

H. VÕRK

ÕHULIINID  
TERAS-  
JUHTMEIST



Arni-ens.

Prof. H. R. VÕRK

# ÕHULIINID TERASJUHTMEIST

*Teine, ümbertöötatud trükk*

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS  
TALLINN 1961

## Retsenseeritud

tehn. tead. kand. G. Pöbul

Teos käsitleb peale üldiste kaalutluste terasest traat- ja köisjuhtmete takistust alalis- ja vahelduv-voolule, soojenemist kestval koormusel, induktiivtakistust, terasjuhtmetega õhuliini pingemuutuse ja lubatava ulatuse määramist nomogrammide abil, juhtmete ja kogumislattide tugevuse arvutust ning juhtmete rippe määramist kõverate abil.

Teos on ette nähtud õhuline projekteerivatele ja ehitavatele tehnikutele ning inseneridele ning on kasutatav õppevahendina tehnikumides ja kõrgemates õppeasutustes.

2

Tartu Riikliku Ülikooli  
Raamatukogu

51877

## 1. ÜLDISED KAALUTLUSED

Õhuliiniks (kitsamas mõttes) nimetatakse väljas asetsevaid elektrienergia ülekandmiseks või jaotamiseks määratud juhtmeid, mis on isolaatorite abil kinnitatud mastidele või muudele tugikonstruktsioonidele, näiteks silla või ehitise kronsteinidele. Kui tugipunktide vahe on väiksem kui 25 meetrit, nimetatakse õhuliini tavaliselt välisjuhtmestikuks. Isolaatoritele kinnitatud paljasjuhtmeid kasutatakse ka lülitusseadmetes (kogumislattid) ja tõste- või transpordiseadmete toiteks (trollijuhtmed). Kogumislattid ja hoonetes asetsevad trollijuhtmed, kuigi nad ei asetse väljas, kuuluvad õhuliinide hulka (laiemas mõttes). Nad on tavaliselt jäigad ja nende kinnituspunktide vahemaa on ainult mõni meeter.

Õhuliinides kasutati käesoleva sajandi esimestel aastakümnetel peamiselt vaskjuhtmeid. Vasel on kahtlemata head elektrilised ja mehaanilised omadused ning tema kasutamine oli ka majanduslikult õigustatud. Kuid elektriseadmete täiustumise ning kõrgepinge- ja madalpinge-elektrivõrkude arengu tõttu suurenes vase kasutamine õhuliinides ja ka teistes rahvamajandusharudes niivõrd, et tuli hakata mõtlema vase asendamisele mõne teise metalliga.

Esimese maailmasõja ajal asendati vask õhuliinides peamiselt rauaga ja pärast sõda ka alumiiniumiga.

Värviliste metallide nappuse tõttu kasutati õhuliinides esialgu tsinkimata terasjuhtmeid. Olgu tähendatud, et õhuliinides kasutavad tsinkimata terasjuhtmed ei roosteta just väga kiiresti. Nähtavasti on terasjuhtmed õhuliinides suhteliselt soodsas olukorras, sest elektrivoolu läbimisel on juhtmete temperatuur veidi kõrgem ümbritseva õhu temperatuurist ja juhtmed on seetõttu kuivad või kuivavad ruttu pärast märjakssaamist. Nüüd siiski kasutatakse õhuliinides peaaegu eranditult tsingitud ja kogumislattides värvitud terasjuhtmeid.

Esialgu kasutati Nõukogude Liidus terasjuhtmeid peamiselt ainult põllumajanduse elektrifitseerimisel. Terasjuhtmete kasutamine õhuliinides on otstarbekohane, kui on tegemist suhteliselt väikeste võimsustega.

Mehaanilise tugevuse seisukohast ei lubata õhujuhimeks kasutada traati ristlõikega alla teatud piiri. Näiteks vaskjuhtmete puhul on minimaalseks ristlõikeks madalpingevõrkudes 6 mm<sup>2</sup> ja kõrgepingevõrkudes 10 mm<sup>2</sup>. Alumiiniumist juhtmete puhul, mida lubatakse kasutada ainult köisjuhtmetena, on vastavad minimaalsed ristlõiked 16 mm<sup>2</sup> ja 25 mm<sup>2</sup>. Kõrgepinge-õhuliinide juhtmed asustatud kohtades peavad olema veelgi suurema ristlõikega. Kui ülekantav võimsus on väike ja tarbija asub alajaama või toitepunkti läheduses, siis võiks pingemuutuse seisukohast leppida vask- ja alumiiniumjuhtmete palju väiksema ristlõikega. Vahel on isegi soovitatav, et alajaama läheduses asuvate tarbijate ühendusjuhtmeis oleks teatav pingelang, sest vastasel korral saaksid tarbijad liiga kõrge pinge. Nimetatud põhjusel, samuti lähtudes soovist säästa defitsiitseid värvilisi metalle, on meil terasjuhtmed levinud mitte ainult madalpinge-, vaid ka kõrgepinge-õhuliinides. Ka võimaldavad terasjuhtmed suurendada visanguid ning seega vähendada liini ehitamiseks vajalikku puidu mahtu ja liini maksumust.

Nõukogude Liidus on hakatud terasjuhtmeid üha rohkem kasutama mitte ainult õhuliinides elektrienergia ülekandmiseks ja jaotamiseks, vaid ka kogumislattides. Hoonetesisestest tõste- ja transportiseadmetes on terasjuhtmete kasutamine elektrienergia ülekandmiseks liikuvale osale muutunud reeglilik. Ainult linnasissetel ja linnadevahelistel raudteedel kasutatakse veel vaskjuhtmeid, sest siin on tegemist suurte võimsustega ja pikkade liinidega; kuid ka trammi- ja trollibussiliinidel on juba hakatud kasutama terasalumiiniumist juhtmeid.

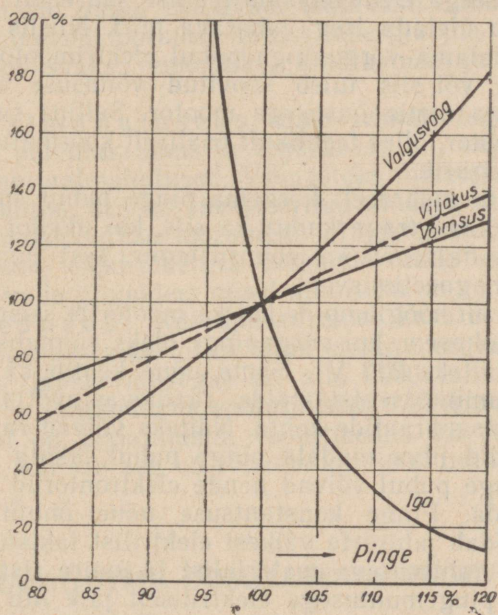
Terase kasutamisel elektriseadmetes, samuti ka seadmete kavandamisel ja ehitamisel tuleb silmas pidada mitmeid tehnilisi tingimusi. Elektriseade peab eeskätt omama teatavat töökindlust, s. o. rahuldama mehaanilise tugevuse nõudeid, sest pingestatud, kuid isolaatori küljest maha libisenud või katkenud juhe on elukardetav nii loomadele kui ka inimestele. Lülitusseadmetes peavad kogumislattid taluma lühisvoolusid, mis põhjustavad mitte ainult juhtmete liigset soojenemist, vaid ka mehaanilisi vigastusi. Trollijuhtmetes ei tohi tekkida liigset deformatsiooni, mis võib põhjustada halba kontakti toitejuhtme ja liikuva seadme vahel.

Teiseks tuleb juhtme ristlõige valida selline, et teatud koormuse juures pingemuutus ja võimsuskadu õhuliinis (selle üldisemas mõttes) ei ületaks lubatavat piiri.

Tuleb ka kontrollida, et juhtmed elektrivoolu toimel liigselt ei soojeneks. Pikkadel liinidel tingib lubatav pingemuutus tavaliselt juhtme nii suure ristlõike, et juhtmete liigne soojenemine ei tule kõne allagi. Kuid lühikestel liinidel võib liigne soojenemine siiski esineda.

Lubatava pingemuutuse suurus on määratud voolutarbijate, eeskätt hõõglampide ja mootorite vajadusega. Hõõglampide valgus-

voog sõltub näiteks väga suurel määral pingest. Nagu nähtub jooniselt 1, langeb pinge vähenemisel 10% võrra (võrreldes nimi-pingega), hõõglambi valgusvoog märksa rohkem, nimelt üle 30%.



Joon 1. Hõõglambi valgusvoog, valgusviljakus (kasutegur), lambi poolt tarbitav võimsus ja lambi iga sõltuvalt pingest. Joonisel on näidatud suhtelised suurused, võrreldes nimisuurustega, mis on tähistatud 100 protsendiga.

Võiks arvata, et kui valida liini alguses (jõujaamas või trafoalajaamas) pinge vastavalt pingemuutusele kõrgem, olekski liini lõpus asuvale tarbijale antud sobiv pinge. Kuid tavaliselt on tarbijad mitte ainult liini lõpus, vaid ka alguses ja keskel. Pealegi tekib suurim pingelang liini lõpus ainult kogu liini maksimaalse koormuse korral. Kui tarbija asub liini alguses või väga väikese koormuse ajal ka liini lõpus, saab ta normaalsest kõrgema pinge. Seejuures suureneb näiteks hõõglambi valgusvoog 10-protsendilise pingetõusu puhul küll umbes 40% võrra, kuid ühtlasi väheneb hõõglambi iga umbes kolm korda. Seepärast piiratakse minimaalsel koormusel madalpingeliinis pingetõus 7,5 protsendiga.

Elektrimootorid vajavad samuti võimalikult püsivat (konstantset) pinget. Koormatud elektrimootor vajab teatava võimsuse arendamiseks suurema pingelangu korral, s. o. madalama võrgupinge puhul, tugevamat voolu kui nimipinge puhul. Tugevam vool tingib suuremat vaseskadu (suuremat energiakadu mähise vases) ja seega elektrimasina mähise suuremat temperatuuri tõusu, mis võib ületada isegi lubatava piiri. Niisiis ei või nimiväärtusest madalama võrgupinge puhul elektrimootorit koormata nimivõimsuseni, või siis tuleb soovitud võimsuse arendamiseks hankida suurema nimivõimsusega mootor. Selline suurema nimivõimsusega mootor, olles tegelikult osaliselt koormatud, omab madalat võimsustegurit.

Nimipingest ülemääraselt kõrgema pinge puhul suureneb energiakadu aktiivrauas (rauaskadu) ka siis, kui mootor polegi koormatud. Ühtlasi halveneb ka võimsustegur, sest pinge tõusmisel tugevneb ka magnetimisvool.

On ilmne, et nii hõõglampide kui ka mootorite seisukohast oleks kõige otstarbekohasem, kui võrgupinge oleks võimalikult lähedane nimipingele (näiteks 220 V). Sama nõue kehtib ka teiste tarbijate, näiteks luminescentslampide, raadiovastuvõtjate, televiisorite ja soojendusaparatuuride kohta. Näiteks võivad raadio- ja televisiooniaparatuurid liiga madala pinge puhul lakata töötamast ja liiga kõrge pinge puhul võivad nende elektrontorud kiiresti kõlbmatuks muutuda. Pinge konstantsuse nõue õhuliini koormuse muutumisel eeldab juhtmete väikest elektrilist takistust, teiste sõnadega — hea juhtivusega materjalist ja suure ristlõikega juhtmeid. Väikese pingemuutusega elektriliselt jäik liin tingib seega suurt ehituskulu. On selge, et juhtme materjali ja ristlõike valik pole mitte ainult tehniline, vaid ka majanduslik probleem.

Pinge muutumisega (vähenemisega) kaasub võimsuse kadu. Kui ehitada väikese pingemuutusega ja väikese võimsuskaoga elektriliini, säästame küll elektrienergiat, kuid kapitaalmahutus peab olema suurem. Inseneri ülesanne on leida lahendus, milles kõikide kulude summa teatavas ajavahemikus (näiteks aastas) oleks minimaalne. Olgu tähendatud, et NSV Liidu Ministrite Nõukogu Riikliku Teaduslik-tehnilise Komitee otsusega, mis kehtestati 11. maist 1959, tuleb tehnilise lahenduse majanduslikult optimaalse variandi määramisel lähtuda mitte ainult toodangu omahinnast, vaid arvestada ka kapitaalmahutuste suurust. Seega tuleb kasutada nn. tasuvuse kestuse meetodit.

Mitme variandist loetakse kõige tasuvamaks selline variant, mille

$$O + \frac{K}{T_n} = \text{miinimum,}$$

kus  $O$  — aastase produktsiooni omahind,

$K$  — kapitaalmahutus,

$T_n$  — normatiivne tasuvuskestus.

Energeetiliste seadmete jaoks on määratud, et  $T_n = 8$  aastat. Normatiivse tasuvuskestuse pöördväärtust nimetatakse normatiivseks efektiivsusteguriks  $\rho_n = 12,5\%$ . Seega võib kõige tasuvama variandi leidmiseks lähtuda ka valemist

$$O + \rho_n K = \text{miinimum.}$$

Omahinna hulka kuuluvad teatavasti amortisatsioonisummad, väljaminekud tooraine, kütuse, energia jne. peale, töötasud, kulutused jooksvaks remondiks, kindlustuse ja muud kaudsed kulud.

Kapitaalmahutuseks tuleb eeskätt lugeda projekteeritava objekti põhimaksumus ja tegevuskapital, vajaduse korral ka piirnevad kapitaalmahutused. Viimasteks nimetatakse niisuguseid kapitaalmahutusi, mis on investeeritud aladele, mille toodang kasutatakse tehnoloogilise toorainena projekteeritud objektis.

Minimaalsete elektrienergia ülekandekulude saamiseks lähtuti varem õhuliinide projekteerimisel ainult nn. majanduslikust voolutihedusest. Kui tippkoormuse kasutusaeq aastast (mis saadakse kogu aasta kestel tarbitud elektrienergia jagamisel maksimaal- ehk tippkoormusega) on alla 3000 tunni, siis terasjuhtmete puhul on majanduslik voolutihedus  $0,45 \text{ A/mm}^2$ , 3000...5000 tunni korral on majanduslik voolutihedus  $0,4 \text{ A/mm}^2$ , ja ainult  $0,35 \text{ A/mm}^2$ , kui see aeg on rohkem kui 5000 tundi.

## 2. TERASJUHTME OOMILINE JA TEGEVTAKISTUS

Alalisvoolu puhul, kui elektrivool  $I$  jaguneb ühtlaselt juhtme kogu ristlõikele, sõltub elektriline takistus  $R$  oomides ( $\Omega$ ) pikkusest  $l$  meetrites (m), ristlõikest  $q$  ruutmillimeetrites ( $\text{mm}^2$ ) ja erijuhtivusest  $\lambda$  ( $\text{m}/\Omega\text{mm}^2$ ) või selle pöördväärtusest — eritakistusest  $q$  ( $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ ) — järgmise valemi kohaselt: \*

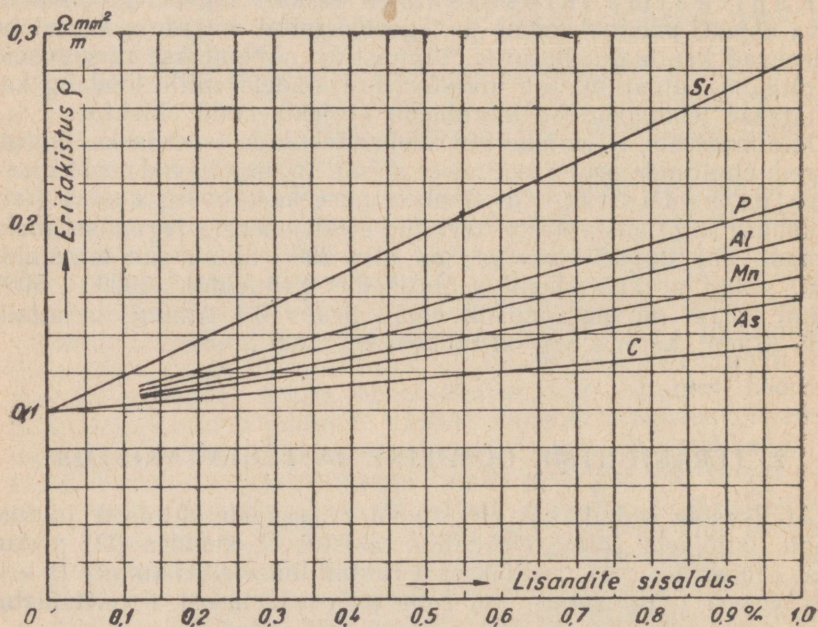
$$R = \frac{l}{\lambda q} = \frac{\rho l}{q}. \quad (1)$$

Terastraadi erijuhtivus (või eritakistus) muutub sõltuvalt terase koostisest suhteliselt suurtes piirides. Puhtal raual on temperatuuril  $20^\circ \text{C}$  erijuhtivus  $10 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ , karastataval terastraadil vähem kui  $5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$ . Teraase erijuhtivust mõjutavad mitmesugused lisandid, kuid ka mehaaniline ja termiline töötlemine. Katsetega on kindlaks tehtud, et jämedateralise terase eritakistus on väiksem kui peeneteralise oma. Seega terase valtsimine, traadiks tõmbamine ja karastamine suurendab tema eritakistust. Joonisel 2 on

\* Trükitehnilistel põhjustel on kreekakeelsed valemitähised trükitud püstkirjas (kursiivkirja asemel).

näidatud eritakistuse muutumine räni (*Si*), fosfori (*P*), alumiiniumi (*Al*), mangaani (*Mn*), arseeni (*As*) ja süsiniku (*C*) toimel.

Jooniselt nähtub, et terases mõjutab eritakistust kõige rohkem räni. Üheprotsendiline ränisisaldus peaaegu kolmekordistab puhta raua eritakistust. Fosfor, alumiinium ja mangaan mõjutavad terase eritakistust vähem. Süsiniku mõju eritakistusele on minimaalne, kuid ta suurendab terases teatavasti hüstereesikadu vahelduvvoolu puhul. Seepärast peab juhtmeteks kasutatavas terases olema kõiki lisandeid võimalikult vähe.



Joon. 2. Terase eritakistus sõltuvalt lisanditest.

Tallinna Polütehnilise Instituudi elektrotehnika-laboratooriumis toimetatud mõõtmised, mida on üksikasjaliselt kirjeldatud teose esimeses väljaandes, näitasid, et pehmete terastraatide erijuhtivus temperatuuril 20° C oli keskmiselt 7,5 m/Ωmm<sup>2</sup> ja kõvade traatide oma keskmiselt 6,25 m/Ωmm<sup>2</sup>. Standardi kohaselt valmistatud terastraatidel läbimõõduga 3...5 mm ja vase lisandiga teras-kõisjuhtmetel peab erijuhtivus olema vähemalt 6,85 m/Ωmm<sup>2</sup> ning tavalisest terasest kõisjuhtmetel vähemalt 7,25 m/Ωmm<sup>2</sup> (kusjuures temperatuur on 20° C).

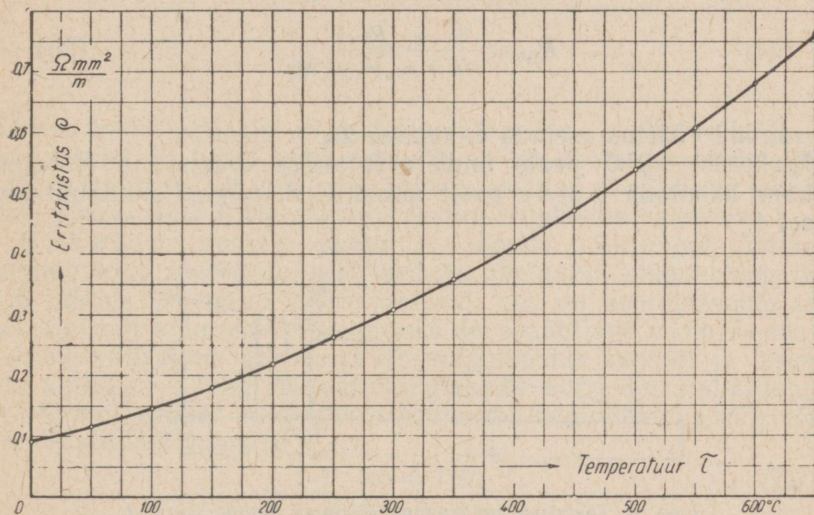
Metallist juhtidel suureneb eritakistus (väheneb elektrijuhti-

vus) temperatuuri tõusuga. Seepärast tuleb koos takistuse (ja ka eritakistuse või erijuhtivuse) andmetega esitada ka temperatuuri andmed.

Takistus temperatuuril  $\tau_2$  arvutatakse tavaliselt valemist

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(\tau_2 - \tau_1)], \quad (2)$$

kus  $\alpha_1$  on juhtme temperatuuritegur vastavalt temperatuurile  $\tau_1$ .



Joon. 3. Puhta raua eritakistus sõltuvalt temperatuurist.

Nii puhta raua kui ka terase jaoks õieti ei tohiks kasutada viimast valemit, sest puhta raua ja terase takistus ei sõltu temperatuurist lineaarselt (joon. 3), nagu see toimub värviliste metallide puhul. Temperatuuri suurtes piirides (mõnesaja kraadi ulatuses) on parem kasutada valemit

$$R_2 = R_1[1 + \alpha_1(\tau_2 - \tau_1) + \beta_1(\tau_2 - \tau_1)^2], \quad (3)$$

kus  $\beta_1$  on teise astme temperatuuritegur, mida võib määrata analüütiliselt, kui kõvera kuju on teada.

Temperatuuri mõõdukates piirides, näiteks ulatuses  $+20 \dots +70^\circ \text{C}$ , võib terasjuhtme takistust lihtsuse mõttes arvutada

küllaldase täpsusega valemi 2 järgi. Standardi kohaselt valmistatud terastraadi temperatuuritegur  $\alpha_{20}=0,00455$ . Et eespool toodud andmed erijuhtivuse ja eritakistuse jaoks kehtivad temperatuuril  $\tau_1=20^\circ\text{C}$ , siis võib valemi 2 kirjutada ka järgmisel kujul:

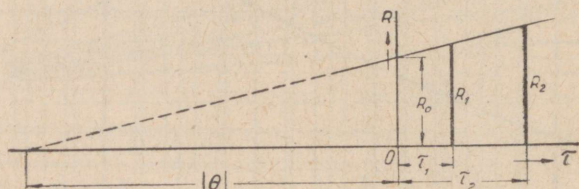
$$R_2 = R_{20}[1 + \alpha_{20}(\tau_2 - 20)]. \quad (2a)$$

Mõne teise algtemperatuuri puhul on temperatuuriteguril teistsugune väärtus. Kui seda uut väärtust ei ole teada, tuleb algul leida takistus temperatuuril  $20^\circ\text{C}$  valemist

$$R_{20} = \frac{R_1}{1 + \alpha_{20}(\tau_1 - 20)} \quad (2b)$$

ja saadud väärtus asetada valemisse 2a.

Igakordse  $20^\circ\text{C}$  peale ümberarvutamise asemel on otstarbekohane kasutada E m d e poolt antud viisi, mis on näidatud joonisel 4.



Joon. 4. Takistuse määramine sõltuvalt temperatuurist.

Oletades, et takistus sõltub temperatuurist lineaarselt (valemi 2 kohaselt), mis terase suhtes on kehtiv temperatuuri mõõdukais piires, pikendame sirget  $R=f(\tau)$  vasakule kuni lõikumiseni abssissteljega nn. iseloomustaval temperatuuril  $\Theta$ . Vasel näiteks on  $\Theta = -235^\circ\text{C}$ , raual  $-200^\circ\text{C}$ . Jooniselt 4 saame tuletada võrde:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{|\Theta| + \tau_2}{|\Theta| + \tau_1} \quad (4)$$

Samalt jooniselt on näha, et temperatuuritegurit  $\alpha_1$ , mis on ju suhteline takistuse juurdekasv vastavalt algtemperatuurile  $\tau_1$ , on võimalik leida valemist:

$$\alpha_1 = \frac{1}{|\Theta| + \tau_1} \quad (5)$$

Asetades nii leitud temperatuuriteguri valemisse 2, on võimalik otsekohe leida takistus uuel temperatuuril, kuigi algtemperatuur ei ole 20° C.

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

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{|\Theta| + \tau_2}{|\Theta| + \tau_1} \quad (6)$$

või, pidades silmas, et  $|\Theta| + \tau_1$  ja  $|\Theta| + \tau_2$  tähendavad õieti temperatuurivahesid  $\tau_1 - \Theta$  ja  $\tau_2 - \Theta$ , kirjutada:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\tau_2 - \Theta}{\tau_1 - \Theta} \quad (6b)$$

Seega, teades eritakistust  $\rho_1$  temperatuuril  $\tau_1$ , on lihtne leida uus eritakistus  $\rho_2$  teisel temperatuuril  $\tau_2$ , kui teame iseloomustavat temperatuuri  $\Theta$ . Sel viisil on võimalik arvutada ka juhtme takistus uuel temperatuuril, kui asetada vastav eritakistus valemisse 1.

Vahelduvvoolu puhul ei jagune elektrivool ühtlaselt juhtme kogu ristlõikele, sest vooluga aheldatud magnetvoogu tekitab juhtme sisemuses pöörisvoolusid, mis on koormusvoolu suhtes ajaliselt nihutatud. Tulemuseks on ebaühtlane voolutihedus — juhtme välispinna läheduses on voolutihedus suurem ja sisemuses väiksem — ning suurem energiakadu, võrreldes alalisvooluga. Alalisvoolu puhul arvutatakse soojuseks muundunud elektrivõimsus (vattides) valemist

$$\Delta P = I^2 R, \quad (7)$$

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

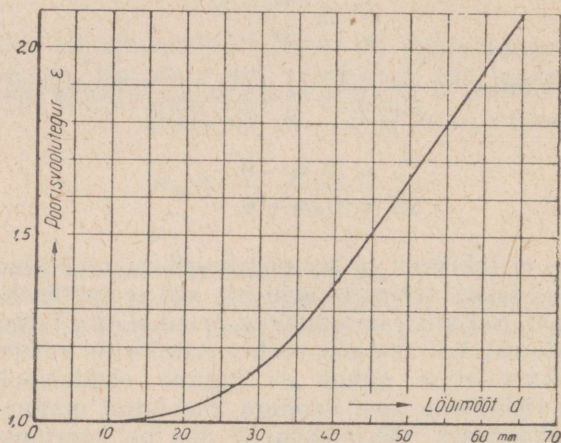
Vahelduvvoolu puhul toimub pöörisvoolude mõjul elektrivoolu nihkumine juhtme välispinna poole (pinnanähtus ehk skin-efekt). Seda nähtust võib tõlgendada ka nii, et vahelduvvoolu puhul on juhtme elektriline takistus suurem kui alalisvoolu puhul. Juhtme takistust vahelduvvoolule nimetatakse tegev takistuseks ehk aktiivtakistuseks. Takistuse suurenemine sõltub peale muu vahelduvvoolu sagedusest  $f$ , mida mõõdetakse hertsides (Hz) ehk perioodide arvuga sekundis.

Tugevvoolutehnikas kasutatavate suhteliselt madalate sageduste puhul (15...60 Hz) omab pinnanähtus õhuga ümbritsetud mittemagnetilisel juhtmel nimetamisväärtset tähtsust ainult siis, kui juhtme ristlõige on suur (üle 100 mm<sup>2</sup>). Terasjuhtmete puhul on aga tegev takistuse suurenemine standardsagedusel 50 Hz märkimisväärne juba palju väiksemate ristlõigete korral.

Vahelduvvoolu puhul esinev suurem tegev takistus  $R_v$  (võrreldes oomilise takistusega  $R$ , mis on mõõdetud alalisvooluga) võetakse tavaliselt arvesse teguri abil, mida nimetatakse pööris-

vooluteguriks  $\epsilon$ , mõnikord ka takistuste suhteks. Ilmselt  $R_v = \epsilon R$ . Soojuseks muundunud võimsus vahelduvvoolu puhul on seega

$$\Delta P_v = R_v I^2 = \epsilon R I^2 \quad (8)$$



Joon. 5. Massiivse vaskjuhtme pöörivoolutegur sõltuvalt traadi läbimõõdust.

