaamast paremale ja vasakule on kujutatud kolmefaasised magistraalid, millel on praktiliselt ühtlaselt jaotatud koormus. Allpool on kaks talundite rühma, mis asetsevad eraldi suhteliselt kaugel alajaamast ja eespool-nimetatud magistraalidest. Lõppeks ülevalpool on kujutatud eraldi seisev üksik talund.



Joon. 27. Tüüpiline madalpinge jaotusvõrgu skeem maaoludes.

Asjaolu, et maksimaalne pingemuutus liini kõige kaugemas punktis ühtlaselt jaotatud koormuse puhul on kaks korda väiksem kui sama üldvõimsusega keskendatud ehk kontsentreeritud koormuse puhul, võimaldab piirduda ainult ühe koormusviisi analüüsimisega. Valime selleks keskendatud koormuse, mis oli ka nomogrammi (joon. 26) koostamise aluseks. Viimase abil ongi määratud joonisel 28 kuni 31 kujutatud ülekande ulatused mitmesuguse läbimõõduga raudtraadist õhuliinides sõltuvalt ülekantavast võimsusest, kui maksimaalne pingemuutus on 10% (s. o. 22 või 38 volti vastavalt sellele, kas liinipinge on 220 või 380 volti).

Teissuguse lubatava pingemuutuse määra juures on ulatused võrreldes protsentuaalse pingemuutusega.

Ühtlaselt jaotatud koormuse korral on samade ülekantavate võimsuste puhul ülekande ulatused kahekordsed võrreldes keskendatud koormuse viisiga.

Eraldi asetseval talundite rühmal on maksimaalne pingemuutus võrdne keskendatud koormuse pingemuutusega, mis asetseb rühma raskuskeskpunktis.

Ulatusi 10% -lise pingemuutusega on uuritud kahe tüüpilise juhtumi jaoks: kui  $\cos \varphi$  võrdub 1 või 0,7. Esimesel juhtumil, mis esineb puhtakujuliselt elektervalgustuse koormusel, on tegemist ainult pingelangu aktiivkomponendiga. Teine juhtum on iseloomustav osaliselt koormatud asünkroonmootori koormusele, mil pingemuutuse aktiiv- ja reaktiivkomponendi osad omavad peaaegu võrdset tähtsust.

Mõlemad juhtumid on kujutatud eraldi kolme- ja ühefaasise ülekandesüsteemi jaoks. Kui värvilisest metallist juhtmete puhul oleks olnud võimalik läbi ajada ühe kõverate parvega, kus kõik kõverad on pealegi hüperboolid, valides ainult ühe faasi korral teissuguse võimsuseastmiku, siis raudjuhtmete puhul ei saa seda teha, kuna tegev- ja induktiivtakistused ise sõltuvad mitte ainult juhtme ristlõikest, vaid ka voolutugevusest liinis. Sama võimsuse ja pinge puhul on aga ühefaasises süsteemis teissugune voolutugevus kui kolmefaasises süsteemis. Ulatus raudjuhtmetega õhuliinil sõltuvalt võimsusest ei ole täpselt hüperbool, vaid ainult selletaoline kõver.

Vaatleme nüüd, kuidas on lugu võimsuskadoga (soojuseks muundunud elektrivõimsusega) raudtraadist õhuliinis.

Võimsuskao eest on vastutav pingelangu aktiivkomponenti põhjustav tegev- ja induktiivtakistus  $R_v = \varepsilon R$ . Valemi 7 kohaselt on võimsuskadu üldiselt  $V = \varepsilon R J^2$ . Ühe faasi puhul on  $V_1 = 2\varepsilon R J^2$ , kus  $R$  on ühe juhtme oomtakistus  $= l/\lambda q$  ja voolutugevus juhtmes  $J = N_1/U \cos \varphi$ .

Võimsuskadu ühefaasises liinis on seega:

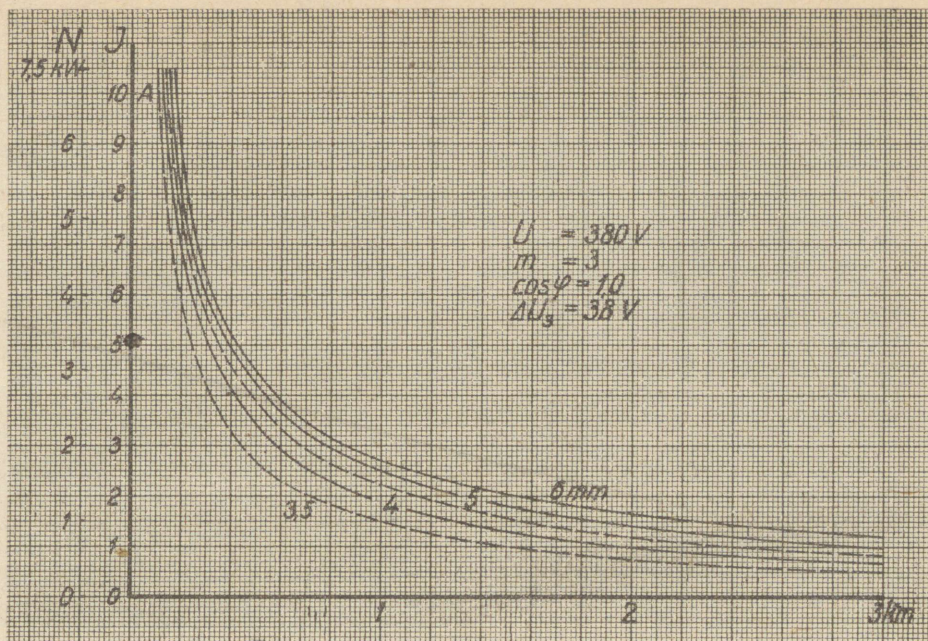
$$V_1 = \frac{2\varepsilon l N_1^2}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} W$$

ja suhteline ehk protsentuaalne võimsuskadu  $p_1$  ühefaasises raudjuhtmetega õhuliinis on:

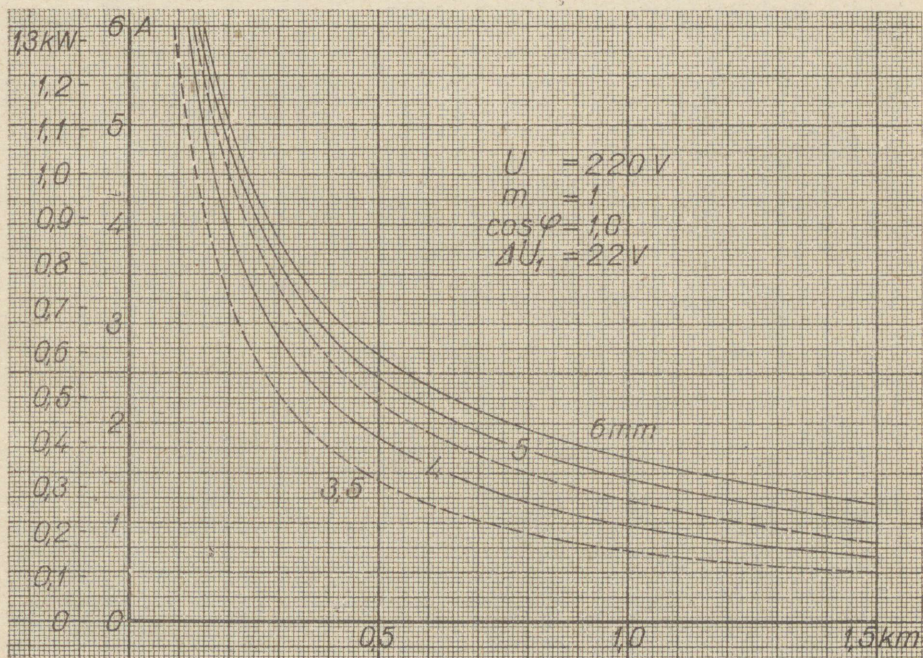
$$p_1 = \frac{V_1}{N_1} 100 = \frac{200 \varepsilon l N_1}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \% \quad (30)$$

Võimsuskadu kolmefaasises liinis on:

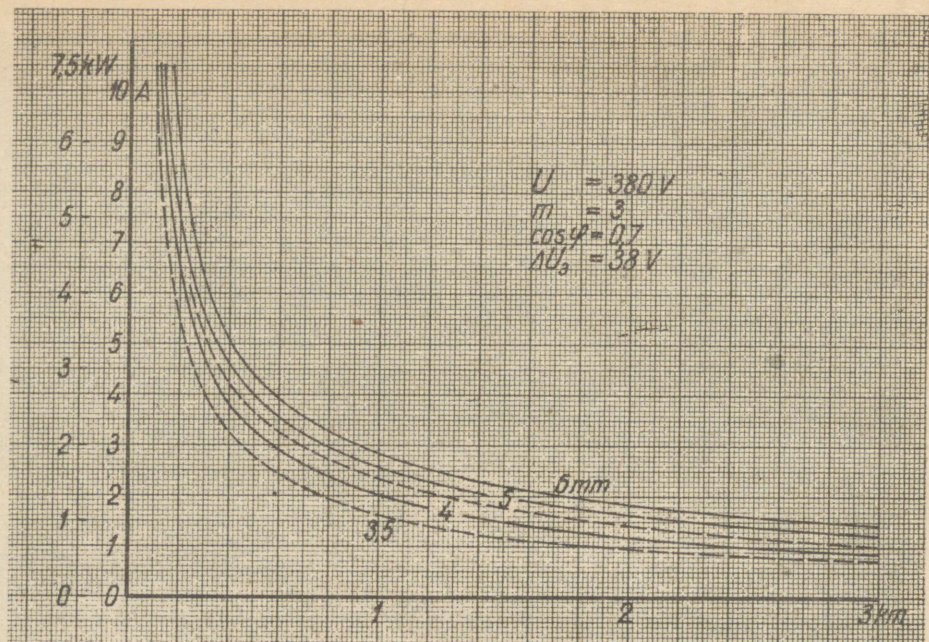
$$V_3 = 3\varepsilon R J^2 = \frac{3\varepsilon l N_3^2}{\lambda q 3U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{\varepsilon l N_3^2}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} W$$



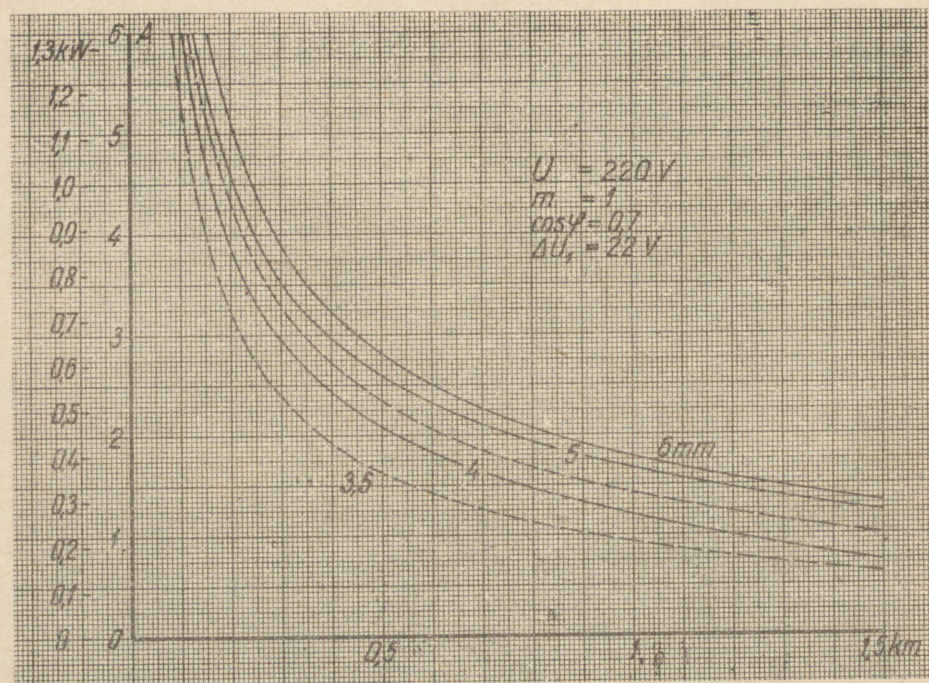
Joon. 28. Ülekande ulatus raudjuhtmetega kolmefaasise keskendatud koormusega liini lõpus (pinge  $U = 380 \text{ V}$ ,  $\cos \varphi = 1$ , pingemuutus 10%).



Joon. 29. Ülekande ulatus raudjuhtmetega ühefaasise keskendatud koormusega liini lõpus (pinge  $U = 220 \text{ V}$ ,  $\cos \varphi = 1$ , pingemuutus 10%).



Joon. 30. Ülekande ulatus raudjuhtmetega kolmefaasise keskendatud koormusega liini lõpus (pinge  $U = 380 \text{ V}$ ,  $\cos \varphi = 0,7$ , pingemuutus  $10\%$ ).



