

AKADEMIJA ZNANOSTI IN UMETNOSTI V LJUBLJANI
MATEMATIČNO-PRIRODOSLOVNI RAZRED

D E L A

5

ALUMINIJ
V ELEKTRIČNIH
PRENOSNIH PROGAH

MILAN VIDMAR



L J U B L J A N A

1947

ALUMINIJ
V ELEKTRIČNIH
PRENOSNIH PROGAH

PROF. DR. TECHN.
MILAN VIDMAR

1947

IZDALA AKADEMIJA ZNANOSTI IN UMETNOSTI V LJUBLJANI

ALUMINIJ
V ELEKTRIČNIH
PRENOSNIH PROGAH

PROF. DR. TECHN.
MIHA VILMAR

TISKALI J. BLASNIKA NASL. D. D. V LJUBLJANI

UVODNE PRIPOMBE

Prepričan, da bo nova Jugoslavija z močno roko posegla po elektrifikaciji, ki ji jo omogočajo bogati naravni viri energije, sem že 1941. l. usmeril svoj študij v zamotane probleme prenašanja in razdeljevanja električne energije. Svoje izsledke sem v naslednjih letih postopoma priobčeval.

Nekakšen uvod tvori moja študija »Veletransformatorski problemi«, ki jo je izdala Akademija znanosti in umetnosti 1945. l. V obširnem delu »Transformation und Energieübertragung«, ki je izšlo 1944. l. v Ljubljani, sem obdelal veliko skupino problemov, skupnih transformaciji in prenašanju električne energije. To delo je medtem že vdrló v široki svet. Z njim sem preoral obrobne probleme elektrifikacijskih naporov.

Ko sem nato načel čiste prenosne probleme, sem si najprej ustvaril osnovno sliko, ki ustreza sodobni veleprenosni elektrotehniki. Opisuje jo študija »Električne veleprenosne proge v svetlobi telegrafske enačbe«, ki jo je izdala 1947. l. Akademija znanosti in umetnosti. Vse območje čiste prenosne elektrotehnike pa sem obdelal v obširni knjigi »Problemi prenašanja električne energije« (Državna založba, Ljubljana, 1947).

Ravno, ko sem zaključil rokopis te knjige, je Jugoslavija uzakonila svoj prvi petletni gospodarski načrt, v njem pa začetek obširne elektrifikacije. V tem načrtu koreninijo izredno važni problemi. Jugoslavija elektrificira, pridobiva pa tudi baker in aluminij. Nedvomno je treba potrebam elektrifikacije prilagoditi načrtno pridobivanje teh dveh važnih prenosnih kovin, da nas tujci ne bodo zavirali. Tako se mi je sprožil študij, ki naj neposredno pomaga našemu prvemu petletnemu gospodarskemu načrtu.

Aluminij je v prenosnih progah močan tekmeč bakra. Kakšen tekmeč je v različnih okoliščinah, kdaj je resnično uporabljivejši od bakra in kdaj naj se bakru umakne, je dokaj zamotan problem. Ko sem ta problem temeljito obdelal, sem ugotovil, da je potreben vestnega opisa. Tako je nastala študija, ki jo s temi uvodnimi pripombami pošiljam v svet.

V svetovni strokovni literaturi nisem našel neoporečne rešitve problema, ki me je zagrabil na samem pragu našega novega načrtnega gospodarstva. Zato ne izključujem možnosti, da bo ta študija v prevodih posegla v svetovno veleprenosno

elektrotehniko. Tem važnejša mi je zavest, da sem po vsem videzu naši elektrifikaciji prvenstveno omogočil neoporečno uporabljanje bakra in aluminija.

Domišljujem si, da sem s svojimi zgoraj omenjenimi deli znesel skromen posreden doprinos k prvi jugoslovanski petletki. Ta študija pa naj bo moj prvi neposredni doprinos. In če bo postala resnično koristna, mi bo bogato nagradila delo, ki sem ga rad, ki sem ga z vncmo opravil.

Ljubljana, 14. julija 1947.

Milan Vidmar.

UVOD

1. Gospodarstvo je nedvomno izživiljanje kolektivov, je torej izraz življenja višje stopnje. Kolektiv je kot živ organizem višje stopnje vidno sestavljen iz živih stanic. In kakor obnavlja vsak živ organizem neumorno svoje stanice, tako se tudi v kolektivu člani-poedinci nenehoma obrabljajo in umikajo novim, svežim.

Življenje je lahko zdravo, močno, udarno, je pa tudi lahko bolno, polno nepravil in komaj vredno svojega imena. V zdravem organizmu ni stanic, ki leno počivajo, medtem ko njihove sosedje delajo. V zdravem organizmu so močni organi, ki izpolnjujejo važne življenjske naloge v čisti medsebojni harmoniji. Zdrav organizem je preplut z močno krvjo, ki se pretaka po vseh organih, vdira v vse koticke telesa, poživlja vse stanice.

V bolnih kolektivih ni življenjske harmonije: stanice se bore druga z drugo in živé le sebi. V stariških kolektivih se pojavljajo rakaste stanice, ki požirajo vse, kar dosežejo, medtem ko v njihovi okolici vse propada. Karteli in trusti poznega kapitalizma so nedvomno takšne rakaste stanice.

Neurejeno, kaotično gospodarstvo je življenje kolektiva, ki ima kot živ organizem višje stopnje nezdravo telo. V tem nezdravem telesu nastajajo nenehoma velike skupine stanic, ki prav za prav ne živé, ker ne delajo: nezaposlenost je bolezen. V tem nezdravem telesu pa so tudi številne stanice, ki ne mislijo na delo, ki izkoriščajo delo svoje zdrave okolice, škodljivke, kali težkih bolezni.

Močan krvni obtok je osnovni pogoj zdravega življenja. Če je kolektiv resnično živ organizem višje stopnje, organizem, ki je nujno nastal pod pritiskom sožitja neštetihi poedincev v stisnjemem prostoru, si mora predvsem ustvariti močno ožilje in krepko, izdatno življenjsko kri.

Kaj pa je življenjska kri velikega gospodarstva? Nedvomno, kar omogoča vsa gospodarska dejanja. Torej nedvomno tisto, kar omogoča delo. Delo pa je prehajanje energije iz položaja v položaj, iz oblike v obliko. Energija je življenjska kri slehernega gospodarstva.

Energija se skriva v hrani, človeški in motorni. Prenašamo jo po gospodarskem telesu, da hranimo stanice-poedince. Zeleznice so nedvomno nekakšne žile, pa tudi ceste, paro-

brodne črte. Ker pa vpreza sodobno gospodarstvo neštete močne umetne delavce, motorje, v svoj voz, je motorna hrana že ravno tako važna kakor človeška in potrebna je močnih žil.

Toda le v električni obliki je energija dovolj gibčna in deljiva, da postane lahko prava življenjska kri velikega gospodarstva. Le električna energija vdre lahko iz skupnega ožilja v sleherni dom, v sleherni delavnico. Le v električni obliki prinaša lahko energija dragoceno svetlobo slehernemu poedincu v sklopu obsežnega kolektiva, sleherni gospodinjači pa toploto, ki jo potrebuje štedilnik, kuhalnik, likalnik.

Ustvarjanje velikega ožilja v gospodarskem telesu obsežnega kolektiva imenujemo *elektrifikacija*. Brez elektrifikacije ni zdravega sodobnega kolektiva, ni razumnega, to se pravi načrtnega kolektivnega gospodarstva. To je vedel in videl Lenin, ko je na pragu nove dobe, dobe velikih razumnih kolektivnih gospodarstev, izrekel znamenito formulo:

komunizem + elektrifikacija = boljše življenje.

Nova Jugoslavija hoče imeti načrtno, razumno, kolektivno gospodarstvo, imeti hoče zdravo, močno življenje višje stopnje. Še vsa krvaveča iz nešteti ran, še vsa polna razvalin, zapuščin zločinske druge svetovne vojne, si je sestavila obširen načrt za razvoj narodnega gospodarstva v letih 1947 do 1951 in ga uzakonila. V tem načrtu ima prihajajoča elektrifikacija svoje odlično mesto.

Ves civilizirani svet misli na elektrifikacijo. Nevzdržno nastajajo povsod na našem planetu kolektivi, ki bodo nedvomno nekoč vsi postali živi organizmi višje stopnje brez rakastih stanic in nepotrebnih težkih bolezni. Kaotično gospodarstvo prav za prav ne potrebuje ožilja. Ker mu pa vendarle nastaja, ker nastaja proti volji bolnih poedincev, je veliko življenje očitno močnejše od kratkovidnega malega. Seveda: elektrifikacijski problemi bolnih kolektivov so neizbežno težje rešljivi: sami so nekako bolni.

Ker pa prinaša nova doba na čelnih svojih velikih gospodarskih načrtov elektrifikacijo, ustvarjanje velikih energijskih ožilj, prinaša tudi tehniške probleme, ki jih je treba naglo in skrbno rešiti. Med temi problemi je tudi na videz preprost problem, problem, ki bi mu laik ne prisodil globine. Vlijemo ga lahko v obliko preprostega vprašanja: iz kakšne kovine bomo zgradili žile velikega energijskega ožilja, velikega električnega omrežja?

Človek bi mislil, da je pravilni odgovor ravno tako preprost, kakor je vprašanje, ki ga je sprožilo. In mislil bi, da je elektrotehnika že dovolj dozorela, da mora že dolgo vedeti,

kaj je njeno osnovno elektrifikacijsko gradivo. Toda dosedanja elektrotehnika je živela pod pritiskom kapitalističnega gospodarstva, celo pod pritiskom poznega, imperialističnega gospodarstva, in je nujno ustrezno reševala svoje osnovne probleme. Gospodarski kaos starikavega kapitalizma odseva nujno tudi iz njenih dosedanjih izsledkov.

Tehnika izkorišča izsledke fizike v prid gospodarstvu. V fiziki ima zdrave, močne temelje. Gospodarstvo pa ocenjuje pridelke tehnike in jih ocenjuje seveda po svojih načelih. Gospodarstvo odloča vselej, kaj je v izdelku tehnike dobro, kaj slabo. Bolno gospodarstvo pa ocenjuje po bolnih načelih.

Tesna, nerazdružljiva povezanost tehnike z gospodarstvom je tako nesporna, da jo more prezreti le popolnoma nekritični opazovalec. Zato more le nekritičen opazovalec pričakovati močnih, smotrnih rešitev tehnike, ki je vsa v okovih razdrapanega, kaotičnega gospodarstva. Zato pa mora vsa tehnika skrbno pregledati svoje osnovne rešitve, ko prestopa usodni prag nove dobe, ko začenja služiti novemu, načrtnemu kolektivnemu gospodarstvu. In zato je tudi vprašanje najprikladnejšega gradiva za električne žile gostih elektrifikacijskih mrež še vse živo in važno.

2. Nedvomno se bo marsikomu zdelo, da je nemogoče govoriti o rešitvah tehniških problemov, ki bi nosile barvo nekoga posebnega gospodarskega sistema, da pretiravamo, če trdimo, da je bila tehnika kapitalističnega gospodarstva kaotična. Toda ravno elektrotehnika je v vsem svojem dosedanjem razvoju polna kapitalističnih potez, ki jih vesten opazovalec ne more prezreti.

Pred petdesetimi leti so si nešteti mali električni gospodarji izmišljali najrazličnejše obratne napetosti, in izdelovalci električnih strojev ter pomožnih električnih priprav so tonili v neštetih izdelovalnih načrtih. Ustrezni izdelki so bili seveda dragi.

Nebrzdano medsebojno tekmovanje številnih izdelovalcev električnih priprav in strojev je izsililo najnujnejšo standardizacijo, izdelovanje po maloštevilnih kopitih. Naivno bi bilo misliti, da so kopita izražala resnične potrebe električnih gospodarjev. Njihov smoter je bil popolnoma jasen: omogočiti so morala največje dosegljive poslovne dobičke izdelovalcem elektrotehniških izdelkov.

To dokazuje mrzlično stremljenje po cenejših in cenejših motorjih, transformatorjih, ki je polnilo začetek našega stoletja, stremljenje, ki je potiskalo nabavne cene, hkrati pa dvigalo energijske izgube v obratujočem stroju. Nizka nabavna

cena je vabila kupca, nepotrebne energijske izgube pa so ostale skrite v letnih obračunih električnih gospodarjev.