Ümara ristlõikega ja õhuga ümbritsetud vaskjuhtme pöörivooluteguri arvutas juba 1890. aastal William Thomson (lord Kelvin), kelle töödel baseerub joonis 5, kus  $\epsilon$  on kujutatud sagedusel  $f=50$  Hz sõltuvalt vasktraadi läbimõõdust.

Terasjuhtmete puhul on pöörivoolutegur ehk takistuste suhe sõltuv mitte ainult sagedusest  $f$  ja traadi mõõtmetest (näiteks ümartraadi läbimõõdust  $d$  või ristlõikest  $q$ ), vaid ka aine permeaablusest  $\mu$ . Terasjuhtmetes soojuseks muundunud võimsus on vahelduvvoolu puhul suurem ka sellepärast, et terase ümbermagnetimisel tekib juhtmetes hüstereesikadu.

Terasjuhtme tegev takistuse probleemiga on tegelnud mitmed väga nimekad teadlased, nagu Rayleigh, Stefan, Thomson, Zennek, Kennely, Archard, Dana ja teised. Pöörivoolutegur terastraadile pidi olema nende uurimuste kohaselt

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

kus  $s$  on juhtme ristlõike pindala  $\text{cm}^2$ .

Viimane valem on tuletatud oletusel, et permeaablus on üks ja sama traadi ristlõike kõikides punktides. Alles 1919. aastal juhtis K. Zickler tähelepanu asjaolule, et permeaablus  $\mu$  ei ole traadi ristlõike kogu ulatuses üks ja seesama [14] \*. Ta tuletas ka lihtsustatud valemid massiivsete terasjuhtmete takistuse arvutamiseks vahelduvvoolu puhul, millede kohaselt ümarratrite jaoks pidi arvutama abisuuruse

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

kus  $\mu$  tähendab materjali permeaablust vastavalt efektiivsele väljatugevusele traadi välispinnal, s. o. kaugusel  $r$  (sentimeetrites) traadi keskkohast:

$$H_r = \frac{0,2 I}{r}. \quad (10)$$

Pöörivoolutegur arvutatakse sel puhul ühega järgmistest valemistest:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon &= 1 + 0,84x^4, \text{ kui } x < 1; \\ \epsilon &= 0,758 + \sqrt{1,342x^2 - 0,183}, \text{ kui } 1 \leq x < 3; \\ \epsilon &= 0,758 + 1,159 x \text{ kui } x \geq 3. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Olgu tähendatud, et valemid 11 on kehtivad mitte ainult ümarrase ristlõikega traatide, vaid ka teistsuguse ristlõikega juhtmete, nagu nelinurkse L-, U- või rööpaprofiiliga juhtmete jaoks. Sel juhul tuleb valemite 9 ja 10 asemel kasutada valemeid

$$x = \frac{2s}{100p} \sqrt{\frac{f\mu}{\rho}} \quad (12)$$

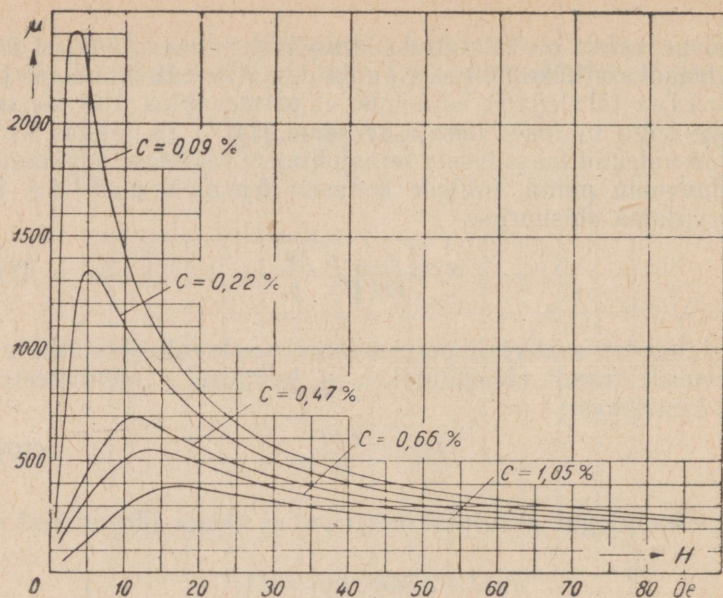
ja

$$H = \frac{0,4 \pi I}{p}, \quad (13)$$

kus  $s$  — juhtme ristlõike pindala  $\text{cm}^2$ ,  
 $p$  — juhtme ristlõike perimeeter  $\text{cm}$ ,  
 $\rho$  — juhtme eritakistus antud temperatuuril  $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ .

Pöörivooluteguri ja seega ka tegev takistuse arvutamisel valemite 9 kuni 11 järgi on vaja teada materjali permeaablust  $\mu$  sõltuvalt väljatugevusest  $H$  ning eritakistust  $\rho$ . Täpsete tulemuste saamiseks on vaja katseandmeid. Neid ei ole aga igakord võimalik saada ja seetõttu tuleb leppida kirjanduses avaldatud andme-

\* Nurksulgudes olevad arvud viitavad teose lõpus asuva kirjanduse loetelu vastavale tiitlile.



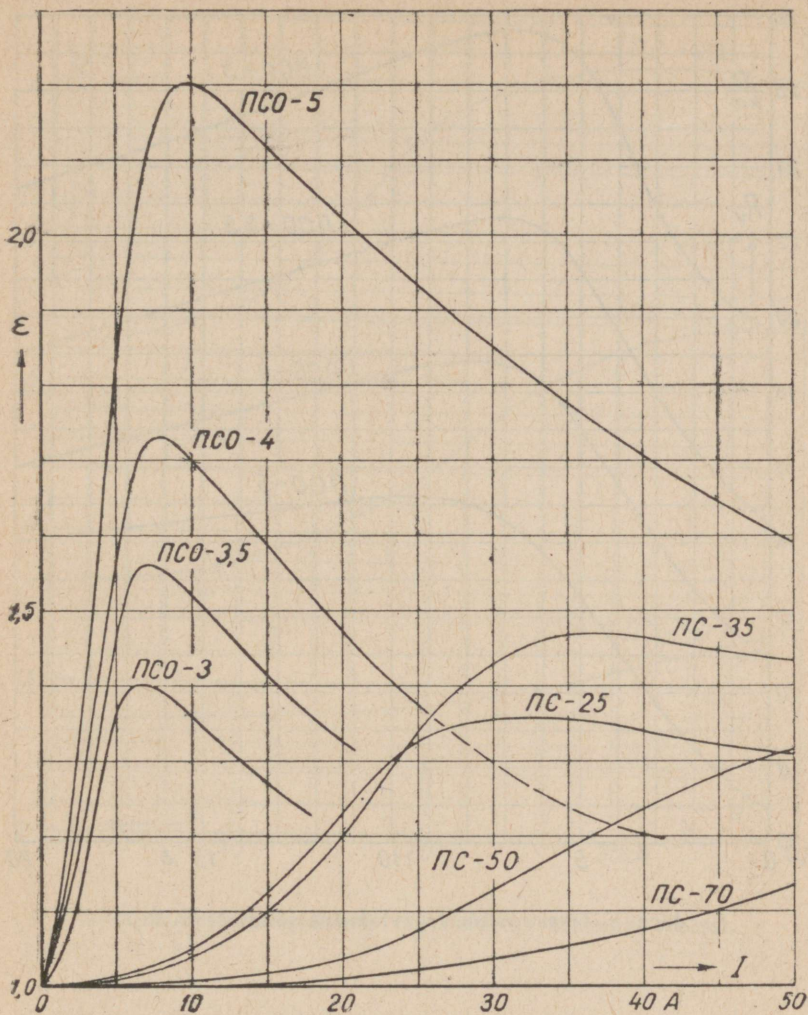
Joon. 6. Mitmesuguse süsinikusaldusega terase permeaabluse sõltuvust väljatugevusest.

tega ning suhteliselt väikese täpsusega. Joonisel 6 on toodud permeaabluse andmed sõltuvust väljatugevusest mitmesuguse süsinikusaldusega terase jaoks. Need andmed on saadud Üleliidulises Elektrotehnilises Instituudis (ВЭИ) teostatud uurimuse tulemusena [3].

Tabel 1

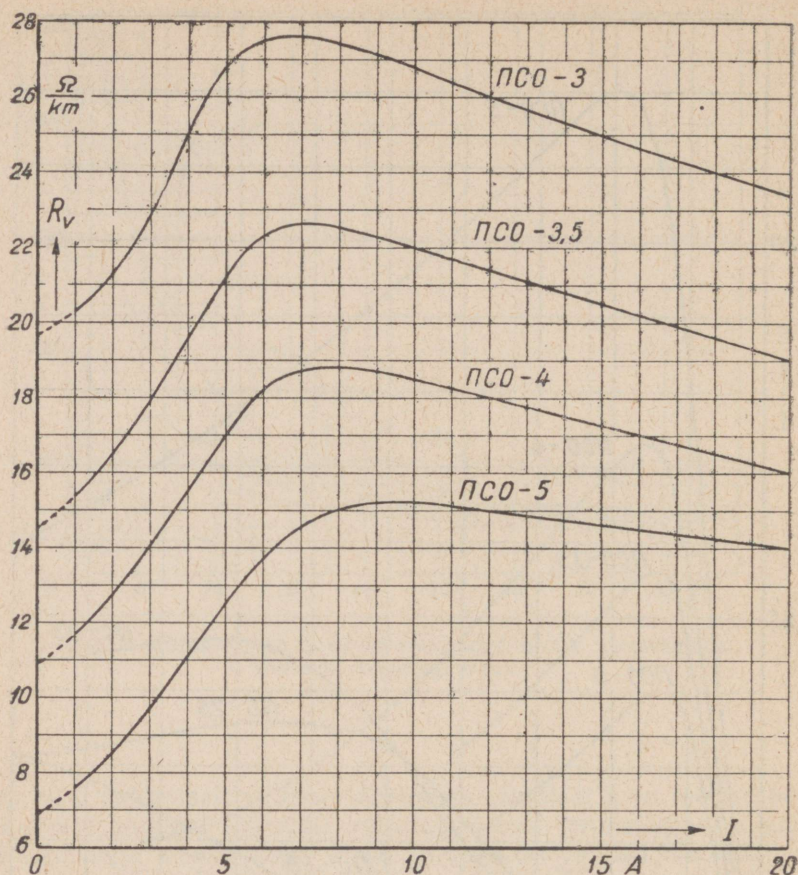
Põhiandmed ja kestvalt lubatav vahelduvvool tsiingitud terasest õhuliini juhtmetele õhu temperatuuril  $+25^{\circ}\text{C}$

Juhtme mark	Traatide arv ja läbimõõt mm	Juhtme ristlõige $\text{mm}^2$	Juhtme arvutuslääbimõõt mm	Juhtme kaal $\text{kg/km}$	Kestvalt lubatav vahelduvvool A	Peamine kasutusala
ПСО-3	1×3,0	7,05	3,0	55,5	23	} Sideliinid.
ПСО-3,5	1×3,5	9,62	3,5	75,5	26	
ПСО-4	1×4,0	12,57	4,0	100	30	} Madal- pinge- ja kõrge- pinge- õhuliinid
ПСО-5	1×5,0	19,64	5,0	154	35	
ПС-25	5×2,5	24,6	5,6	194	60	
ПС-35	7×2,6	37,2	7,8	296	75	
ПС-50	12×2,3	49,8	9,2	396	90	
ПС-70	19×2,3	78,9	11,5	632	125	



Joon. 7. Terastraatide ja teras-kõisjuhtmete pöörisvoolutegur sõltuvalt voolust.

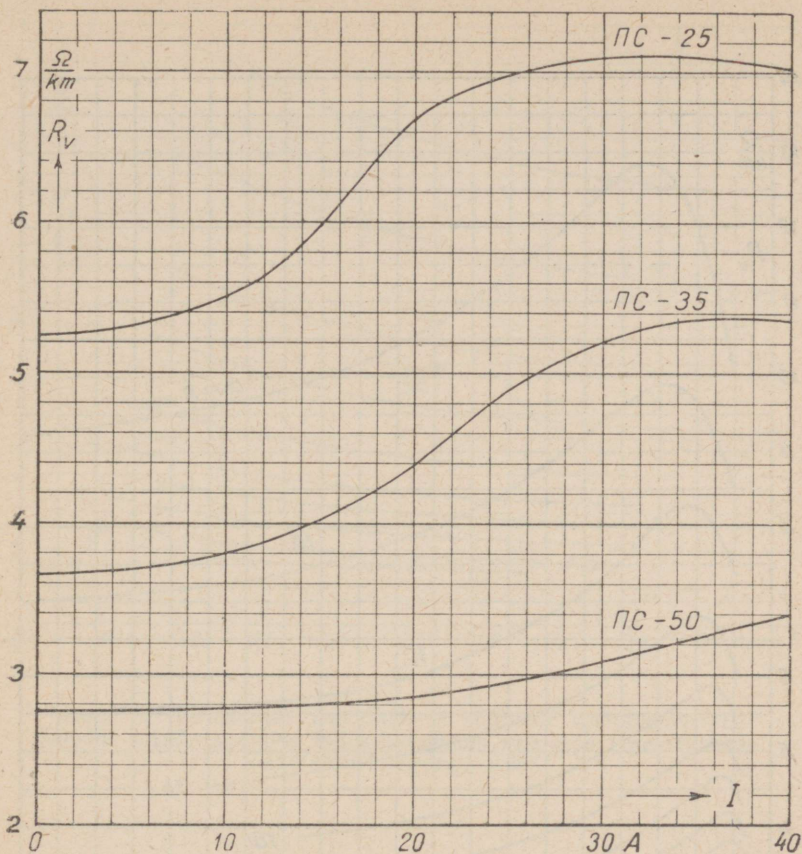
Õhuliinide arvutamisel on väga tülikas määrata terasjuhtme tegevtaekistust isegi eespool toodud lihtsustatud valemite järgi. Tuleks eelistada katseandmete põhjal saadud kõveraid, mis võimaldavad otseselt määrata pöörisvoolutegurit ja tegevtaekistust sõltuvalt juhelt läbivast voolust. Joonisel 7 on esitatud pööris-



Joon. 8. Terastraatide tegevtaakistus sõltuvalt voolust.

voolugegur õhuliinides kasutatavate tsingitud terastraadist juhtmete ja teras-kõisjuhtmete kohta, mille muud andmed on toodud tabelis 1 (ГОСТ 5800-51 kohaselt). Terastraatide tegevtaakistus on toodud joonisel 8 ja kõisjuhtmete tegevtaakistus joonisel 9.

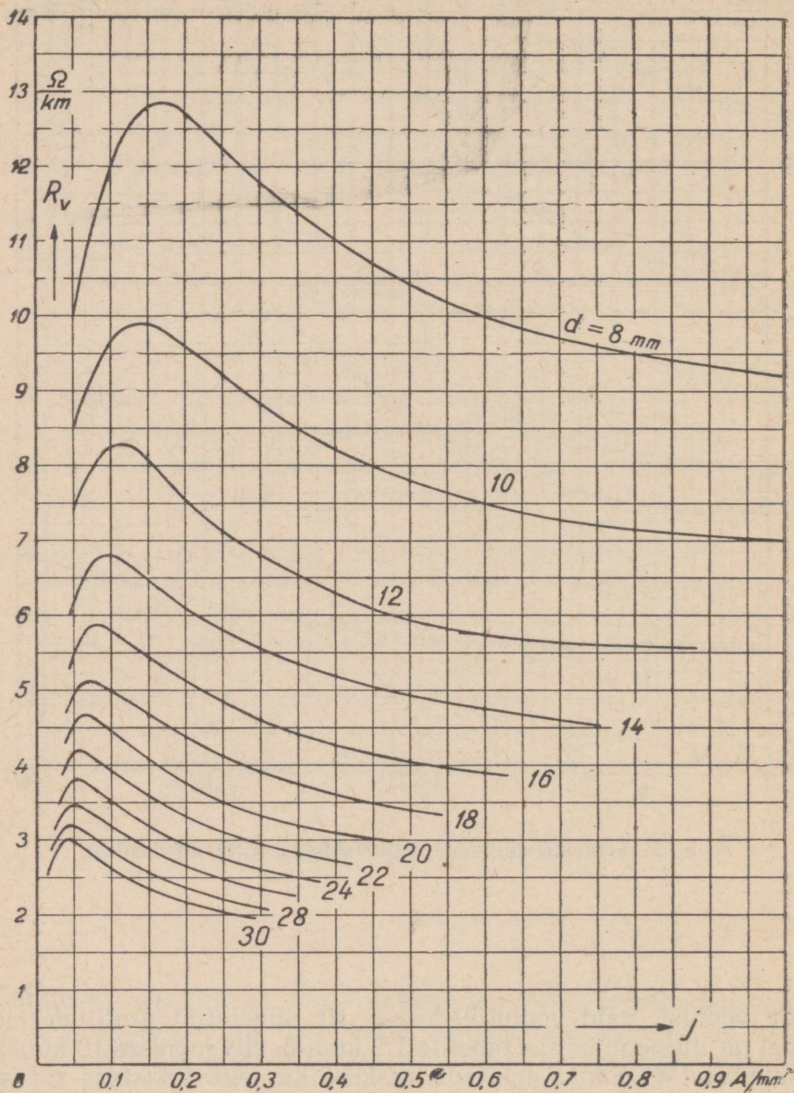
Kogumislattideks kasutatakse mõnikord suhteliselt suure läbimõõduga ümarvarrast või toru, tavaliselt siiski nelinurkset teraslatti. Trollijuhtmeteks aga kasutatakse kas nurkprofiili või rõõpaid. Et tegemist on väga erinevate ristlõigetega, siis on joonistel 10, 11, 13 ja 14 toodud ülalnimetatud materjalide tegevtaakistus, joonisel 12 aga tegevtaakistuse ja ristlõike korrutis sõltuvalt



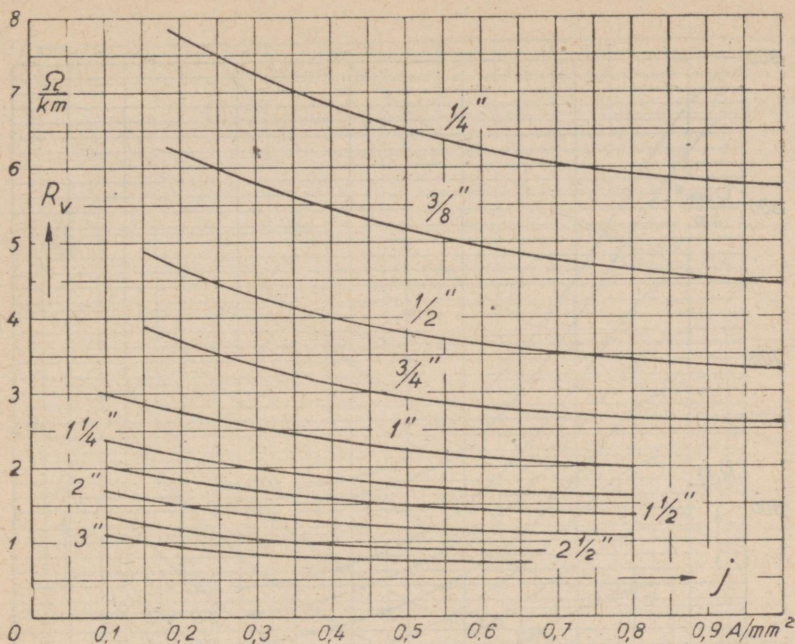
Joon. 9. Teras-kõisjuhtmete tegevtaekistus sõltuvalt voolust.

mitte voolust, vaid voolutihedusest. Et nimetatud profiilide ristlõiget on lihtne määrata tabelitest 2 kuni 6, siis jooniste 10 kuni 14 kasutamisel ei tohiks tekitada raskusi ka tegevtaekistuse määramine igasuguse vahelduvvoolu puhul.

Jooniselt 6 nähtub, et süsinikusalduse suurenemisel terasjuhtmete permeaablus väheneb. Süsinikusalduse suurenemisel aga suureneb terasjuhtme eritakistus, nagu võib järeldada jooniselt 2. Seepärast ei ole võimalik otseselt öelda, millise teguri mõju on suurem ja kas terasjuhtme tegevtaekistus suureneb või väheneb süsinikusalduse suurenemisel.



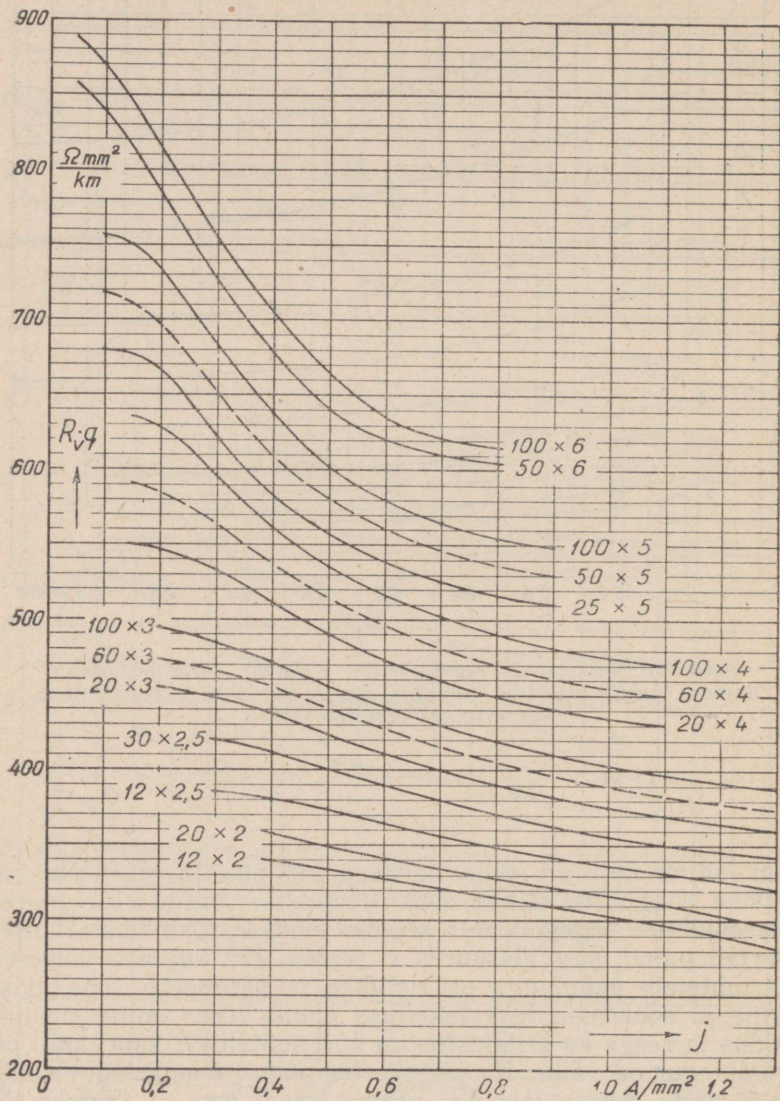
Joon. 10. Ümar-terasvarraste tegevtaakistus sõltuvalt voolutihedusest. Samade varraste sisemine induktiivtaakistus saadakse tegevtaakistuse korrutamisel teguriga 0,565.



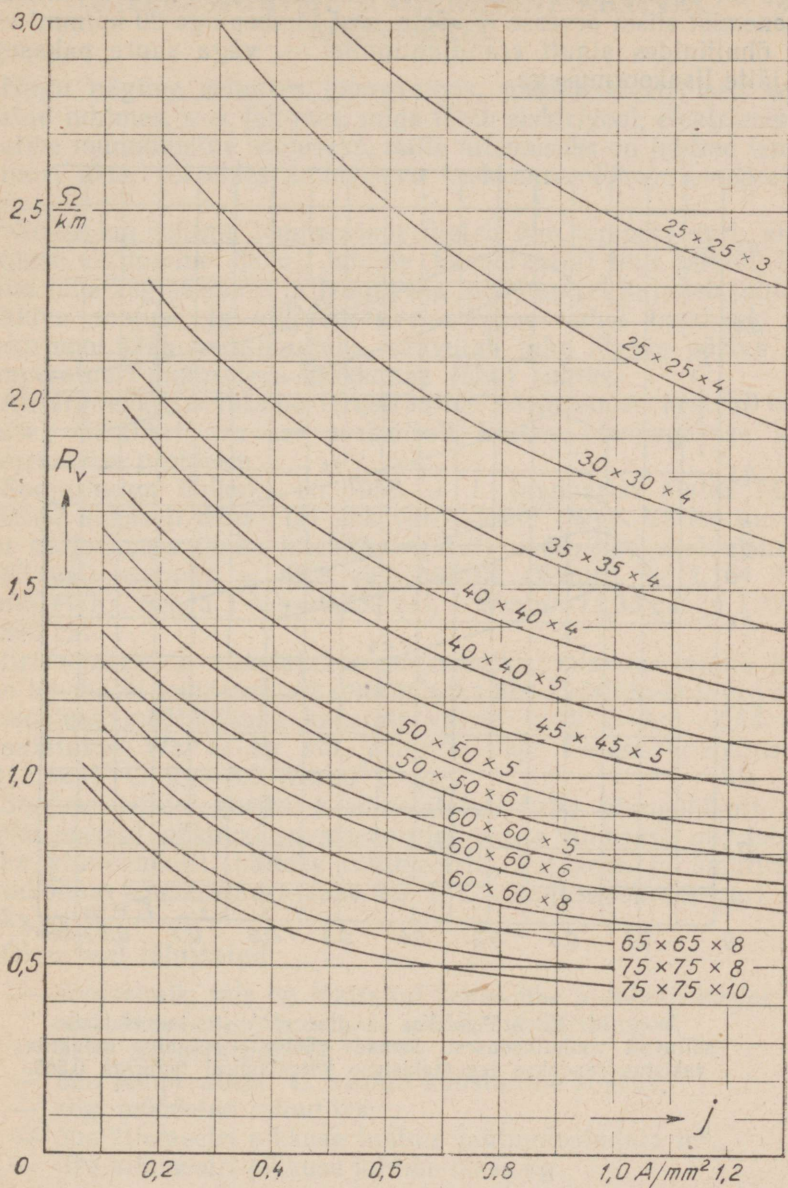
Joon. 11. Terastorude tegevtaakistus sõltuvalt voolutihedusest. Samade torude sisemine induktiivtaakistus saadakse tegevtaakistuse korrutamisel teguriga 0,565.

Kui juhtme kuju on selline, et tema ristlõike ja perimeetri suhe on väike (nagu see esineb õhukeseseinalise profiilterase juures), on terasjuhtme tegevtaakistus soodne väikese süsinikusisaldusega materjali puhul, sest abisuurus  $\times$  (valem 12) kujuneb väikeseks. Ümarjuhtmete puhul aga on ristlõike ja perimeetri suhe maksimaalne ja soodsama tegevtaakistuse annab teras, mille süsinikusisaldus ja seega ka eritakistus on küll suhteliselt suur, kuid pöörivoolutegur on väike. Ka jäigaks tõmmatud traadi tegevtaakistus võib osutuda soodsamaks kui pehme traadi oma — jäigaks tõmmatud traadi eritakistus küll suureneb, kuid pöörivooluteguri vähenemise mõju võib osutuda suuremaks.