Joon. 31. Ülekande ulatus raudjuhtmetega kolmefaasise keskendatud koormusega liini lõpus (pinge  $U = 220 \text{ V}$ ,  $\cos \varphi = 0,7$ , pingemuutus  $10\%$ ).

ja protsentuaalne võimsuskadu kolmefaasises raudjuhtmetega õhuliinis:

$$p_3 = \frac{V_3}{N_3} 100 = \frac{100 \varepsilon l N_3}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \% \quad (31)$$

Näitame, et protsentuaalset võimsuskadu on lihtne arvutada protsentuaalse pingemuutuse aktiivkomponendi osast. Ennemalt leidsime, et pingemuutuse aktiivkomponendi osa faasi kohta on  $\Delta U_{fa} = \varepsilon R J \cos \varphi$ . Et ühe faasi puhul  $J \cos \varphi = N_1 / U$  ja kolme faasi puhul  $J \cos \varphi = N / \sqrt{3} U$  ning pidades silmas valemeid 26 ja 26a, võime kirjutada:

$$\Delta U_{1a} = 2 \cdot \Delta U_{fa} = 2 \varepsilon R \frac{N_1}{U};$$

$$\Delta U_{3a} = \sqrt{3} \cdot \Delta U_{fa} = \frac{\sqrt{3} \varepsilon R N_3}{\sqrt{3} U} = \frac{\varepsilon R N_3}{U}.$$

Seega on protsentuaalsed pingemuutuse aktiivkomponendid:

$$e_{a1} = \frac{\Delta U_{1a}}{U} 100 = \frac{200 \varepsilon R N_1}{U^2} = \frac{200 \varepsilon l N_1}{\lambda q U^2} \% ; \quad (32)$$

$$e_{a3} = \frac{\Delta U_{3a}}{U} 100 = \frac{100 \varepsilon R N_3}{U^2} = \frac{100 \varepsilon l N_3}{\lambda q U^2} \% . \quad (33)$$

Võrreldes viimaseid valemeid eelmistega näeme, et raudjuhtmete puhul

- 1) protsentuaalne pingemuutuse aktiivkomponent ei sõltu tarbija võimsustegurist ( $\cos \varphi$ ), kui seda väljendada mitte voolu, vaid võimsuse abil;
- 2) protsentuaalset võimsuskadu on võimalik määrata protsentuaalsest pingemuutuse aktiivkomponendist, kui seda jagada  $\cos^2 \varphi$ -ga;
- 3)  $\cos \varphi = 1$  puhul on protsentuaalsed võimsuskadu ja pingemuutuse aktiivkomponendid võrdsed.

Lühis (lühiühendus) värvilisest metallist juhtmetega õhuliinis põhjustab tavaliselt ebasoovitavalt suurt voolutugevust (nn. liigvoolu), mille kahjulikku toimet — trafode, juhtmete ja lülitusseadiste lubamatut temperatuuri tõusu või suurte võimsuste puhul ka mehhaanilist deformatsiooni — välditakse vooluallikale võimalikult lähedale paigutatud kaitsmetega, et need katkestaksid vooluringi.

Liigvoolu kaitsmeteks on vastavad automaatlülitid või lihtsalt sulavkaitsmed. Viimaste „läbipõlemise“ puhul tuleb nende vahetatav osa uuendada, muidugi pärast lühise põhjuse kõrvaldamist, näit. juhtmete peale visatud traadi eemaldamist, isolaatori pealt libisenud traadi õigesse asendisse kinnitamist jne.

Raudjuhtmega õhuliinil on see omapära, et lühise puhul küllalt kaugel vooluallikast või alajaamast võib juhtmete üldtakistus osutuda nii suureks, et lühisvool ei ole suuteline sulatama kaitsmeid või põhjustama automaatlüliti tegevusse astumist. Tagajärjeks on elektrienergia raiskamine, ilma et seda niipea märgataks. Elektrienergia tarbija ei saa lühise puhul, mis võib juhtuda ka pealpool majaühenduse kaitsmeid (näiteks siseinstallatsiooni harukarbis, laualambi juhtmes või lambipesas) küll vajalikku pinget — hõõglambid selle tagajärjel ei „põle“ enam—, kuid ta ei või iga kord aimata rikke põhjust, pealegi kus tema kaitsmed on terved, sest hõõglambid ei valgusta ka siis, kui liin on meelevaldselt välja lülitatud.

Meie ülesanne on leida kaugus alajaamast, kus lühise korral voolutugevus ei küüni normitud suurusega (2-, 4-, 6- või 10-amprilise nimisuurusega) kaitsmete läbisulatamiseni.

Teatavasti normitud sulavkaitsmed ei tohi ühe tunni vältel sulada, kui voolutugevus ei ületa 1,5-kordset nimivoolu, ja nad peavad katkestama vooluringi, kui voolutugevus 1 tunni vältel on vähemalt 2,1-kordne nimivoolu tugevusest. Seega tuleb leida liini pikkus, mille näivtakistus on säärane, et nimipingega alajaamas voolutugevus tõuseb vähemalt 2,1-kordseks sulavkaitsmete nimivoolust.

Joonistelt 18 ja 21 saame raudtraatide tegev- ja sisemised induktiivtakistused teataval voolutugevusel. Juhtme väliseks induktiivtakistuseks  $X_{ov}$  võtame ebasoodsaima suuruse, mis esineb kahe juhtme vahel — 0,4  $\Omega$ /km. Seega leiame näivtakistuse  $Z_0$  liini ühe km pikkuse kohta valemist:

$$Z_0 = 2\sqrt{(\varepsilon R_0)^2 + (X_{os} + X_{ov})^2}. \quad (34)$$

Voolutugevus lühise puhul on üldiselt

$$J = \frac{U}{Z} = \frac{U}{l_x Z_0}. \quad (35)$$

Maksimaalset kaugust alajaamast  $l_x$ , millel kaitsmed sulavad voolutugevusel  $J$ , on seega lihtne arvutada valemist:

$$l_x = \frac{U}{JZ_0}. \quad (36)$$

Maksimaalsed kaugused alajaamast, millistel sulavkaitsmed reageerivad lühise puhul, on raudtraatide keskmiste väärtuste jaoks toodud alljärgnevas tabelis 2.

Tabel 2.

Maksimaalsed kaugused [km] alajaamast, millistel sulavkaitsmed reageerivad lühise puhul.

Nimipinge <i>U</i>	Kaitsmete nimisuurus	Minim. lühisvool	Raudtraadi läbimõõt [mm] $d =$					
			3,5	4	4,5	5	5,5	6
V	A	A	km	km	km	km	km	km
220	2	4,2	2,7	3,3	3,9	4,4	4,6	4,9
	4	8,4	1,1	1,3	1,45	1,6	1,75	1,9
	6	12,6	0,75	0,85	0,95	1,05	1,15	1,25
	10	21	0,45	0,55	0,6	0,7	0,75	0,85
380	2	4,2	4,6	5,6	6,7	7,6	7,9	8,5
	4	8,4	1,9	2,2	2,5	2,75	3,0	3,3
	6	12,6	1,25	1,45	1,6	1,8	1,95	2,2
	10	21	0,75	0,95	1,05	1,2	1,3	1,45

Ex bibl. univ. Tart.