1915. l. je avtor v svoji knjigi »Moderne Transformatorenfragen« (Vieweg, Braunschweig) razkrinkal dotodanje izdelovanje električnih transformatorjev in dokazal, da vodi v obupno gospodarsko zagato. Toda šele dvajset let kasneje je elektrotehnika resnično začela upoštevati, kar je že takrat bilo jasno in dokazano.

Kako pa naj upoštevajo izdelovalci električnih strojev in priprav poleg svojih tudi koristi uporabljevalcev svojih izdelkov, če so izsilili standardizacijo? Koristi neštetihi samostojnih gospodarjev so zelo različne. V kaotičnem gospodarstvu ni jasnih potreb in določenih koristi. Kaotično gospodarstvo pozna le povprečne slike. Njegovi neoporečni izsledki so vsi statistični

Statistika pregleduje pojave, jih urejuje in ocenjuje. Statistika je mrtvo orodje, ki ne kritizira in ne vodi. Tehnika, ki se usmeri na statistično dognane potrebe, ko jo dognanja znanstvenikov prisilijo, da zapusti brezobzirno zasledovanje poslovnih dobičkov v svojem ustvarjevalnem taboru, se usmeri v povprečne resnične, hkrati pa tudi v povprečne zmotne potrebe. Tudi v tem oziru je verca odliček svojega gospodarskega sistema.

1918. l. je avtor v svoji knjigi »Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischer Maschine« opisal svojevrstne oblikovalne zakone, ki jih je našel v dolgoletnem študiju. Dokazal je, da je med neštetihi možnimi oblikami električnega stroja vselej edinstvena, ki najvarčneje izkorišča svoja gradiva. Transformator na primer je zgrajen iz železa in bakra. Toda le v obliki, ki zahteva za železni del nekako iste gradbene stroške kakor za bakreni del, je idealno varčno zgrajen.

V omenjeni knjigi je avtor opisal vrsto podobnih gospodarsko-geometričnih zakonov. Njegova teorija je menda presenetila strokovni svet. To dokazuje francoski prevod knjige, ki se je kmalu pojavil. Pojavil se je pa tudi ruski prevod »Ekonomičeskije zakoni projektirovanja električeskih mašin« (Državna založba, Moskva). Takrat je avtor mislil, da je izdelovanje električnih strojev dobilo neoporečno obliko.

Kaj kmalu pa mu je postalo jasno, da posega kapitalistično gospodarstvo tudi v takšne znanstveno neoporečne izsledke elektrotehnike. Da: transformator je pravilno zgrajen, če pravično razdeli gradbene stroške na železo in baker. Toda ceni kilograma železa in bakra sta bili dolgo igrački kovinskih borz. Kasneje sta padli v trde roke trustov. 1935. l. je avtor v svoji knjigi »Der kupferarme Transformator« (J. Springer,

Berlin) resignirano zapisal, »da trgujejo svetovne borze tudi z oblikami električnih strojev«.

Zelo značilen je bil ob koncu prve svetovne vojne primer znane velike elektrotehniške tvrdke, izdelovalke strojev in seveda tudi transformatorjev. Avtor je zapazil, da se transformatorji te tvrdke skozi vso prvo svetovno vojno nenehoma spreminjajo in sicer vztrajno v isto smer: vse manj in manj bakra je bilo v njih, ustrezno pa več in več železa. In ker drugi izdelovalci transformatorjev niso ubrali te smeri, se je znašel pred uganko.

Ta uganka pa je imela preprosto rešitev. Prva svetovna vojna je zalotila ravno tisto tvrdko ob bogati zalogi transformatorske železne pločevine in hkrati ob izpraznjenem skladišču bakra. Pločevina ji je ostala skozi vso vojno na predvojni ceni, baker pa se ji je dražil. Samo zato se je spreminjala oblika transformatorjev!

In vendar je jasno, da rešitve važnih tehniških problemov ne morejo ostati igracke špekulantov in izkoriščevalcev. Saj je jasno, da so gradiva toliko vredna, kolikor dela zahteva njihovo pridobivanje. Poslovni dobički ne smejo imeti domovinske pravice v plodovih znanstvenega dela.

Primeri se lahko, da nov izum pocnostavi pridobivanje nekoga gradiva in mu ustrezno zniža ceno. Takšne načelne gospodarske spremembe se seveda morajo uveljaviti v najrazličnejših tehniških problemih. Spremembe pa, ki so zasidrane v poslovnih zvijačah, ki onemogočajo uveljavljanje vrednosti dela, so izrodki bolnega gospodarskega sistema.

Študija, ki jo uvajajo te vrstice, ki naj reši problem najprikladnejšega gradiva za električna omrežja, bo dokazala, da so tudi v njen problem posegali trusti in borze, špekulanti in koristolovci. Zato je njena najvažnejša naloga, izriniti iz problema najprimernejše kovine za električne vode vse kvarne vplive in uveljaviti v osnovah prihajajoče jugoslovanske elektrifikacije vrednost neoporečnega dela.

Jugoslavija bo pridobivala baker in aluminij, torej obe kovini, ki tekmujeta v prenosni elektrotehnik. V svojem razumnem, načrtnem gospodarstvu bo lahko ugotovila resnično vrednost kilograma bakra in aluminija. Njen problem najprikladnejše kovine za električne vode ne bo igracka trustov. Zato je neoporečno rešljiv.

5. Kako važen je problem najprikladnejše kovine za električna omrežja, vidimo, če si ogledamo pravkar uzakonjeni jugoslovanski petletni načrt. Iz podatkov tega načrta si namreč

lahko približno izračunamo, kolikšne množine bakra oziroma aluminija bodo potrebne za nastajajoče električno ožilje.

V svojem 9. členu napoveduje načrt v prvi točki povečanje proizvodnje električne energije na 4'55 milijarde letnih kilovatnih ur, torej za nekaj več kakor 5 milijarde. V drugi točki istega člena pa govori o izgraditvi novih elektrarn s skupno zmogljivostjo 1'55 milijona kilovatov.

Denimo, da bo treba za vse nove elektrarne zgraditi ustrezna omrežja! To pomeni zgraditev velikih pokrajinskih žil za 110.000 voltov, slabotnejših okrožnih za 55.000 voltov in potrebnega razdeljevalnega omrežja za 580/220 voltov. V treh stopnjah bo potemtakem potrebna kovina za električne vode.

1'55 milijona kilovatov pomeni v zvezi s prenosno napetostjo 110.000 voltov prenosni tok:

$$\frac{1'55 \times 10^9}{\sqrt{3} \times 110.000} = 8150 \text{ amperjev.}$$

Preizkušena gospodarska gostota prenosnega toka v bakrenih vodih bi zahtevala nekako 6000 mm² skupnega prereza prenosnih vodnikov. Ker pa smemo predpostavljati, da se bodo prenosne proge za 110 kV lotile povprečne prenosne razdalje 150 km in vemo, da ima proga za vrtilni tok tri vodnike, dobimo potrebno množino bakra:

$$3 \times 6000 \times 10^{-4} \times 150 \times 10^4 \times 8'9 = 24 \cdot 10^6 \text{ kilogramov.}$$

ustrezno specifični teži 8'9 kg/dm³.

Seveda: jalovih dodatnih bremen se tudi najskrbneje upravljana veleprenosna proga ne odkriža popolnoma. Jalovi prenosni toki pa trošijo baker ravno tako kakor žlahtni. Ker pa niso tako stanovitni kakor žlahtni — saj jih sproti odrivamo, ko se pojavljajo — jim smemo žrtvovati razmeroma skromne dodatne množine prenosne kovine. Če torej zaokrožimo pravkar izračunano, 110-kV-nim žilam potrebno množino bakra na 25 milijonov kilogramov, na 25.000 ton, se opravičljivo približamo resnični potrebi.

Skočimo zdaj s prve prenosne stopnje takoj na tretjo: s pokrajinskih žil za 110 kV na razdeljevalno mrežo! Razdeljevalna medfazna napetost je:

$$\frac{110.000}{380} = 290\text{-krat}$$

manjša od veleprenosne. Razdeljevalna proga pa zmore le skromno prenosno razdaljo. Avtor bi ji prisodil nekako 500 metrov. To je 300-krat manj kakor 150 km.

Potemtakem bi potrebovala razdeljevalna mreža približno isto množino bakra kakor veleprenosne žile, ki jo hranijo. Račun pa s tem še ni zaključen. V veleprenosnih progah se lahko ubranimo jalovih prenosnih bremen, medtem ko jih razdeljevalno omrežje zbira in znaša v jalove elektrarne na koncu veleprenosnih prog. Izkušnje nas uče, da so jalova bremena razdeljevalnih mrež nekako enaka žlahtnim ($\cos \varphi = 0,7$). V električnem ožilju pa se uveljavljajo tako, da dvigajo žlahtnim bremenom potrebne množine prenosne kovine v razmerju:

$$1 : \cos \varphi.$$

Pa tudi s tem važnim dodatkom še ne moremo zaključiti računa, ki naj ugotovi v razdeljevalnem omrežju potrebno množino prenosne kovine. Znano je namreč, da se nešteti mali odjemalci električne energije ne vključujejo sočasno. Isti kilovat služi, kakor nas uče izkušnje, povprečno dvema malima odjemalcema. Torej je treba istemu kilovatu zgraditi dve razdeljevalni žilici, ki zmoreta obe vsi moč. To pomeni seveda dvojno potrebno množino prenosne kovine.

Oprti na zgoraj ugotovljenih 25.000 ton, ki jih bodo potrebovale v jugoslovanskem petletnem načrtu zamišljene pokrajinske žile za 110 kV in na verjetno vrednost jalovih bremen, izraženo s:

$$\cos \varphi = 0,7,$$

bi dobili po vsem tem:

$$\frac{25.000}{0,7} \times 2 = 71.500 \text{ ton}$$

bakra za razdeljevalno omrežje.

Tudi ta izsedeek smemo zaokrožiti na 75.000 ton, da upoštevamo neštete hišne priključke. S tem pa še nismo vključili bakra, ki bo potreben v hišnih napeljavah. In predvsem je treba še misliti na okrožne žile, ki se bodo povsod vrivale med pokrajinske in krajevne, torej na vmesno ožilje za 55 kV.

Vse to dokazuje, da bo potrebovalo vse ožilje prihajajočih novih elektrarn za skupno zmogljivost 155 milijona kilovatov mnogo več kakor 100.000 ton bakra. Prav lahko se primeri, da tudi 150.000 ton bakra ne bo dovolj. Ta množina pa pomeni skoraj 10 milijard dinarjev!

Problem, ki se suče okoli tolikšnih vsot, je nedvomno zelo važen problem. Razumno gospodarstvo uporablja varčno sredstva, ki jih premore njegov kolektiv. Vsak odstotek milijarde je pomembna vsota. Rešitev problema najprikladnejše prenosne kovine, ki prihrani 5 odstotkov, je gotovo silen uspeh.

Ker pa posega kapitalistična špekulacija z mnogo izdatnejšimi odstotki v tehniške probleme, ki potrebujejo milijarde za svoje zgradbe, je študij ustreznih možnosti neodložljiv. V tem smislu naj bo ta študija skromen prispevek k izvrševanju jugoslovanskega petletnega načrta, hkrati pa doprinos h teoriji električnih prenosnih prog.

Dokaže naj, da je njen problem globlji, kakor se zdi, da ponuja razumnemu kolektivnemu gospodarstvu jasnejšo rešitev kakor kapitalističnemu. Opozarja pa naj tudi na tesno povezanost elektrifikacije s pridobivanjem bakra in aluminija. Saj je jasno, da spravlja uvažanje prenosnih kovin iz tujine problem teh kovin v odvisnost od gospodarskega ustroja tujine.

Potemtakem bi potrebovala razdeljevalna mreža približno isto množino bakra kakor veleprenosne žile, ki jo hranijo. Račun pa s tem še ni zaključen. V veleprenosnih progah se lahko ubranimo jalovih prenosnih bremen, medtem ko jih razdeljevalno omrežje zbira in znaša v jalove elektrarne na koncu veleprenosnih prog. Izkušnje nas uče, da so jalova bremena razdeljevalnih mrež nekako enaka žlahtnim ($\cos \varphi = 0,7$). V električnem ožilju pa se uveljavljajo tako, da dvigajo žlahtnim bremenom potrebne množine prenosne kovine v razmerju:

$$1 : \cos \varphi.$$

Pa tudi s tem važnim dodatkom še ne moremo zaključiti računa, ki naj ugotovi v razdeljevalnem omrežju potrebno množino prenosne kovine. Znamo je namreč, da se nešteti mali odjemalci električne energije ne vključujejo sočasno. Isti kilovat služi, kakor nas uče izkušnje, povprečno dvema malima odjemalcema. Torej je treba istemu kilovatu zgraditi dve razdeljevalni žilici, ki zmoreta obe vso moč. To pomeni seveda dvojno potrebno množino prenosne kovine.