Terasjuhtmetel on veel üks huvitav omadus: nende elektriline takistus väheneb, kui neid mehaaniliselt pingutada. B. S a d i k o v uuris seda nähtust Üleliidulise Elektrotehnilise Instituudi magnetiliste materjalide laboratooriumis juba 1930. aastal ja näitas, et takistuse vähenemine võib ulatuda 30 protsendini, kui tõmbe-

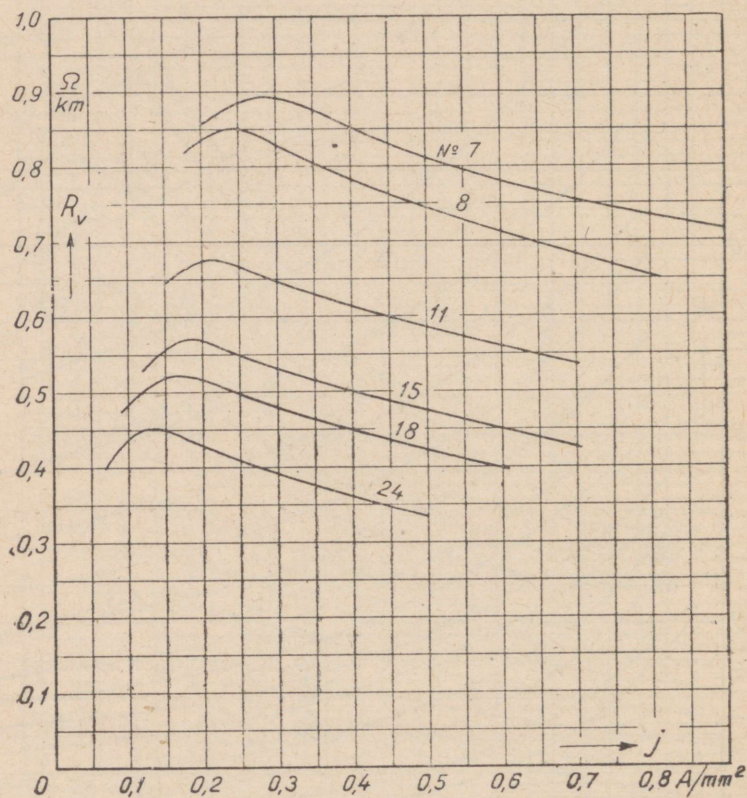


Joon. 12. Lamedate teraslattide tegevtahtsuse ja ristlõike korrutis sõltuvalt voolutihedusest. Samade lattide sisemise induktiivtahtsuse ja ristlõike korrutised saadakse, kui korrutatakse kõveralt saadud andmed teguriga 0,565.



Joon. 13. Nurkteraslattide tegevtaekistus sõltuvalt voolühedusest. Samade lattide sisemine induktiivtaekistus saadakse tegevtaekistuse korrutamisel teguriga 0,565.

pinge on  $20 \text{ kp/mm}^2$ . \* Õhuliinide kavandamisel sellist takistuse vähenemist siiski arvesse ei võeta, sest tõmbepinge  $20 \text{ kp/mm}^2$  esineb õhuliinides ainult erandjuhtumitel — väga suure pakasega või jäite lisakoormusega.



Joon. 14. Kitsarööpmelise raudtee rööbaste tegevtaakistus sõltuvalt voolutihedusest. Samade rööbaste sisemine induktiivtaakistus saadakse tegevtaakistuse korrutamisel teguriga 0,565.

\* Ühik kilopond (kp) tähistab kilogramm-jõudu

### 3. TERASJUHTME SOOJENEMINE KESTVAL KOORMUSEL

Nagu nägime eelmises paragrahvis, toimub elektriliselt koor-  
matud juhtmes, s. o. juhtmes, mida läbib elektrivool, elektrienergia  
osaline muundumine soojuseks, mille tulemuseks on juhtme tempera-  
tuuri tõus, võrreldes ümbritseva keskkonna (õhu) temperatuuriga.

Niipea kui juhtme temperatuur ületab õhu temperatuuri, algab  
soojuse siirdumine õhku. Juhtme temperatuuri tõus jätkub, kuid  
nüüd juba aeglasemalt, ja teatud aja möödumisel kujuneb juhtmes  
tekkiva soojuse ja väljasiirduva soojuse vahel tasakaal. Kui  
elektrivool jääb muutumatuks, saavutab juhe lõpuks püsiva üle-  
temperatuuri ümbritseva keskkonna (õhu) suhtes.

Alljärgnevalt arvutame terastraatide soojenemise kestval koor-  
musel. Sisuliselt on see seesmiselt köetava homogeenise keha  
soojenemise probleem.

Soojushulga ühikuks on 1958. a. 1. jaanuarist alates ГОСТ  
8550-57 kohaselt džaul (J) ehk vatt-sekund (Ws). Varem kasuta-  
tud soojushulga ühiku kilokalori (kcal) elektriline ekvivalent on  
4187 vatt-sekundit = 69,8 vatt-minutit (Wmin) = 1,164 vatt-  
tundi (Wh). Seega  $1 \text{ Ws} \approx 0,239 \text{ cal}$ ,  $1 \text{ Wmin} \approx 14,33 \text{ cal}$  ja  $1 \text{ Wh} \approx$   
 $\approx 860 \text{ cal}$ .

Erisoojuseks  $c$  nimetatakse soojushulka, mis on vajalik keha  
ühe kg massi temperatuuri muutmiseks ühe Celsiuse-kraadi võrra.  
Erisoojuse mõõtühikuks kasutati varem  $\text{kcal}/^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$ , nüüd aga  
kasutatakse  $\text{Ws}/^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$  või  $\text{Wmin}/^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$ . Teras eisisoojus on  
 $0,115 \text{ kcal}/^\circ\text{C} \cdot \text{kg} = 8,0 \text{ Wmin}/^\circ\text{C} \cdot \text{kg}$ .

Soojuse siirdeteguriks  $h$  nimetatakse keha pinnaühikult aja-  
ühiku jooksul lahkuvat soojusenergiat, seega võimsust, mis lahku-  
b keha pinnaühikult, näiteks ruutmeetritl, kui keha ja ümbritseva  
keskkonna temperatuuri vahe on  $1^\circ\text{C}$ . Soojuse siirdeteguri ühi-  
kuks on  $\text{W}/^\circ\text{C} \cdot \text{m}^2$ .

Olgu veel tähistatud:

- $Q$  — soojushulk, mis on tekitatud kehas ühe ajaühiku kestel; see  
olgu konstantne suurus ja mõõdetud vattides;
- $\tau$  — keha temperatuur  $^\circ\text{C}$ ;
- $\tau_0$  — õhu temperatuur  $^\circ\text{C}$ , samuti konstantne suurus;
- $t$  — aeg, mõõdetud minutites;
- $S$  — ühe kilomeetri pikkuse juhtme jahtumispindala  $\text{m}^2$ ;
- $G$  — ühe kilomeetri pikkuse juhtme mass kg.

Soojenemise alguses olgu terastraadi temperatuur võrdne ümb-  
ritseva õhu temperatuuriga. Kui algab soojenemine (kütmine),  
hakkab traadi temperatuur tõusma, seega toimub traadis soojuse  
salvestumine; ent ühtlasi algab soojuse lahkumine ümbritsevasse  
keskkonda. Lõpuks jääb traadi temperatuur muutumatuks, kui aja-

ühikus tekitatud soojushulk (soojuseks muundunud energia) võrdub traadist väljasiirdunud soojushulgaga.

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

$$Qdt = Gcd\tau + Sh(\tau - \tau_0) dt. \quad (14)$$

Seega aja  $dt$  jooksul tekitatud soojushulk võrdub traadi temperatuuri tõstmiseks  $d\tau$  võrra kuluva soojushulga ja aja  $dt$  vältel traadist välja siirduva soojushulga summaga temperatuuride vahe juures  $(\tau - \tau_0)$ .

Püsiva olukorra saavutamisel, kui traadi temperatuur enam ei muutu, seega  $d\tau=0$ , ja soojust enam ei salvestu, ning seega ka  $Gcd\tau=0$ , võrdub aja  $dt$  jooksul tekitatud soojushulk ehk soojuseks muundunud energia  $Qdt$  traadist välja siirdunud soojushulgaga  $Sh(\tau - \tau_0) dt$ .

Piirjuhtumil, kui traadi temperatuur on saavutanud maksimaalse väärtuse  $\tau_m$ , võtab valem 14 kuju

$$Qdt = Sh(\tau_m - \tau_0) dt, \quad (15)$$

millest leiame traadi maksimaalse ületemperatuuri:

$$\tau_m - \tau_0 = \frac{Q}{Sh}. \quad (15a)$$

Viimane valem võimaldab väga lihtsalt arvutada seesmiselt köetava keha, käesoleval juhul terastraadi lõpptemperatuuri, kui teame soojuse siirde teguri  $h$  suurust.

Kui keha temperatuur tõuseb ümbritseva keskkonna temperatuurist kõrgemale, siis lahkeb soojust kehast tavaliselt kahel või kolmel teel: kiirgamise, konvektsiooni või ka juhtimise teel.

Kiirgamine toimub vaakuumis, kuid ka õhk ei sega seda oluliselt. Konvektsioon saab toimuda ainult gaasis või vedelikus — vaakuumis konvektsiooni ei esine.

Stefan-Boltzmanni seaduse kohaselt toimub absoluut-ses vaakuumis energia kiirgamine võrdeliselt absoluutse temperatuuri neljanda astmega. Igalt ruutmeetrilt ühes sekundis kiiratud soojushulk (s. o. soojusvoo tihedus vattides ruutmeetri kohta) on:

$$\frac{Q_k}{S} = 5,77 \cdot 10^{-8} \cdot (T_k^4 - T_0^4), \quad (16)$$

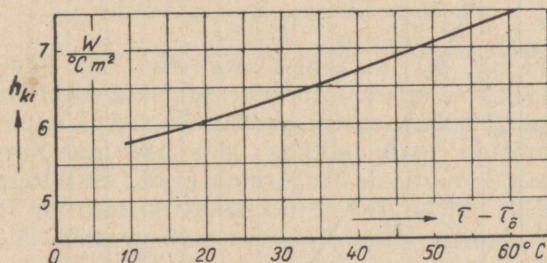
- kus  $T_k$  — kōetud keha absoluutne temperatuur °K,  
 $T_\delta$  — ümbritseva õhu absoluutne temperatuur °K,  
 $5,77 \cdot 10^{-8}$  — absoluutselt musta keha katseliselt määratud kiirgamistegur  $W/m^2 \cdot ^\circ K^4$ ,  
 $\nu$  — tegur, mis arvestab kiirgava pinna omadusi; suhteline kiirgamistegur võrreldes absoluutselt musta kehaga; tuhmi pinnaga terasel  $\nu=0,95$ .

Juhtmete puhul on tegemist mõõdukate temperatuuridega. Kui võtta õhu temperatuuriks  $\tau_\delta = 20^\circ C$ , siis võiks juhtme lubatav ületemperatuur olla  $40^\circ C$ , s. o. juhe tohib soojeneda kuni  $+60^\circ C$ .

Kui taandada soojusvoo tihedus (valem 16) ületemperatuuri ühele kraadile, saame soojuse siirdeteguri kiirgamise osa:

$$h_{ki} = \frac{5,77 \cdot 0,95 \cdot 10^{-8} (T_k^4 - T_\delta^4)}{\tau - \tau_\delta} \frac{W}{^\circ C \cdot m^2} \quad (17)$$

Joonisel 15 on kujutatud  $h_{ki}$  sõltuvus ületemperatuurist  $\tau - \tau_\delta$  ümbritseva õhu temperatuuril  $\tau_\delta = 20^\circ C$ . Jooniselt nähtub, et siirdeteguri kiirgamise osa muutub ületemperatuuri muutumisega vähe ja on keskmiselt  $6 W/^\circ C \cdot m^2$ .



Joon. 15 Siirdeteguri kiirgamise osa sõltuvalt ületemperatuurist, kui õhu temperatuur  $\tau_\delta = +20^\circ C$ .

Konvektsiooni teel siirdub soojus juhtmest õhku sõltuvalt paljudest teguritest: õhu soojusjuhtivusest, õhu kiirusest, paisumistegurist, erikaalust (seega ka rõhust), niiskusesisaldusest, temperatuurist, kuid ka jahutatava pinna asendist, kujust ja suurusest. Ümartraatide kohta kehtib empiiriline (katsete teel saadud) valem:

$$h_{ko} = \frac{182}{(\sqrt{T_k T_\delta})^{0,123}} \sqrt{\frac{\rho \nu}{d}} \frac{W}{^\circ C \cdot m^2}, \quad (18)$$

kus  $p$  — õhu rõhk at,  
 $v$  — õhu liikumise kiirus m/s,  
 $d$  — juhtme läbimõõt mm.

Õhu temperatuuri määdukates piirides (20...60°C) ja õhu rõhul 1 at võib valemi 18 asendada lihtsama valemiga

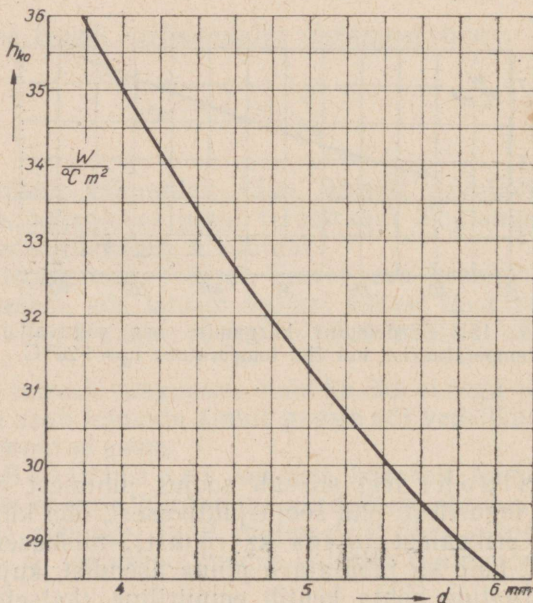
$$h_{ko} \approx 90 \sqrt{\frac{v}{d}} \frac{W}{^{\circ}\text{C m}^2} \quad (18a)$$

Kinnises ruumis sõltub õhu liikumise kiirus õhu osakeste tõusust ja ta võrdub 0,1...0,3 m/s. Väljaspool kinnist ruumi on õhu kiirus suurem, vähemalt 0,6 m/s. Seega võime õhuliinidel siirdeteguri konvektsiooni osa arvutada ligikaudu valemist

$$h_{ko} \approx 90 \sqrt{\frac{0,6}{d}} \approx \frac{70}{\sqrt{d}} \frac{W}{^{\circ}\text{C m}^2} \quad (18b)$$

Joonisel 16 on näidatud  $h_{ko}$  väärtus sõltuvalt paljasjuhtme läbimõõdust  $d$ . Kui liita sellega siirdeteguri kiirgamise osa  $h_{ki}$ , saame üldise soojuse siirdeteguri

$$h = h_{ki} + h_{ko} \quad (19)$$



Joon. 16. Siirdeteguri konvektsiooni osa sõltuvalt terastraadi läbimõõdust.

Soovides määrata vahelduvvoolu  $I$ , millega terasjuhtmed saavutavad maksimaalse temperatuuri  $\tau_m$ , kui õhu temperatuur on  $\tau_\delta$ , asetame soojusbilansi piirväärtuse valemisse 15 soojuseks muunduva võimsuse valemi 8 kohaselt, kasutades seejuures ka valemit 2:

$$R_v [1 + \alpha (\tau_m - \tau_\delta)] I^2 = h (\tau_m - \tau_\delta) S, \quad (20)$$

kus juhtme tegevtaakistus

$$R_v = \frac{\varepsilon l}{\lambda q} = \frac{4 \varepsilon l}{\lambda \pi d^2} \Omega,$$

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

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

millest saame otsitava voolu

$$I = \sqrt{\frac{h \lambda d^3 \pi^2 (\tau_m - \tau_\delta)}{4000 \varepsilon [1 + \alpha (\tau_m - \tau_\delta)]}}, \quad (20a)$$

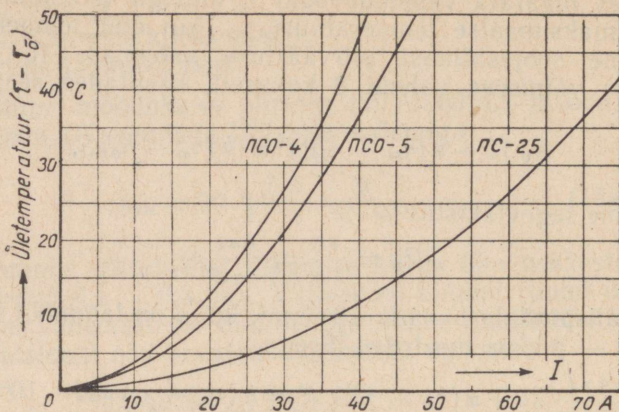
Terasjuhtme puhul  $\lambda = 7,5 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$  ja kui võtta arvesse, et  $\pi^2 = 9,87$ , saame veidi lihtsama valemi:

$$I = \sqrt{\frac{0,0185 h d^3 (\tau_m - \tau_\delta)}{\varepsilon [1 + \alpha (\tau_m - \tau_\delta)]}}. \quad (20b)$$

Et terasjuhtmeis pöörisvoolutegur  $\varepsilon$  ise sõltub voolust  $I$  (joon. 7), siis tuleb  $\varepsilon$  esialgu hinnata ja siis asetada ta valemisse 20b ning proovida, kas hinnang oli õige. Mõne katsetamise järel leiame sobivad suurused, mis rahuldavad nii valemit 20b kui ka joonisel 7 kujutatud pöörisvooluteguri  $\varepsilon$  sõltuvust voolust  $I$ .

Joonisel 17 on toodud terastraatide ПСО-4 ja ПСО-5 ning köisjuhtme ПС-25 ületemperatuurid sõltuvalt voolust, kui õhu temperatuur on  $+25^\circ \text{C}$ . Tabelist 1 nähtub, kui palju on lubatud koormata vahelduvvooluga neidsamu juhtmeid. Sellest võib järeldada, et terasjuhtmed soojenevad suvel maksimaalselt lubatava voolu puhul vähem kui  $30^\circ \text{C}$ . Kui õhu temperatuur on madalam, on lubatud juhtmeid koormata rohkem. Võiks öelda, et õhu temperatuuri vähenemisel iga kraadi võrra võib suurendada maksimaalset voolu 1 protsendi võrra ja vastupidi. Näiteks õhu temperatuuril  $5^\circ \text{C}$  on juhtme ПСО-5 maksimaalselt lubatav vool  $1,20 \cdot 35 = 42$  amprit.

Olgu tähendatud, et köisjuhtmete ületemperatuuri arvutamisel ei saa siirdeteguri konvektsiooni osa määramiseks kasutada valemit 18b, mis kehtib ainult ümartraatide kohta. Et köisjuhtme välispind on sooneline, siis on tema siirdeteguri konvektsiooni osa märksa suurem kui siledal terastraadil. Köisjuhtme välispindala on samuti suurem kui sama läbimõõduga traatjuhtme välispind-



Joon. 17. Terasjuhtmete ületemperatuur «rahulikus» välisõhus sõltuvalt vahelduvvoolu tugevusest, kui õhu temperatuur  $\tau_0 = +25^\circ \text{C}$ .

ala. Seega ei saa kõisjuhtme ületemperatuuri arvutamiseks kasutada valemit 20b. Et puuduvad sobivad valemid, võib kõisjuhtmete soojenemist määrata esialgu ainult katseliselt.

Kogumislattidel lubatakse soojeneda normaalsel talitlusel kuni  $+75^\circ \text{C}$ , kui ruumi temperatuur on  $+25^\circ \text{C}$ . Temperatuuril  $+75^\circ \text{C}$  ei ületa kontaktide üleminekutakistus ja pinna oksüdeerumine lubatavat piiri. Kuid kogumislattide kavandamisel tavaliselt ei arvutata soojenemist; see jäetakse lihtsalt lubatava voolu piiridesse. Tabelites 2 kuni 4 on toodud lubatavad voolud ümarlattidele, torudele ja serviti asetatud teraslattidele nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul sagedusega 50 Hz, kui ruumi temperatuur on  $+25^\circ \text{C}$ . Lattide asetamisel lapiti tuleb kasutada parandustegurit 0,95.

Tabelites 5 ja 6 on toodud põhilised andmed ning kestvalt lubatav koormus nurk-profiilterasele ja rööbastele, mida kasutatakse trollijuhtmeteks.

Nagu nähtub tabelist 2 kuni 5, on lubatav alalisvool märksa tugevam kui vahelduvvool. See on seletatav muidugi asjaoluga, et vahelduvvoolu puhul on terasjuhtme tegevtaakistus märksa suurem kui oomiline takistus, ja nimelt pöörivooluteguri kordselt.

Ei ole otstarbekohane kasutada paksemaid latte, kui on näidatud tabelis 4, sest paksemate lattide pöörivoolutegur on suur ja jahtumise tingimused on ebasoodsad. Tugevate voolude puhul on otstarbekohane ehitada elektrijuhe mitmest rööbiti lülitatud latist. Sellega on võimalik saavutada materjali suurt kokkuhoidu.

Tabel 2

Põhiandmed ja kestvalt lubatav koormus ümmargustele teraslattidele,  
kui ruumi temperatuur on  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Läbimõõt mm	Ristlõige mm <sup>2</sup>	1 meetri kaal kg	Lubatud koormus	
			alalisvooluga A	vahelduvvooluga A
8	50,3	0,40	80	49
10	78,5	0,62	108	60
12	113	0,89	140	72
14	154	1,21	174	86
16	201	1,58	212	100
18	255	2,00	250	114
20	314	2,47	291	132
22	380	2,98	333	140
24	452	3,55	376	148
26	530	4,17	422	157
28	617	4,84	470	170
30	708	5,55	520	180

Tabel 3

Põhiandmed ja kestvalt lubatav koormus terastorudele,  
kui ruumi temperatuur on  $+25^{\circ}\text{C}$ .

Toru sise- läbimõõt toilides	Toru välis- läbimõõt mm	Toru metalli ristlõige mm <sup>2</sup>	1 meetri toru kaal kg	Lubatud koormus	
				alalisvooluga A	vahelduv- vooluga A
1/4	13,5	78,5	0,62	120	75
				140	86
3/8	17,0	105	0,82	150	90
				180	106
1/2	21,35	160	1,25	220	118
				245	133
3/4	26,75	207	1,63	270	145
				305	165
1	33,5	309	2,42	370	180
				425	207
1 1/4	42,25	398	3,13	460	220
				540	258
1 1/2	48,0	489	3,84	560	255
				645	292
2	60,0	621	4,88	660	320
				745	360
2 1/2	75,5	864	6,64	870	390
				995	447
3	88,5	1061	8,34	1080	455
				1230	520

Märkus. Murrujoonel (lugejas) olevad arvud kehtivad värvitud torude  
kohta, murrujoone all (nimetajas) olevad arvud aga värvimata torude kohta.

Kestvalt lubatav koormus amprites alalisvooluga  $I_a$  ja vahelduvvooluga  $I_v$  nelinurksetele serviti asetatud teraslattidele, kui ruumi temperatuur on  $+25^{\circ}\text{C}$

Latus mm	P a k s u s  m m							
	2		2,5		3		4	
	$I_a$	$I_v$	$I_a$	$I_v$	$I_a$	$I_v$	$I_a$	$I_v$
12	50	35	55	42				
16	67	48	75	55				
20	85	60	90 95	60 65	100 105	65 70	115 120	70 75
25			110 115	75 80	120 125	80 85	140 150	85 90
30			135	95	140 150	95 100	165 180	100 110
40					190 200	125 130	220 235	130 140
50					230 250	155 160	270 290	165 170
60					280 295	185 195	325 345	195 205
70					320 345	215 225	375 400	225 235
80					365 390	245 255	430 455	260 270
90					410 440	275 285	480 510	290 300
100					460 490	305 320	535 565	325 335

Märkus. Murrujoonel (lugejas) olevad arvud kehtivad värvitud lattide (ГОСТ 6009-51 ja ГОСТ 103-51) kohta, murrujoone all (nimetajas) olevad arvud aga värvimata lattide kohta. Lattide asetamisel lapiti tuleb lubatavad koormused korrutada teguriga 0,95.

Põhiandmed ja kestvalt lubatav koormus nurk-profiilterasele,  
kui ruumi temperatuur on +25° C.

Nurkprofiili mõõdud mm	Ristlõige mm <sup>2</sup>	1 meetri kaal kg	Oomiline takistus Q/km	Lubatud koormus	
				alalisvooluga A	vahelduv- vooluga A
25×25×3	143	1,12	1,01	233	155
25×25×4	186	1,46	0,78	264	163
30×30×4	227	1,78	0,64	320	194
35×35×4	267	2,10	0,54	374	226
40×40×4	308	2,42	0,47	430	260
40×40×5	379	2,97	0,38	479	278
45×45×5	429	3,37	0,34	535	312
50×50×5	480	3,77	0,30	596	345
50×50×6	569	4,47	0,255	640	347
60×60×5	582	4,57	0,25	710	410
60×60×6	691	5,42	0,21	776	416
60×60×8	903	7,09	0,16	887	431
65×65×8	987	7,75	0,147	970	474
75×75×8	1150	9,03	0,126	1140	545
75×75×10	1410	11,1	0,103	1240	570

Tabel 6

Põhiandmed ja kestvalt lubatav koormus vahelduvvooluga sagedusel  
50 Hz kitsarööpmelise raudtee rööbastele

Rööpa tüübi nr.	Põhilised mõõtmised				Ristlõige mm <sup>2</sup>	1 meetri kaal kg	Oomiline takistus Q/km	Kestvalt lubatud vahelduv- vool A
	kõrgus mm	talla laius mm	pea paksus mm	kaela paksus mm				
7	65	50	25	5,5	885	6,93	0,226	410
8	65	54	25	7	1076	8,42	0,186	430
11	80,5	66	32	7	1431	11,20	0,140	535
15	91	76	37	7	1880	14,72	0,106	625
18	100	80	40	10	2307	18,06	0,087	745
24	107	92	51	10,5	3270	24,04	0,061	790

Selgitame veel küsimuse, millise aja jooksul saavutab juhe mingisuguse voolu korral lõpptemperatuuri. Selleks peame leidma juhtme soojenemise ajakonstandi.

Jagades valemi 14 mõlemad pooled avaldisega  $Sh dt$ , saame:

$$\frac{Q}{Sh} = \frac{Gc d\tau}{Sh dt} + \tau - \tau_0, \quad (21)$$

millest leiame soojenemiskõvera tõusu  $d\tau/dt$ , võttes arvesse, et valemi 21 vasak pool võrdub maksimaalse ületemperatuuriga ( $\tau_m - \tau_\delta$ ):

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{\tau_m - \tau}{\frac{Gc}{Sh}} = \frac{\tau_m - \tau}{T} \quad (22)$$

Suurust

$$T = \frac{Gc}{Sh} \quad (23)$$

nimetataksegi ajakonstandiks. Ajakonstant omab aja dimensiooni ja käesoleval juhtumil mõõdetakse teda minutites. Olles keha soojusmahtuvuse ja soojuskaotuse suhe, iseloomustab ajakonstant juhtme soojenemise või jahtumise kiirust.

Et valemi 15a kohaselt

$$Sh = \frac{Q}{\tau_m - \tau_\delta},$$

siis võib ajakonstanti väljendada ka järgmiselt:

$$T = \frac{Gc(\tau_m - \tau_\delta)}{Q} \quad (24)$$

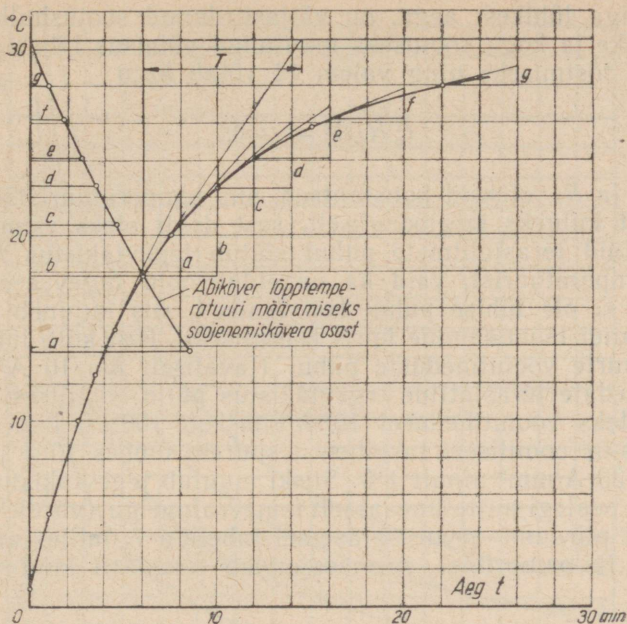
Viimase valemi kohaselt võrdub ajakonstant ajaga, mille jooksul keha saavutaks lõpptemperatuuri, kui ei esineks soojuse siirdumist ümbruskonda. See kehtib soojenemiskõvera mistahes punkti kohta.

Nagu nähtub valemist 22, on temperatuuri muutuse tuletis  $d\tau/dt$ , mis on võrdeline soojenemiskõvera tõusunurga tangensiga, ühtlasi võrdeline kaugusega lõpptemperatuurist. Temperatuuri tõus on seda aeglasem, mida rohkem kõetava keha temperatuur läheneb maksimaalsele ehk lõpptemperatuurile  $\tau_m$ . Teoreetiliselt saavutatakse lõpptemperatuur alles väga pika aja jooksul, praktiliselt aga juba nelja kuni viie ajakonstandi möödumisel (vastavalt 98,2- või 99,3-protsendiliselt).