## 7. Raudjuhtmete tugevuse arvutus ja lõtve kõverad.

Mehhaanilise tugevuse nõudeist tingituna ei lubatud meil varem raudjuhtmeid tarvitada väiksema ristlõikega kui 12 mm<sup>2</sup>. Sellele minimaalristlõikele vastav traadi läbimõõt on u. 3,9 mm ja lähim turustatava traadi läbimõõt — 4 mm.

Teisest küljest oli piiratud ka suurim ristlõige traadikujulisil raudjuhtmeil 25 mm<sup>2</sup>-ga, millele vastab traadi läbimõõt 5,65 mm. Tegelikult minnakse raudjuhtmete läbimõõduga harva üle 5 mm, sest ka selle läbimõõdu puhul on raudtraat liigagi jäik, kui ta tõmbetugevus on 50 ... 60 kg/mm<sup>2</sup>, nagu see elektrilisest seisukohast on soovitav, sest „pehmete“ raudtraatide pöörivoolutegur ja tegev- ning induktiivtakistused on liiga kõrged.

Nagu nägime eelmises peatükis (joon. 28 kuni 31), ei ole suurema kui 5-mm-lise läbimõõduga raudjuhtmete tarvitamisel ka majanduslikku mõtet. Näiteks 6-mm-lise läbimõõduga raudtraat kaalub, võrreldes 5-mm-lisega, 46% rohkem, kuid ulatus suureneb suuremate ülekantavate võimsuste puhul, kui  $\cos \varphi = 1$ , keskmiselt ainult 10% ( $\cos \varphi = 0,7$  puhul u. 20 ... 30%).

Suuremate kui 25-mm<sup>2</sup> ristlõigete vajadusel tulevad igal juhtumil kõne alla ainult köisjuhtmed, kuid need pole käesoleva töö vaatlusobjektiks. Meil tuleb praegusel ajal leppida tsinkimata raudtraadiga, mille läbimõõt on tavaliselt kas 4, 4,2, 4,5 või 5 mm.

Ohulini raudtraate on lubatud maksimaalselt pingutada ainult 30%-ni nende tõmbetugevusest ehk katkemispingest. Võrdlusks olgu öeldud, et rauast (terasest) köisjuhtmeid lubatakse pingutada kuni 45%-ni nende tõmbetugevusest, sest juhuslik materjali viga või täke üksikus kius ei ole nii ohtlik.

Et 4- kuni 5-mm-lise läbimõõduga raudtraadid esinevad meil ka tõmbetugevusega 34 ... 40 kg/mm<sup>2</sup>, siis võiks neid maksimaalselt koormata tõmbepingeni 10 .. 12 kg/mm<sup>2</sup>. Võttes arvesse, et kaunis tülikas on hankida iga traadikera kohta tema täpseid tõmbetugevuse andmeid, siis on otstarbekohane võtta lubatud tõmbepinge piiriks 10 kg/mm<sup>2</sup>, mida on ka tehtud alljärgnevate arvutuste puhul.



malt 5 m, kuid I ja II klassi maanteede, tänavate, raudteede ja veeteede kohal vähemalt 6 m.

Seega, mida suurem on mastide vahe  $a$ , seda suurem peab olema masti üldpikkus  $H$  (meetreis), mida saab määrata valemist

$$H = 0,15 + b \cdot n + f + k + m, \quad (37)$$

kus  $n$  tähistab masti isolaatoreile kinnitatud juhtmete vahemaade arvu ja  $m$  — maasse asetatud mastiosa pikkust.

Madalpinge õhuliinidel asetatakse puitmastid kõvasse maasse vähemalt 1,3 m sügavuselt, kui masti üldpikkus on kuni 8 m; iga üle 8 m pikkuse masti meetri kohta tuleb kõvasse maasse sängitatud osa suurendada 0,1 m võrra; pehmesse maasse muidugi rohkem. Valemiga väljendatult on

$$m \geq 1,3 + 0,1(H - 8). \quad (38)$$

Majanduslikel kaalutlustel piirduakse madalpingeliini mastipikkuse valikul 8...10,5 m-ga ja nii saadaksegi tavaliseks mastide vahemaaks 40...50 m, kusjuures suuremad visangud tingivad pikema masti, sest juhtmete lõdve sõltub peamiselt visangu suurusest.

Juhtmete lõtve  $f$  arvutamine on kaunis tülikas toiming. Ehitusnormid nõuavad, et juhtmete maksimaalne tõmbepinge esineks vaid kahel juhtumil, kas  $-5^{\circ}\text{C}$  juures ühes lisakoormusega, mille suurus meie kliimaatiliste olude kohaselt tuleb võtta võrdseks  $200 \cdot \sqrt{d}$  grammi ühele jooksvale meetrile, kusjuures  $d$  on juhtme läbimõõt mm-tes, või  $-35^{\circ}\text{C}$  temperatuuril vastavalt sellele, missugusel olukorral tõmbepinge on suurem.

Juhtmete maksimaalseks lõtveks loetakse suurim lõdvetest temperatuuril  $-5^{\circ}\text{C}$  ühes lisakoormusega või temperatuuril  $+35^{\circ}\text{C}$ .