Oprti na zgoraj ugotovljenih 25.000 ton, ki jih bodo potrebovale v jugoslovanskem petletnem načrtu zamišljene pokrajinske žile za 110 kV in na verjetno vrednost jalovih bremen, izraženo s:

$$\cos \varphi = 0,7,$$

bi dobili po vsem tem:

$$\frac{25.000}{0,7} \times 2 = 71.500 \text{ ton}$$

bakra za razdeljevalno omrežje.

Tudi ta izsledek smemo zaokrožiti na 75.000 ton, da upoštevamo neštete hišne priključke. S tem pa še nismo vključili bakra, ki bo potreben v hišnih napeljavah. In predvsem je treba še misliti na okrožne žile, ki se bodo povsod vrvale med pokrajinske in krajevne, torej na vmesno ožilje za 55 kV.

Vse to dokazuje, da bo potrebovalo vse ožilje prihajajočih novih elektrarn za skupno zmogljivost 155 milijona kilovatorv mnogo več kakor 100.000 ton bakra. Prav lahko se primeri, da tudi 150.000 ton bakra ne bo dovolj. Ta množina pa pomeni skoraj 10 milijard dinarjev!

Problem, ki se suče okoli tolikšnih vsot, je nedvomno zelo važen problem. Razumno gospodarstvo uporablja varčno sredstva, ki jih premore njegov kolektiv. Vsak odstotek milijarde je pomembna vsota. Rešitev problema najprikladnejše prenosne kovine, ki prihrani 5 odstotkov, je gotovo silen uspeh.

Ker pa posega kapitalistična špekulacija z mnogo izdatnejšimi odstotki v tehniške probleme, ki potrebujejo milijarde za svoje zgradbe, je študij ustreznih možnosti neodložljiv. V tem smislu naj bo ta študija skromen prispevek k izvrševanju jugoslovanskega petletnega načrta, hkrati pa doprinos h teoriji električnih prenosnih prog.

Dokaže naj, da je njen problem globlji, kakor se zdi, da ponuja razumnemu kolektivnemu gospodarstvu jasnejšo rešitev kakor kapitalističnemu. Opozarja pa naj tudi na tesno povezanost elektrifikacije s pridobivanjem bakra in aluminija. Saj je jasno, da spravlja uvažanje prenosnih kovin iz tujine problem teh kovin v odvisnost od gospodarskega ustroja tujine.

I. OSNOVNA SLIKA PROBLEMA

4. Ko je tehnika začela graditi električne stroje, priprave in vode, je morala predvsem in načelno rešiti vprašanje prikladnih, varčnih strug za električne toke. Vedela je, da omogočajo le kovine pretakanje elektronin. Pa se je brez oklevanja odločila za baker.

Baker je tudi še danes gradivo, iz katerega sestavljamo električne struge v strojih in pripravah, pa tudi v prenosnih napravah. Dolgo je bil absoluten gospodar v burno se razvijajoči elektrotehniki. Prav za prav je šele prva svetovna vojna opozorila na druge možne kovine, ko je začela požirati več in več bakra in ga odtegovati elektrotehniki. Toda stiska je minula in baker je vnovič zasedel svoj prestol v elektrotehniki.

Razumljivo je, da je neizkušena mlada elektrotehnika brez kritičnega razmišljanja posegla po bakru. Električne struge naj vendar omogočajo kar se da nemoteno pretakanje elektronin. Idealni prevodnik bi ne smel imeti upornosti. Ker pa se vse kovine nekoliko upirajo električnim tokom, je tista med njimi, ki ima najmanjšo specifično upornost, najbližja idealn.

Baker in srebro imata skoraj enaki omski upornosti in nadkriljujeta s svojo ustrezno električno prevodnostjo vse ostale kovine. Kdor torej išče najprikladnejšo kovino za električne vodnike, vidi po vsem videzu nujno le izbiro med bakrom in srebrom. Če bi upošteval le izsledke fizike, bi se težko odločeval. Tehnika pa se opira na fiziko in prepušča gospodarstvu ocenjevanje fizikalnih možnosti. Gospodar seveda ne bo uporabljal dragega srebra, če mu obeta mnogo cenejši baker iste praktične možnosti. Osnovni problem najprikladnejše kovine za električne vodnike je tako preprost in prozoren, da je njegova rešitev skoraj trivialna.

Toda zamudimo se nekoliko ob nji! Fizika pravi, da je omski upor vodnika, ki ima specifično upornost.

$\rho \left(\frac{\text{omov} \times \text{mm}^2}{\text{m}} \right)$, dolžino L (m) in prerez F (mm^2):

$$R = \rho \cdot \frac{L}{F} \text{ omov.}$$

Problem najprikladnejše prevodne kovine misli vselej na določeno dolžino (L) vodnika. Če imata torej baker in srebro

isto električno prevodnost, zahtevata očitno isti prerez (F) vodnika, ko hočeta graditi določenemu toku I [A] strugo z neko dopustno upornostjo (R). To pomeni isto potrebno prostornino prevodne kovine.

Od prostornine pridemo do teže s pomočjo tako imenovane specifične teže. Kubični decimeter elektrolitnega bakra tehta 8·9 kilograma, kubični decimeter srebra pa več kakor 10 kilogramov. Zato je bakrenemu električno enakopravni srebrni vodnik za skoraj 16 odstotkov težji. Je pa seveda neprimerno dražji, ker leži cena kilograma srebra visoko nad ceno kilograma bakra.

Ta silno preprosta slika pa le ni tako nepomembna, kakor se zdi. Saj opozarja na važne činitelje problema najprikkladnejše prevodne kovine. To so:

- ρ_x specifična omska upornost $\left(\frac{\text{omov} \times \text{mm}^2}{\text{m}}\right)$
- γ_x specifična teža (kg/dm³)
- in c_x cena kilograma prevodne kovine (din/kg).

Če mislimo na določeno dolžino vodnika (L), določen tok (I) v njem in na določeno dopustno upornost, moramo specifični upornosti ρ_x sorazmerno prikrojovati prerez (F) vodnika. Torej je potrebna prostornina kovine sorazmerna specifični upornosti, potrebna teža zmnožku te upornosti in specifične teže, potrebni gradbeni stroški pa zmnožku specifične upornosti, specifične teže in specifične (kilogramske) cene. Skratka, zmnožek:

$$Z = \rho_x \cdot \gamma_x \cdot c_x \dots \dots \dots 1)$$

je jedro problema najprikkladnejše prevodne kovine.

Ta zmnožek naj dobi najmanjšo dosegljivo vrednost; v nji se skriva rešitev problema. Videli smo, da zahteva srebro neprimerno večjo vrednost kritičnega zmnožka kakor baker. Kaj zahtevajo ostale kovine, pa ne vidimo takoj. Potemtakem problem najprikkladnejše prevodne kovine le ni tako silno preprost, kakor je mislila še neizkušena mlada elektrotehnika.

Če si ogledujemo lestvico specifičnih omskih upornosti, zagledamo na tretjem klinu, seveda pod srebrom in bakrom, aluminij. Njegova specifična omska upornost je kajpada znatno večja: nekako 1·7-krat prekaša svoji plemenitejši sestri. To pa ne sme ustrašiti kritičnega raziskovalca. Aluminij je presenetljivo lahka kovina. Njegova specifična teža je 2·7 kg/dm³, je torej:

$$\frac{8\cdot9}{2\cdot7} = 3\cdot3 \text{ - krat}$$

manjša od specifične teže bakra. Potemtakem prenese aluminij:

$$\frac{3.3}{1.7} = 1.94\text{-kratno,}$$

to se pravi skoraj dvakratno specifično ceno bakra, ne da bi se moral v najpreprostejšem problemu prevodne kovine umakniti starejšemu, mogočnemu tekmecu.

To je nedvomno važen izsledek najpreprostejšega problema prevodne kovine, in praktični elektrotehniki je seveda že dolgo dobro znan. Jasno je, da opozarja na obširne možnosti, ki se odpirajo v trenutku, ko se cena kilograma aluminija dovolj približa ceni kilograma bakra. In nehoté se raziskovalec začne zanimati za gibanje enotnih cen bakra in aluminija v toku desetletij, v katerih se je razvijala in doraščala elektrotehnika. Ustrezna slika je izredno zanimiva in poučna. V nji zagledamo marsikaj, česar bi laik ne pričakoval.

5. Človeštvo pozna baker že tisočletja in svoje prvo orožje je gradilo s pomočjo te rdeče kovine. Aluminij pa je odkril Fr. Wohler šele 1827. l. Njegovo poročilo najdemo v »Poggen-dorff's Annalen für Physik und Chemie« (zv. 9., 1927). Čudovita, srebru podobna, toda izredno lahka kovina je takrat presenetila ves svet.

Danes vemo, da je aluminij poleg kisika in silicija najbolj zaširjena prvina človeškega sveta: celih 8 odstotkov zemeljske skorje je iz aluminija. Ker pa nikjer v človeku dosegljivi naravi ni čistega aluminija, te prvine dolgo nismo zapazili. Ko pa jo je človeštvo prvič zagledalo, je bilo prepričano, da je našlo žlahtno kovino, žlahtnejšo od srebra in enakopravno zlatu.

1854. l. je stal kilogram aluminija 5000 zlatih frankov! Takrat je bil resnično nekako enakopraven kilogramu zlata. 30 let kasneje, 1886. l. je veljal kilogram aluminija le še 87⁵ zl. franka in je že zaostal za kilogramom srebra. 1915. l. pa najdemo aluminij tako rekoč na tleh: samo 2¹ zl. franka je bil še vreden njegov kilogram. Še je neznatno dražji od kilograma bakra, ki je stal 1915. l. 1⁸⁴ zl. franka.

Slika tega čudovitega padanja vrednosti opravičuje zadržanje mlade elektrotehnike popolnoma. Takrat, ko se je začela razvijati, ko je gradila svoje prve razsvetljevalne naprave, ko je preživljala svojo prvo veliko krizo, polno bojev med enosmernim in izmeničnim tokom, je edini možni tekmec bakra, aluminij, plaval v nedosegljivih višavah in ji je bil skoraj ravno tako odmaknjen kakor srebro. Ko pa je aluminij

v prvih letih našega stoletja dosegel bakru nevarno ceno, se je elektrotehnika nemudoma začela zanimati zanj. Že 1899. l. je bila v Angliji zgrajena prenosna proga z vodniki iz aluminija (Northallertou, Yorkshire). Ta proga obratuje menda še danes.

Prav za prav je presenetljivo, da aluminij ni popolnoma izpodrinil bakra v elektrotehniki, ko je nekako dosegel specifično ceno svojega starejšega tekmeca. V zadnjem odseku smo vendar ugotovili, da je v osnovnem problemu prevodne kovine nevaren, dokler ne prekorači dvojne specifične cene bakra. Kako se je torej baker branil in ubranil?

Oglejmo si predvsem razvoj svetovne produkcije aluminija! Ves svet je pridobil:

leta:	1885.	1888.	1890.	1896.	1902.	1908.	1913.	1926.
ton:	13	39.2	175.3	1.789	7.800	18.600	65.000	200.000.

Od 1915. l., ko je aluminij postal v elektrotehniki bakru silno nevaren, se mu je svetovna produkcija do 1926. l. potrojila. V istem razdobju se je dvignila svetovna produkcija bakra za manj kakor 70 odstotkov.

Zmotno bi bilo sklepati iz teh podatkov, da se je aluminij razživel v elektrotehniki. Našel je namreč važna področja tehnike, ki so žejno posegla po izredno lahki kovini. Gospodinjstvo uporablja zelo rado lahke posode. Zrakoplovstvu je skromna specifična teža aluminija dragocena. Ko pa je mehansko malo odporni aluminij v posebnih zlitinah dosegel presenetljivo mehansko trdnost, so se mu povsod v tehniki odprla vrata (duraluminij).