Ajakonstandi arvutamiseks tuleme meelde, et raua või terase tihedus  $\rho = 7,8 \text{ kg/dm}^3$  ja erisoojus  $c = 8 \text{ Wmin/kg}^\circ\text{C}$ . Juhtme kaal  $G = \rho ql \text{ kg}$  ja ümmarguse ristlõikega juhtme välispindala  $S = \pi dl^2$ , kui  $d$  on läbimõõt millimeetrites ja  $l$  pikkus kilomeetrites. Ümmarguse terasjuhtme ajakonstant on seega

$$T = \frac{Gc}{Sh} = \frac{\rho qc}{\pi dh} = \frac{19,8q}{dh} \quad (25)$$

Kinnises ruumis, kus soojuse siirdetegur  $h$  on väike (sest õhu liikumise kiirus on väiksem kui väljas), toimub juhtmete soojenemine küll intensiivsemalt ja ületemperatuur on kõrgem, kuid lõpp-



Joon. 18. Soojenemiskõver terastraadile  $d=5,86$  mm vahelduvvoolu tugevusel 50 A. Kõver on saadud katseliselt.

temperatuur saabub märksa pikema aja pärast. Tallinna Polütehnilise Instituudi elektrotehnika-laboratooriumis 1946. aastal teostatud katsetel oli näiteks 5,86-millimeetrise läbimõõduga traadi ajakonstant  $T=8,5$  minutit. Seega kulus selle traadi lõpptemperatuuri saavutamiseks vähemalt 40 minutit. Väljas oleks sama traadi ajakonstant ainult 2,7 minutit ja lõpptemperatuur saavutataks juba 14 minutiga. Analoogiline on olukord kogumislattide ja trollijuhtmete juures.

Joonisel 18 on näitena toodud ülalnimetatud 5,86-millimeetrise terastraadi soojenemiskõver, kui traati läbib vahelduvvool tugevusega 50 amprit. Sel joonisel on ühtlasi näidatud ajakonstandi ja lõpptemperatuuri määramine soojenemiskõvera osast.

Kogumislattide kavandamisel tuleb kontrollida, milline soojenemine esineb ka võimalike lühiste puhul. Lühis tohib kesta ainult mõni sekund, sest tugeva voolu tõttu tõuseb juhtme temperatuur väga kiiresti ja võib küündida mitmesaja kraadini. Kui lühis

kestab väga lühikest aega, on väljasiirdunud soojushulk tähtsusetult väike ja kogu soojuseks muutunud võimsus läheb lati temperatuuri tõstmiseks ning valem 14 võtab kuju

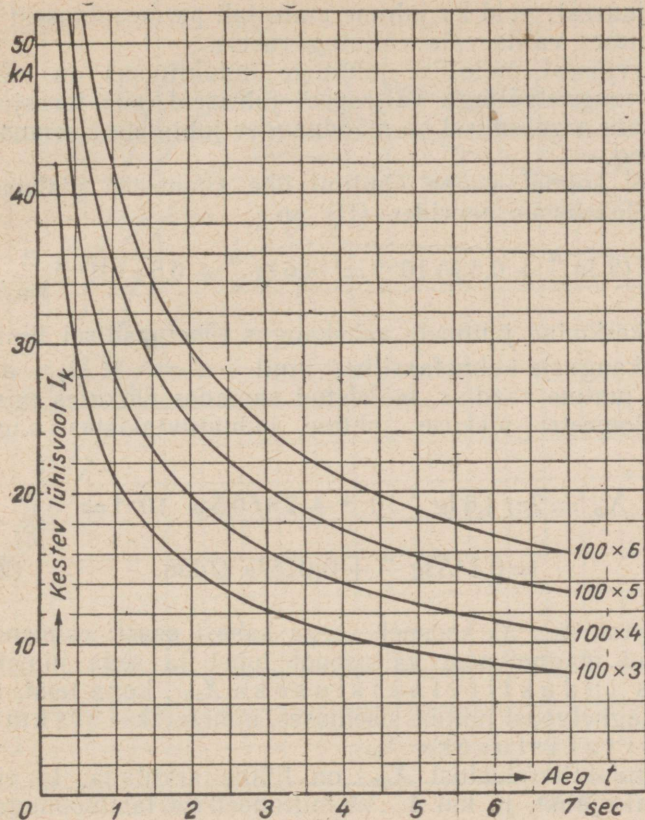
$$I_v^2 R_v dt = Gcd\tau. \quad (26)$$

Kui  $I_v$  ja  $R_v$  oleksid konstantsed, siis temperatuuri tõus sõltuvalt ajast kulgeks sirgjooneliselt, sest  $d\tau/dt$  oleks samuti konstantne. Kuid terasjuhtmete puhul sõltub tegevtaekistus  $R_v$  mitte ainult temperatuurist, vaid ka vahelduvvoolu tugevusest  $I_v$ . Et  $R_v$  ja  $I_v$  ei ole lühise puhul konstantsed, siis kujuneb diferentsiaalvõrrandi lahendamine üpris keeruliseks. Tõsi küll, lühisel esinevate suurte voolutiheduste puhul (tavaliselt üle 10 A/mm<sup>2</sup>) ei erine lamedate teraslattide tegevtaekistus palju oomilisest taekistusest. Näiteks voolutihedusel 10 A/mm<sup>2</sup> on 100×6 mm teraslatti tegevtaekistus oomilisest taekistusest suurem umbes 10% ja voolutihedusel 30 A/mm<sup>2</sup> ainult 1%. Siiski muutub tegevtaekistus suurel määral ja pealegi mitte lineaarselt temperatuuriga (võrdle joon. 3). Seepärast piirdume arvutuse asemel tabeliga 7, milles on toodud lühisvool (kiloamprites), mis soojendab teraslatti kuni 400°, kui

Tabel 7

Lühisvool kiloamprites, mida talub teraslatt teatava aja kestel, kui ta soojeneb kuni 400° C

Lati mõõtmed mm	A e g s e c								
	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	7
16×2	4,5	3,15	2,25	1,6	1,29	1,12	1,01	0,91	0,85
20×2,5	7,0	4,90	3,56	2,46	2,03	1,76	1,56	1,43	1,33
25×2,5	8,85	6,15	4,42	3,07	2,58	2,15	1,93	1,79	1,65
30×3	12,67	8,96	6,26	4,43	3,68	3,20	2,83	2,58	2,37
40×3	16,85	11,90	8,35	5,90	4,92	4,18	3,81	3,44	3,18
50×3	21,1	14,9	10,45	7,38	6,15	5,30	4,66	4,30	4,00
60×3	25,4	17,85	12,7	8,96	7,36	6,25	5,65	5,16	4,75
80×3	33,7	23,8	16,85	11,9	9,7	8,48	7,5	6,88	6,35
100×3	42,2	29,7	21,0	14,85	12,2	10,6	9,35	8,6	7,9
40×4	22,5	15,9	10,2	8,0	6,5	5,65	5,04	4,55	4,25
50×4	28,1	19,9	14,0	9,95	8,1	7,0	6,26	5,78	5,3
60×4	33,7	23,8	16,85	11,9	9,7	8,48	7,5	6,88	6,35
80×4	45,0	31,7	22,5	15,85	12,9	11,2	10,1	9,06	8,5
100×4	56,0	39,8	28,0	19,9	16,2	14,0	12,5	11,5	10,6
50×5	35,0	24,6	17,8	12,3	10,15	8,8	7,8	7,15	6,65
60×5	42,2	29,7	21,0	14,85	12,2	10,6	9,35	8,6	7,9
80×5	56,0	39,8	28,0	19,9	16,2	14,0	12,5	11,5	10,6
100×5	70,0	49,2	35,6	24,6	20,3	17,6	15,6	14,3	13,3
80×6	67,4	47,6	33,7	23,8	19,4	17,0	15,0	13,75	12,7
100×6	84,4	59,4	42,0	29,7	24,4	21,2	18,7	17,2	15,8



Joon. 19. Lühisvool, mida talub 100 mm laiune teraslatt sõltuvalt ajast, kui latt soojeneb kuni  $+400^{\circ}\text{C}$ .

lühis kestab 0,25...7 sekundit. See tabel võimaldab valida sobiva ristlõikega teraslatti, mis taluks esineda võivad lühisvoolu.

Kasutades tabeli 7 andmeid on tarbe korral võimalik joonestada sobivas mõõtkavas millimeetripaberil kõverad, mis võimaldavad hõlpsasti interpoleerimise teel leida vahepealseid suurusid. Joonisel 19 on näitena toodud sellised kõverad teraslattidele laiusel 100 mm.

#### 4. TERASJUHTMETE INDUKTIIVTAKISTUS

Terasjuhtmete induktiivtakistuse määramine vahelduvvoolu korral ei ole just lihtne. Terasjuhtmetega elektriliinil on see iseärasus, et liini induktiivtakistus  $X$  ei sõltu ainult juhtmete mõõtmetest ja kaugusest juhtmete vahel (nagu see esineb värvilisest metallist

juhtmete juures), vaid ka juhtme materjali permeaablusest  $\mu$ , vastavalt juhtmes valitsevale väljatugevusele.

Kui värvilisest metallist juhtmete induktiivsus on määratud peamiselt magnetväljaga väljaspool juhtmeid, siis terasjuhtmete induktiivsuse arvutamisel on mõõduandev juhtmete sisemuses olev magnetvoog.

Ühe- või kolmefaasilise õhuliini ühe kilomeetri pikkuse ühe juhtme induktiivsus henrides (H) on

$$L_o = (2 \ln \frac{a}{r} + 0,5 \mu) 10^{-4} = (4,6 \lg \frac{a}{r} + 0,5 \mu) 10^{-4} \frac{\text{H}}{\text{km}}, \quad (27)$$

kus  $a$  on keskmine juhtmete vahekaugus (ühefaasilisel liinil juhtmete vahekaugus); kolmefaasilisel liinil  $a = \sqrt{a_1 \cdot a_2 \cdot a_3}$ ;  $r = d/2$  on juhtme raadius, mõõdetud samades ühikutes mis  $a$ .

Ühe kilomeetri pikkuse juhtme induktiivtakistus sagedusel  $f = 50$  Hz:

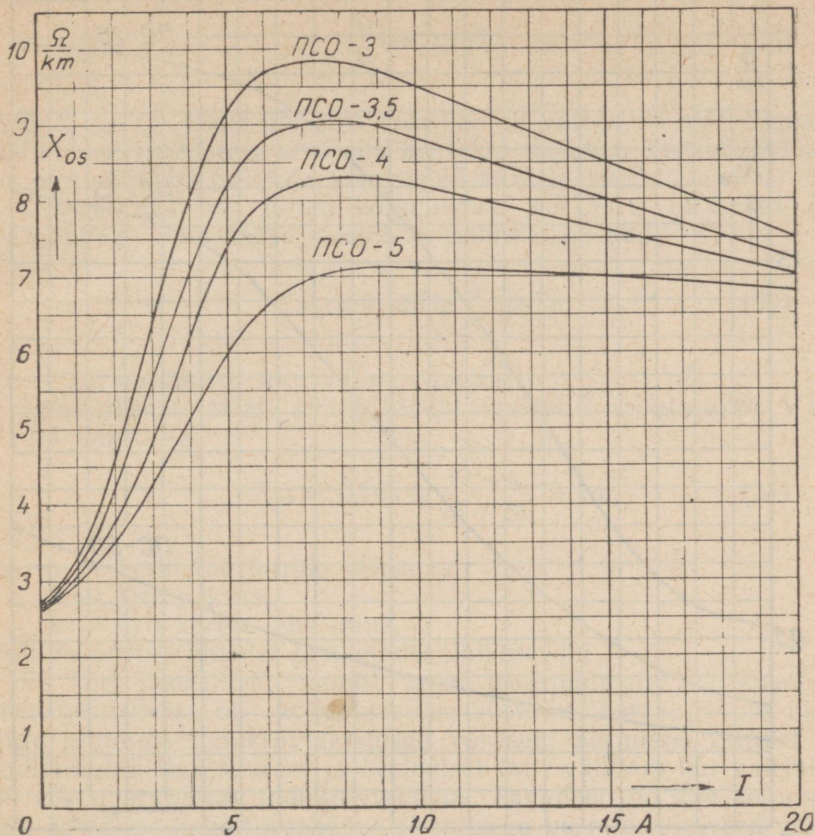
$$\begin{aligned} X_o &= 2\pi f 4,6 \lg \frac{a}{r} 10^{-4} + 2\pi f 0,5 \mu 10^{-4} = \\ &= 0,145 \lg \frac{a}{r} + 0,0157 \mu \quad \Omega/\text{km}. \end{aligned} \quad (28)$$

Induktiivtakistus  $X_o$  koosneb seega kahest osast: esimene neist on tingitud magnetvoost väljaspool juhet ja seda nimetatakse väliseks induktiivtakistuseks  $X_{ov}$ , kuna teist, mis on tingitud magnetvoost juhtme sisemuses, nimetatakse sisemiseks induktiivtakistuseks  $X_{os}$ .

Välist induktiivtakistust  $X_{ov}$  on lihtne arvutada; ta ei sõltu juhtme materjalist, ja kui 4...5-millimeetrise läbimõõduga traatide vaheline kaugus on 40...60 cm, muutub ta piirides 0,276...0,315  $\Omega/\text{km}$ . Sama läbimõõduga terastraatide tegevtaakistus on juonise kohaselt 6,3...11,2  $\Omega/\text{km}$ . Seega moodustab väline induktiivtakistus tegevtaakistusest ainult 2,8...4,4% ja võib paljudel juhtumel tähele panemata jääda.

Sisemine induktiivtakistus  $X_{os}$ , mis vask- või alumiiniumjuhtmeis moodustab ainult mõne protsendi välisest induktiivtakistusest, on terasjuhtmes märksa suurem ja väga keeruline arvutada. See on tingitud esiteks asjaolust, et pinnanähtuse tõttu ei ole voolutihedus juhtmes ühtlane, mistõttu on raske määrata väljatiheduse kulgu juhtme sisemuses; teiseks on raske määrata ka permeaabluse kulgu, mis sõltub terase magnetilistest omadustest. Sisemine induktiivtakistus terasjuhtmeis on pealegi muutuv suurus, sest väljatugevus ja permeaablus sõltuvad ka voolust juhtmes.

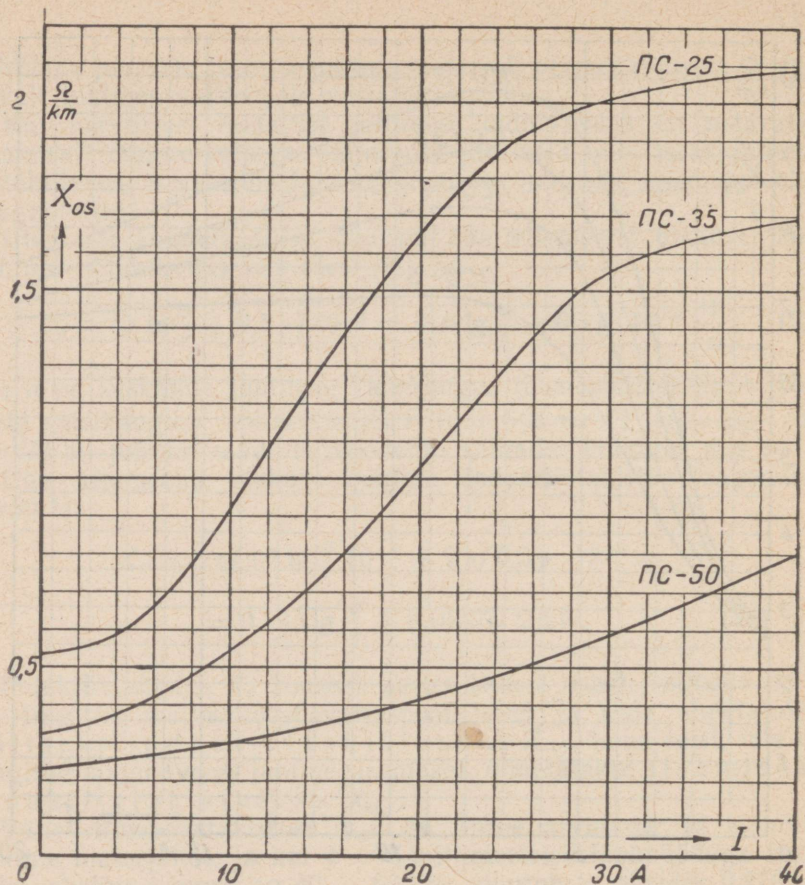
Tegelikult ei jää muud üle, kui terasjuhtmete sisemine induktiivtakistus  $X_{os}$ , samuti ka aktiivtakistus  $R_{ov} = \epsilon R_o$  võtta tabelleist või kõveraist, mis on saadud hoolikate laboratoorsete katsete tulemusena.



Joon. 20. Terastraatide sisemine induktiivtakistus sõltuvalt voolust.

Käesoleva raamatu esimeses väljaandes on toodud üksikasjaline kirjeldus mõõtmistest, mida autor teostas 1945. aasta kevadel Tallinna Polütehnilise Instituudi elektrotehnika-laboratooriumis Tallinna tehastes tõmmatud terasjuhtmete pöörisvooluteguri, tegev- ja induktiivtakistuse määramiseks [1]. Et niisuguseid traate enam ei toodeta, on käesolevas väljaandes toodud ainult standarditega määratud terasest traat- ja köisjuhtmete andmed.

Joonisel 20 on esitatud terastraatide ja joonisel 21 terasköite sisemised induktiivtakistused sõltuvalt vahelduvvoolu tugevusest. Tavaliselt esitatakse need andmed tabelite kujul, kuid siis teeb teatavaid raskusi vahepealsete suuruste leidmine interpoleerimise teel.



Joon. 21. Teras-kõisjuhtmete sisemine induktiivtakistus sõltuvalt voolust.

Umarvarraste, torude, lämedate ja nurk-teraslattide ning rööbaste sisemisi induktiivtakistusi ei ole esitatud, sest need on tihe-  
das seoses tegev-  
takistustega. Üleliidulises Elektrotehnilises Instituudis teostatud katsetega on tõestatud, et sisemise induktiiv-  
takistuse ja tegev-  
takistuse suhe on 0,56 kuni 0,9, kusjuures see suhe sõltub terase süsinikusisaldusest ja voolutihedusest.

Ühel ja samal mõõdukal voolutihedusel ja lati, toru või rööpa väikese süsinikusisalduse korral (nagu seda omab lülitusseadmetes ja trollijuhtmetes kasutatav teras) on sisemise induktiivtakistuse  $X_{os}$  ja aktiivtakistuse  $R_v$  suhe 0,565. s. o.

$$\frac{X_{os}}{R_v} = 0,565. \quad (29)$$

Seega, kui on teada üht liiki takistus, on valemi 29 abil võimalik küllaldase täpsusega arvutada ka teine takistus. Tegevtakistused on aga võimalik määrata jooniste 10 kuni 14 abil.

Ümarvardast või torust kogumislatti väline induktiivtakistus arvutatakse valemi 28 esimese osa abil:

$$X_{ov} = 0,145 \lg \frac{a}{r} \quad \Omega/\text{km}, \quad (30)$$

kus  $r$  on varda või toru väline raadius.

Nelinurkse teraslatti väline induktiivtakistus arvutatakse Volteni valemiga:

$$X_{ov} = 0,145 \lg \frac{\pi a + h}{\pi b + 2h} \quad \Omega/\text{km}, \quad (31)$$

kus  $a$  — keskmine lattide vahemaa,

$b$  — lati paksus,

$h$  — lati kõrgus ehk laius,

kõik mõõdetud ühtedes ja samades ühikutes [3].

Et kogumislattidel, samuti nagu trollijuhtmetel, ei kasutata transpositsiooni, siis kolmefaasilise süsteemi korral ei ole üksikute juhtmete induktiivtakistused võrdsed: äärmistel lattidel on induktiivtakistus suurem ja keskmisel latil väiksem kui valemiga 30 või 31 arvutatav induktiivtakistus. Tavaliselt on aga kogumislattide väline induktiivtakistus sisemisega võrreldes niivõrd väike, et teda üldse ei võeta arvesse, samuti nagu ei võeta arvesse tõsteseadmete trollijuhtmete välist induktiivtakistust.

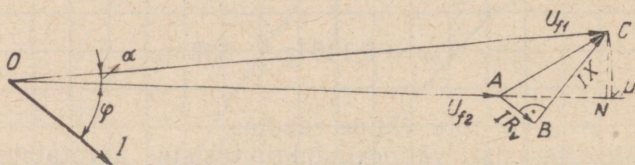
## 5. PINGEMUUTUSE MÄÄRAMINE TERASJUHTMETEGA LIINIS

Alalisvoolu puhul ei tee pingemuutuse arvutamine liini lõpus mingit raskust. Pingete vahe liini lõpus tühijooksul ja koormusel on võrdne pingete algebralise vahega liini alguses ja lõpus ning seda arvutatakse Ohmi seaduse abil:

$$\Delta U = \sum_1^n IR, \quad (32)$$

kus  $R$  on liiniosade takistused ja  $I$  — voolud vastavates liiniosades.

Vahelduvvoolu korral tuleb vahet teha pingelangu ja pingemuutuse vahel. Joonisel 22 on näitena kujutatud faasipinged ja liinivoolud diagrammvektorite abil ühefaasilises süsteemis juhtumi jaoks, kus kogu koormus on koondatud liini lõppu ja tarbija võimsustegur ehk  $\cos\varphi=0,8$ . Nihkenurk  $\varphi$  voolu  $I$  ja pinge  $U_f$  vahel liini lõpus on siis umbes  $37^\circ$ .



Joon. 22. Pingelangu ja pingemuutuse selgitamine diagrammvektorite abil.

Pinget  $\overline{AC}$ , mis on faasipingete  $U_{f1}$  ja  $U_{f2}$  geomeetiline vahe, nimetatakse pingelanguks ühes faasis.  $U_{f1}$  on faasipinge liini alguses (toitepunktis või alajaamas),  $U_{f2}$  — faasipinge tarbija juures; s. o. liini lõpus. Pingete  $U_{f1}$  ja  $U_{f2}$  algebralist vahet, käesoleval juhtumil  $\overline{AD}$ , nimetatakse pingemuutuseks ühes faasis. Punkti  $D$  saame, kui tõmbame kaare raadiusega  $\overline{OC}$  kuni  $\overline{OA}$  pikenduseni. Tarbijat huvitabki mitte pingelang, vaid pingemuutus.

$\overline{AB}$  on pingelangu aktiivkomponent; ta on paralleelne vooluvektoriga  $I$  ja võrdub  $IR_v$ , kus  $R_v$  on ühe juhtme tegevtahtsus (vahelduvvoolule), mis mittemagnetilisest ainest juhtme puhul on peaaegu võrdne ühe juhtme oomilise takistusega  $R$ , mida mõõdetakse alalisvooluga.

$\overline{BC}$  on pingelangu reaktiivne ehk käesoleval juhtumil induktiivne komponent, mis on risti komponendiga  $\overline{AB}$  ja võrdub suurusega  $IX=I \cdot 2\pi fL$ , kus  $f$  on vahelduvvoolu sagedus,  $L$  — ühe juhtme induktiivsus ja  $X$  — ühe juhtme induktiivtakistus.

Erijuhtumil, kui pingelangu suund satub ühte faasipinge  $U_{f2}$  suunaga, on pingete  $U_{f1}$  ja  $U_{f2}$  geomeetiline vahe võrdne samade pingete algebralise vahega ning pingelang võrdub pingemuutusega.

Pingemuutuse  $\overline{AD}$  asemel kasutatakse madalpingevõrkudes arvutamisel tavaliselt suurust  $\overline{AN}$ , mida nimetatakse pingelangu pikikomponendiks  $\Delta U_f$ . Komponenti  $\overline{CN}$ , mis on risti pinge  $U_{f2}$  pikendusega, nimetatakse pingelangu ristikomponendiks.

nendiks  $\delta U_f$ . Komponenti  $\delta U_f$  abil saab arvutada nurka  $\alpha$ , mille võrra liini aktiiv- ja induktiivtakistuse tõttu on pöördunud pingektor:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\overline{CN}}{OA + AN} = \frac{\delta U_f}{U_{f2} + \Delta U_f} \quad (33)$$

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

Vahe pingelangu pikikomponendi ja pingemuutuse vahel on ainult mõni protsent. Pidades silmas, et pingemuutus tohib olla ainult kuni 10% faasipingest, võib küllaldase täpsusega kirjutada:

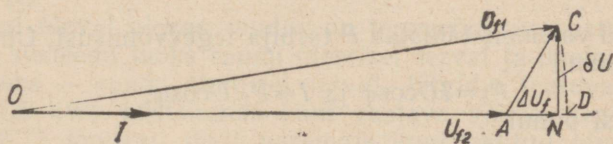
$$U_{f1} \approx U_{f2} + \Delta U_f. \quad (34)$$

Pingemuutus ühe- või kolmefaasilises liinis on tegelikult suurem kui pingemuutus ühes juhtmes, sest on tegemist pingemuutusega kahes või kolmes juhtmes. Pingemuutus ühefaasilises (kahe juhtmega) liinis

$$\Delta U_1 = 2 \cdot \Delta U_f. \quad (35)$$

Pingemuutus kolmefaasilises liinis

$$\Delta U_3 = \sqrt{3} \cdot \Delta U_f. \quad (36)$$



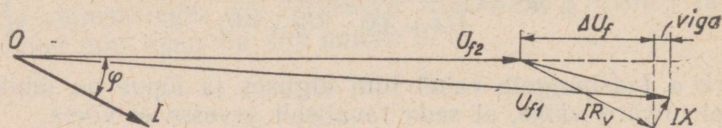
Joon. 23. Pingelang ja pingemuutus aktiivkoormuse puhul.

Juhtumil, kui koormuse võimsustegur võrdub ühega ( $\cos \varphi \approx 1$ ), nagu see on tavaline elektrivalgustuse madalpingeliinides, on pingelangu pikikomponent ühtlasi pingelangu aktiivkomponentiks (joon. 23) ja me võime kirjutada värvilisest metallist ühefaasilise liini puhul

$$\Delta U_1 \approx 2 \sum_1^N IR_v \quad (37)$$

ning kolme faasilise liini korral

$$\Delta U_3 \approx \sqrt{3} \sum_1^n IR_v. \quad (38)$$



Joon. 24. Pingemuutuse ligikaudne määramine.

Väikese ulatusega värvilisest metallist juhtmetega madalpingeliinides on pingelangu reaktiivkomponent tavaliselt neli-viis korda väiksem kui aktiivkomponent. See asjaolu võimaldab pingemuutuse määramisel värvilisest metallist juhtmetega õhuliini puul arvutada tegevtahtusega  $R_v$  ka siis, kui võimsustegur ei ole võrdne ühega (joon. 24). Tekkivat viga võib tarbe korral arvesse võtta korrektsiooniteguri abil. Pingemuutust (pingelangu pikikomponenti) on seega võimalik arvutada ligikaudselt üldiste valemitega:

$$\Delta U_1 \approx 2 \sum_1^{in} IR_v \cos \varphi = 2 \sum_1^n \frac{Il \cos \varphi}{\lambda q} = 2 \sum_1^n \frac{P_1 l}{\lambda q U}; \quad (39)$$

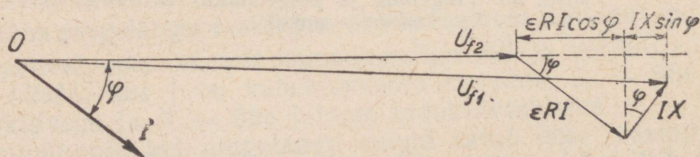
$$\Delta U_3 \approx \sqrt{3} \sum_1^n IR_v \cos \varphi = \sqrt{3} \sum_1^n \frac{Il \cos \varphi}{\lambda q} = \sum_1^n \frac{P_3 l}{\lambda q U}. \quad (40)$$

Ülaltoodud valemis tähistab  $P$  tarbija tegev võimsust. Ühefaasilise süsteemi puhul

$$P_1 = IU \cos \varphi \text{ ja } I = P_1 / U \cos \varphi; \quad (41)$$

kolme faasi puhul

$$P_3 = \sqrt{3} IU \cos \varphi \text{ ja } I = P_3 / \sqrt{3} U \cos \varphi. \quad (42)$$



Joon. 25. Pingemuutuse määramine terasjuhtmetega liinis.