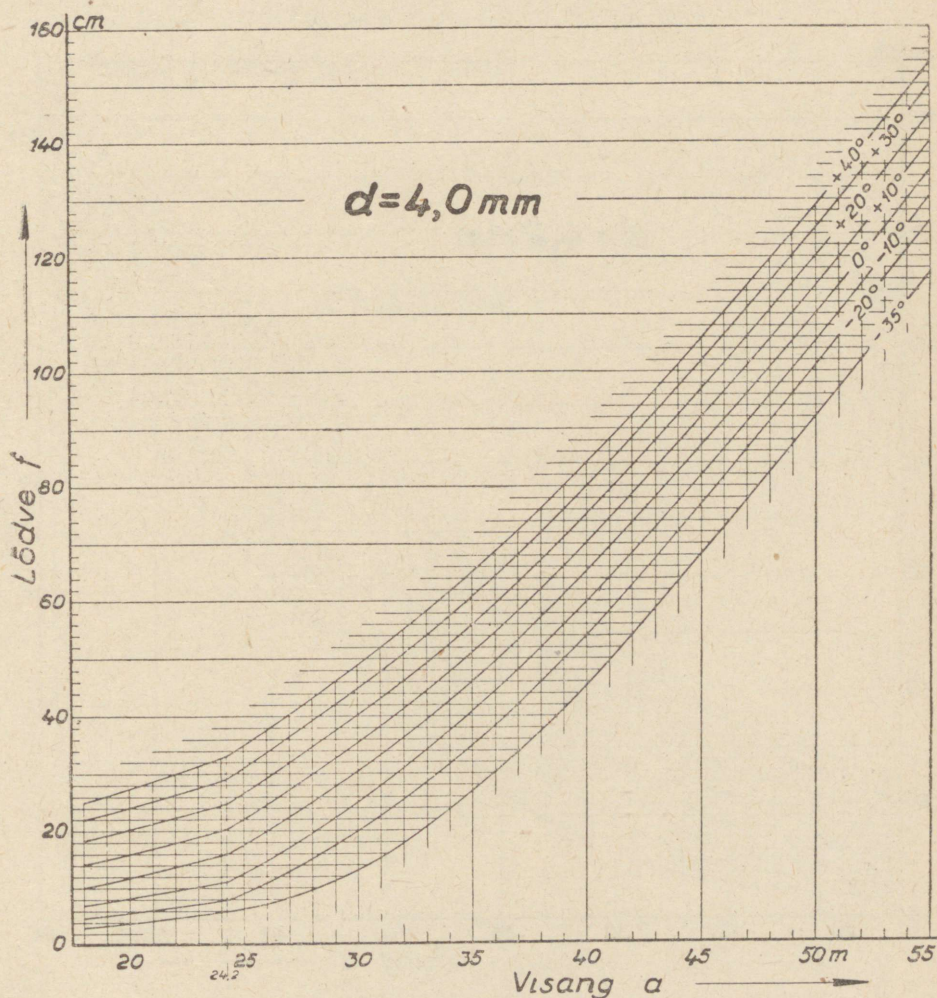
Õhuline tavaliselt ei ehitata pakasega  $-35^{\circ}\text{C}$  ega ka  $-5^{\circ}\text{C}$  juures, kui juhtmed on parajasti kaetud härmatisega. Seepärast tuleb ehitamisel juhtmeid pingutada vähem kui ebasoodsaimal juhtumil ja nende lõdve on siis tavaliselt väiksem kui  $-5^{\circ}\text{C}$  juures ühes lisakoormusega või  $+35^{\circ}\text{C}$  juures. Juhe tõmbub talvel külmaga kokku ja venib temperatuuri tõusuga (suvekuumusel), suurendades lõdvet. Õhuliini ehitamisel tuleb juhtmed paigutada nii, et ainult ebasoodsaimal juhtumil ( $-35^{\circ}\text{C}$  või  $-5^{\circ}\text{C}$  juures ühes lisakoormusega) tõmbepinge raudjuhtmeis küüniks suuruseni  $10 \text{ kg/mm}^2$ .

Teisest küljest, kui ehitamisel valime liiga väikese tõmbepinge, nii et ebasoodsaimal juhtumil see jääks vähemaks kui  $10 \text{ kg/mm}^2$ , siis kujuneb lõdve  $+35^{\circ}\text{C}$  juures liiga suureks ja tuleb asjata püstitada liiga kõrged mastid, sest ka maksimaalse lõtve puhul ei tohi õhuliini juhe läheneda maapinnale rohkem, kui see on normidega lubatud.

Niisiis õhuliini ehitamisel on juhtmete pingutamisel seatud väga kitsad piirid, kui tahetakse rahuldada tehnilisi tingimusi ja täita ka majandus-

likke nõudeid. Kahjuks eksitakse veel väga palju nende tingimuste ja nõuete vastu, eriti montööride poolt, kes pole teadlikud asjade tõelisest seisukorrast. Tihtipeale pingutatakse juhtmed ehitamisel üle, et liin oleks „ilus“. Talvel suure pakasega tõmbub siis õhuliini juhe niivõrd kokku, et ületatakse juhtmematerjali elastsuse piir ja tekib juhtme kestev deformatsioon või juhe koguni katkeb, kui just mõni nurgamast viltu ei kista.

Enne traadi sidumist isolaatoreile võib ju juhtmeid veidi üle pingutada, et traat tõmbuks sirgeks, kuid juhtmeid peaks kinnitama isolaatoreile siiski



Joon. 33. Lõtved raudtraatidele läbimõõduga  $d = 4$  mm ja maksimaalse tõmbepinge 10 kg/mm<sup>2</sup>.

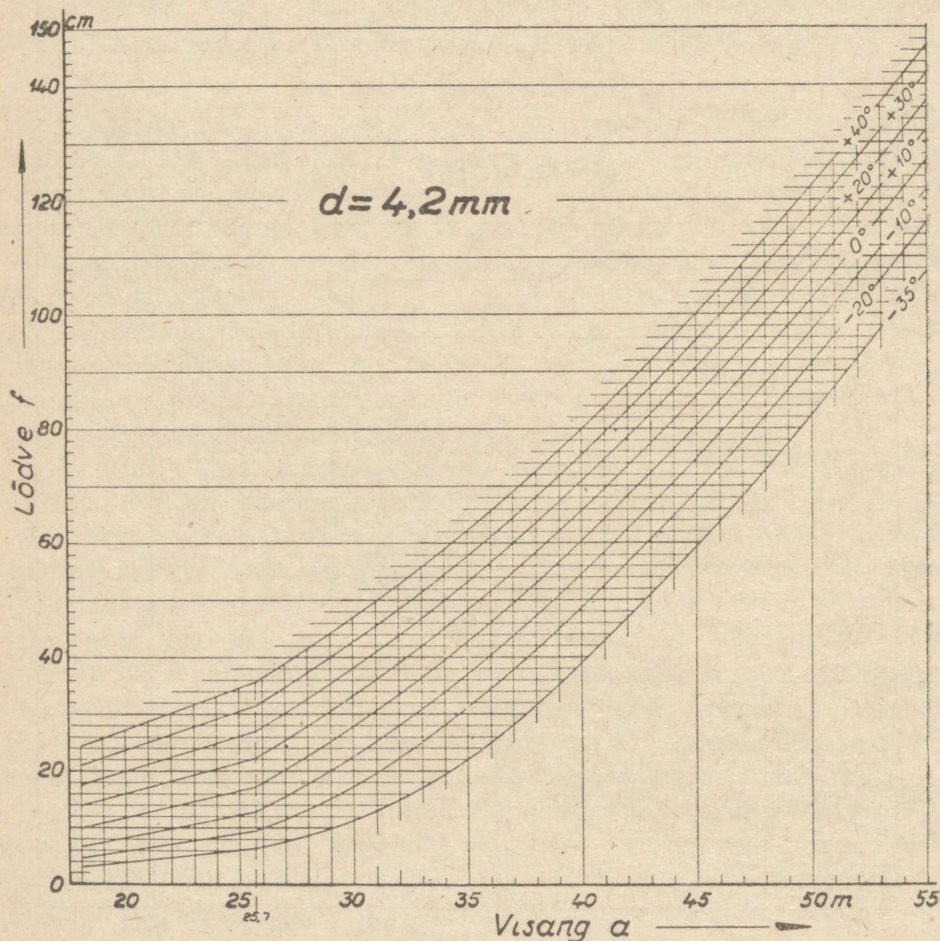
nõutava lõtvega, mis on antud nn. monteerimistabelis, millest on juttu allpool (lk. 60).