Pa vendar: kako se ga je baker v elektrotehniki ubranil? Marsikaj ustreznega zvemo že iz statistike svetovne produkcije bakra. Najpomembnejše podatke prinaša naslednja

r a z p r e d e l n i c a št. 1.

produkcija v tonah, v letih:

Zed. drž.	Čile	Belg.	Kongo	Nemčija	Kanada	Sovj. Rusija	Ves svet
1913.							
555.410	42.300	7.500		49.500	34.900	34.300	1.018.500
1928.							
828.210	286.800	108.200		108.200	56.600	22.000	1.693.500.

Podatek o produkciji Sovjetske Rusije je v tej razpredelnici, ki prihaja iz nemških virov, seveda sumljiv.

Znano je, da kontrolirajo Zedinjene države vso produkcijo bakra v južnoameriški državi Čile. Znano je nadalje, da se je

1926. l. ustanovil svetovni kartel »Copper Export Association«, ki je popolnoma v severnoameriških rokah. Razmeroma počasno napredovanje produkcije bakra v razdobju 1915. do 1928. l. je odsev težav, ki jih je baker v tem času doživljal v prenosni elektrotehniki. Ustanovitev kartela pa je najbrž izraz močnega obrambnega ukrepa.

In res vidimo, da pada od 1915. l. cena bakra niže in niže, medtem ko ostaja cena aluminija stanovitna. To pripoveduje razpredelnica št. 2., ki je sestavljena s pomočjo podatkov, priobčenih v »Vierteljahrshefte zur Statistik des Deutschen Reiches«, in obsega tudi druge, elektrotehniki važne kovine.

Razpredelnica št. 2

	Povprečna cena za 100 kg v letih (M oziroma Mk)				
	1913.	1927.	1929.	1930.	1931.
srebra	8.155	7.839	7.343	5.339	4.101
bakra	146 ⁻¹⁹	826 ⁻⁵⁸	173 ⁻⁸⁵	127 ⁻⁴³	82 ⁻²¹
aluminija	170 ⁻⁰	210 ⁻⁰	190 ⁻⁰	185 ⁻⁷¹	170
cinka	45 ⁻³⁸	57 ⁻⁷⁷	49 ⁻⁹⁵	32 ⁻⁹⁶	22 ⁻⁴¹
kositra	418 ⁻⁵	609 ⁻⁵	430 ⁻⁰⁸	294 ⁻⁹²	233 ⁻¹²
nikla	325 ⁻⁰	345 ⁻⁶⁸	350 ⁻⁰	350 ⁻⁰	350
zlata		281.000.			

Baker se je potemtakem bolj in bolj približeval kritični polovični specifični ceni aluminija, medtem ko je aluminij mirno opazoval svojega tekmeca. Tik pred izbruhom druge svetovne vojne je stal kilogram prenosnega bakra le še nekako 1 šv. frank. Ta frank pa je bil le še 67 odstotkov nekdanjega!

Poznavalci boja med bakrom in aluminijem trdijo, da sta se oba tabora dobro zavedala globljih potankosti problema prevodnih kovin in da sta njihova kartela skrbno nadzirala uporabljanje svojih kovin. Kakor bomo videli, je aluminij bakru posebno nevaren v območju električnih prenosnih prog. Videli smo, da potrebuje elektrifikacija silne množine prenosnih kovin. Elektrifikacija je potemtakem predvsem izsilila bojno urejanje specifičnih cen bakra in aluminija.

Toda pridobivanje aluminija ni tako zgoščeno, kakor je pridobivanje bakra, ki je do treh četrtin v rokah severnoameriškega kartela. To vidimo iz naslednje razpredelnice, ki razčlenjuje svetovno produkcijo aluminija na najvažnejše države v Evropi in Ameriki.

Razpredelnica št. 5.

Produkcija aluminija, izražena v tonah, v letih:

Zed. drž.	Francija	Švica	Norveška	Nemčija	Anglija	Kanada
1913.						
20.900	14.500	10.000	1.500	1.000	7.600	5.900
1926.						
75.000	21.000	22.000	22.000	29.000	7.300	18.000.

Zanesljivega podatka o produkciji Sovjetske Zveze avtor ni imel, zato ga je rajši izpustil. Vsekakor je razpredelnica dovolj zgovorna: aluminij raste povsod v civiliziranem svetu.

To pa pomeni, da posegajo v borbo med bakrom in aluminijem tudi oziri na trgovinske bilance. Marsikateri elektrifikator poseže po domačem aluminiju, čeprav mu svetovni kartel ponuja razmeroma cenen prenosni baker. V Hitlerjevi Nemčiji sta na primer uredbi s 26. marca in z 28. aprila 1934. l. preprosto prepovedali uporabo bakra v prenosnih progah za srednje in visoke napetosti.

Iz vsega tega je jasno razvidno, da je velekapitalistično gospodarstvo v svoji imperialistični obliki energično posegalo v problem prevodne kovine in mu zatemnjevalo znanstveno neoporečno rešitev. Graditelji veleprenosnih prog so pod pritiskom kartelov zašli v skoraj neprodarno meglo. Vso njihovo spretnost in iznajdljivost je samopašni urejevalec specifičnih cen sproti izkoriščal. Zato sodobna prenosna elektrotehnika še ne premore jasne in dokončne rešitve problema prenosnih kovin.

Takšno rešitev pa bo našlo razumno kolektivno gospodarstvo, ki bo pridobivalo dovolj bakra in aluminija za svoje potrebe. Le oprt na neoporečne specifične cene obeh možnih prenosnih kovin, bo elektrifikator lahko pravilno oblikoval svoje prenosne proge in dokončno iztrgal važni problem rokam špekulantov in izkoriščevalcev.

6. Čeprav se zdi, da prenese aluminij v tekmi z bakrom skoraj dvojno specifično ceno, in čeprav so veliki kovinski karteli ustrezno uravnavali svoje specifične cene, najde kritični raziskovalec kaj kmalu zapletljaj, ki zavira prodiranje aluminija v elektrotehniki in pogloblja osnovno sliko problema prevodne kovine.

Aluminij ima, kakor smo videli, 17-krat manjšo električno prevodnost kakor baker in vsiljuje svojim vodnikom po vsem videzu 17-kraten prerez. To pa pomeni, da potrebuje vodnik iz aluminija 17-krat večji prostor kakor njegov bakreni tek-

mec. Le tedaj prenese torej aluminij skoraj dvojno specifično ceno bakra, če njegove večje prostorne potrebe niso važne.

Vzemimo preprost primer! Transformator je sestavljen iz železnega obroča, v katerem niha magnetni fluks, in navitij, ki oklepajo ta fluks (slika 1.). Jasno je, da bo transformator potreboval tem manj železa za svoje jedro, čim skrbneje bo prerez skozi navitje izkoristil odprtino v železnem obroču. Potemtakem so prostorne potrebe navitij graditeljem transformatorjev izredno važne.

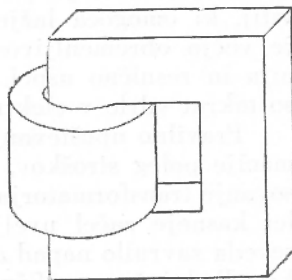
Navitje iz aluminija potrebuje seveda 17-krat večji prerez, če naj zamenja bakreno navitje, ne da bi povečalo energijske izgube. 17-kratna odprtina v železnem obroču pa pomeni skoraj 13-krat daljši obroč. Pomeni pa tudi, kar je važnejše, 13-krat večje energijske izgube v železu. Zato aluminij v transformatorski panogi ne more izpodrinuti bakra.

Vsi električni stroji so prav za prav transformatorji. V vseh so potrebna železna jedra in navitja. V vseh se jedro in navitja medsebojno oklepajo kakor členi verige. Zato so vsem prostorne potrebe navitij izredno važne in preprečujejo vdiranje aluminija.

Nekatera navitja električnih strojev pa oklepajo stanovitne, enosmerne magnetne flukse, ki ne povzročajo energijskih izgub, na primer vzbujalna navitja sinhronskih strojev in strojev za enosmerni tok. Stanovitni fluksi ne inducirajo nikakršnih napetosti v ovojih, ki jih obkrožajo. Kratek stik takšnega ovoja je očitno neškodljiv. Zato pa je izolacija teh ovojev razmeroma malo važna.

Vodnik iz aluminija se obda vselej z oksidno plastjo, ki je uporaben, čeprav skromen površinski izolator. Vsa navitja pa trošijo obilo prostora za izolacijske plašče, ki nujno obdajajo ovoje. Če izkoristimo oksidni plašč vodnika iz aluminija, prihranimo mnogo prostora. V vzbujalnih navitjih, ki služijo enosmernim magnetnim fluksom, je torej aluminij vendarle nevaren tekmeč bakra.

1912. l. je avtor izkoristil znatno večjo prostorno zahtevnost navitij iz aluminija na način, ki je zelo značilen za tiste čase. Takrat so bili gradbeni stroški transformatorjev vsemogočni, poleg njih pa energijske izgube v železnih jedrih in navitjih skoraj nepomembne. Cenejši transformator je seveda



Slika 1.

trošil neplodno več energije. Trošiti pa jo je smel le, če se pod njenim vplivom ni nedopustno ogreval. V tistih nekritičnih časih transformatorske panoge je bil zato problem hlajenja navitij in jeder vodilni problem.

Avtor je videl znatno večje prostorne potrebe navitij iz aluminija, videl je pa tudi ustrezno večjo površino teh navitij, ki omogoča lažje odvajanje obratne toplote. Izkoristil je večjo obremenljivost transformatorja z navitji iz aluminija in resnično uspel. Stotine transformatorjev iz aluminija so takrat vdrle v električne naprave.

Pravilno upoštevanje stroškov energijskih izgub transformacije poleg stroškov, ki jih povzroča obrestovanje in odpisovanje transformatorja, upoštevanje, ki ga je avtor sam nekaj let kasneje začel uveljavljati v transformatorski panogi, je seveda zavrnilo napad aluminija na nezavzetno postojanko bakra. Padajoča specifična cena bakra je izrinila aluminij tudi iz vzbujevalnih navitij, kjer je bila oksidna plast na površini aluminjskih ovojev takó le nekakšna zasilna rešitev izolacijskega problema. V območju električnih strojev bi se bil baker nedvomno ubranil svojega lažjega tekmeca, tudi če bi ne bil postajal specifično cenejši in cenejši.

V električnih strojih je treba vselej spajkati obilo koncev tuljavic, iz katerih so sestavljena navitja. Baker dopušča tako imenovano mehko spajkanje, ki ne potrebuje močne toplote. Aluminij je občutljivejši za zunanje vplive in odpornejši sožitju z drugimi kovinami. Njegova neizbežna oksidna površina je nadležna zapreka mehkeemu spajkanju. Trdo spajkanje v neposredni sosesčini občutljivih izolacijskih plaščev na tuljavicah pa je nevarno.

Danes ima aluminij svojo izkušeno tehnologijo. Pa tudi danes so zveze med konci zaporednih vodnikov aluminiju težavnejši problem kakor bakru. Tudi v območju prenosnih vodnikov poznamo ustrezno, pomembno razliko, ki pa seveda ni tako važna, da bi lahko resno zavirala prodiranje aluminija v prenosne proge.

V električnih prenosnih progah je večja prostorna zahtevnost aluminija brez pomena. V progah z visoko prenosno napetostjo pa je potrební večji premer prenosnega vodnika iz aluminija celó dragocen. Potemtakem so vse proste prenosne proge aluminiju zelo dostopne.

Iz dejstva, da se borita baker in aluminij za elektrotehniko na dveh bistveno različnih bojiščih, tam kjer so prostorne potrebe prevodne kovine važne in tam, kjer so popolnoma nevažne, izvirajo zabavne težave kapitalističnih kartelov, ki usmerjajo specifične cene kovin. Ves baker, ki ga

potrebuje elektrotehnika za svoje stroje, pa tudi za svoje raznolike priprave, je varen pred aluminijem in ne potrebuje nizke, skoraj polovične specifične cene aluminija. Ves baker pa, ki bi lahko zasedel prenosne proge, je v napornem boju z aluminijem. Kako pa naj prodajalec bakra ugotovi, kje ga bo kupec uporabil? Preoblikovanje bakrenih žic je razmeroma preprosto. Baker mora potemtakem na obeh svojih elektrotehniških bojiščih popuščati ali pa se mora načelno odmakniti prostim prenosnim progam.