Pingemuutuse arvutamisel terasjuhtmetega õhuliinis on see iseärasus, et juhtme takistus ei sõltu ainult aine erijuhtivusest  $\lambda$ , juhtme ristlõikest  $q$  ja pikkusest  $l$ , vaid ka juhet läbiva

voolu tugevusest. Teiseks on terasjuhtmetega õhuliini induktiivtakistus märksa suurem kui mittemagnetilisest ainekst liini induktiivtakistus ja sisemine induktiivtakistuse suurus sõltub samuti voolust.

Puhtaktiivse koormuse korral (hõõglambid, soojendusriistad) ei ole terasjuhtmete puhul ka sisemisel induktiivtakistusel määravat tähtsust pingemuutuse arvutamisel, rääkimata välisest induktiivtakistusest. Kui aga koormus on induktiivse iseloomuga (asünkroonmootorid, luminescentsvalgustus), siis tuleb pinget vähegi täpseks määramiseks liini lõpus paratamatult arvesse võtta liini induktiivtakistus.

Pingemuutuse määramiseks terasjuhtmetega ühe- või kolme-faasilises liinis on koostatud nomogramm (joon. 26) järgmise põhimõtte kohaselt.

Potentsiaalide vahe ehk pingemuutus ühes juhtmes  $\Delta U_f$  koosneb kahest osast: pingelangu aktiivkomponendi projektsioonist  $U_{f2}$  pikendusele, mis võrdub  $\varepsilon RI \cos \varphi$ , ja pingelangu reaktiivkomponendi projektsioonist samale joonele —  $IX \sin \varphi$  (joon. 25). Seega pingemuutus ühes juhtmes

$$\begin{aligned} \Delta U_f &= \Delta U_a + \Delta U_r = \varepsilon RI \cos \varphi + IX \sin \varphi = \\ &= \frac{\varepsilon l}{\lambda q} I \cos \varphi + X_0 I \sin \varphi. \end{aligned} \quad (43)$$

Pingemuutuse komponentide määramiseks on vaja eeskätt leida vool  $I$ . Teades tarbija võimsust, võib voolu arvutada valemi 41 või 42 abil, kuid seda saab teha ka graafiliselt, nagu on näidatud joonisel 26.

Vasakul üleval olevas ruudus on tegev võimsuse astmik kolme-faasilise süsteemi jaoks ruudu ülemisel serval ja ühefaasilise süsteemi jaoks — ruudu alumisel serval. Jälgides teatavat võimsust (näitel 1,5 kW) püstsuunas kuni vastava võimsusteguri (näitel  $\cos \varphi = 0,7$ ) jooneni, sealt paremale kuni valitud pinget jooneni (näitel 380 V) ja viimaselt alla kuni keskmise alumise ruudu ülemisele servani, saamegi otsitava voolu 3,25 A.

Järgmiseks ülesandeks on korrutise  $\frac{\varepsilon}{\lambda q} I$  määramine. Joonisel 26 minnakse selleks voolu astmikult alla vastava läbimõõdu või ristlõikega terasjuhtme kõverani (näitel ПСО-4), mis suundub alt vasakult paremale üles.

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

Siis määratakse pingelangu aktiivkomponendi projektsioon  $\frac{\varepsilon l}{\lambda q} I \cos \varphi$ . Tulles liini pikkuse joonelt, pööratakse tarbija võim-

susteguri sirgelt (käesoleval juhtumil  $\cos \varphi = 0,7$ ) paremale või vasakule vastavalt sellele, kas on tegemist ühe- või kolmefaasilise süsteemiga, et lugeda astmikult pingemuutuse aktiivkomponendi osa voltides (näitel 8,5 V). Astmikul saame pingemuutused ühes juhtmes, korrutatud teguriga 2 või  $\sqrt{3}$  vastavalt valemitele 35 ja 36.

Pingelangu reaktiivkomponendi projektsiooni  $X_0 I \sin \varphi$  määramiseks väljume jällegi võimsusest  $P$  või juba määratud voolust  $I$  ja leiame kõigepealt  $X_0 I$ . Selleks siirdume vooluastmikult alla kuni vastava juhtme induktiivtakistuse kõverani (näitel ПСО-4), mis kulgeb ülevalt vasakult paremale alla (keskmises alumises ruudus).

Korrutise  $X_0 I$  määramiseks jälgime horisontaalset joont vasakule kuni liini pikkuse sirgeni (näitel 150 m).

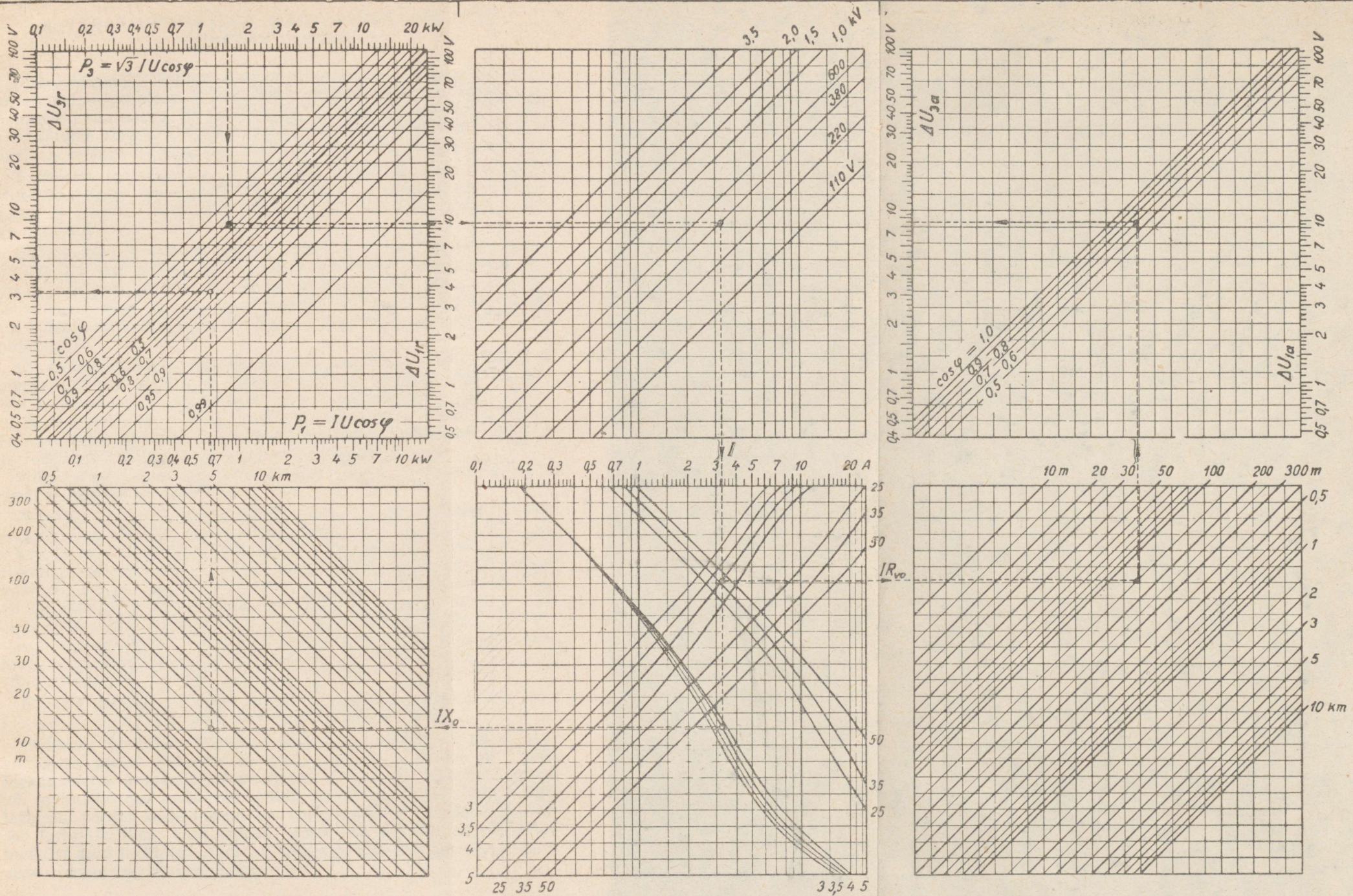
Et määrata pingelangu reaktiivkomponendi projektsiooni, läheme pikkuse joonelt üles kuni vastava  $\sin \varphi$ -jooneni (näitel on mindud  $\sin \varphi$ -jooneni, mis vastab  $\cos \varphi = 0,7$ -le) allpool ruudu diagonaali, et siis pöörduda kas paremale või vasakule vastavalt sellele, kas on tegemist ühe- või kolmefaasilise liiniga, ja lugeda astmikult otsitav suurus voltides (näitel 3,2 V).

Üldise pingemuutuse saame leitud pingemuutuse aktiiv- ja reaktiivkomponentide liitmisel.

Olgu tähendatud, et joonisel 26 kujutatud nomogramm on koostatud vastavalt standarditud terasjuhtmete omadustele temperatuuril  $+20^\circ \text{C}$ , kusjuures väliseks induktiivtakistuseks on võetud keskmine suurus  $0,35 \Omega/\text{km}$ .

Praktikas võib aga olla tegemist terastraatidega, millede omadused standarditud väärtustest mõnevõrra erinevad. Sel juhul on terastraatidega liinide pingemuutuse määramine võimalik ainult ligikaudselt. Kuid kasutades nomogrammi (joon. 26) on siiski võimalik saada selget kujutlust, missuguses suuruseastmes asub otsitav suurus. Muidugi kui mõne juhtme kohta on teada kindlad andmed, on neid võimalik ära kasutada, kandes nomogrammi alumisse keskmisse ruutu vastavad abikõverad, ja saada seega juba märksa täpsemad tulemused.

Nomogrammi kasutamise ulatust saab soovi korral meelevaldselt suurendada, sest kõik astmikud on tehtud logaritmilises mõodus. Seejuures tuleb siiski meeles pidada, et voolu astmikku ei tohi muuta, sest sellega on seotud tegev takistuste ja induktiivtakistuste kõverad. Kui on näiteks tegemist pingega 15 kV, siis tuleb ülemises keskmises ruudus kasutada 1500 V sirget ja võimsuse astmikudes (ülemises vasakus ruudus) lugeda 10 korda suuremat võimsust. Kui liini pikkuse (alumises paremas või vasakus) ruudus ei leidu vajalikku pikkust, siis tuleb võtta  $n$  korda suurem või väiksem pikkus. On loomulik, et ka pingemuutuse astmikul saame siis  $n$  korda suurema või väiksema väärtuse.



Joon 26. Nomogramm pingemuutuse määramiseks terasjuhtmetega ühe- või kolmefaasilises liinis.

## 6. TERASJUHTMETEGA MADALPINGE-ÕHULIINI LUBATAV ULATUS

Terasjuhtmetest õhuliini ulatuse selgitamisel on tegemist peamiselt kolme probleemiga: lubatava pingemuutuse, energiakao ja lühisvoolu suurusega. Et neid küsimusi selgitada meie olude kohaselt, võtame aluseks tüüpilise skeemi, mis esineb meil põllumajanduslikes elektrivõrkudes, kus kasutatakse peamiselt terasjuhtmeid.

Tavaliselt paikneb küla või majand, mida tahetakse varustada elektrienergiaga, piki teed. Seejuures ei asu pered igakord lähetikku, vaid on tavaliselt ümbritsetud aiaga või nende vahel on kogu põllud.

Elektrivõrgu projekti koostamisel püütakse võimalust mööda paigutada alajaam tarbijate koormuse keskpunkti lähedale, et pingemuutus ja energiakadu oleksid minimaalsed. Alajaamast tõmmatakse siis kolmefaasilised magistraalid, milledest hargnevad ühe- või kolmefaasilised haruliinid üksikute tootmishooneteni või majapidamisteni.

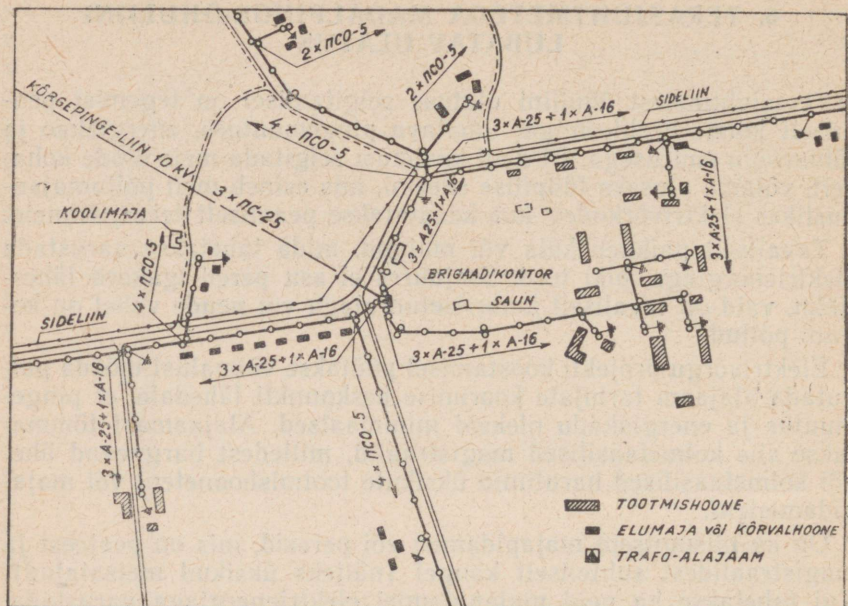
On ka niisuguseid majapidamisi või peresid, mis on peateest ja magistraalidest suhteliselt kaugel (näiteks üksikud metsatalud). Kui tahetakse ka neid majapidamisi elektrienergiaga varustada, tuleb neile ehitada eri liin, tavaliselt ühefaasiline. Elektriliini ehitamine eraldi asetseva majapidamise jaoks on suhteliselt kulukas ja seepärast tehakse seda tavaliselt teises järjekorras.

Olukord on seega tavaliselt sarnane sellega, mida on skemaatiliselt kujutatud joonisel 27.

Asjaolu, et maksimaalne pingemuutus liini kõige kaugemas punktis ühtlaselt jaotatud koormuse puhul on ka 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 joonistel 28 kuni 31 kujundatud ülekantavad võimsused mitmesuguste terasjuhtmetega õhuliinides sõltuvalt ülekande ulatusest, kui maksimaalne pingemuutus on 10% (s. o. 22 või 38 V vastavalt sellele, kas liinipingeline on 220 või 380 V).

Erineva lubatava pingemuutuse juures on ulatused võrdelised protsentuaalse pingemuutusega.

Ühtlaselt jaotatud koormuse korral on samade ülekantavate võimsuste puhul ülekande ulatused kahekordsed, võrreldes ülekannetega keskendatud koormuse puhul. Kui majapidamised või tootmishooned asetsevad eraldi, on maksimaalne pingemuutus tarbijani võrdne keskendatud koormuse pingemuutusega, mis asetseb tarbijaterühma keskpunktis, pluss pingemuutus sellest keskpunktist kuni tarbijani, mille võimsuse ja kauguse korrutis (võimsuse moment) on maksimaalne.



Joon. 27. Tüüpiline madalpinge-jaotusvõrgu skeem põllumajanduses.

Ulatusi 10-protsendilise pingemuutusega on uuritud kahe tüüpilise olukorra jaoks: kui võimsustegur võrdub 1-ga või on 0,7. Esimese olukorra puhul, mis esineb ainult elektrivalgustus- ja soojenduskoormusel, on tegemist ainult pingelangu aktiivkomponendiga. Teine juhtum on iseloomulik osaliselt koormatud asünkroonmootorite koormusele, mispuhul pingemuutuse aktiiv- ja reaktiivkomponendid omavad peaaegu võrdset tähtsust.

Mõlemad olukorrad on kujutatud eraldi kolmefaasilise ja ühefaasilise ülekandesüsteemi jaoks. Värvilisest metallist juhtmete puhul oleks olnud võimalik läbi ajada ühe kõverate parvega, kus kõik kõverad on pealegi hüperboolid, kui valida kolme või ühe faasi korral erinev võimsuseastmik. Terasjuhtmete puhul aga seda teha ei saa, sest tegev- ja induktiivtakistused ise sõltuvad mitte ainult juhtme ristlõikest, vaid ka voolust liinis. Ühe ja sama võimsuse ja pinge puhul on aga ühefaasilises süsteemis voolu tugevus teistsugune kui kolmefaasilises süsteemis. Terasjuhtmetest õhuliini! esineva võimsuse graafiline kujutis ei ole täpselt hüperbool, vaid ainult hüperboolitaoline kõver.

Vaatleme nüüd, kuidas on lugu võimsuskogaga (soojuseku muundunud elektrivõimsusega) terasjuhtmetest õhuliinis.

Võimsuskao määrab pingelangu aktiivkomponenti põhjustav tegevtakistus  $R_{\sigma} = \epsilon R$ . Valemi 8 kohaselt on võimsuskadu üldiselt  $\Delta P = \epsilon R I^2$ . Ühe faasi puhul on  $\Delta P_1 = 2\epsilon R I^2$ , kus  $R = l/\lambda q$  on ühe juhtme oomiline takistus ja  $I = P_1/U \cos \varphi$  — vool juhtmes.

Võimsuskadu ühefaasilises liinis on seega

$$\Delta P_1 = \frac{2 \epsilon l P_1^2}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \text{ W} \quad (44)$$

ja suhteline ehk protsentuaalne võimsuskadu  $p_1$  ühefaasilises terasjuhtmetega õhuliinis

$$p_1 = \frac{\Delta P_1}{P_1} 100 = \frac{200 \epsilon l P_1}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \% \quad (45)$$

Võimsuskadu kolmefaasilises liinis

$$\Delta P_3 = 3 \epsilon R I^2 = \frac{3 \epsilon l P_3^2}{3 \lambda q U^2 \cos^2 \varphi} = \frac{\epsilon l P_3^2}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \text{ W} \quad (46)$$

ja protsentuaalne võimsuskadu kolmefaasilises terasjuhtmetega õhuliinis:

$$p_3 = \frac{\Delta P_3}{P_3} 100 = \frac{100 \epsilon l P_3}{\lambda q U^2 \cos^2 \varphi} \% \quad (47)$$

Protsentuaalset võimsuskadu on lihtne arvutada protsentuaalse pingemuutuse aktiivkomponenti osast. Eespool leidsime (valem 43), et pingemuutuse aktiivkomponenti osa ühes juhtmes

$$\Delta U_a = \epsilon R I \cos \varphi.$$

Et ühefaasilises süsteemis

$$I \cos \varphi = \frac{P_1}{U}$$

ja kolmefaasilises süsteemis

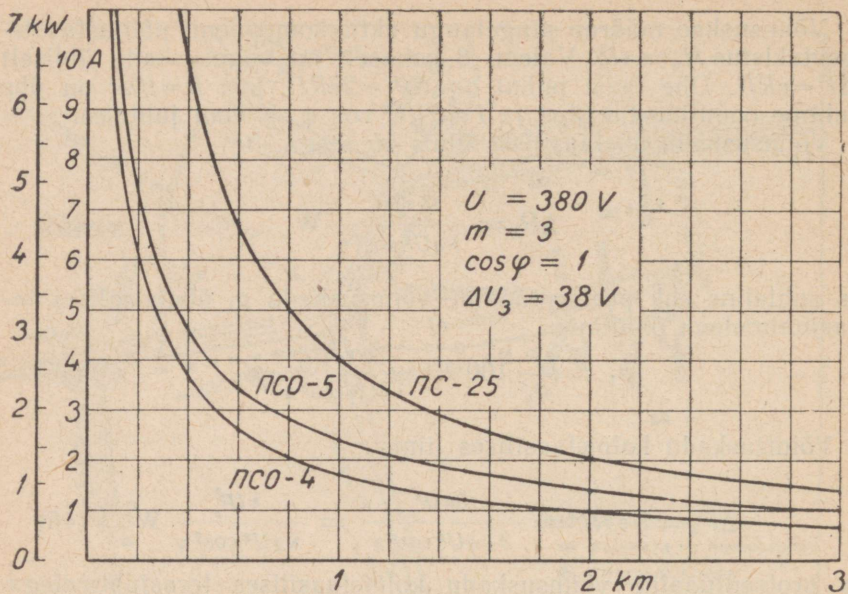
$$I \cos \varphi = \frac{P_3}{\sqrt{3} U}$$

ning pidades silmas valemeid 35 ja 36, võime kirjutada, et pingemuutuse aktiivkomponent ühefaasilises süsteemis

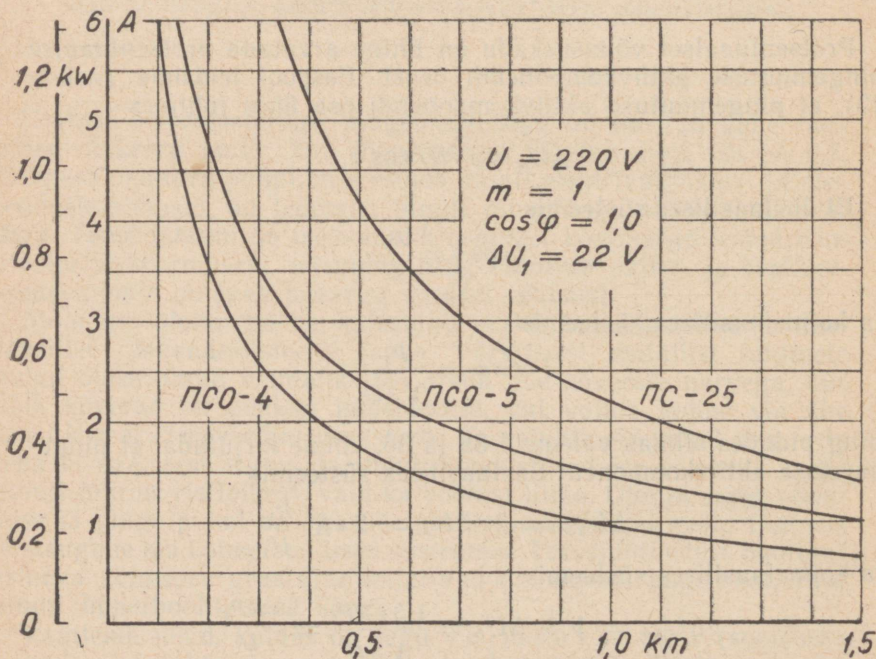
$$\Delta U_{1a} = 2 \Delta U_a = 2 \epsilon R \frac{P_1}{U}$$

ja kolmefaasilises süsteemis

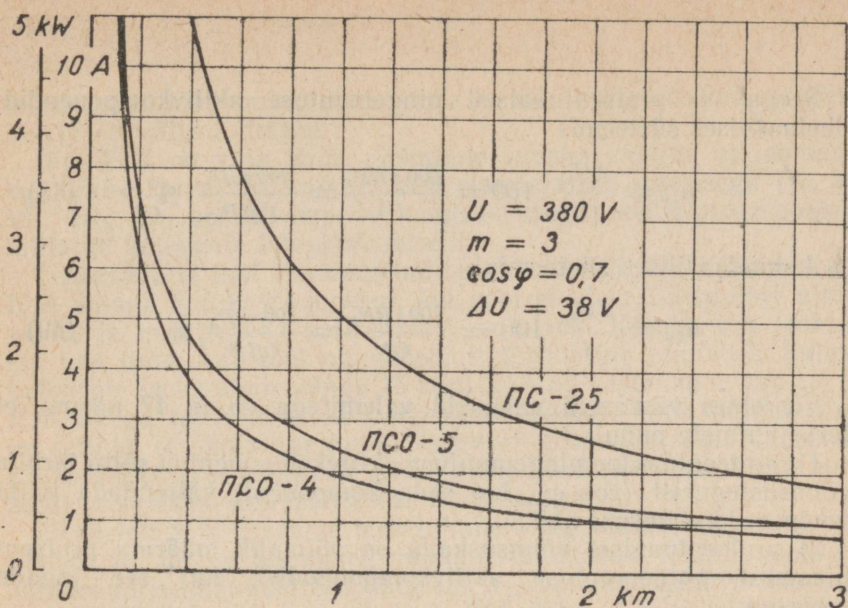
$$\Delta U_{3a} = \sqrt{3} \Delta U_a = \frac{\sqrt{3} \epsilon R P_3}{\sqrt{3} U} = \frac{\epsilon R P_3}{U}$$



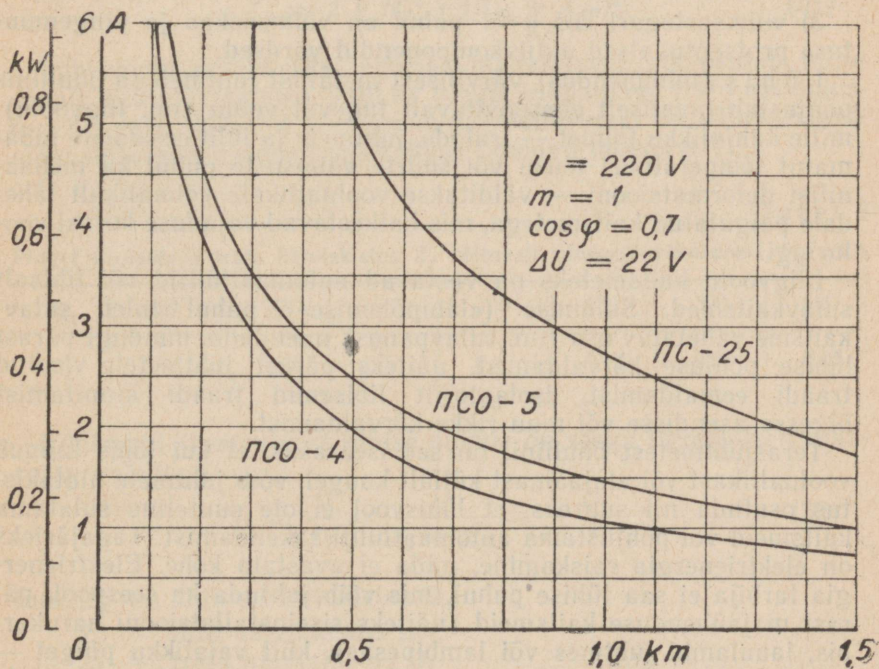
Joon. 28. Ülekande ulatus kolmefaasilise keskendatud koormusega terasjuhtmetest liini lõpus (pinge  $U=380 V$ ,  $\cos \varphi=1$ , pingemuutus 10%).



Joon. 29. Ülekande ulatus ühefaasilise keskendatud koormusega terasjuhtmetest liini lõpus (pinge  $U=220 V$ ,  $\cos \varphi=1$ , pingemuutus 10%).



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



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

Seega on protsentuaalsed pingemuutuse aktiivkomponendid: ühefaasilises süsteemis

$$u_{1a} = \frac{\Delta U_{1a}}{U} 100 = \frac{200 \varepsilon R P_1}{U^2} = \frac{200 \varepsilon I P_1}{\lambda q U^2} \% \quad (48)$$

ja kolme faasilises süsteemis

$$u_{3a} = \frac{\Delta U_{3a}}{U} 100 = \frac{100 \varepsilon R P_3}{U^2} = \frac{100 \varepsilon I P_3}{\lambda q U^2} \% \quad (49)$$

Võrreldes viimaseid valemeid valemitega 45 ja 47 näeme, et terasjuhtmete puhul:

1) protsentuaalne pingemuutuse aktiivkomponent ei sõltu tarbija võimsustegurist ( $\cos \varphi$ ), kui seda komponenti väljendada mitte voolu, vaid võimsuse abil;

2) protsentuaalset võimsuskadu on võimalik määrata protsentuaalsest pingemuutuse aktiivkomponendist, kui see jagada  $\cos^2 \varphi$ -ga:

$$p_1 = \frac{u_{1a}}{\cos^2 \varphi} \text{ ja } p_3 = \frac{u_{3a}}{\cos^2 \varphi}; \quad (50)$$

3) võimsusteguri  $\cos \varphi = 1$  puhul on võimsuskao ja pingemuutuse protsentuaalsed aktiivkomponendid võrdsed.