Tekib küsimus, kuidas siis määrata lõdve  $f$  mitmesugustel temperatuuridel  $\vartheta$  sõltuvalt visangust ehk mastide vahekaugusest  $a$ . Selleks võib kasutada järgmisi valemeid:

$$f = \frac{ga^2}{8q\sigma} = \frac{ea^2}{8\sigma} \quad (39)$$

või

$$f = \frac{pa^2}{8q\sigma} = \frac{e_p a^2}{8\sigma} \quad (39a)$$



Joon. 34. Lõtved raudtraatidele läbimõõduga  $d = 4,2$  mm ja maksimaalse tõmbepingega  $10 \text{ kg/mm}^2$ .

ja

$$\sigma^3 + \sigma^2 \left[ \frac{e^2 a^2 E}{24 \cdot \sigma_0^2} + (\vartheta - \vartheta_0) \beta E - \sigma_0 \right] = \frac{e_p^2 a^2 E}{24}, \quad (40)$$

kus  $g$  = juhtme pikkusühiku omakaal [kg/m],

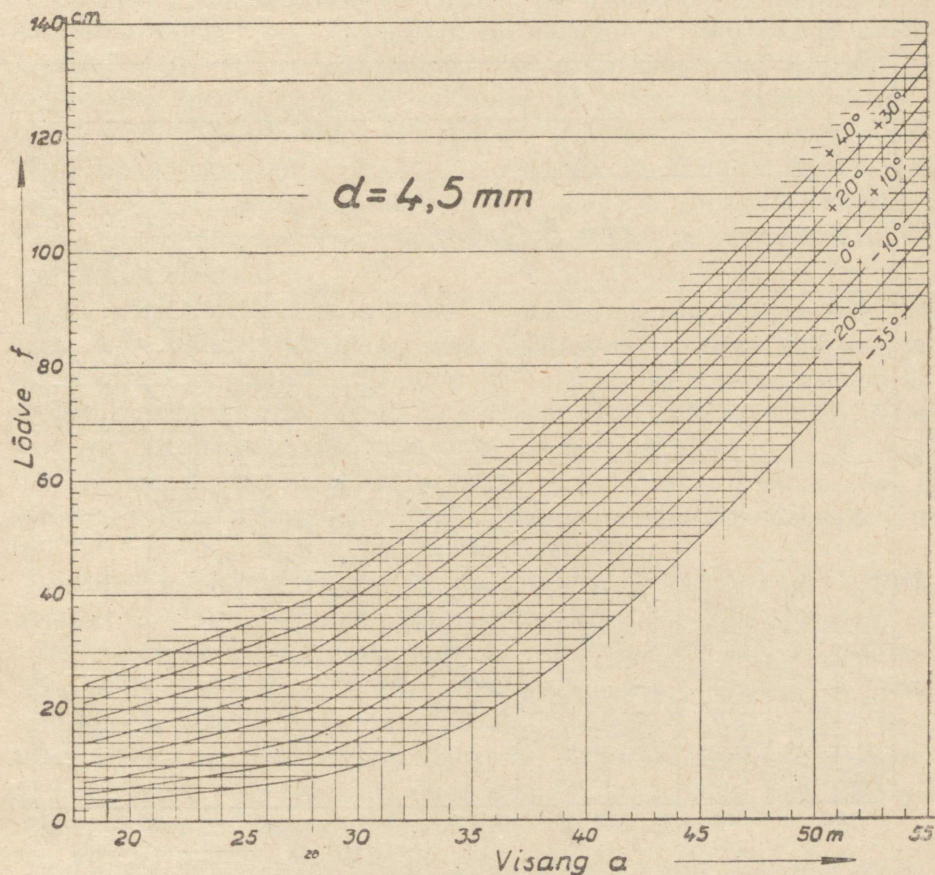
$q$  = juhtme ristlõige [mm<sup>2</sup>],

$\sigma$  = tõmbepinge juhtmes [kg/mm<sup>2</sup>] teataval koormusel ja temperatuuril  $\vartheta$ ,

$\sigma_0$  = tõmbepinge juhtmes teissugusel koormusel ja temperatuuril  $\vartheta_0$ ,

$e = \frac{g}{q}$  = juhtme erikaal [kg/m ja mm<sup>2</sup>] ehk [kg/cm<sup>3</sup>],

$d$  = juhtme (suurim) läbimõõt [mm],



Joon. 35. Lõtved raudtraatidele läbimõõduga  $d = 4,5$  mm ja maks. tõmbepingega 10 kg/mm<sup>2</sup>.