Po vsem videzu je bojišče prostih prenosnih prog tako važno, da se mu baker ne more odtujiti. Zato pada specifična cena bakra že skozi desetletja, medtem ko je specifična cena aluminija ves ta čas stanovitna. V kapitalističnem gospodarstvu aluminiju očitno ni treba popuščati. Ker pa produkcija aluminija burno narašča, je njegova skoraj stanovitna specifična cena le odsev težav, s katerimi se bori prenosni baker. Resnično vrednost kilograma prenosnega aluminija bo ugotovilo le razumno, načrtno kolektivno gospodarstvo.

7. Vesten raziskovalec problema prevodne kovine ne sme že v osnovah brez utemeljitve odrinuti vseh drugih kovin poleg bakra in aluminija. Zato si bo nedvomno ogledal ustrezno razpredelnico, ki se opira na osnovno enačbo (1), čeprav jo mora prikrojiti nekemu poljubno izbranemu položaju specifičnih cen, da ne zaide v nepotrebna razglabljanja. Tako nastane na primer naslednja slika.

Razpredelnica št. 4.

	specif. upornost (ρ_x)	specif. teža (γ_x)	specif. cena (c_x) 1951. l.	$\rho_x \cdot \gamma_x \cdot c_x$
srebro	0.017	10.5	41.01	7.34
baker	0.0175	8.9	0.82	0.128
aluminij	0.03	2.6	1.7	0.1327
cink	0.06	7.15	2.24	0.96
kositer	0.12	7.4	2.33	2.07
nikel	0.10	8.7	3.5	3.05.

Ta slika je tako jasna, da odklanja vsa nadaljnja preiskavanja: specifične cene se ne morejo tako temeljito spremeniti, da bi poleg bakra in aluminija še druge kovine mogle poseči v problem prevodne kovine. In vendar ni popolna. V nji ne najdemo najvažnejše kovine: železa.

Železo ima nekako isto specifično težo kakor kositer in tudi nekako isto električno upornost, je pa zelo cenena ko-

vina. Če bi njegova specifična cena padla na dvajsetino specifične cene kositra, bi omogočila zmnožek:

$$c_x \cdot \gamma_x \cdot c_x = \frac{2 \cdot 07}{20} = 0 \cdot 1035,$$

ki bi pomenil po vsem videzu nevarno tekmovanje železa kot prevodne kovine z bakrom in aluminijem.

Tej kritični specifični ceni je bilo železo že zelo blizu. Zato mora vestni raziskovalec neoporečno dokazati, da ima elektrotehnika zelo tehtne razloge za odklanjanje železa kot prevodne kovine. Ta naloga je tem važnejša, ker smo v kritičnih časih resnično uporabljali železne vodnike in jih, kakor bomo videli, tudi v normalnih časih ne moremo popolnoma pogrešati.

Ugotovimo predvsem, da ima železo nekako trikratno električno specifično upornost aluminija in da ima zato tudi trikratne prostorne potrebe! Aluminij se je moral uveriti, da zaradi svojih prostornih zahtev v električnih strojih ne more izpodriniti bakra. Še mnogo težje bi tedaj železni vodniki vdiral v električne stroje. Železo se more potemtakem kot prevodna kovina uveljavljati le v primerih, ki se ne menijo za prostorne potrebe.

Če omejimo po tej ugotovitvi nadaljnja raziskavanja na uporabo železa za vodnike prostih prenosnih prog, pa moramo nemudoma razčistiti važno osnovno vprašanje problema prevodnih kovin, ki smo ga doslej zanemarjali, ker postane praktično le v izjemnih primerih pomembno. To vprašanje je namreč v območju železnih vodnikov neobičajno zaostreno. Suče se okoli specifične omske upornosti.

Ko govorimo o omski upornosti prevodnih kovin, mislimo vselej le na upornost, s katero se bori enosmerni tok v kovinskem vodniku. Izkušnje nas uče, da se upirajo prevodne kovine izmeničnim tokom normalno ravno tako, kakor se upirajo enosmernemu toku. Te izkušnje smo zbrali v obratih s frekvenco 50 (sek⁻¹) in z vodniki iz bakra oziroma aluminija, ki nimajo prevelikega prereza. Teorija izmeničnih tokov pa ve, da je izmenična specifična omska upornost večja od enosmerne. Razliko nam opisuje nazorno v sliki tako imenovanega kožnega pojava.

Prvi je opozoril na naraščanje specifične omske upornosti z dvigajočo se frekvenco izmeničnega toka Hughes (Journal of the Society of Telegraph Engineers, Jan. 28. 1886). Zanimivi pojav je takoj popolnoma razčistil Lord Rayleigh (Philos. Magazine, 1886. I. str. 369 in 382). Elektrotehnika pa je postala pozorna, ko je znani fizik W. Thomson 1889. I. v »Institution

of Electrical Engineers« predaval o problemu izmenične omske upornosti. O teh predavanjih imamo ohranjena poročila v takratnih vodilnih strokovnih časopisih »Electrical Review« (1889. l., str. 25). »Electrician« (1890. l., str. 510, 575 in 1891. l., str. 159). »Elektrotechnische Zeitschrift« (1890. l., str. 661).

Teorija izmenične omske upornosti upošteva seveda vpliv magnetnega polja, ki se oprede okoli vsakega električnega toka, na razdelitev toka čez prerez vodnika. Ustrezni računi so zelo zamotani. V njih se uveljavljata poleg frekvence (f) izmeničnega toka električna in magnetna prevodnost kovine, najvažnejšo vlogo pa prevzame premer d (cm) okroglega vodnika. Zaradi različnih električnih in magnetnih prevodnosti različnih kovin je seveda izmenična upornost bakra, aluminija in železa v različnih odnosih do ustrezne enosmerne. V vseh primerih je kajpada večja (k -krat) od enosmerne. Je pa:

$$\text{v primeru bakra: } k_b = 1 + 0.7 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^2 - 0.4 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^4$$

$$\text{v primeru aluminija: } k_{al} = 1 + 0.25 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^2 - 0.05 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^4$$

$$\text{v primeru železa: } k_z = 1 + 2.10^4 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^2 - 3.33 \cdot 10^8 \left(\frac{f \cdot d^2}{1000} \right)^4$$

V evropski prenosni elektrotehniki imamo ustaljeno frekvenco:

$$f = 50 \text{ (sek}^{-1}\text{)}.$$

Razlike med izmenično in enosmerno omsko upornostjo, ki ne dosežejo enega odstotka, so seveda praktično nepomembne. Zato se bakreni vodniki ne menijo zanje, dokler je:

$$0.7 \cdot \left(\frac{50 \cdot d^2}{1000} \right)^2 \leq \frac{1}{100}$$

drugače povedano, dokler je:

$$d_b \leq 1.55 \text{ centimetra.}$$

Ustrezni kritični premer okroglega vodnika iz aluminija je:

$$d_{al} \leq 2.0 \text{ centimetra.}$$

Železo pa je neprimerno občutljivejše. Iz:

$$2.10^4 \cdot \left(\frac{50 \cdot d^2}{1000} \right)^2 = \frac{1}{100}$$

dobimo:

$$d_z \leq 0.119 \text{ centimetra} = 1.19 \text{ milimetra.}$$

V prenosni elektrotehniki ne uporabljamo bakrenih vodnikov s polnim prerezom nad 16 mm^2 , to se pravi s premerom nad 4.5 milimetra, ker moramo misliti na zadostno upogljivost, ki omogoča navijanje dolgih žic na lesene transportne bobne. Zato so vsi bakreni prenosni vodniki z večjimi prerezi iz razmeroma tankih žic spletene vrvi. Seveda so tudi prenosni vodniki iz aluminija vrvi. Praktično se torej bakreni in aluminij-ski prenosni vodniki po vsem videzu močno odmikajo kožnemu pojavu, hkrati pa tudi razliki med izmenično in enosmerno omsko upornostjo.

Že 1900. l. je G. Mie ugotovil (Wiedemann's Annalen), da se v izmenični upornosti sestavljenih vodnikov nekoliko uveljavlja magnetni vpliv žile na žilo. Tako je na primer v bakreni vrvi, ki razpade na dve okrogli žili:

$$k'_b = 1 + \left[0.7 + 8.5 \left(\frac{d}{2a} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{1}{1000} \right]^2 - \left[0.4 + 32 \left(\frac{d}{2a} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{f \cdot d^2}{1000} \right]^4,$$

če je a (cm) razdalja osi teh dveh žil. Ker pa je v prenosni vrvi:

$$d = a,$$

je:

$$0.7 + 8.5 \left(\frac{d}{2a} \right)^2 = 0.7 + 2.125 = 4.04 \times 0.7.$$

Zato sme d doseči le nekako 70 odstotkov kritičnega premera polnega okroglega vodnika, in dvožilna vrv ne doseže vsega prereza polnega vodnika. V mnogožilnih vrveh nastajajo večje razlike. Ker pa se v prenosnih vrveh žile prepletajo — v vi-bah (spiralah) potujejo vzdolž vrvi — se magnetni vplivi žilic deloma izenačujejo. Potemtakem praktično le ni upoštevanja vrednega kožnega pojava v bakrenih, pa tudi v aluminij-skih, prenosnih vrveh. Primer dvožilne vrvi dokazuje namreč, da posega vrv brez nevarnosti po izdatno večjih premerih kakor polna okrogla žica. Razkosavanje prereza na številne delne prereze sestavnih nitk je pač podobno učinkovito kakor razkosavanje železnih jeder, ki naj služijo izmeničnim fluksom, na tanke liste iz pločevine.

Iz poglobljene slike izmenične omske upornosti je razvidno, da je železo kot prevodna kovina slabo uporabljivo. Saj izsiljuje že v območju zelo majhnih prenosnih prerezov razkosavanje, to se pravi uporabo prenosnih vrvi, spletenih iz zelo

tankih nitk. Le prerade se pojavljajo v takšnih vrveh pomembne razlike med izmenično in enosmerno omsko uporabnostjo.

Železo je tudi kemično malo odporno. Vplivi iz ozračja so mu nevarni, oksidiranje mu razjeda površino. Zato je treba železne žice in vrvi, ki jih včasih le uporabljamo v prenosni elektrotehniki, vselej skrbno pocinkati. Baker in aluminij ne potrebujeta podobnega zavarovanja. Aluminiju je oksidni plašč dobro obrambno sredstvo.

Železo ima trikratne prostorne potrebe aluminija. Ker pa je aluminij skoraj trikrat specifično lažji od železa, omogoča prenosne vodnike, ki so devetkrat lažji od ustreznih železnih. To je važna razlika, ki se očituje v oblikovanju nosilnih stebrov prenosnih prog.

Po vsem tem je železo le v izjemnih primerih uporabljivo, takrat namreč, ko se pojavi potreba izdatne mehanske odpornosti prenosnega vodnika. Jeklo zdrži mnogo večji specifični nateg kakor baker, baker zdrži dvainpolkrat toliko kakor aluminij. V mehansko zelo ogroženih koščkih prenosnih prog, na primer v izjemno velikih razpetinah, je jeklena vrvi dober pripomoček, njena nevšečna omska uporabnost pa v zaporedju z uporabnostjo vse ostale proge malo važna.

Problem prevodnih kovin se skrči po pregledu osnovnih slik nedvomno v problem tekmovanja aluminija z bakrom, toda tudi to tekmovanje je omejeno na območje prostih prenosnih prog. Videli smo, da potrebujejo električna ožilja velikih gospodarstev ogromne množine prevodnih kovin. Tudi močno zoženi problem prevodnih kovin ostane potemtakem izredno važen, lina pa neslutene globine. Doslej smo mu v tej študiju zgradili le okvir. V naslednjih poglavjih pa naj nastane slika, ki bo napolnila ta okvir.

II. GOSPODARSKI USTROJ PROSTIH PRENOSNIH PROG

8. V svoji osnovni sliki uveljavlja problem prevodnih kovin načelo, da potrebujejo vodniki, ko izbirajo med kovinami, prereze, ki so premo sorazmerni specifičnim omskim upornostim. Tudi v zoženem problemu, ki raziskuje le tekmovanje aluminija z bakrom, uporablja živa elektrotehnika načelo, da potrebujejo prenosni vodniki iz aluminija 17-kratni prerez ustreznih bakrenih, ker ima aluminij pač 17-kratno specifično upornost. To načelo pa mi vselej neoporečno.