L ü h i s (lühiihendus) värvilisest metallist juhtmetega õhuliinis põhjustab tavaliselt ebasoovitavalt tugevat voolu (nn. liigvoolu), mille kahjulikku toimet — trafode, juhtmete ja lülitusseadiste lubamatut temperatuuri tõusu või suurte võimsuste puhul ka mehaanilist deformatsiooni — välditakse vooluallikale võimalikult lähedale paigutatud kaitsmetega, mis katkestavad vajaduse korral vooluringi.

Liigvoolu kaitsmeteks on vastavad automaatlülitid või lihtsalt sulavkaitsmed. Sulamise («läbipõlemise») puhul tuleb sulavkaitsme vahetatav osa (nn. sulavpanus) uuendada, muidugi pärast lühise põhjuse kõrvaldamist, näiteks pärast juhtmetele visatud traadi eemaldamist, isolaatorilt libisenud traadi kinnitamist õigesse asendisse või muu rikke kõrvaldamist.

Terasjuhtmetest õhuliinil on see iseärasus, et kui lühis toimub vooluallikast või alajaamast küllalt kaugel, võib juhtmete üldtakistus osutada nii suureks, et lühisvool ei ole suuteline sulatama kaitsmeid või põhjustama automaatlüliti rakendamist. Tagajärjeks on elektrienergia raiskamine, mida ei avastata kohe. Elektrienergia tarbija ei saa lühise puhul, mis võib juhtuda ka seespool, pärast majaühenduse kaitsmeid (näiteks siseinstallatsiooni harukarbis, laualambi juhtmes või lambipesas), küll vajalikku pinget — hõõglambid selle tagajärjel ei «põle» enam —, kuid ta ei suuda iga kord aimata rikke põhjust, pealegi kui tarbija kaitsmed on

terved, sest hõõglambid ei valgusta ka siis, kui elektriliin on meelevaldselt välja lülitatud.

Järelikult on vaja leida niisugune suurim kaugus alajaamast, kus lühise korral vool ulatub veel standarditud suurusega (4-, 6-, 10-, 15-, 20- või 25-amprise nimisuurusega) madalpinge-poolle lülitatud kaitsmete läbisulatamiseni.

Teatavasti ei tohi standarditud sulavkaitsmed nimivooluga kuni 10 A sulada ühe tunni jooksul, kui vool ei ületa 1,5-kordset nimivoolu, ja nad peavad katkestama vooluringi lühema aja jooksul kui üks tund, kui vool on vähemalt 2,1-kordne nimivool. Sulavkaitsmete jaoks nimivooluga 15 kuni 25 A on vastavad arvud 1,4 ja 1,75. Seega tuleb leida liini niisugune pikkus, mille näivtakistus on selline, et nimipingega puhul kujuneks vool alajaamas vähemalt 2,1-kordseks (või vastavalt 1,75-kordseks kaitsmete puhul 15 kuni 25 A), võrreldes sulavkaitsmete nimivooluga.

Joonistelt 8 ja 9 saame terasjuhtmete tegevtahtused ning joonistelt 20 ja 21 sisemised induktiivtahtused teatud vooluga. Juhtme väliseks induktiivtahtuseks  $X_{ov}$  võtame keskmise suuruse, mis esineb kahe juhtme vahel, — 0,35  $\Omega/\text{km}$ . Seega leiame näivtahtuse  $Z_o$  vahelduvvooluliini ühe kilomeetri pikkuse lõigu kohta valemist

$$Z_o = 2 \sqrt{R_v^2 + (X_{os} + X_{ov})^2}. \quad (51)$$

Lühisvoolu määravaks teguriks madalpingeliinis osutub mitte ainult liini näivtahtus, vaid ka pinget madaldava trafo näivtahtus  $Z_t$ , mis sõltuvalt trafo nimi-näivvõimsusest on «Elektriseadmete ehituseeskirjade» I osa kohaselt toodud tabelis 8 [11],

Tabel 8

Pinget madaldava trafo näivtahtus  $Z_t$  sõltuvalt nimi-näivvõimsusest  $P_n$  kVA

$P_n$	20	30	50	100	180	320	560
$Z_t$	0,97	0,72	0,51	0,17	0,12	0,08	0,05

Lühisvool (kestev vool lühise puhul) on seega ligikaudselt määratav valemiga

$$I_k \approx \frac{U}{Z_Y} = \frac{U}{Z_l + Z_t} = \frac{U}{lZ_o + Z_t}, \quad (52)$$

kus  $Z_Y$  on üldine näivtahtus  $\Omega$ ,

$Z_l$  — liini näivtahtus  $\Omega$ ,

$Z_t$  — trafo näivtahtus  $\Omega$ ,

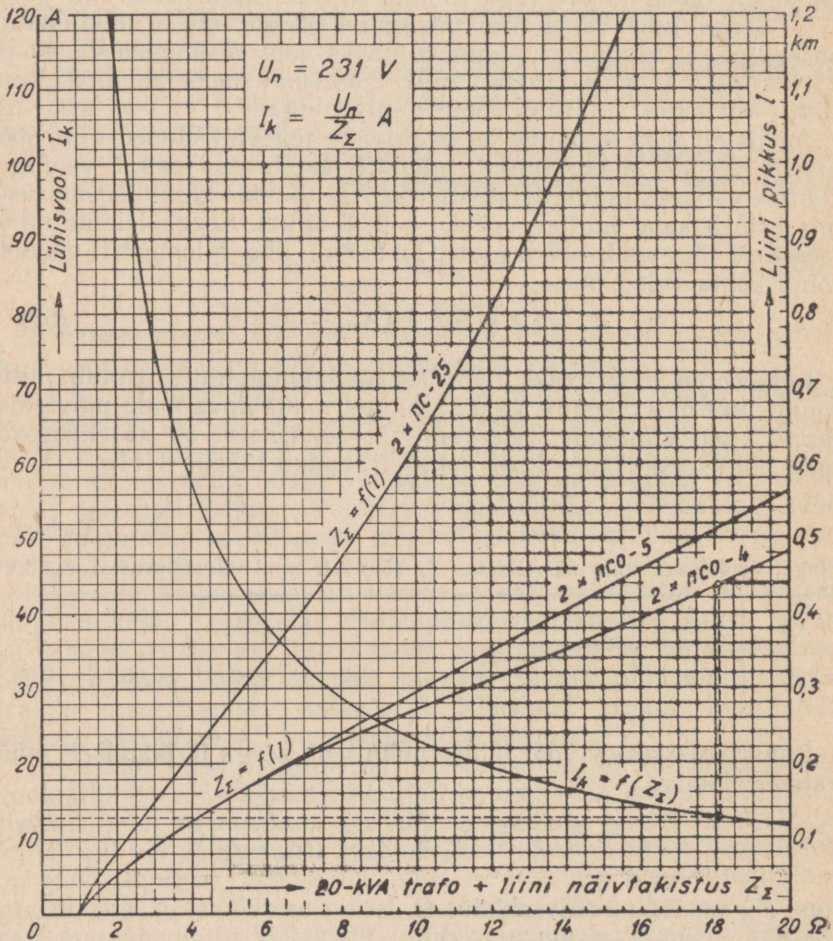
$l$  — liini pikkus km,

$Z_o$  — ühe kilomeetri pikkuse liini näivtahtus  $\Omega/\text{km}$ .

Lühise kaugus alajaamast  $l$ , millel madalpinge-polele lülitatud kaitsmed sulavad vooluga  $I_k$ , on seega arvutatav valemist 52, kui avaldame liini pikkuse

$$l \approx \frac{U - I_k Z_l}{I_k Z_0} \quad (53)$$

Lühisvoolu otsene arvutamine valemist 52 ei ole võimalik, sest liini näivtakistus  $Z_l$  ise sõltub voolust. Seepärast on otstarbekohane



Joon. 32. Nomogramm lühisvoolu määramiseks ühefaasilise lühise puhul (faasisuhtme ja nulljuhtme vahel), kui alajaama näivvõimsus on 20 kVA ja pinge alajaamas 231 V.

arvutada valitud vooludele  $I^*$  liini pikkus  $l$  valemi 53 kohaselt ja kanda saadud andmed koordinaatteljestikku, nagu see on tehtud joonisel 32, kusjuures trafo näivvõimsus on 20 kVA, tegemist on ühefaasilise lühisega (faasijuhtme ja nulljuhtme vahel) ja pinge alajaamas on 231 V. Ühefaasiline lühis on käesoleval juhtumil kõige ebasoodsam, sest ta limiteerib kõige rohkem liini pikkust.

Joonisel 32 toodud graafiku abil on hõlpus määrata ka maksimaalset kaugust alajaamast, millel madalpinge-poolele lülitatud sulavkaitsmed reageerivad ühefaasilise lühise puhul. Kui lühis tekib kahe faasijuhtme vahel, siis on maksimaalsed kaugused  $\sqrt{3}$  korda suuremad.

Joonist 32 saab kasutada ka siis, kui trafo nimi-näivvõimsus ei ole 20 kVA, võttes arvesse tabelis 7 toodud trafo näivtakistuse andmed. Suurema trafo puhul on ka lühisvool tugevam.

Kui võrrelda terasjuhtmetega õhuliini ulatust piiravaid tegureid, siis selgub, et võimsusteguri  $\cos \varphi < 1$  puhul limiteerib liini ulatust kõige rohkem võimsuskadu,  $\cos \varphi = 1$  puhul samal määral ka pingemuutus ning kõige vähem lühisvool. Kui lubada võimsuskadu või pingemuutust rohkem kui 10%, võib terasjuhtmetega õhuliini ulatust piiravaks teguriks kujuneda ka lühisvool.

## 7. TERASJUHTMETE TUGEVUSE ARVUTUS JA RIPPEKÕVERAD

Mehaanilisest tugevusest ja ohutusest lähtudes esitavad kehtivad «Elektriseadmete ehituseeskirjad» erinevaid nõudeid õhuliinidele pingega kuni 1000 V ja õhuliinidele pingega üle 1000 V, kusjuures tehakse vahet asustatud, asustamata ja raskelt juurdepääsetavate kohtade vahel [13].

Asustatud kohaks loetakse eeskirjade kohaselt linnade, asulate, külade, tööstusettevõtete, sadamate, raudteejaamade, avalike parkide ja puisteede maa-alad nende arengu reaalses perspektiivsetes piirides.

Asustamata kohaks on hoonestamata alad, kuigi seal tihti viibivad inimesed ning kuhu pääsevad ligi veokid ja põllumajandusmasinad. Juurvilja- ja viljapuuaiad ning üksikute hõredasti paiknevate hoonete ja ajutiste ehitistega maa-alad loetakse samuti asustamata kohtadeks.

Raskelt juurdepääsetavaks kohaks nimetatakse maa-ala, kuhu ei pääse veokid ega põllumajandusmasinad.

Terasest traatjuhtme lubatud minimaalseks läbimõõduks madalpinge-õhuliinis või selle harus on 3 mm; kõrgepinge-õhuliinis pingega kuni 35 kV, kui ta kulgeb asustamata kohas, on terastraadi lubatud minimaalseks läbimõõduks 3,5 mm. Asustatud kohtades ja ristumisel teedega, sideliinide või teiste õhuliinidega on kõikides

õhuliinides pingega üle 1000 V lubatud kasutada ainult köisjuhtmeid, terasest juhtmete puhul minimaalse ristlõikega 25 mm<sup>2</sup>.

Terastraatide maksimaalseks läbimõõduks õhuliinides pingega kuni 1000 V on 5 mm, pingega üle 1000 V — 6 mm. Nagu näitavad vastava arvutused, ei ole suurema kui 5-millimeetrise läbimõõduga terastraatide kasutamine madalpinge-õhuliinides majanduslikult õigustatud. 6-millimeetrise läbimõõduga terastraat kaalub 5-millimeetrise läbimõõduga traadist 44% rohkem, kuid ta kasutamise ulatus lühise seisukohast suureneb keskmiselt umbes 20% ja lubatava pingemuutuse seisukohast keskmiselt ainult 10%. Suurema kui 5-millimeetrise läbimõõduga terastraat on pealegi liiga jäik ja seepärast pole 6-millimeetrist läbimõõtu viimases standardis ette nähtud. 5-millimeetrise traadi ristlõige on 19,64 mm<sup>2</sup>. Kui on vaja suuremat ristlõiget, tulevad kõrgepinge-õhuliinides kõne alla eeskätt terasest köisjuhtmed ja madalpinge-õhuliinides alumiiniumist või vasest köisjuhtmed.

Terastraate ei lubata kasutada kaitsejuhtmeks välgu vastu; selleks kasutatakse ainult terasest köisjuhtmeid vähemalt 35-ruutmillimeetrise ristlõikega.

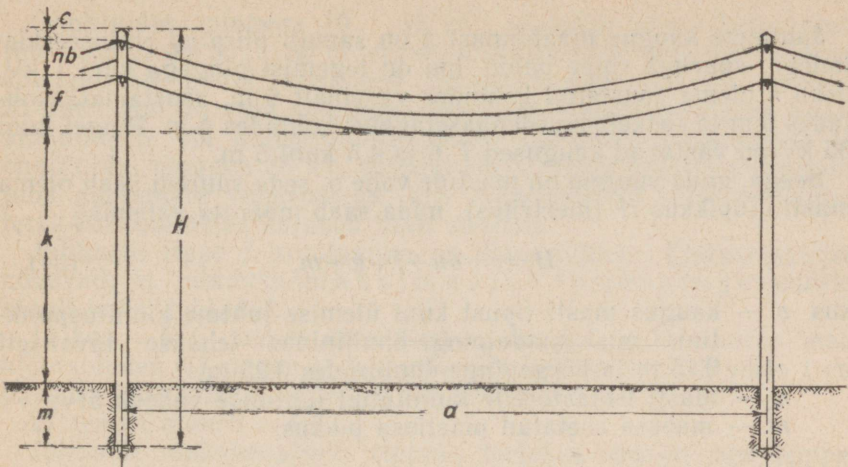
Terastraatide tõmbetugevus peab olema vähemalt 55 kp/mm<sup>2</sup>, teraskõite oma vähemalt 65 kp/mm<sup>2</sup>. Elektriseadmete ehituseeskirjad nõuavad, et asustamata kohtades oleks mehaanilise tugevuse varu  $v a r u t e g u r$  terastraatide puhul vähemalt 2,5 ja teraskõite korral vähemalt 2.

Asustatud kohtades ja sideliini, trami ning trollibussi kontaktjuhtmetega ristumisel peab kõikide kuni 25-ruutmillimeetrise ristlõikega terasjuhtmete varutegur olema suurem; vähemalt 2,5. Suurema kui 25-ruutmillimeetrise ristlõikega köisjuhtmete varutegur võib eeskirjade kohaselt olla võrdne 2-ga.

Tegelikult kasutatakse asustatud kohtades ja ristumistel terastraatide puhul varutegurit vähemalt 3 või veel suuremat, kui tahtakse kasutada ka asustatud kohtades ja ristumistel isolaatoreid konksudel või soovitakse suurendada liini töökindlust.

Kuna Eesti NSV asub II kliimaatilises rajoonis, siis lubatakse meil  $t e r a s t r a a t i d e$  ПСО-4 ja ПСО-5 ning köisjuhtme ПС-25 puhul maksimaalset tõmbepinget 22 kp/mm<sup>2</sup> asustamata kohtades ja ümmarguselt 18 kp/mm<sup>2</sup> asustatud kohtades ja ristumistel. Köisjuhtmete ПС-35 ja ПС-50 korral on nii asustatud kui ka asustamata kohtades lubatud kasutada maksimaalset tõmbepinget 32,5 kp/mm<sup>2</sup>, kuid nimetatud juhtmete puhul kasutatakse ka väiksemat maksimaalset tõmbepinget, tavaliselt 20 kp/mm<sup>2</sup>, et ei tuleks ehitada väga tugevaid maste.

Terasjuhtmete  $v i s a n g u d$  (kinnituskohdade horisontaalsed kaugused) ei ole kehtivate ehituseeskirjadega piiratud. Tegelikult aga võetakse sirgel liinil terastraatide visanguks ainult 40...50 m; seda kaugust vähendatakse, kui liinid ületavad teid ja sidejuhtmeid. Põhjuseks on asjaolu, et mida suurem on visang  $a$  (joon. 33),



Joon. 33. Õhuliini masti pikkuse määramine.

seada suurem peab esiteks olema juhtmete vertikaalne kaugus üksteisest  $b$ , et ühele ja samale mastile kinnitatud juhtmed ei puutuks tuules ja tormis kokku. Madalpingeliinidel tehakse tavaliselt  $b \geq 0,4$  m. Visangul  $a=40$  m tuleb meie oludes soovitavaks pidada  $b=0,4$  m ja visangul  $a=50$  m,  $b=0,5$  m. Kõrgepingeliinides soovivad ehituseeskirjad minimaalse vertikaalse kauguse meie oludes valida tabeli 9 kohaselt.

Tabel 9

Minimaalne kaugus juhtmete vahel (cm) kõrgepingeliinidel pingega kuni 35 kV II kliimatilises rajoonis

Kõrgpingeliini isolatsioon ja juhtmete asetus	Mastidevahelised visangud m								
	50	75	100	125	150	175	200	250	300
Varrisisolaatorid juhtmete igasugusel asetusel, pingel									
kuni 10 kV	80	80	90	110	130	150	175	—	—
kuni 35 kV	100	100	125	150	175	200	225	—	—
Rippisolaatorid pingel 20...35 kV juhtmete asetusel vertikaalselt	100	125	150	175	200	225	250	—	—
horisontaalselt	—	175	200	225	250	275	300	325	350

Teiseks, mida suurem on visang, seda suuremaks kujuneb sama tõmbepingel puhul juhtme lõdve ehk  $r$  i p e f, s. o. juhtme madalaima punkti ja juhtme kinnituspunktide ühendusjoone vaheline vertikaalne kaugus.

Juhtmete kaugus maapinnast  $h$  on samuti piiratud ehituseeskirjadega: suurima rippe puhul, kui on tegemist pingega kuri 1 kV, peab  $h$  olema asustatud kohtades vähemalt 6 m, asustamata kohtades 5 m ja raskelt juurdepääsetavates kohtades 4 m. Pingel kuni 35 kV on vastavad kaugused 7, 6 ja 4,5 kuni 5 m.

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

$$H = c + bn + f + k + m, \quad (54)$$

kus  $c$  — kaugus masti tipust kuni ülemise juhtme kinnituspunkti, mis madalpinge-õhuliinides tehakse tavaliselt 0,15 m ja kõrgepinge-õhuliinides 0,25 m,

$n$  — masti isolaatoreile kinnitatud juhtmete vahede arv;

$m$  — maasse asetatud mastiosa pikkus.

Viimase suuruse soovitavad ehituseeskirjad tavaliste tugimastide jaoks valida tabelist 10. Ankrumastid tuleb asetada maasse 5% rohkem, lõpu- ja nurgamastid 20% rohkem, kui on antud tabelis 10.

Majanduslikel kaalutlustel piirduakse madalpingeliini masti pikkuse valikul 8,5...10,5 meetriga ja nii saadaksegi tavaliseks mastide vahemaaks 40...50 m.

Tabel 10

Maasse asetatud kandemasti osa pikkus

Pinnase iseloom	Juhtmete koguristlõige mastil kuni mm <sup>2</sup>	Masti maast välja ulatuva osa pikkus m			
		kuni 8,5		11...12	
		Maasse asetatud mastiosa pikkus m			
		augu kaevamisel käsitsi	augu puurimisel mehhaniseeritud vahenditega		
Saviliiv ja savi, veega läbi imunud, kui lubatav rõhk pinnases on 1 kp/cm <sup>2</sup>	150	1,8	2,15	1,6	1,75
	300	2,3	2,5	1,8	2,0
	500	2,7	2,9	2,0	2,3
Tavalise niiskusesisaldusega saviliiv ja savi, kuiv löss, märg liiv, kui lubatav rõhk pinnases on 1,5...2 kp/cm <sup>2</sup>	150	1,5	1,8	1,4	1,5
	300	1,9	2,2	1,6	1,8
	500	2,3	2,5	1,8	2,1
Tihe savi, kruusane või kivine savi, kruusane liiv, killustik, paene pinnas, kui lubatav rõhk pinnases on vähemalt 2,5 kp/cm <sup>2</sup>	150	1,35	1,6	1,2	1,3
	300	1,7	2	1,4	1,6
	500	2,1	2,2	1,6	1,9

Õhuliinides (pingega 10...15 kV) võetakse meie oludes mastide vahemaaks 60...80 m terastraatide puhul ja kuni 100 m teraskõisjuhtmete puhul, kusjuures tavaliselt piirdatakse ristlõikega 25 mm<sup>2</sup>. Kui on vaja suuremat ristlõiget, kasutatakse juba teras-alumiinium- või alumiiniumjuhtmeid. Viimaseid kasutatakse ka õhuliinides pingega 35 kV, sest nii kõrge pinge puhul on tegemist juba suuremate võimsustega, kus võimsuskadu ja pingemuutus teras-kõisjuhtmetes kujuneb liialt suureks.

Juhtmete rippe  $f$  arvutamine on üsna tülikas. Ehituseeskirjad nõuavad, et juhtmete maksimaalne tõmbepinge esineks ainult kahel juhtumil:

1) kas  $-5^{\circ}\text{C}$  juures ühes lisakoormusega, mille suurus meie kliimaoludes (II rajoon ehituseeskirjade kohaselt) tuleb võtta 1 cm paksuse jäite kihina, mille erikaal on 0,9, või

2) temperatuuril  $-40^{\circ}\text{C}$ .

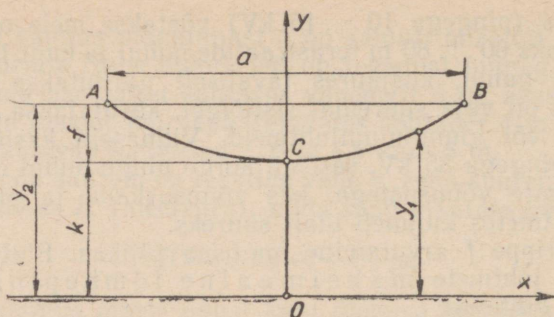
Juhtmete maksimaalseks rippeks loetakse suurim ripe temperatuuril  $-5^{\circ}\text{C}$  ühes lisakoormusega või temperatuuril  $+40^{\circ}\text{C}$ .

Õhuliini tavaliselt ei ehitata pakasega  $-40^{\circ}\text{C}$  ega ka  $-5^{\circ}\text{C}$  juures, kui juhtmed on parajasti kaetud jäitega või härmatisega. Seepärast tuleb ehitamisel pingutada juhtmeid vähem kui ebasoodsaimal juhtumil ja juhtmete ripe on siis väiksem kui  $-5^{\circ}\text{C}$  juures ühes jäitega või temperatuuril  $+40^{\circ}\text{C}$ . Talvel külmaga juhe tõmbub kokku ja temperatuuri tõusul (suvekuumusel) venib, suurendades ripet. Õhuliini ehitamisel tuleb juhtmed paigutada nii, et ainult ebasoodsaimal juhtumil ( $-40^{\circ}\text{C}$  või  $-5^{\circ}\text{C}$  juures koos jäite ja tuulega) küündiks tõmbepinge ehituseeskirjades ettenähtud määran.

Kui ehitamisel valida tõmbepinge väike, nii et see ebasoodsaimal juhtumil jääb väiksemaks, kui oli ette nähtud ehituseeskirjades, siis kujuneb ripe  $+40^{\circ}\text{C}$  juures liiga suureks ja tuleb asjata püstitada liiga kõrged mastid. Teisest küljest ei tohi õhuliini juhe ka maksimaalse rippe puhul läheneda maapinnale rohkem, kui see on lubatud eeskirjadega.

Niisiis on õhuliini ehitamisel juhtmete pingutamisele seatud väga kitsad piirid, et rahuldada tehnilisi tingimusi ja täita ka majanduslikke nõudeid. Kahjuks eksitakse veel mõnikord nende tingimuste ja nõuete vastu, sest montöörid pole sageli teadlikud asjade tegelikust seisukorrast. Mõnikord pingutatakse juhtmed üle, et liin oleks «ilus». Talvel suure pakasega tõmbub pingutatud õhuliini juhe niivõrd kokku, et ületatakse juhtmematerjali elastsuse piir ja tekib juhtme jääv deformatsioon või juhe koguni katkeb, kui mõnda lõpu- või nurgamasti viltu ei tõmmata.

Enne traadi kinnitamist isolaatoreile võib juhtmeid veidi üle pingutada, et traat tõmbuks sirgeks. Kuid juhtmed tuleb kinnitada isolaatoreile siiski nõutava rippega, mille väärtused on antud monteerimistabelis ja mida käsitletakse allpool (lk. 64).



Joon. 34. Juhtme riipe kahe võrdse kõrgusega kinnituspunkti vahel.

Tekib küsimus, kuidas siis määrata riipe  $f$  mitmesugusel temperatuuril  $\tau$  sõltuvalt mastide vahekaugusest ehk  $\text{visangust } a$ . Kahe kinnituspunkti  $A$  ja  $B$  vahel moodustab juhe aheljoone (joon. 34), mille võrrandid on antud hüperboolsete funktsioonidega:

$$y = k \cos \text{hyp } \frac{x}{k}$$

ja

$$L = 2k \sin \text{hyp } \frac{x}{k},$$

kus  $k$  — juhtme väikseim kaugus abstsissisteljest,  
 $L$  — juhtme pikkus kahe kinnituspunkti vahel.

Madalpingele ja kõrgepingele 6...15 kV määratud õhuliinides on riipe kinnituspunktide vahekaugusega võrreldes niivõrd väike, et juhtme pikkuse võib küllaldase täpsusega lugeda võrdseks visanguga, teiste sõnadega —  $L \approx a$ . Tarbe korral võib arvutada kinnituspunktidevahelise juhtme pikkuse valemist

$$L = a + \frac{8}{3} \frac{f^2}{a}. \quad (55)$$

Riipe  $f$  arvutatakse mõõdukatel visangutel (kuni 100 m) lihtsusstatud valemist, oletades, et juhe moodustab aheljoone asemel parabooli:

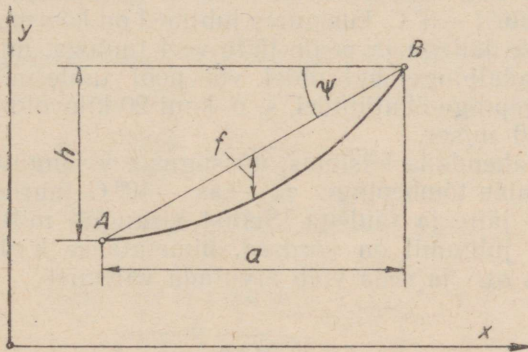
$$f = \frac{g a^2}{8 q \sigma} = \frac{\gamma a^2}{8 \sigma} \quad (56)$$

või valemist

$$f = \frac{\gamma_m a^2}{8 \sigma_m}, \quad (57)$$

millede tähiste tähendused on selgitatud allpool.

Juhtme temperatuuri ja lisakoormuse muutuse tõttu (näiteks jäite, tuule või härmatise tagajärjel) tõmbepinge  $\sigma$  juhtmes muutub ja sellega kaasneb ka rippe muutus. Tavaliselt kasutatakse tõmbepinge määramiseks lihtsustatud valemeid. Üldisema juhtumi jaoks, kui kinnituspunktid ei asu ühel ja samal kõrgusel, võib kasutada Maureri järgi valemit nn. kallakulise visangu jaoks (joon. 35) [14]:



Joon. 35. Juhtme rippe kinnituspunktide erisugusel kõrgusel,

$$\sigma^3 \left( 1 + \frac{h^2}{2a^2} \right) + \sigma^2 \left[ \frac{\gamma_o^2 a^2 E}{24 \sigma_o^2} \cos \psi + (\tau - \tau_o) \beta E - \right. \\ \left. - \sigma_o \left( 1 + \frac{h^2}{2a^2} \right) \right] = \frac{\gamma^2 a^2 E}{24} \cos \psi, \quad (58)$$

- kus  $\sigma$  — tõmbepinge juhtmes (kp/mm<sup>2</sup>) teataval koormusel ja temperatuuril  $\tau$ ,  
 $\sigma_o$  — tõmbepinge juhtmes teistsugusel koormusel ja temperatuuril  $\tau_o$ ,  
 $h$  — kinnituspunktide kõrguste vahe m,  
 $a$  — kinnituspunktide horisontaalne vahe (visang) m,  
 $\psi$  — nurk (vt. joonis 35),  
 $g$  — juhtme pikkusühiku omakaal kp/m,

- $q$  — juhtme ristlõige  $\text{mm}^2$ ,  
 $\gamma = \frac{g}{q}$  — juhtme taandatud omakaal  $\text{kp/m} \cdot \text{mm}^2$ ,  
 $\beta$  — juhtmematerjali joonpaisumistegur (terasel  
 $\beta = 12 \cdot 10^{-6}$ ),  
 $E$  — juhtmematerjali elastsusmoodul (terasel  
 $E = 2 \cdot 10^4 \text{ kp/mm}^2$ ).