$$p = g + 0,2\sqrt{d} = \text{juhtme üldkoormus [kg/m]},$$

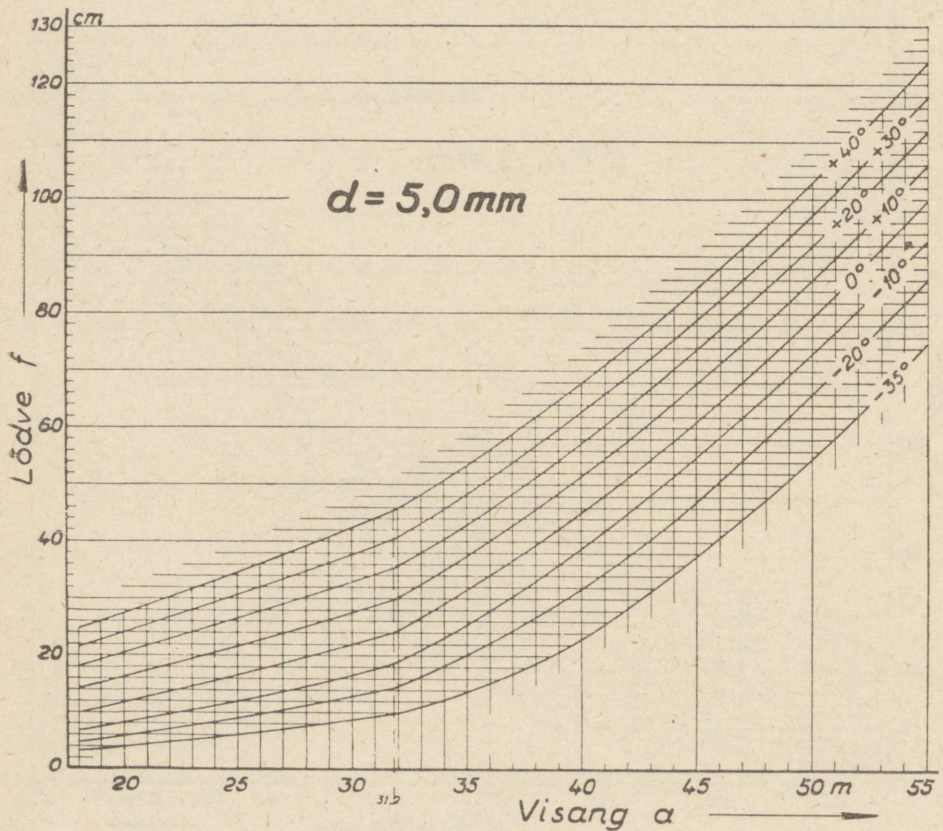
$e_p = \frac{g}{q} + \frac{0,2\sqrt{d}}{q} = \text{juhtme suhteline üldkoormus } -5^{\circ} \text{ C juures lisakoormusega [kg/cm}^3\text{]},$

$\beta = \text{juhtmematerjali joonpaisumise tegur (raual } \beta = 12,3 \cdot 10^{-6}\text{),}$

$E = \text{juhtmematerjali elastsuse moodul (raual } E = 19\,200 \text{ kg/mm}^2\text{).}$

Tõmbepinge  $\sigma_0$  esineb temperatuuril  $\vartheta_0$ , kusjuures juhtme erikaal on  $e$ .

Esialgu on veel lahtine küsimus, missugustes tingimustes esineb maksimaalne tõmbepinge  $\sigma_m$ , kas  $-35^{\circ} \text{ C}$  või  $-5^{\circ} \text{ C}$  juures lisakoormusega. Säärast visangut, millel tõmbepinged mõlemal juhtumeil on võrdsed,



Joon. 36. Lõtved raudtraatidele läbimõõduga  $d = 5 \text{ mm}$  ja maks. tõmbepingega  $10 \text{ kg/mm}^2$ .

nimetatakse kriitiliseks visanguks  $a_{kr}$  ja seda võib arvutada valemist

$$a_{kr} = \sigma_m \sqrt{\frac{720 \cdot \beta}{e_p^2 - e^2}}. \quad (39)$$

Kriitilisest visangust suuremal mastide kaugusel esineb suurim tõmbepinge  $-5^\circ \text{C}$  juures lisakoormusega, kuna vähemal visanguil on maksimaalne tõmbepinge ikka  $-35^\circ \text{C}$  temperatuuril. Niisiis mastide vahekaugusel  $a > a_{kr}$  on maksimaalne tõmbepinge (raudjuhtmeil näiteks  $10 \text{ kg/mm}^2$ ) temperatuuril  $-5^\circ \text{C}$ , kusjuures lõtve arvutamiseks tuleb kasutada valemit 39a, milles peale juhtme omakaalu esineb ka lisakoormus.

Et samal visangul  $a$  leida tõmbepinge  $\sigma$  teissugusel temperatuuril  $\vartheta$ , kasutame valemit 40. Tõmbepinge  $\sigma_0$  on nüüd tuntud suurus, praegusel juhtumil  $= 10 \text{ kg/mm}^2$ , samuti on tuntud ka kõik teised suurused peale  $\sigma$ . Asetades tuntud suurused valemisse 40 saame kolmanda astme võrrandi, mida võib lahendada katsetamise teel, kusjuures suureks abiks on kuubiline arvutuslükati või arvude ruutude ja kuupide tabelid. Leitud tõmbepinge võimaldab arvutada lõdvet uuel temperatuuril valemiga 39. Nii tuleb talitada iga teise temperatuuri puhul ja korrata arvutusi ka teissuguseil visanguil.

Et suure arvu kolmanda astme võrrandite lahendamine on siiski kaunis aeganõudev toiming, kusjuures pole välditav ka eksimise võimalus, mida on raske avastada, siis on joonistel 33...36 esmakordselt avaldatud lõtved  $f$  raudtraatidele läbimõõduga 4, 4,2, 4,5 ja 5 mm sõltuvalt visangust  $a = 18...55 \text{ m}$  temperatuuridel  $-35, -20, -10, 0, +10, +20, +30$  ja  $+40^\circ \text{C}$ , mis peaks rahuldama praktilisi nõudeid. Lõtveid vahepealseil temperatuuridel on hõlpus leida toodud kõverate parvedest interpoleerimise teel.

Tegeliku ehitustöö jaoks on otstarbekohane koostada nn. monteerimistabelid, mis sisaldavad lõtve suurusi õhuliinis tegelikult esinevale visanguile või sõltuvalt mastide vahekaugusest näiteks 5 m tagant temperatuuridel  $-10...+20^\circ \text{C}$  ( $5^\circ \text{C}$  astendusega), nagu see on näidatud alljärgnevas tabelis 3 raudtraadile läbimõõduga 4 mm. Lõtve andmed selles tabelis on ümmardatud ülespoole ja toodud terveis sentimeetreis. Suurem täpsus pole tegelikul monteerimisel ka vajalik, sest isegi sellise täpsusega lõdvet määramine õhuliinil teeb raskusi.

Juhtme pingutamine toimub tali abil pärast seda, kui juhe on asetatud isolaatori konksudele. Kui ühest toetuspunktist allapoole asetada lõtve pikkusele vastav märk ja teiselt mastilt viseerida traadi toetuspunktist

Tabel 3.

Monteerimise andmed (lõtved sentimeetreis) raudtraadile läbimõõduga  $d=4$  mm, maksimaalse pingepuhul  $10 \text{ kg/mm}^2$ .

Õhutemperatuur °C	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20
20	8	10	12	14	16	18	20
25	12	15	18	20	22	24	26
30	25	28	30	33	36	38	40
35	41	44	46	49	51	54	56
40	60	63	65	68	70	73	75
45	82	85	87	90	92	95	97
50	105	108	110	113	115	118	120

niisama kaugel allpool asetseva punkti kohalt esimese märgi suunas, siis tuleb traadi tõmmet reguleerida seni, kuni juhtme madalaim punkt asetseb kahe märgiga ühel sirgjoonel (joon. 32).