Nastalo je zelo preprosto. Če zamenjam bakreni vodnik z aluminijskim, ki ima isto upornost, ne spremenim prenosnih energijskih izgub in omskega napetostnega padca. Vse ostalo ima le gospodarski pomen. Toda gospodarski kritik si ogleduje tudi negospodarske osnove problema. In zato ne bo slepo odobrill primerjevalnega načela, ki je postalo nekakšen aksiom.

Proti koncu preteklega stoletja je znani angleški fizik W. Thomson, kasnejši Lord Kelvin, nazorno opisal gospodarski ustroj problema prevodnih kovin. Thomson je, kakor smo videli v prejšnjem poglavju, učinkovito posegel tudi v problem enosmerne in izmenične omske upornosti. Gospodarski ustroj prostih prenosnih prog se je seveda v zadnjih petih desetletjih močno zamotal, toda Kelvinova slika mu je le ostala važna. Oglejmo si jo!

Vodniku, ki naj bo struga nekemu določenemu toku, damo lahko poljuben prerez. Nabavni stroški prevodne kovine so seveda temu prerezu sorazmerni, dokler ostane dolžina vodnika nespremenjena. Energijske izgube v vodniku, džaulska toplota toka, pa je kajpada obratno sorazmerna izbranemu prerezu.

V letnem obračunu prenosne naprave se uveljavljajo nabavni stroški prevodne kovine z ustreznimi obrestmi in odpisi, energijske izgube pa z vrednostjo izgubljenih kilovatnih ur. Celotni letni prenosni stroški so potemtakem v svojem prvem delu sorazmerni, v svojem drugem delu pa obratno sorazmerni izbranemu prerezu prenosnega vodnika.

S to ugotovitvijo se je Kelvin znašel pred starim geometrijskim problemom pravokotnega četrkotnika z določeno ploščino, ki išče najmanjši možni obseg. Kvadrat je dobro znana rešitev tega problema. Zato zahteva tako imenovano Kelvinovo pravilo polovične letne prenosne stroške za

obrestovanje ter odpisovanje prenosne kovine, drugo polovico teh stroškov pa za presnosne energijske izgube.

Nezaupljivi opazovalec bo seveda takoj ugotovil, da teko obresti in odpisi neizprosno, brez ozira na obratovanje, da pa prenosna proga ni stanovitno obremenjena, da torej nima stanovitnih energijskih izgub. Fizik Kelvin morda res ni mislil na časovno spremenljivost džaulske toplote v prenosnem vodniku, temveč je preprosto predpostavljajl neoporečno stanoviten obrat. Njegovo pravilo je pa le uoporečno.

Elektrotehnika si je ustvarila pojem letnih obratnih nr. V ustrezni pomožni sliki vidi vse v letu zbrano električno delo opravljeno s polno močjo naprave, zato pa zgoščeno v obratnih urah, ki zaostajajo za 8760 urami vsega leta. Dolgoletne izkušnje jo uče, da so povprečne letne obratne ure razsežnega električnega gospodarstva dokaj stanovitne.

Seveda je treba misliti na dejstvo, da sledi prenosna moč ob stanovitni prenosni napetosti vsakokratni jakosti prenosnega toka, džaulska toplota prenosne proge pa kvadratu te jakosti. Nedvomno pa imajo tudi prenosne energijske izgube svoje dokaj stanovitne letne obratne ure, ki so pa seveda maloštevilnejše od pravih letnih obratnih ur. S temi obratnimi urami džaulske toplote je pač treba poglobiti Kelvinovo pravilo — če ne postanejo sploh nepomembne. Vodnim električnim centralam so skoraj popolnoma nevažne; vodne centrale proizvajajo električno energijo s stanovitno ceno letnega kilovata.

Če po vsem tem uvidimo, da je treba uravnovesiti obratovanje ter odpisovanje prenosne kovine z vrednostjo njenih letnih energijskih izgub, stojimo nenadoma pred dobro utemeljenim načelom primerjanja prevodnih kovin, ki ni skladno s praktično vsestransko priznanim. Neskladnost je prav lahko opisati.

Vzemimo bakreno prenosno progo, ki popolnoma ustreza prvotnemu Kelvinovemu pravilu! Če zamenjamo bakreni vodnik z aluminijem, ki dobi 17-kratni prerez, se energijske izgube v progi ne spremenijo, če ne spremenimo obratovanja. Pač pa postane teža prenosnega vodnika v razmerju:

$$1.7 \times \frac{2.7}{8.9} = 0.515 : 1$$

manjša. Zamenjava je torej le tedaj neoporečna, če stojita specifični ceni bakra in aluminija v istem razmerju.

Kolikšno je neoporečno razmerje specifičnih cen bakra in aluminija, more povedati le razumno načrtno gospodarstvo. Če so karteli umetno uveljavili razmerje, ki ustreza praktičnemu

načelu specifični omski upornosti premo sorazmernega prenosnega prereza, so se pač prilagodili ukoreninjenemu mnenju prenosne elektrike. Nepristranski raziskovalec problema prevodnih kovin pa vidi vso trhllost te gospodarske konstrukcije, vidi, da je potreben prerez prenosnega vodnika globlje povezan z gospodarskim ustrojem prenosnih prog in računa z razmerjem specifičnih enotnih cen, ki ni plod gospodarskih spekulacij.

Kdor pa le veruje, da je razmerje specifičnih cen, ki so ga določili karteli, neoporečno in vztraja v oblikovanju prenosnih prevezov po starem praktičnem načelu, doživi neljubo razočaranje, ko zagleda v gospodarskem ustroju prenosnih prog dodatek, ki ga Kelvin ni upošteval, ker ga ni poznal, dodatek, ki močno posega v prvotno Kelvinovo pravilo. Kelvinov vodnik je bil namreč tako rekoč razpet v praznem prostoru, ker ni potreboval mehanske opore. Sodobni prenosni vodniki pa so obešeni na mogočne kletkaste jeklene stebre. Mehanska oprema sodobnih prenosnih prog posega nedvomno v letne prenosne stroške. Zato je treba prvotno Kelvinovo pravilo poglobiti.

9. Fiziku Kelvinovega kova podtikati, da je mislil le na vodnike, ki so osamljeni v neizmernem prostoru in zato vzvišeni nad kakršno koli mehansko oporo, bi bilo seveda krivično. Kelvin je nedvomno poznal električne prenosne naprave svoje dobe. Predpostavljal pa je, ko je gradil svoje pravilo, da so stroški mehanske opreme prenosnih vodnikov neodvisni od prereza, ki ga naj vodnik dobi.

Ko so v začetku osemdesetih let preteklega stoletja nastajale prve skromne evropske razsvetljevalne naprave, so imele prenosne proge silno kratko pot. Tako imenovane bločne centrale so bile zadovoljne s kletjo dovolj velikega poslopja v skupini hiš med štirimi ulicami, v bloku hiš torej. Iz kleti so vodili prenosni vodniki razsvetljevalni tok v sobe teh hiš. Prenosni vodniki so bili takrat zadovoljni z oporami v obliki porcelanskih ali pa steklenih gumbov, ki so bili pritrjeni na stene. Ta skromna mehanska opora je bila praktično seveda popolnoma neodvisna od prereza prenosnega vodnika in povzročala je praktično nepremakljive stroške.

Prvotno Kelvinovo pravilo določa najmanjše možne prenosne stroške, všteti stroške, to se pravi obrestovanje ter odpisovanje, mehanske opreme, dokler je ta oprema neodvisna od prereza prenosnega vodnika. Če pa se mehanska oprema prilagodeva prerezu prenosnega vodnika, je treba prvotno Kelvinovo pravilo seveda izpopolniti. V sodobnih prenosnih progah

so stroški stebrov, ki nosijo prenosne vodnike, nedvomno močno odvisni od prereza teh vodnikov.

Ko obešamo vodnike prostih prenosnih prog med podporne stebre, jih natezamo, da se ne povešajo preveč. Prenosna kovina zdrži določen nateg, določeno število kilogramov na vsak kvadratni centimeter prereza, ki ga dobi vodnik. Čim večji je prerez, s tem večjo silo upogiba torej vodnik steber, na katerega se je obesil. Zato rastejo stroški sodobne mehanske opreme prenosnih prog, če raste prerez prenosnih vodnikov. Prenosna kovina prevzema potemtakem dandanes gospodarsko odgovornost za svojo mehansko opremo.

Denimo, da si zgradimo prvo, čeprav nenatančno sliko te gospodarske odgovornosti, da naraščajo stroški stebrov v prenosni progji sorazmerno prerezu prenosnega vodnika! V tem primeru bi morali polagati na tisto skodelico Kelvinove tehtnice, ki nosi obresti in odpise prenosne kovine, tudi obresti in odpise stebrov. Saj sta obe uteži sorazmerni prerezu prenosnega vodnika. V drugi skodelici bi pa ostali nespremenjeni stroški prenosnih energijskih izgub: stebri ne povzročajo džaulske toplote.

Ta preprosta slika dokazuje, da se prenosni progji, ki vpliva s prerezom vodnika na svojo mehansko opremo, prenosna kovina nekako podraži. V poglobljenem Kelvinovem pravilu je seveda nevažno, ali obrestujemo ter odpisujemo stebre in prenosno kovino ali pa samo neko nadomestno prenosno kovino, ki stane na videz toliko kakor resnična in njena mehanska oprema.

Potemtakem primerjanje bakra z aluminijem ni v redu, če se opira na resnični specifični ceni teh dveh prenosnih kovin, preusmeriti ga je treba na specifični, s stroški mehanske opreme obremenjeni ceni bakra in aluminija. Naivno pa bi bilo preprosto predpostavljati, da dvigne upoštevanje mehanske opreme prvotno specifično ceno bakru in aluminiju v istem razmerju.

Zoženi problem prenosnih kovin se vidno zamotava, ko ga začenjajo skrbno raziskavati. Praktiku je še takšen, kakršnega je videl Kelvin. Toda v zadnjih petih desetletjih je postala mehanska oprema prenosnih prog presenetljivo važen činitelj v gospodarskem ustroju teh prog. Prenosni baker zahteva včasih le še tretjino gradbenih stroškov, pa tudi manj. In da sta ostali dve tretjini močno odvisni od prereza prenosnega vodnika, je jasno. Lahkomiselno bi bilo zanemarjati njun vpliv na tekmovanje aluminija z bakrom.

Seveda je pravkar sestavljena slika v marsičem pomanjkljiva. Stroški stebrov v prenosni progji niso sorazmerni prerezu

prenosnega vodnika. Sodobne proge gradimo tako, da zdrži le vsaki šesti ali pa vsaki deseti steber natezalno silo, s katero se vodniki obešajo nanj, vmesni stebri so šibkejši. Saj v nepoškodovani progi prav za prav ni upogibnih momentov v stebrih, ker se natezalne sile sosednih razpetin navadno uravnovešajo. Upogibni momenti se pojavljajo le takrat, če se nekje prenosni vodnik pretrga. Takšnim mehanskim mošnjam pa naj kljubujejo močnejši natezni stebri v procesiji preprostih nosilnih: v skrajnem primeru omagajo pač vsi nosilni stebri med dvema zaporednima nateznima.

Nedvomno pa tudi stroški nateznih stebrov niso sorazmerni upogibnim momentom natezalnih sil, ki vlečejo iz prenosnih vodnikov; odvisnost je, kakor bomo videli, drugačna. Pa tudi resnična odvisnost ne objema vsega nateznega stebra, temveč le njegov mehansko aktivni del med vrhom temelja, v katerega je steber vpet, in obešališčem prenosnega vodnika. Pod tem aktivnim delom je temeljni, nad njim vrhni del. Steber pa ima tudi močne prečne nosilce, ki skrbijo za potrebno razmikanje faznih obešališč.

In navsezadnje: Kelvinovo pravilo predpostavlja tudi v svoji poglobljeni obliki določeno število stebrov, to se pravi neko določeno razpetino med dvema zaporednima stebroma. Ali ni labkomiselno predpostavljati, da morata baker in aluminij uporabljati isto razpetino?

Vse to odkriva vznemirljive globine v zoženem problemu prenosnih kovin. Ker pa se problem v teh globinah po vsem videzu tako zamotava, da mu neoporečno znanstveno raziskavanje ne more slediti, je praktična elektrotehnika ubrala silno preprosto pot: zaupala se je izkušnjam, ki jo na videz uče, da je staro načelo prenosnih prevezov, ki so premo sorazmerni specifičnim omskim upornostim, zadovoljivo.