Meie oludes nimetamisväärsset juhtme kinnituspunktide kõrguse vahet tavaliselt ei esine ( $h \approx 0$  ja  $\cos \varphi \approx 1$ ). Seepärast valem 58 lihtsustub.

Elektriseadmete ehituseeskirjade järgi tuleb II kliimaatilises rajoonis õhuliini juhtmed arvutada nii, et maksimaalselt lubatav pinge esineks kas temperatuuril  $-40^\circ \text{C}$  (jäiteta ja tuuleta) või siis temperatuuril  $-5^\circ \text{C}$ , kusjuures juhtmed on koormatud 10 millimeetri paksuse jäitega ja peale jäite veel tuulega, mille kiirus on 10 m/sec madalpinge-õhuliinidel või pool tuule maksimaalsest kiirusest kõrgepinge-õhuliinidel, s. o. kuni 20-kilovoldistel õhuliinidel samuti 10 m/sec.

Jääb veel lahendada küsimus, missuguste visangute juures esineb maksimaalne tõmbepinge  $\sigma_m$ , kas  $-40^\circ \text{C}$  juures tuuleta või  $-5^\circ \text{C}$  juures jäite ja tuulega. Sellist visangut, millel tõmbepinged mõlemal juhtumil on võrdsed, nimetatakse kriitiliseks visanguks  $a_{kr}$  ja seda võib arvutada valemist

$$a_{kr} = \sigma_m \sqrt{\frac{24 \beta (\tau_l - \tau_{min})}{\gamma_m^2 - \gamma^2}}, \quad (59)$$

kus  $\tau_l$  — temperatuur, kus esineb lisakoormus (jäide ja tuul);  
 II rajoonis  $\tau_l = -5^\circ \text{C}$ ;

$\tau_{min}$  — madalaim temperatuur (II rajoonis  $-40^\circ \text{C}$ ),

$\gamma_m$  — juhtme taandatud maksimaalne üldkoormus  $-5^\circ \text{C}$  juures jäite ja tuulega.

Viimane suurus arvutatakse järgmiselt:

$$\gamma_m = \sqrt{(\gamma + \gamma_j)^2 + \gamma_t}, \quad (60)$$

kus  $\gamma = g/q$  — juhtme taandatud omakaal (nagu eespool);

$\gamma_j$  — jäitest tingitud lisakoormus ühe meetri kohta  
 $\text{kp/m mm}^2$ ;

$$\gamma_j = \frac{\pi B (d + B) 0,9 \cdot 10^{-3}}{q}; \quad (61)$$

- $d$  — juhtme arvutuslâbimõõt mm;  
 $B$  — jâite paksus; II rajoonis  $B=10$  mm;  
 $\gamma_t$  — tuulest tingitud taandatud koormus ühe meetri kohta, kui juhe on kaetud jâitega, kp/m · mm<sup>2</sup>:

$$\gamma_t = \frac{0,075 v^2 (d + 2B) 10^{-3}}{q}; \quad (62)$$

$v$  — tuule kiirus; II rajoonis  $v=10$  m/sec.

Terasjuhtmete puhul kujuneb II rajoonis kriitilise visangu valem järgmiseks:

$$a_{kr} = \frac{0,1004}{\sqrt{\gamma_m^2 - \gamma^2}} \sigma_m. \quad (63)$$

Näide 1. Valime juhtmeks terastraadi ПСО-4, mille  $d=4$  mm,  $q=12,6$  mm<sup>2</sup>,  $g=0,099$  kp/m. Seega

$$\gamma = \frac{g}{q} = \frac{0,099}{12,6} = 0,00785,$$

$$\gamma_j = \frac{3,14 \cdot 10 (4 + 10) 0,9 \cdot 10^{-3}}{12,6} = 0,0314,$$

$$\gamma_t = \frac{0,075 \cdot 10^2 (4 + 20) 10^{-3}}{12,6} = 0,0143,$$

$$\gamma + \gamma_j = 0,03925,$$

$$\gamma_m = \sqrt{0,03925^2 + 0,0143^2} = \sqrt{0,001745} = 0,0418,$$

$$\sqrt{\gamma_m^2 - \gamma^2} = \sqrt{0,001745 - 0,000061} = 0,0409.$$

Kriitilise visangu valemit 63, mis kehtiks kõikidele terasjuhtmetele ei ole võimalik rohkem lihtsustada, sest ruutjuure all olev suurus sõltub juhtme läbimõõdust ja ristlõikest. Kuid näites toodud traadi jaoks võime kirjutada lihtsa valemi

$$a_{kr} = \frac{0,1004}{0,0409} \sigma_m = 2,45 \sigma_m.$$

Analoogiliselt võib tuletada lihtsustatud kriitilise visangu valemi ka teistsuguste juhtmete jaoks.

Kriitilisest visangust väiksemal mastide kaugusel esineb suurim tõmbepinge  $\sigma_m$  temperatuuril  $-40^\circ\text{C}$ , kuna kriitilisest suuremal visangul esineb maksimaalne tõmbepinge  $-5^\circ\text{C}$  juures lisakoormusega (jâite ja tuulega).

Kui liin on horisontaalne ja visang  $a < a_{kr}$ , siis  $\tau_o = -40^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_o = \gamma$  ja  $\sigma_o = \sigma_m$  ning valem 58 võtab järgmise kuju:

$$\sigma^3 + \sigma^2 \left[ \frac{\gamma^2 a^2 E}{24 \sigma_m^2} + (\tau + 40) \beta E - \sigma_m \right] = \frac{\gamma^2 a^2 E}{24} \quad (64) \quad \parallel$$

Kui liin on horisontaalne ja visang  $a > a_{kr}$ , siis  $\tau_o = -5^\circ\text{C}$ ,  $\gamma_o = \gamma_m$  ja  $\sigma_o = \sigma_m$  ning valem 58 kujuneb järgmiseks:

$$\sigma^3 + \sigma^2 \left[ \frac{\gamma_m^2 a^2 E}{24 \sigma_m^2} + (\tau + 5) \beta E - \sigma_m \right] = \frac{\gamma^2 a^2 E}{24} \quad (65)$$

Et leida visangul  $a$  tõmbepinge  $\sigma$  teistsugusel temperatuuril  $\tau$  (mitte sellisel, mille juures tekib maksimaalne tõmbepinge  $\sigma_m$ ) kasutamegi valemit 64 või 65. Tõmbepinge  $\sigma_m$  on nüüd tuntud suurus (18, 20, 22 või 32,5 kp/mm<sup>2</sup>), samuti on tuntud ka kõik teised suurused peale  $\sigma$ . Asetades tuntud suurused valemisse 64 või 65 saame kolmanda astme võrrandi, mida on kõige lihtsam lahendada katsetamise teel, kasutades arvude ruutude ja kuupide tabeleid ja arvutuslükati. Arvutusi on soovitatav teha tabeli kujul, et kokku hoida aega ja vähendada eksimise võimalust.

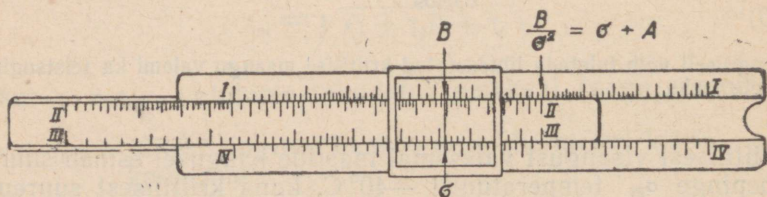
Asendades võrrandi 64 või 65 nurksulgudes oleva osa tähega  $A$  ja parempoolse liikme tähega  $B$ , võime võrrandi

$$\sigma^3 + A \sigma^2 = B$$

kirjutada järgmiselt:

$$\sigma + A = \frac{B}{\sigma^2}, \quad (66)$$

mis sobib hästi  $\sigma$  väärtuse leidmiseks tavalise arvutuslükati abil (joon. 36). Selleks asetame lükati aknakesel oleva kriipsu arvu  $B$



Joon. 36. Kolmanda astme võrrandi lahendamine arvutuslükatiga.

kohale astmikul I. Siis nihutame keelt seni, kuni II astmiku lõpp (või algus) satub astmikul I A võrra suurema arvu kohale, kui on astmikul III aknakese kriipsu all olev arv, mis ongi otsitav suurus  $\sigma$ . Tegelikult osutab keele astmiku II lõpp (või algus) astmikul I olevale suurusele  $B/\sigma^2$ , sest arvu  $B$  vastas on astmikul II suurus  $\sigma^2$  ja me teostame tegelikult arvude  $B$  ja  $\sigma^2$  jagamist. Kui arv  $B/\sigma^2$  võrdub summaga  $\sigma + A$ , siis ongi täidetud antud võrrandi tingimus ja leitud ühtlasi võrrandi reaalne lahend. Muidugi kui tegur  $A$  on negatiivne, tuleb astmikul I keele lõpp- või alguskriipsu vastas otsida arv, mis on astmikul III aknakese kriipsu all olevast arvust  $A$  võrra väiksem.

Seda tüüpi võrrandi lahendamisel kasutame ainult astmikke I ja III. Arvude suurusjärku on kerge hinnata, pealegi kui on teada, et rippe arvutamisel esinevad ainult ühe- või kahekohalised arvud (mõeldud on arve enne koma).

Näide 2. Antud on võrrand  $\sigma^3 + 3\sigma^2 = 490$  ehk  $\sigma + 3 = \frac{490}{\sigma^2}$ . Asetame akna-

kese kriipsu arvu 490 kohale astmikul I ja nimelt esimesel logaritmilisel ühikul, sest arvul 490 on paaritu arv kohti (kolm kohta). Võrrandi lahend on ilmselt suurem kui üks ja väiksem kui kümme, seega on ta ühekohaline arv enne koma. Kui keel on asetatud nii, et aknakese kriipsu all on astmikul III arv 5, siis keele lõpukriips osutab astmikul I arvule 19,6. Vahe  $19,6 - 5 = 14,6$  on liiga suur, sest ülesande kohaselt peab ta olema ainult 3. Kui nihutada keelt vasakule, nii et aknakese kriipsu all astmikul III arvud järjest suurenevad, saame keele lõpukriipsu vastas astmikul I järjest väiksemad arvud, kuni jõuame sellele astmikul arvuni 10; siis on astmikul III kriipsu all arv 7. Nende arvude vahe ongi 3 ja võrrandi lahend on  $\sigma = 7$ .

Näide 3. Antud on võrrand  $\sigma^3 - 4\sigma^2 = 1960$ . Et arvul  $B = 1960$  on paarisarv kohti, siis asetame aknakese kriipsu astmiku I teise logaritmilise ühiku piiridesse. Käesoleval juhtumil on võrrandi lahend ilmselt kahekohaline arv (suurem kui 10) ja tegur  $A$  on negatiivne ( $A = -4$ ). Nihutame keelt seni, kuni astmikul I keele alguskriipsu vastas olev arv on 4 võrra väiksem kui on arv astmikul III aknakese kriipsu all. See tingimus on käesoleval juhtumil täidetud siis, kui astmikul I võime lugeda arvu 10 ja keele astmikul III arvu 14. Viimane ongi võrrandi lahend ( $\sigma = 14$ ).

Kuupvõrrandi lahendamine arvutuslükati abil on mõnevõrra tülikas, kui tegur  $A$  on mitmekohaline murdarv. Tavaliselt leitakse arvutuslükati abil kuupvõrrandi lahend ainult kahekohalise täpsusega, sest astmikul I on arve raske täpsemalt lugeda. Kirjeldatud meetod sobib seega kuupvõrrandi lahendi ligikaudseks määramiseks. Kuupvõrrandi lahendit võib siis täpsustada katsetamise teel, kasutades otstarbekohaselt arvude ruutude ja kuupide tabelit ja korrutise  $A\sigma^2$  moodustamiseks ka arvutuslükatit või arvutusmasinat. Seejuures  $\sigma^2$  leitakse tabelist ja korrutamisel kasutatakse lükati astmikke III ja IV, mis võimaldavad suuremat täpsust.

Teatavale temperatuurile vastava tõmbepinge  $\sigma$  leidmine ühel

või teisel teel võimaldab arvutada ripet  $f$  sellel temperatuuril valemil 56 abil:

$$f = \frac{\gamma a^2}{8\sigma}.$$

See valem on kehtiv, kui juhtmel ei esine lisakoormust. Lisakoormusega juhtme puhul tuleb viimasesse valemisse juhtme taandatud omakaalu  $\gamma = g/q$  asemele asetada vastav taandatud üldkoormus, näiteks jäite korral  $(\gamma + \gamma_m)$  ja jäite ning tuule korral  $(\gamma + \gamma_m)$  teiste sõnadega — tuleb kasutada valemit 57.

Nii tuleb talitada iga teise temperatuuri puhul ja korrata arvutusi ka teistsugustel visangutel.

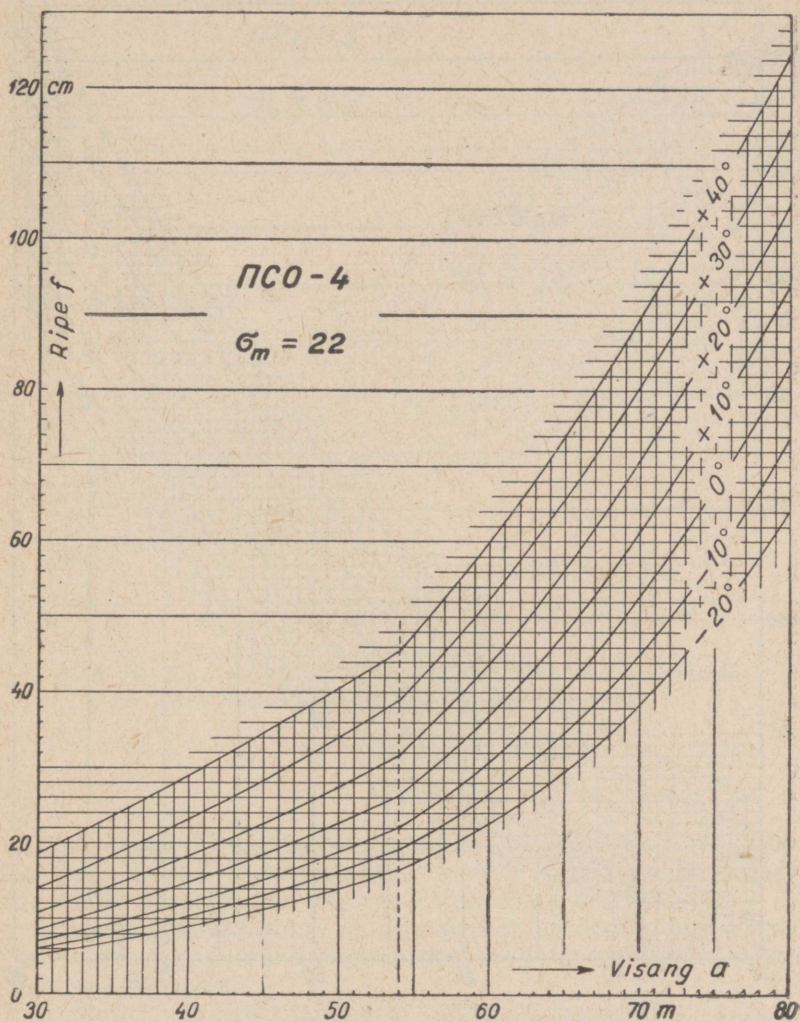
Et paljude kolmanda astme võrrandite lahendamine on siiski üsna aeganõudev toiming ja iga kord pole välditud ka eksimused, mida on raske avastada, siis on joonistel 37 kuni 42 avaldatud ripped standarditud teras-traatjuhtmetele ПСО-4 ja ПСО-5 ning teras-kõisjuhtmetele ПС-25 sõltuvalt visangust  $a = 30 \dots 80$  m temperatuuridel  $-20, -10, 0, +10, +20, +30$  ja  $+40^\circ\text{C}$  nii asustamata kui ka asustatud kohtadele, s. o. maksimaalse tõmbepingega 22 või 18 kp/mm<sup>2</sup>, mis peaks rahuldama praktika nõudeid. Rippeid vahepealsetel temperatuuridel on hõlpus leida toodud kõverate parvedest interpoleerimise teel.

Kõisjuhtmed ПС-35, ПС-50 ja ПС-70 asetatakse mastidele võrdse maksimaalse tõmbepingega nii asustatud kui ka asustamata kohtades (32,5 kp/mm<sup>2</sup>). Nende juhtmete ripped on toodud joonisel 43, sest kriitilisest väiksemal visangul on nende juhtmete ripped võrdsed. Samade juhtmete ripped vähendatud tõmbepingega (20 kp/mm<sup>2</sup>) on toodud joonisel 44.

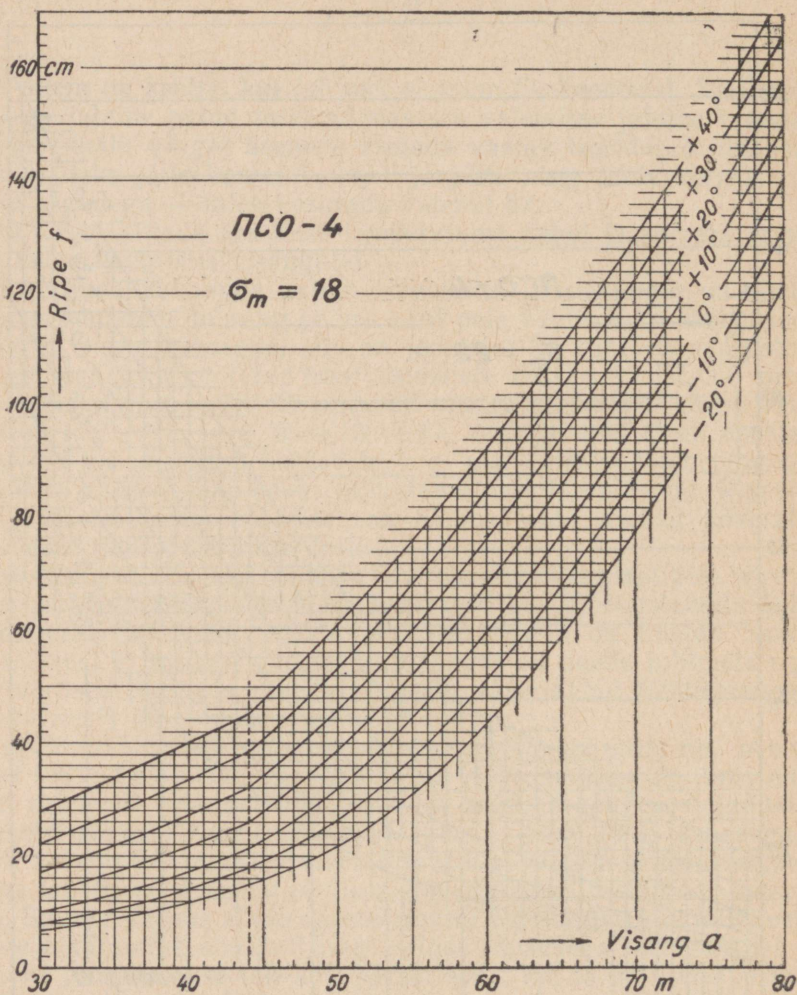
Tegeliku ehitustöö jaoks on otstarbekohane koostada nn. monteerimistabelid, mis sisaldavad rippe suurusi õhuliinis ehitusel esinevail visanguil või sõltuvalt mastide kaugusest (näiteks 5 meetri tagant) temperatuuridel  $-10 \dots +20^\circ$  ( $5^\circ\text{C}$  vahedega), nagu see on näidatud tabelis 11 traadile ПСО-5. Rippe andmed selles tabelis on ümardatud ülespoole ja toodud terveis sentimeetris. Suurem täpsus ei ole monteerimisel tegelikult ka vajalik, sest ripete määramine õhuliinil isegi sellise täpsusega teeb raskusi.

Juhet pingutatakse tali abil pärast seda, kui ta on asetatud iso-laatori konksudele. Kui asetada ühest toetuspunktist allapoole rippe suurusele vastav märk ja teiselt mastilt viseerida juhtme toetuspunktist niisama kaugel allpool asetseva punkti kohalt esimese märgi suunas, siis tuleb juhtme tõmme reguleerida seni, kuni juhtme madalaim punkt asetub kahe märgiga määratud sirgjoonele (joon. 33).

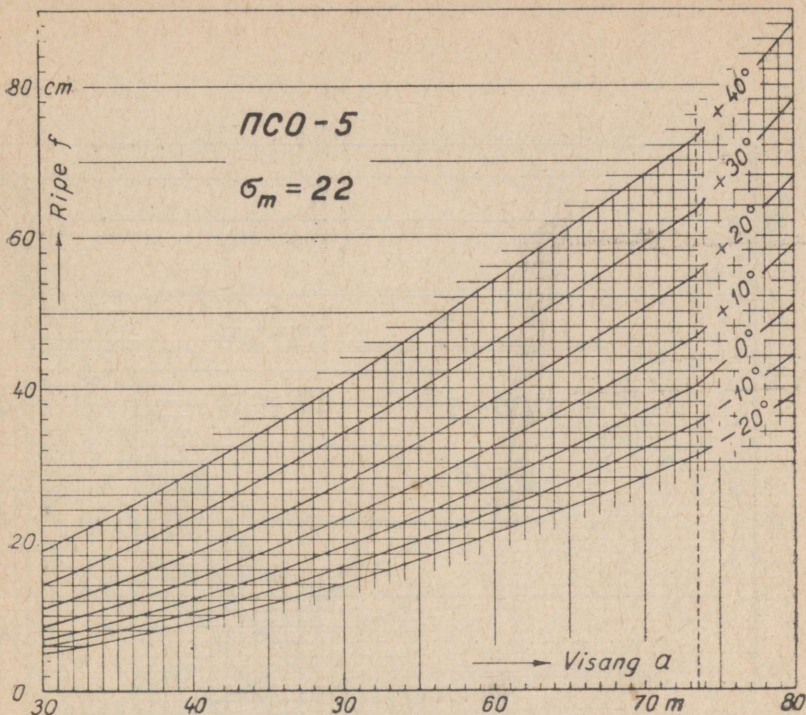
Tavaliselt teostatakse rippe kontrolli mitme masti tagant. Võrdsete visangute puhul on teatava rippega määratud traadis ka tõmbepinge. Kui kahe masti vahel on sobiv ripe kord leitud, siis ühe ja sama tõmbepinge ja võrdsete visangute puhul on ka ripe



Joon. 37. Ripe terastraadile läbimõõduga  $d=4$  mm maksimaalse tõmbepingega  $\geq 22$  kp/mm<sup>2</sup> (asustamata koht).



Joon. 38. Ripe terastraadile läbimõõduga  $d=4$  mm maksimaalse tõmbepingega  $18 \text{ kp/mm}^2$  (asustatud koht).

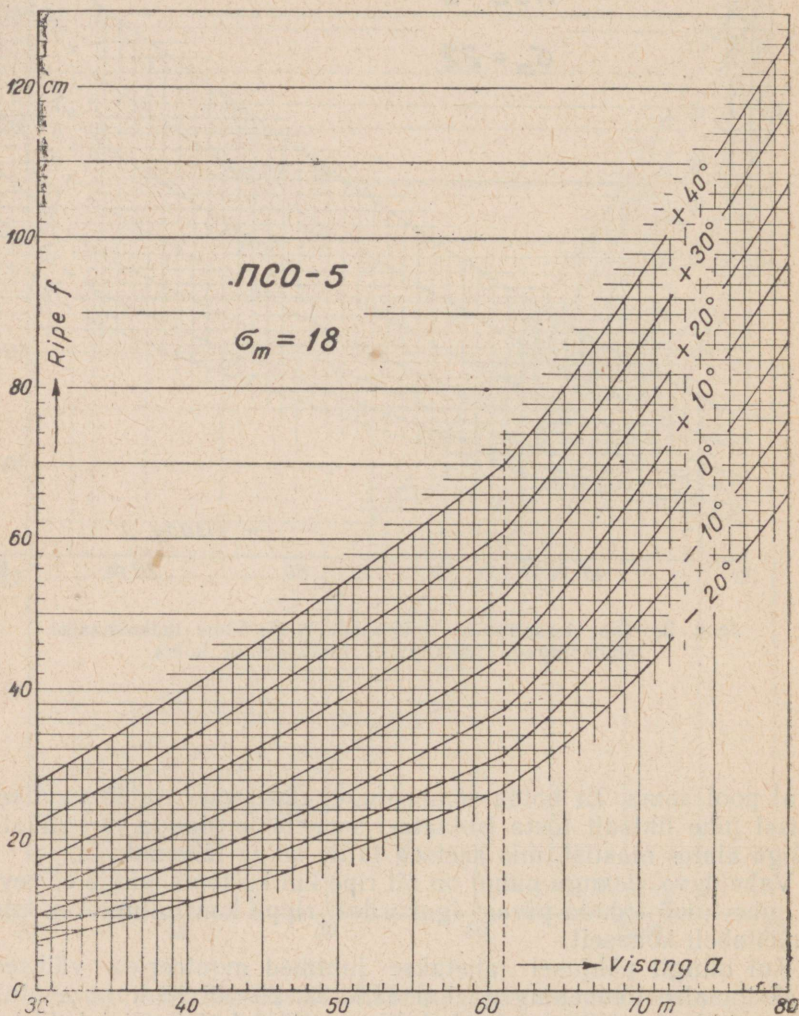


Joon. 39. Ripe terastraadile läbimõõduga  $d=5$  mm maksimaalse tõmbepingega  $22 \text{ kp/mm}^2$  (asustamata koht).

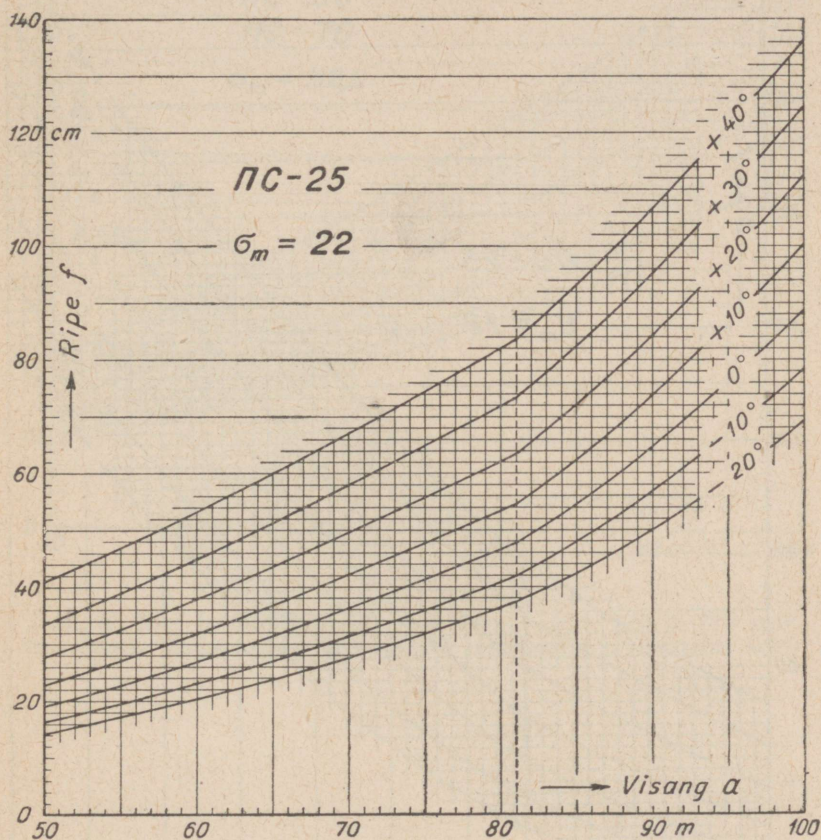
igal pool sama. Et hoida tõmbepinget ühtlasena, tuleb monteerimisel juhe lihtsalt tõsta isolaatori soonele ja siduda ta isolaatori külge alates mastist, mis asetseb talile kõige lähemal.