Tavaliselt teostatakse lõtve kontrolli mitme masti vahemaa tagant. Võrdse visangu puhul on teatava lõtvega määratud traadi tõmbepinge. Kui kord on leitud sobiv lõdve kahe masti vahel, on võrdse tõmbepinge ja võrdse visangu puhul ka lõdve igal pool sama. Hoides pinget ühtlasena tuleb monteerimisel traat lihtsalt tõsta isolaatori soone peale ja siduda see isolaatori külge, alates mastist, mis asetseb talile kõige lähemal.

Vahelduva visangu puhul on nii lõdve kui ka tõmbepinge isesugused ja juhtme sidumist tuleb teostada peale igakordset lõtve kontrollimist monteerimistabeli kohaselt.

Juhtumel, kus tehnilised tingimused nõuavad 25% võrra vähendatud maks. pinget, tuleb lõdve teha muidugi suurem, kui see on näidatud joonistel 33 — 36 või monteerimistabelis; sest nagu näha valemist 39 või 39a, on lõdve  $f$  pöördsuhteline tõmbepingega  $\sigma$ . Kuid uusi lõtveid ei saa otseselt arvutada jooniste 33 — 36 andmeist, sest uue maksimaalse tõmbepingega (käsoleval juhtumil  $7,5 \text{ kg/mm}^2$ ) muutub nurksulgudes olev koefitsient teise astme liikme taga. Seepärast tuleb arvutada uus lõdve soovitavale visangule valemite 39—40 kohaselt.

## 8. Kokkuvõte.

Nagu nägime eelnevaist arutlustest, kõveraist ja tabelleist, on raudtraatide kasutamise võimalused madalpinge õhuliinides siiski asetatud kitsasse raamidesse. Eriti käib see raudtraatide kohta väiksema läbimõduga kui 4 mm ja suuremaga kui 5 mm.

Soojenemine piirab raudtraatide tarvitamist kõige vähem. Soojenemise seisukohast võiks raudtraate koormata mitmekümne ampriga, ilma et nende temperatuur muutuks hädaohtlikuks (joon. 9).

Lühisvoolu suurus ja lubatav pingemuutus liinis piiravad raudtraatide tarvitamist juba märksa rohkem. Madalpingega (220 või 380 V) saaks kilovatilist võimsust üle kanda sõltuvalt traadi läbimõödust ja tarvitatavast pingest 0,2...2 km peale (joon. 28 — 31), kui lubatav pingemuutus on 10% ja on tegemist keskendatud koormusega; jaotatud koormusega ning lubades suuremat pingemuutust võiks ulatust veelgi suurendada, kuid kindla piiri selleks seab minimaalne lühisvool (tabel 3).

Mehhaanilise tugevuse nõuded piiravad väikeste (alla 3,9 mm) või suurte läbimõõtudega raudtraatide kasutamist. Seega jäävad järele ainult keskmiste läbimõõtudega traadid — 4- kuni 5-mm-lise, äärmisel juhtumil 5,5-mm-lise läbimõöduga.

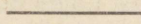
Kerkib küsimus, kas pole siiski võimalik suurendada raudjuhtmetega õhuliini varustamise ulatust.

See küsimus on eriti tähtis üksikult asetsevatele taludele või talude rühmale, mis on trafo-alajaamast kaugel. Kui säärane tarbija, mis vajaks näiteks 1 kW võimsust, asub trafo-alajaamast 5 km kaugusel, siis madalpingelise ühefaasise liiniga ei saa teda kuidagi varustada. 220 V puhul oleks voolutugevus liinis u. 4,5 A ja pingelang 4 mm läbimõöduga raudtraatide puhul juba 0,5 km kaugusel u. 70 volti ehk u. 32%! Viie km pikkusel liinil oleks raudjuhtmete takistus nii suur, et ka lühise puhul vool ei tõuseks 4,5 amprini, teiste sõnadega, terve võimsus kuluks energiakadudeks liinis.

Ainus tõhus abinõu raudjuhtmetega õhuliini ulatuse suurendamisel on liini pinge tõstmine. Valides liini nimipingeks 1000 V, milleks oleks muidugi vaja muretseda kaks ühefaasist trafot vastava võimsuse ja ülekande-

suhtega, võiks kasutada tavalisi madalpinge isolaatoreid, sest need on ehitatud pingele kuni 1000 V. Voolutugevus liinis oleks nüüd ainult 1 A ja pingelang (joon. 26 kohaselt) 4-mm-lise raudjuhtmega 0,5 km kaugusel 12 volti või 5 km kaugusel 120 V, seega 12%. 5-mm-lise läbimõõduga raudtraadi puhul on pingelang ainult 75 V ehk 7,5%, mis on täiesti vastuvõetav.

Eelöeldut kokku võttes: me võime teha hädast vooruse ja saavutada hea tehnilise lahenduse, kui põhjalikult õpime tundma raudjuhtmete omadusi. Käesoleva töö ülesanne oli süvendada teadmisi raudjuhtmetega õhuliinidest ja kõverate ning nomogrammi abil hõlbustada raudtraatidest õhuliini elektrilist ja mehhaanilist arvutust vastavalt meie kliimatilistele oludele.



## Sisukord.

	Lk.
1. Üldised kaalutlused . . . . .	3
2. Raudtraadi takistus . . . . .	7
3. Raudjuhtme soojenemine kestval koormusel . . . . .	15
4. Raudjuhtmete tegev- ja induktiivtakistuse määramine vahelduvvooluga . . . . .	22
5. Pingemuutuse määramine liini lõpus . . . . .	39
6. Raudjuhtmetega õhuliini lubatav ulatus pingel 220 ja 380 V . . . . .	44
7. Raudjuhtmete tugevuse arvutus ja lõtve kõverad . . . . .	52
8. Kokkuvõte . . . . .	61

1. trükk.

*Vastutav toimetaja*

*D. Palgi.*

*Tehniline toimetaja*

*H. Kohu.*

Ladumisele antud 4. XI 1946.  
Trükkimisele antud 16. I 1947.  
Paberi kaust 67 × 95. 1/16. Trüki-  
poognaid 4+lisa 2/3. Autoripoog-  
naid 2,72. Arvestuspoogn. 4,2.  
MB 01588. Laotih. trpg. 47000.  
Tiraaz 2200. Trükikoja tellimus  
nr. 1624.

Trükikoda „Hans Heidemann“,  
Tartu, Vallikraavi 4.

*Hind 8 rbl.*

Х. Р. Вырк, Воздушные про-  
вода из железа.

На эстонском языке.

Эгосиздат „Научная Литера-  
тура“, Тарту.



**Rbl. 8.—**