In vendar: specifični ceni bakra in aluminija, ki sta se v kapitalističnem gospodarstvu nekako prilagodili temu staremu načelu, nedvomno nista neoporečni. Kakor hitro se pod vplivom razumnega kolektivnega gospodarstva razmakneta, nastane položaj, kateremu staro primerjevalno načelo ni več kos.

Jasno je tudi, da se znanost ne more ustrašiti na videz nepreglednih zapletljajev v globini zoženega problema prenosnih kovin. Stroški mehanske opreme prenosnih prog so tako važni, da zaslužijo tudi naporno znanstveno razčlenjevanje. Pa saj je to razčlenjevanje le na videz naporno!

10. Kelvinovo pravilo, ki uravnoveša stroške energijskih izgub v prevodni kovini z obrestovanjem ter odpisovanjem te kovine, obdrži, kakor smo videli, tudi v svoji poglobljeni, iz-

popolnjeni obliki svojo preprosto tehtnico, le specifično ceno prenosne kovine dviga tako, da se v nji izraža tudi vsa gospodarska odgovornost prenosne kovine za nepogresljivo mehansko opremo.

Kelvin pa prav za prav ni mislil na prenosne vodnike, ko je gradil svoje pravilo, temveč na poljubne vodnike. V osnovah njegovega problema ni nikjer prenosnih prog. Potemtakem velja njegovo pravilo vsi elektrotehniki in je po vsem videzu eden izmed njenih najvažnejših stebrov. In ker se suče okoli najpriporočljivejšega prereza, ki ga naj dobi vodnik določenega toka, določa prav za prav vsi elektrotehniki najpriporočljivejše gostote uporabljenih tokov.

Oglejmo si primer prenosne proge, ki ima tako skromno mehansko opremo, da prerez prenosnega vodnika ne more vplivati nanjo! Specifična cena prenosne kovine naj bo c_x (din/kg), obrestovalna ter odpisovalna kvota p_x odstotkov, vrednost letnega kilovata, ki ga potrebuje džaulska toplota v prenosnem vodniku pa k_x dinarjev!

Ker merimo gostote tokov z amperji na kvadratni milimeter, mislimo najbolje na vodnik s prerezom kvadratnega milimetra: tok v njem je potem skladen z gostoto (g). Popolnoma nevažno je, kako dolg je vodnik. Zato mu smemo odmeriti dolžino enega kilometra.

Prostornina vodnika je v tem primeru:

$$\begin{aligned} & 1 \times 10^{-4} \times 1 \times 10^4 = 1 \text{ kubični decimeter.} \\ \text{teža:} & \quad 1 \times \gamma_x \text{ kilogramov,} \end{aligned}$$

če je γ_x (kg/dm³) specifična teža prenosne kovine, letne obresti ter odpisi pa znesó:

$$\frac{p}{100} \cdot \gamma_x \cdot c_x \text{ dinarjev.}$$

Z druge strani vidimo omski upor:

$$q_x \cdot \frac{1000}{1} \text{ omov,}$$

džaulsko toploto:

$$q_x \cdot g^2 \cdot 1000 \text{ vatov} = q_x \cdot g^2 \text{ kilovatov}$$

in vrednost izgubljenih letnih kilovatov:

$$k_x \cdot q_x \cdot g^2 \text{ dinarjev.}$$

Kelvinovo pravilo zahteva:

$$\frac{p}{100} \cdot \gamma_x \cdot c_x = k_x \cdot \varrho_x \cdot g^2$$

oziroma:

$$g = \sqrt{\frac{\gamma_x \cdot c_x \cdot p}{100 \varrho_x \cdot k_x}} \dots \dots \dots 2)$$

Če vstavimo, ko mislimo na bakren vodnik:

$$\gamma_x = 8.9 \text{ kilogramov/dm}^3,$$

$$c_x = 20 \text{ dinarjev/kg.}$$

$$100 \varrho_x = 1.75 \frac{\text{omov} \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

in

$$p_x = 10 \text{ odstotkov,}$$

$$k_x = 1000 \text{ dinarjev/letni kilovat.}$$

dobimo:

$$g = \sqrt{\frac{8.9 \times 20 \times 10}{1.75 \times 1000}} = 1.0 \text{ amperjev/mm}^2.$$

Ta izsledek je lepo skladen z izkušnjami prenosne elektrotehnike, je pa seveda odvisen od specifične cene bakra in vrednosti letnega kilovata. Seveda mislimo na vodne centrale, ko ocenjujemo džaulsko toploto v prenosnem vodniku z vrednostjo letnega kilovata. Povprečni gradbeni stroški večjih vodnih central so se pred zadnjo svetovno vojno sukali okoli 10.000 din/kW. Obresti ter odpisi tega zneska določajo vrednost letnega kilovata.

Gospodarska gostota se seveda ne spremeni, če se dvigata c_x in k_x v istem razmerju, je torej neodvisna od vrednosti denarja, s katerim ju ocenjujemo. Pač pa je odvisna od špekulativnega premikanja specifične cene prenosne kovine. Zato vidimo, da je v zadnjih časih gostota prenosnega toka v bakrenih progah polagoma padala.

Seveda obeta enačba 2) najpriporočljivejšo gostoto le v primeru najpreprostejše prenosne proge, če ji pomeni c_x resnično specifično ceno prenosne kovine. Prav za prav pa je tudi v najpreprostejšem primeru c_x že obremenjena s stroški montaže prenosnega vodnika in njegove morebitne izolacije. Cena elektrolitnega bakra na primer še ni cena okrogle žice iz elektrolitnega bakra in je še manj cena iz okroglih žic spletenih prenosnih vrvi. Izdatno višja je nazadnje specifična cena bakra v votlih prenosnih vodnikih.

Vse to dokazuje, da je gospodarska gostota toka v bakrenih vodnikih tudi še po silnem padanju specifične cene bakra v bližini enega amperja/mm², dokler se ji ni treba meniti za mehansko opremo prenosne proge. Ko pa mora prevzeti tudi to odgovornost, se ji c_x prav lahko podvoji ali pa celo potroji. Tako nastanejo gostote prenosnih tokov, ki se dvignejo energično nad en amper/mm² in dosežejo tudi 17 amperja/mm².

Slika gospodarske gostote, ki smo jo tu sestavili, je praktično tako važna, da jo moramo še nekoliko izpopolniti. Doslej je oprta le na vodne centrale, katerim letne obratne ure niso važne. V toplotnih centralah pa ni stanovitne vrednosti letnega kilovata: vsaka potrošna kilovatna ura potroši določeno množino premoga.

Omenili smo že, da so letne ure džaulske toplote maloštevilnejše od letnih obratnih ur. To pomeni, da ostajajo tudi v intenzivnem električnem gospodarstvu še v bližini tistih letnih obratnih ur, ki obetajo vodni in toplotni kilovatni uri isto vrednost.

V razumno urejenem obsežnem električnem gospodarstvu pa je treba z energijskimi izgubami prenosnih prog obremeniti vodne centrale, ki so ogrodje gospodarstva: brez energijskih izgub je vendar obratovanje nemožno. Zato je gospodarska gostota prenosnih tokov tudi iz tega razloga praktično oprta na stanovitno vrednost letnega vodnega kilovata.

11. Dozdevna podražitev prevodne kovine, ki pogloblja prvotno Kelvinovo pravilo, je v zoženem problemu prenosnih kovin oprta na upoštevanje stroškov mehanske opreme, prav za prav tistega dela mehanske opreme, ki se mora prilagodovati prerezu prenosnih vodnikov. Če je ta podražitev resnično neoporečna, mora imeti tudi ostala elektrotehnikna opravka s podobnimi dozdevnimi podražitvami prevodnih kovin.

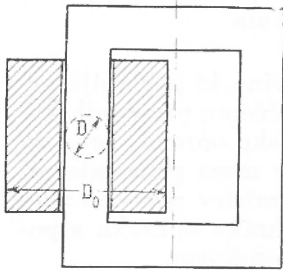
Vzemimo primer transformatorja! Njegovo navitje je nedvomno svojevrstno oblikovan vodnik. V tem vodniku nastajajo energijske izgube, džaulska toplota, ki je obratno sorazmerna prerezu bakrenega ovoja, medtem ko je teža njegovega bakra sorazmerna prerezu.

Predvsem je jasno, da je treba specifično ceno tega bakra obremeniti z oblikovalnimi stroški: vodnik je včasih okrogel, včasih štirioglat. Nadalje je jasno, da povzroča izolacijski plašč, ki je potreben vsakemu ovojju, precejšnje stroške: prevodni baker je odgovoren zanje. In ker je treba oblikovani in izolirani vodnik naviti v tuljavice, tuljavice pa skrbno izolirati in montirati, se vležejo izdatni nadaljnji stroški na prevodni baker.

Teža montiranega navitja je večja od teže v njem skritega bakra. Ker pa so energijske izgube v navitju sorazmerne teži bakra, je treba vso ceno navitja porazdeliti na kilograme njegovega bakra, da nastane neoporečna specifična cena transformatorske prevodne kovine.

To pa še ni vse. Tudi v prenosnih progah je kilogram prenosne kovine že obremenjen z oblikovalnimi stroški prenosnih vrvi, pa tudi z montažnimi stroški, preden prevzame gospodarsko odgovornost za aktivni del mehanske opreme, to se pravi stebrov. V transformatorju je navitje tesno povezano z železnim jedrom, ki mu je deloma mehanska oprema, predvsem pa sodelovalni elektromagnetni organ. Da se stroški transformatorskega jedra večajo, če raste prerez bakrenega vodnika v navitju, je jasno. Ustrežno pa se večajo tudi energijske izgube v jedru: prevodna kovina v navitju transformatorja ima nedvomno podobno in močnejšo gospodarsko odgovornost za svojo opremo, ki je deloma mehanska, deloma elektromagnetna, kakor jo ima prenosna kovina.

Ker pa je prevodna kovina v transformatorju očitno v obeh stopnjah, ki smo ju pravkar opisali, zelo močno obremenjena, moramo pričakovati v transformatorski panogi dokaj višje gostote toka po Kelvinovem pravilu kakor v prenosni elektrotehnik. In živa transformatorska panoga nam resnično pripoveduje, da potrebuje nekako 5 A/mm^2 v svojih navitjih.



Slika 2.

Vrteči se električni stroji potrebujejo skrbno obdelane sestavne dele. Njihova navitja se skrivajo v utorih, rešujejo naporne izolacijske probleme in povzročajo obilne montažne stroške. Poglobljeno Kelvinovo pravilo jim obeta potemtakem še višje gostote toka kakor transformatorjem. Izkuš-

nje desetletij nam dokazujejo, da se je uveljavilo.

Avtor, ki se je desetletja bavil s problemom najvarčnejše zgrajenega transformatorja, je v svoji knjigi „Transformation und Energieübertragung“ (Kleinmayr in Bamberg, Ljubljana, 1944. l.) obdelal problem najvarčnejše transformacije, to se pravi transformatorja, ki je v živem obratu najvarčnejši delavec. Ustrezna raziskavanja se ne opirajo na Kelvinovo pravilo. Osnova jim je prav za prav razmerje med premerom železnega stebra D in zunanjim premerom na stebri sedečega navitja D_0 (slika 2):

$$y_0 = \frac{D}{D_0}$$

Med izsledki te nove transformatorske teorije je tudi naj-priporočljivejša gostota toka v navitju. Na 729. strani omenjene knjige najdemo izraz, ki naj bo tu tako preoblikovan, da ga lahko primerjamo z enačbo 2):

$$g = \sqrt{\frac{\gamma_x \cdot c_x \cdot p}{100 \cdot \rho_x \cdot k_x} \cdot 3 \cdot \frac{2 - y_0}{5 y_0 - 2}} \dots \dots \dots 2a)$$

Takoj vidimo, da se je v avtorjevi transformatorski teoriji neopazeno uveljavilo Kelvinovo pravilo. Zmnožek:

$$c_x' = c_x \cdot \left(3 \cdot \frac{2 - y_0}{5 y_0 - 2} \right)$$

je očitno dozdevna specifična cena prevodne kovine.

Enačba 2a) pa potrjuje zgovorno vse, kar smo zgoraj v tem odseku trdili. V specifični ceni c_x se že skrivajo stroški oblikovanja, izoliranja in montiranja transformatorskega vodnika, kar je iz opisa enačbe 2a) v navedeni knjigi takoj razvidno. Pribitek:

$$3 \cdot \frac{2 - y_0}{5 y_0 - 2}$$

pa nedvomno upošteva gospodarsko odgovornost prevodne kovine v navitju za jedro transformatorja.