Vahelduva visangu puhul on nii ripe kui ka tõmbepinge erinevad ja juhe tuleb siduda pärast igakordset rippe kontrollimist monteerimistabeli kohaselt.

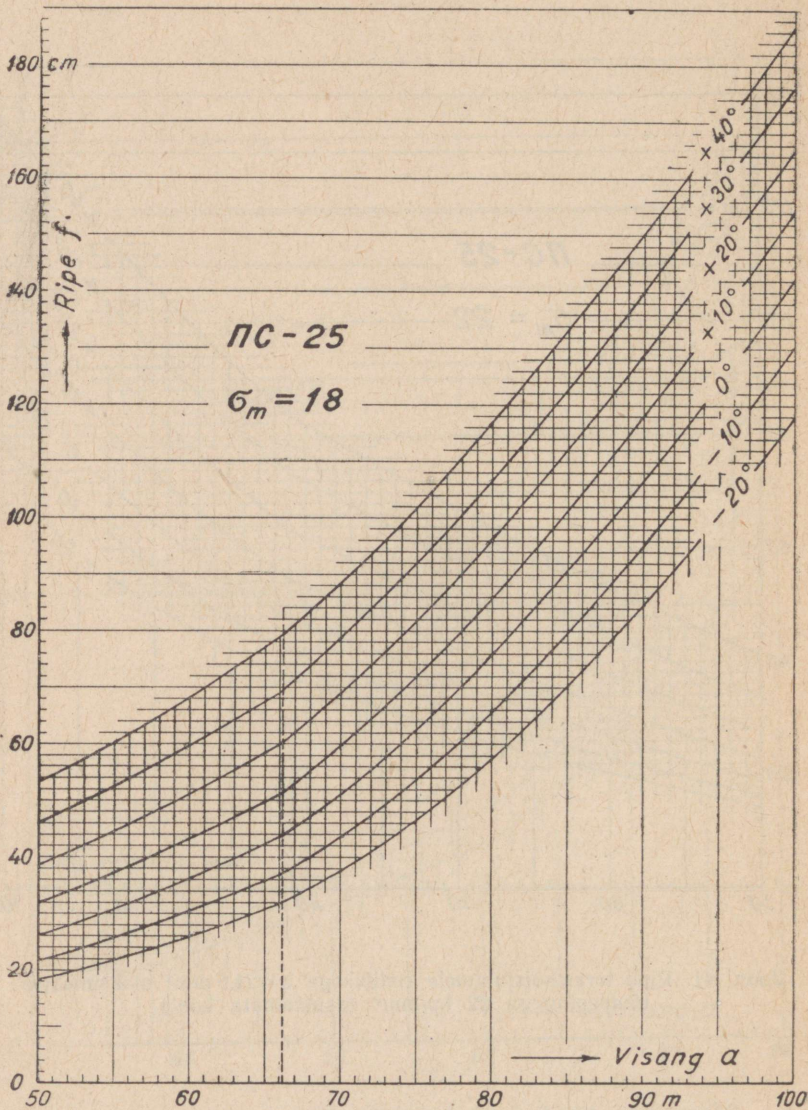
Kui mingil põhjusel tahetakse juhtmed monteerida väiksema maksimaalse tõmbepingega kui  $32,5$ ,  $22$ ,  $20$  või  $18 \text{ kp/mm}^2$ , tuleb ripe muidugi teha suurem, kui see on näidatud joonistel 37 kuni 44, sest, nagu näha valemist 56 või 57, on ripe  $f$  pöördvõrdeline tõmbepingega  $\sigma$ . Kuid uusi rippeid ei saa arvutada otseselt jooniste 37 kuni 44 abil, sest uue maksimaalse tõmbepingega muutub valemite 64 või 65 nurksulgudes olev tegur teise astme liikme taga. Seepärast tuleb arvutada uus ripe soovitavaale visangule valemite 56 või 57 ja 64 või 65 kohaselt.



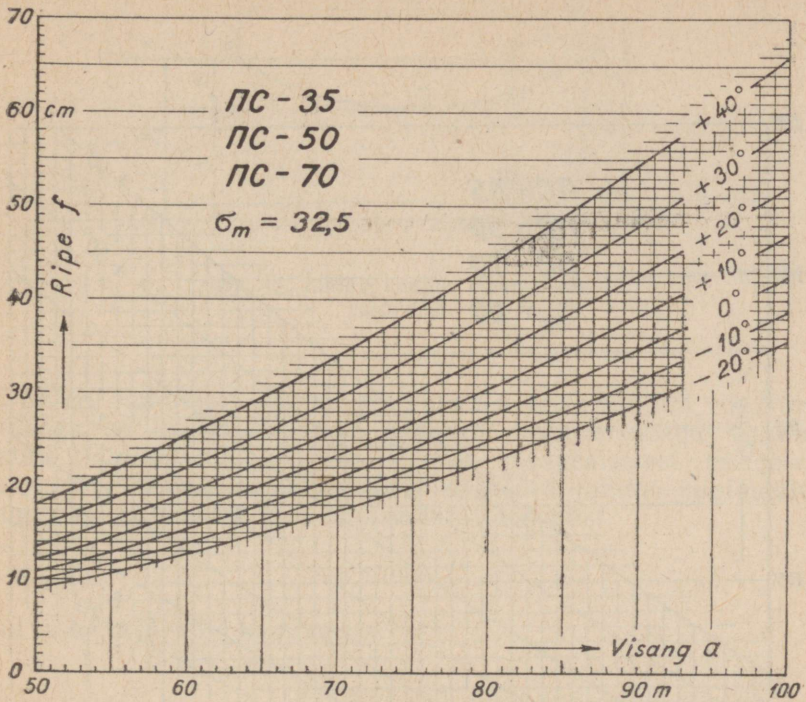
Joon. 40. Ripe terastraadile läbimõõduga  $d=5$  mm maksimaalse tõmbepingega  $18 \text{ kp/mm}^2$  (asustatud koht).



Joon. 41. Ripe teras-kõisjuhtmele ristlõikega  $q=24,6$  mm<sup>2</sup> maksimaalse tõmbepingega 22 kp/mm<sup>2</sup> (asustamata koht).



Joon. 42. Ripe teras-kõisjuhtmele ristlõikega  $q = 24,6\ mm^2$  maksimaalse tõmbepingega  $18\ kp/mm^2$  (asustatud koht).

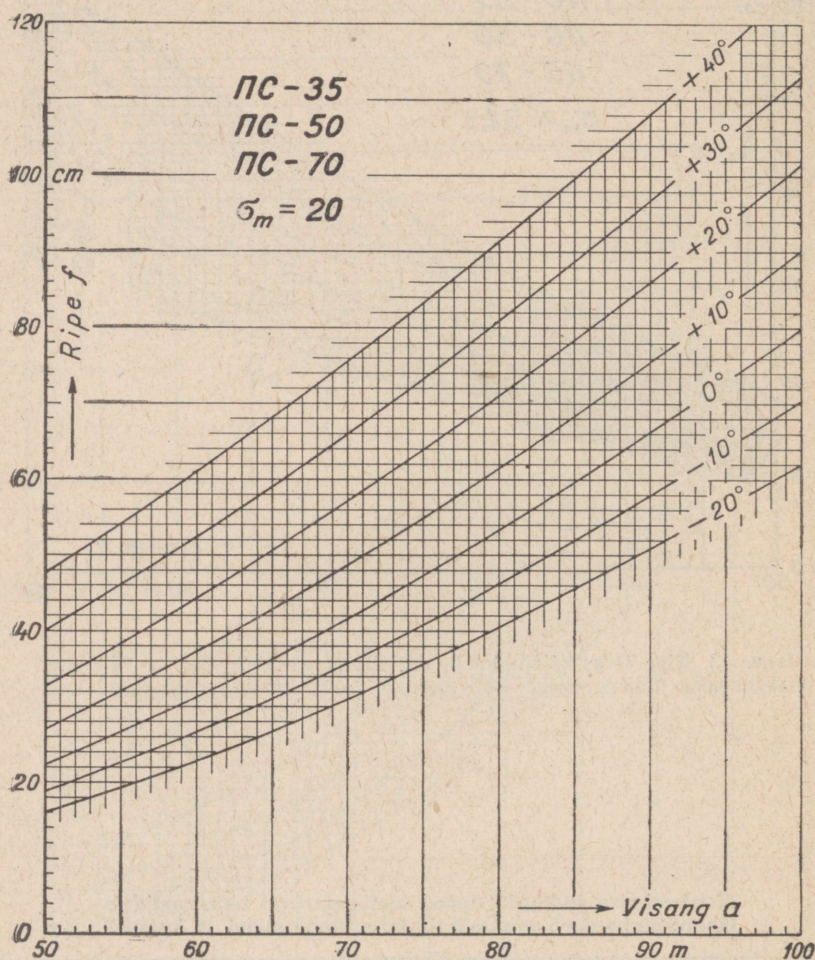


Joon. 43. Ripe teras-kõisjuhtmele ristlõikega  $q=37,2, 49,5$  ja  $78,9$  mm<sup>2</sup> maksimaalse tõmbepingega  $32,5$  kp/mm<sup>2</sup> (asustamata ja asustatud koht)

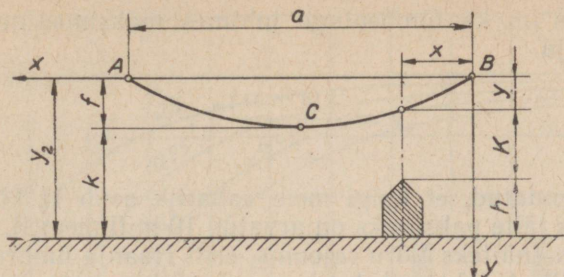
Tabel 11

Monteerimise andmed (ripped sentimeetrites) terastraatidele läbimõõduga  $d=5$  mm, maksimaalse pinge puhul  $18$  kp/mm<sup>2</sup>

Visang m	Õhu temperatuur °C						
	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20
30	8	9	10	11	13	15	17
35	11	12	13	15	17	19	22
40	14	15	17	19	21	24	27
45	18	19	21	23	26	29	33
50	22	24	26	29	32	35	39
55	26	28	31	34	37	41	45
60	30	33	36	39	43	47	51



Joon. 11. Ripe teras-kõisjuhtmele ristlõikega  $q=37,2, 49,5$  ja  $78,9 \text{ mm}^2$  maksimaalse tõmbepingega  $20 \text{ kp/mm}^2$  (asustamata ja asustatud koht).



Joon. 45. Juhtme kaugus maapealsetest esemetest.

Õhuliini ristumisel raudtee või muu tee, teise õhuliini või mingi ehitisega on ehituseeskirjade kohaselt vaja arvutada õhuliini juhtme minimaalne kaugus nendest maapealsetest esemetest (joon. 45). Seda kaugust igakord ei määra juhtme minimaalne kaugus maapinnast  $k$ , mis on arvutatav valemist

$$k = y_2 - f,$$

vaid ta on määratud kaugusega

$$K = y_2 - h - y, \quad (67)$$

kus  $y_2$  on juhtme kinnituspunkti  $B$  kõrgus maapinnast ja  $h$  on maapealse eseme kõrgus; seejuures  $y$  on arvutatav parabooli valemist, mille koordinaatide algus on toodud punkti  $B$ :

$$y = \frac{4fx}{a} \left(1 - \frac{x}{a}\right). \quad (68)$$

Kui visang on väiksem kriitilisest visangust ( $a < a_{kr}$ ), siis võib maksimaalse rippe  $f$  leida joonistelt 37 kuni 44 (temperatuuril  $+40^\circ\text{C}$ ). Asetades valemi 56 väärtuse

$$f = \frac{\gamma a^2}{8\sigma}$$

valemisse 68, saame:

$$y = \frac{x(a-x)\gamma}{2\sigma}. \quad (69)$$

Juhtumil, kui õhuliini visang on kriitilisest visangust suurem ( $a > a_{kr}$ ), ei esine maksimaalne riipe temperatuuril  $+40^\circ\text{C}$ , vaid temperatuuril  $-5^\circ\text{C}$  maksimaalse lisakoormusega, s. o. jäite ja

tuulega. Siis on ka tõmbepinge juhtmes maksimaalne ja valem 69 võtab kuju

$$y = \frac{x(a-x)\gamma_m}{2\sigma_m} \quad (70)$$

Olgu tähendatud, et kuigi meie vabariik asub II kliimaatilises rajoonis, kus jäite paksuseks on arvatud 10 millimeetrit, on ta meil mõnes kohas (näiteks Võru rajoonis, eriti Haanja ümbruses) palju suurem. Sellisel juhtumil tuleb muidugi kasutada kogemustega saadud andmeid.

## 8. KOGUMISLATTIDE TUGEVUSE ARVUTUS

Kogumislattide tuleb kontrollida lühiste puhul mitte ainult soojenemise (tabel 7), vaid ka mehaanilise tugevuse seisukohast. Kogumislattides ei tohi tekkida jäävat deformatsiooni ka tõukelühisvoolu  $i_k$  korral, mis alajaamades ületab 1,5...2,5-kordselt püsivlühisvoolu efektiivväärtust  $I_k$ , mis oli mõõduandev soojenemise seisukohast. 1,5-kordne tõukelühisvool tekib trafo järsu lühise korral, kui trafo näivvõimsus ei ületa 100 kVA. Püsivlühisvool  $I_k$  arvutatakse teatavasti nimi-lühispinge  $u_k$  (protsentides) ja nimi-voolu  $I_n$  abil valemist

$$I_k = \frac{I_n}{u_k} 100 \text{ A.} \quad (71)$$

Kahe voolujuhtme vahel, mis asetsevad rööbiti pikkusel  $l$  ja on teineteisest kaugusel  $a$ , tekib jõud

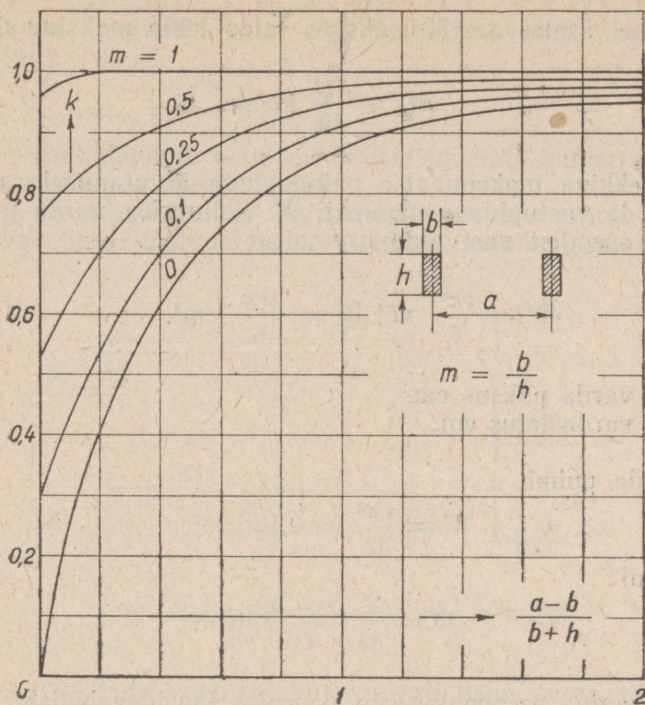
$$F = 2,04 k i_1 \cdot i_2 \frac{l}{a} 10^{-8} \text{ kp,} \quad (72)$$

kus  $k$  — kujutegur, mis määratakse jooniselt 46;  
 $i_1$  ja  $i_2$  — voolud üksikuis juhtmeis [5].

Joonisel 46 nähtub, et kui  $\frac{a-b}{b+h} \geq 2$ , siis  $k \approx 1$ .

Juhtmed püüavad tõmbuda kokku, kui voolud on ühesuunalised; erisuunaliste vooludega juhtmed tõukuvad. Lühise puhul kahe faasi vahel tekib maksimaalne jõud

$$F_2 = 2,04 k i_k^2 \frac{l}{a} 10^{-8} \text{ kp.} \quad (73)$$



Joon. 46. Kujutegur  $k$  juhtmetevahelise jõu arvutamiseks.

Kolmefaasilise lühise puhul on kõige raskemas olukorras keskmine kogumislatt (kui kõik kogumislattid asetsevad ühes ja samas tasapinnas):

$$\begin{aligned}
 F_3 &= \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2,04 k i_k^2 10^{-8} = \\
 &= 1,76 k i_k^2 \frac{l}{a} 10^{-8} \text{ kp.} \quad (74)
 \end{aligned}$$

Tegur  $\sqrt{3}/2 \approx 0,87$  võtab arvesse voolude hetkväärtuse ebavõrdsust üksikutes faasides.

Kahel toel asetsevas ühtlaselt koormatud talas tekib maksimaalne moment

$$M_m = \frac{F_3 l}{8} \text{ kpcm,} \quad (75)$$

mitmel toel asetsevas läbijooksvas talas tekib maksimaalne moment

$$M_m = \frac{F_3 l}{10} \text{ kpcm.} \quad (76)$$

Vardas tekkiva maksimaalse paindepinge arvutamiseks on vaja teada varda vastupidavusmomenti  $W$ . Nelinurkse varda puhul on sõltuvalt asendist vastupidavusmoment

$$W = \frac{bh^2}{6} \text{ või } W = \frac{b^2h}{6} \text{ cm}^3, \quad (77)$$

kus  $b$  — varda paksus cm,  
 $h$  — varda laius cm.

Umarvarda puhul

$$W = \frac{\pi d^3}{32} \approx 0,1d^3 \text{ cm}^3, \quad (78)$$

toru puhul

$$W = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} \text{ cm}^3. \quad (79)$$

Maksimaalne paindepinge terasvardas faasidevaheliste jõudude toimel

$$\sigma_f = \frac{M_m}{W} \text{ kp/cm}^2 \quad (80)$$

ei tohi ületada 1600 kp/cm<sup>2</sup>.

Analoogiliselt arvutatakse ka trollijuhtmeid, kusjuures nurkprofiilide vastupidavusmoment võetakse käsiraamatutest.

Tugevate voolude puhul tehakse kogumislattid tavaliselt mitmest rööbiti kokkuneeditud nelinurksest vardast vahetükkidega, mis on niisama paksud kui vardad ja asetsevad teineteisest



Joon. 47. Kahest vardast kogumislatt vahetükkidega tugiisolaatoritel.

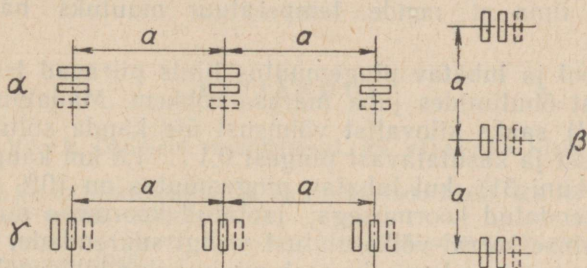
30...50 cm kaugusel (joon. 47). Sel puhul tekib kogumislatis paindepinge

$$\sigma = \sigma_f + \sigma_v, \quad (81)$$

kus  $\sigma_f$  — paindepinge faasidevaheliste jõudude toimel, mis arvutatakse valemi 80 abil,

$\sigma_v$  — paindepinge ühe kogumislati varraste vahel.

Faasidevaheliste jõudude toimel tekkiva paindepinge arvutamiseks



Joon. 48. Kogumislattide varraste asetusviise.

seks tuleb kasutada vastupidavusmomenti kahe varda puhul, mis asetsevad serviti (joon. 48,  $\alpha$  või  $\beta$ ),

$$W = \frac{2bh^2}{6} \quad (82)$$

ja analoogiliselt kolme varda puhul, mis asetsevad serviti,

$$W = \frac{3bh^2}{6} \quad (83)$$

Kui aga mitmest vardast kogumislattid asetsevad lapiti, siis kogumislatti vastupidavusmoment kahe varda puhul (joon. 48,  $\gamma$ )

$$W = 1,44 b^2 h \quad (84)$$

ning kolme varda puhul

$$W = 3,3 b^2 h. \quad (85)$$

Kogumislatti enda varraste vahel tekkiva paindepinge arvutamiseks tuleb eeldada, et tõukelühisvool jaguneb kogumislatti varraste vahel võrdselt, ning kasutada valemeid 73, 75 või 76, 77 ja 80.

## 9. KOKKUVÖTE

Nagu nägime eelnevaist arutlustest, kõveraist ja tabelleist, on terasjuhtmete kasutamise võimalused madalpinge-õhuliinides piiratud. Eriti kehtib see terastraatide kohta läbimõõduga alla 4 mm ja üle 5 mm. Rohkem kasutatakse terasjuhtmeid trollijuhtmetes, kogumislattides ja kõrgepinge-õhuliinides.

Soojenemine piirab terasjuhtmete kasutamist kõige vähem. Soojenemise seisukohast võiks terastraategi koormata mitmekümne ampriga, ilma et nende temperatuur muutuks hädaohtlikuks (joon. 17).

Lühisvool ja lubatav pingemuutus liinis piiravad terasjuhtmete kasutamist õhuliinides juba märksa rohkem. Madalpingega (220 või 380 V) saaks kilovatist võimsust üle kanda sõltuvalt traadi läbimõõdust ja kasutatavast pingest 0,1 . . . 1,8 km kaugusele (joonised 28 kuni 31), kui lubatav pingemuutus on 10% ja on tege mist keskendatud koormusega; jaotatud koormuse ning suurema pingemuutuse korral võiks ulatust veelgi suurendada, kuid kindla piiri ulatuse suurendamiseks seab minimaalne lühisvool (joon. 32).

Mehaanilise tugevuse nõuded piiravad väikese (alla 4 mm) või suure läbimõõduga (üle 5 mm) terastraatide kasutamist. Seega jäävad järele ainult traadid läbimõõduga 4 või 5 mm ja teraskõis ПО-25.

Kerkib küsimus, kas ei ole terasjuhtmetest õhuliiniga varustamise ulatust siiski võimalik suurendada.

See küsimus on eriti tähtis põllumajanduse elektrifitseerimisel, kui tahetakse elektrienergiat anda ka üksikult asetsevatele peredele või perede rühmale, mis on alajaamast kaugel. Kui selline tarbija, mis vajaks näiteks 1-kilovatist võimsust, asub alajaamast 5 km kaugusel, siis madalpingelise ühefaasilise liiniga ei saa teda terasjuhtme abil kuidagi varustada. 220 V puhul oleks vool liinis umbes 4,5 amprit ja pingelang 5 mm läbimõõduga terastraadi puhul juba 0,5 km kaugusel umbes 57 V ehk 26%! 5 km pikkusel liinil oleks terasjuhtmete takistus nii suur, et ka lühise puhul vool ei tõuseks 4,5 amprini, teiste sõnadega — kogu võimsus kuluks energiakadudeks liinis.

Ainus tõhus abinõu terasjuhtmetega õhuliini ulatuse suurendamiseks on liini pinge tõstmine. Kui valida liini alguses pingeks 1000 V, milleks oleks muidugi vaja muretseda kaks ühefaasilist trafot vastava võimsuse ja ülekande teguriga, võiks kasutada tavalisi madalpingeisolaatoreid, sest need on ehitatud pingele kuni 1000 V. Vool liinis oleks nüüd  $\cos \varphi = 0,9$  puhul ainult 1,1 A ja pingelang (joonise 26 kohaselt) ka 4-millimeetrise terasjuhtmega 0,5 km kaugusel  $11 + 1,2 \approx 12$  V või 5 km kaugusel 120 V. 5-millimeetrise läbimõõduga terastraadi puhul on pingelang ainult  $72 + 1,6 \approx 74$  V ehk 7,4%, mis on täiesti vastuvõetav. Sedagi

põngelangu on võimalik kondensaatori kasutamise või trafo ülekandeteguri valikuga osaliselt või täielikult kompenseerida.

Teatavasti on Eesti NSV Teaduste Akadeemia Energeetika Instituudi töötajad juba võtnud kaalumisele raamatu esimeses väljaandes [1] esitatud idee realiseerimise — tõsta terasjuhtmetega õhuliini varustamise ulatust pinge tõstmisega ühe- kui ka kolmefaasiliste trafode abil.

## KIRJANDUS

1. Hans R. Vörk. Ohuliinid raudjuhtmeist. RK «Teaduslik Kirjandus». Tartu, 1947.
2. A. Rjabkov. Elektrivõrgud ja elektriülekanne liinid. RK «Pedagoogiline Kirjandus». Tallinn, 1949.
3. Г. М. Петухин. Расчет стальных проводов, шин и крановых троллеев. Госэнергоиздат, 1948.
4. ГОСТ 5800-51. Провода стальные (ПС).
5. Л. Н. Бантиданов и В. И. Тарасов. Основное электрооборудование электрических станций и подстанций. Издание второе. Госэнергоиздат, 1952.
6. А. А. Глазунов. Номограммы, графики и таблицы для расчета линий электропередачи. Том I. Работа и расчет проводов и тросов. Госэнергоиздат, 1956.
7. М. И. Пронникова. К расчету токов короткого замыкания в сетях со стальными проводами. Труды Московского Института механизации и электрификации сельского хозяйства. Том III, стр. 142...164. Сельхозгиз, 1956.
8. Б. М. Сарычев. Номограммы, графики и таблицы для расчета линий электропередачи. Издание Мин. коммунального хозяйства РСФСР, 1956.
9. ГОСТ 8053-56. Провода стальные одиночные (ПСО).
10. В. В. Усов и А. С. Займовский. Проводниковые, реостатные и контактные материалы. Том II. Металлы и сплавы в электротехнике. Госэнергоиздат, 1957.
11. Министерство электростанций СССР. Правила устройства электроустановок. Раздел I. Общие правила. Госэнергоиздат, 1957.
12. Б. М. Сарычев. Справочник по проектированию воздушных линий электропередачи, 1958.
13. Министерство электростанций СССР. Правила устройства электроустановок. Глава II—4. Воздушные линии электропередачи напряжением до 1000 в. Глава II—5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1000 в. Госэнергоиздат, 1959.
14. K. Zickler. Der Wechselstromwiderstand von massiven Eisenleitern. «Elektrotechnik und Maschinenbau» 1919, lk. 449 ja 1920, lk. 165; kokkuvõtte avaldatud «ETZ» 1920, lk. 698.
15. K. Girkmann und E. Königshofer. Die Hochspannungs-Freileitungen. Wien, Springer, 1938.

## SISUKORD

1. Oldised kaalutlused . . . . .	3
2. Terasjuhtme oomiline ja tegevtahtistus . . . . .	7
3. Terasjuhtme soojenemine kestval koormusel . . . . .	23
4. Terasjuhtmete induktiivtahtistus . . . . .	35
5. Pingemuutuse määramine terasjuhtmetega liinis . . . . .	39
6. Terasjuhtmelega madalpinge-õhuliini lubatav ulatus . . . . .	45
7. Terasjuhtmete tugevuse arvutus ja rippekõverad . . . . .	53
8. Kogumislattide tugevuse arvutus . . . . .	71
9. Kokkuvõte . . . . .	78
Kirjandus . . . . .	79

Вырк Ханс Тынувич  
ВОЗДУШНЫЕ ЛИНИИ ИЗ СТАЛЬНЫХ ПРОВОДОВ  
Издание второе, дополненное  
На эстонском языке  
Оформление В. Томассов  
Эстонское Государственное Издательство  
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Toimetaja L. Abo  
Kunstiline toimetaja R. Tungla  
Tehniline toimetaja K. Timmer  
Korrektorid M. Sepp ja E. Multer

Ladumisele antud 6. X 1960. Trükkimisele antud 22. III 1961. Faber  
60×90, 1/16. Trükipoognaid 5 + 1 lisa. Arvutuspoognaid 4,58. Trüki-  
arv 3000. MB-02335. Tellimise nr. 3514.

Trükkkoda «Ühiselu», Tallinn, Pikk tn. 40/42.

Hind 28 kop.



28 kop.

A-23778

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00366271 7