V skrajnem primeru:

$$y_0 = 1$$

je:

$$3 \cdot \frac{2 - y_0}{5 y_0 - 2} = 1$$

in pravkar omenjena odgovornost izgine. Zakaj? V tem primeru ni prostora za navitje, torej tudi ni prevodnega bakra v transformatorju. V primeru:

$$y_0 = \frac{2}{3}$$

pa je:

$$3 \cdot \frac{2 - y_0}{5 y_0 - 2} = 3,$$

kar pomeni silno dozdevno podražitev prevodnega bakra.

Vse to dokazuje, da je Kelvinovo pravilo mogočen steber vse elektrotehnike, da je torej nedvomno tudi steber prenosne elektrotehnike. Vse to pa tudi dokazuje, da zoženega problema prenosnih kovin ne smemo površno opirati na Kelvinovo pravilo, temveč da moramo skrbno upoštevati tisto dozdevno specifično ceno prenosne kovine, ki upošteva oblikovanje prenosnega vodnika in s prenosnim vodnikom povezano montažo, pa tudi njegovo gospodarsko odgovornost za mehansko opremo prenosne proge.

Ta ugotovitev je silno važna. V specifičnih cenah bakra in aluminija, ki so jih določevali karteli, je obilo samopašnosti. V njih pa seveda ni ne oblikovalnih ne montažnih stroškov, ki jih povzročajo bakreni in aluminijski prenosni vodniki, ne stroškov, ki jih izsiljuje prenosni vodnik v stebrih prenosne proge.

Od elektrolitnega bakra do okrogle bakrene žice je razmera kratka pot. Daljša je do iz drobnih bakrenih žic spletene prenosne vrvi, še dalja do spletenega votlega bakrenega prenosnega vodnika. V kilogramu prenosnega vodnika iz aluminija je več oblikovalnih stroškov kakor v kilogramu bakrenega vodnika z istim prerezom, ker je aluminijski vodnik iste teže več kakor trikrat daljši. In prav gotovo moramo računati z možnostjo, da mora biti bakreni vodnik že votel, medtem ko je njegov tekmeč iz aluminija še lahko preprosta polna vrv. Zoženi problem prenosnih kovin je nedvomno mnogo globlji, kakor se zdi, in je resnično potreben skrbnega raziskavanja.

III. PROBLEM GOSPODARSKE RAZPETINE

12. Ko je elektrotehnika pred desetletji začela graditi svoje prve skromne proste prenosne proge, se je, neizbežno, oklenila izkušenj mnogo starejše telegrafske tehnike in je preprosto posnemala telegrafske proge. Uporabljala je lesene stebre, zadovoljna je bila s skromnimi razpetinami, ki so dosegale le nekaj bornih desetih metrov, prenosne vodnike pa je preprosto pritrjevala na preizkušene telegrafske porcelanske izolatorje. Takrat seveda ni slutila, da je gospodarska razpetina, varčna razdalja dveh zaporednih stebrov, važen problem.

Kasneje, ko so prenosne proge postajale močnejše in zahtevale močne stebre, so praktiki začeli prevladno večati razpetine. Saj so videli, da so stroški stebrov in na njih sedečih izolatorjev v dolgi progi obratno sorazmerni uporabljeni razpetini. Rastoči povesi prenosnih vodnikov pa so jim delali preglavice.

Še kasneje, ko so večje in večje prenosne napetosti dražile porcelanske izolatorje, ko je postajalo jasno, da je prenosni izolator električno najšibkejša točka v prenosni progi, je skrb za električno odpornost proge bolj in bolj pritiskala v smer velikih razpetin. In nenadoma se je pojavil — menda je nastal v podjetni Ameriki — „sistem velikih razpetin“.

Proste prenosne proge prodirajo skozi ozračje in morajo računati z motnjami, ki prihajajo iz ozračja. Veter pritiska na prenosne vodnike in njihove stebre, zima obdaja vodnike z nevšečnimi snežnimi in lednimi plašči. Veter je muhast. Njegovi sunki povzročajo nihanja povešenih prenosnih vodnikov, zimski plašči odpadajo in izsiljujejo včasih zelo zamotana in nevarna medsebojna približevanja vzporednih faznih vodnikov.

Ozračje pa napada prosto prenosno progo tudi na elektromagnetni fronti. Med zemljo in oblaki nastajajo ob nevihtah silna električna polja, ki se nenadoma zrušijo, ko udari strela. Pošastne dodatne napetosti se torej neizbežno pojavljajo v prostih prenosnih progah. Ker pa so napadi ozračja tako na mehanski kakor na elektromagnetni fronti nepreračunljivi, so ustrezne motnje v prostih prenosnih progah neizbežne.

Popolnoma zavarovana prosta prenosna proga je nedosegljiv ideal. Pač pa je prenosni elektrotehniki uspelo, da je polagoma dvigala električno in mehansko varnost v svojih progah. Rastoče prenosne napetosti so jemale ozračnim dodatnim

napetostim r e l a t i v n o ostrino, skrbnejše reševanje povernih problemov pa je krotilo mehanske nevarnosti. Avtor primerja rad sodobno veleprenosno progo z velikim parnikom, nekdanjo skromno pa z bornim čolničkom. Parnik kljubuje razburkanemu morju neprimerno laže kakor čolniček.

Večanje razpetin manjša število prenosnih izolatorjev, torej šibkih električnih točk v progi, večja pa povese in ustvarja ustrezne mehanske nevarnosti. Jasno je, da mora iskati prosta prenosna proga, ki se bori z ozračjem na dveh ločenih frontah, tisto srednjo rešitev razpetinskega problema, s katero postane na obeh frontah nekako enako odporna. »Sistem velikih razpetin« je potemtakem v nevarnosti, da se otrese električne Scille in zabrede v mehansko Karibdo.

Ta slika vsiljuje spoznanje, da je problem gospodarske razpetine znanstvenemu raziskovanju povsem odmaknjen in ves v rokah nekakšne opazovalne statistike. Praktična prenosna elektrotehnika je dejansko prepričana, da ji morejo le bogate izkušnje dolgih desetletij določiti gospodarsko neoporečno razpetino. Saj ve, da mora spraviti gradbene stroške svojih prog v sklad s stroški neizbežnih obratnih motenj, mehanskih in električnih.

Ozračje pa je tako muhasto, da statistika njegovim napadom na proste prenosne proge po vsem videzu le ne bo kos. Zato bo le treba pogledati, kaj zahteva problem gospodarskih razpetin, če ga osvobodimo meglenih vplivov, sklicevanj na dozdevne izkušnje ter nekakšne sisteme in ga zasidramo v preizkušenem Kelvinovem pravilu.

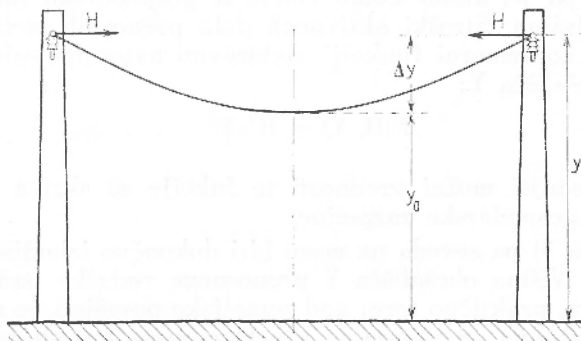
Ugovor, da ni mogoče neoporečno opisati v računom dostopni obliki odvisnosti stroškov prenosnih stebrov od prereza prenosnega vodnika, je preprosta trditev, ki jo je treba dokazati. Ugovor, da so stroški obratnih motenj mnogo važnejši od najnižjih dosegljivih stroškov nemotenega prenašanja energije, je le do neke mere pravilen, ne more pa preprečiti znanstvene obdelave problema, ki išče najvarčnejšo razpetino. Saj znanstvenik ne odklanja upoštevanja vplivov iz ozračja na prenosno progo. Kar zmore v tej smeri praktik, zmore tudi teoretik.

Jasno je, da mora problem gospodarske razpetine misliti na povse prenosnega vodnika. To ve tudi teoretik. Povse pa je zelo odvisen od dodatnih zimskih bremen na prenosnih vrveh, torej od snežnih in lednih plaščev. V tej točki dobi teoretik ravno tako stik z dolgoletnimi izkušnjami prenosne elektrotehnike kakor praktik. Potemtakem je treba le najti ključ do na videz računom nedostopne odvisnosti stroškov prenosnih stebrov od prereza prenosnega vodnika.

Ali tega ključa resnično ni? Avtor je prepričan, da ga je našel. V svojem članku »Oblikovanje prenosnih prog« (Elektrotehniški Vestnik, 1947. l.) je posegel po silno preprosti pomožni sliki in izračunal z njeno pomočjo najvarčnejši povs. hkrati pa posredno tudi najvarčnejšo razpetino. Našel je, da so sodobne veleprenosne proge resnično tako oblikovane, kakor zahteva rešitev, ki se opira na omenjeno pomožno sliko. Torej je le možno dati problemu gospodarske razpetine znanstveno obliko!

Ta ugotovitev pa odpira zoženemu problemu prenosnih kovin možnosti, ki jih doslej ni imel. Sklicevanje na dozdevne izkušnje je vselej megleno. Ko pa se začne vmešavati v primerjanje dveh prenosnih kovin, med katerima po vsem videzu ni velikih gospodarskih razlik, postane nevarno. Saj praktično lahko odloča po mili volji. Znanstveno neoporečna, čeprav natančna rešitev problema gospodarske razpetine je nedvomno mnogo pravičnejša sodnica.

15. Predstavljajmo si steber iz poljubne snovi, ki ima ob izstopu iz svojega temelja, v katerega je vpet, poln krožni prerez! Y metrov nad temeljem naj bo nanj obešen prenosni



Slika 5.

vodnik. Prerez tega vodnika problemu najvarčnejše razpetine ni važen. Pač pa je važna vodoravna natezalna sila, s katero vleče vsak kvadratni centimeter v prerezu prenosnega vodnika. Imenujmo to silo H (kg/cm^2)! Glej sliko 5.!

Upogibni moment, kateremu je treba prikrojiti kritični prerez stebra, je nedvomno sorazmeren zmnožku $H \cdot Y$. Po izsledkih teorije prožnosti in trdnosti je temu zmnožku sorazmerna tretja potenca potrebnega premera v kritičnem prerezu

stebra, za katero se skriva tako imenovani upornostni moment. Kritični prerez okroglega stebra je potemtakem sorazmeren dvetretjinski potenci zmnožka $H \cdot Y$.

To je važen izsledek. Od kritičnega prereza ob izstopu iz temelja do teže stebra med temeljem in obešališčem prenosnega vodnika je kratka pot. Ta teža je nedvomno, če predpostavljamo količkanj običajno oblikovanje stebra, sorazmerna zmnožku kritičnega prereza in višine obešališča vodnika nad temeljem. Ker pa so gradbeni stroški postavljenega stebra praktično sorazmerni njegovi teži, so sorazmerni tudi izrazu:

$$(H \cdot Y)^{\frac{2}{3}} \cdot Y = H^{\frac{2}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}}.$$

Prav za prav pa so temu izrazu sorazmerni le stroški aktivnega dela stebra med temeljem in obešališčem prenosnega vodnika, kar si moramo zapomniti.

Čudovita dozdevna neodvisnost najnižjih možnih stroškov, ki jih povzroča aktivni del prenosnih stebrov ob predpisani razpetini, od snovi, iz katere so stebri zgrajeni, od prenosne kovine, od prereza prenosnega vodnika, od števila prenosnih vodnikov v progi, je v prvem trenutku nerazumljiva. V resnici pa je, kakor bomo videli, le gospodarska razpetina tako neodvisna. Stroški aktivnega dela prenosnih stebrov so seveda le sorazmerni funkciji vodoravne natezalne sile H in višine obešališča Y :

$$f(H, Y) = H^{\frac{2}{3}} \cdot Y^{\frac{5}{3}}. \quad \dots \dots \dots 3)$$

In v najmanjši možni vrednosti te funkcije se skriva rešitev problema gospodarske razpetine.

Enačba 3) pa seveda ne more biti dokončno izhodišče tega problema. Višina obešališča Y prenosnega vodnika nad temeljem stebra, praktično torej nad zemeljsko površino, je namreč še sama odvisna od natezalne sile H prenosnih vodnikov. Sestavljena je kajpada iz dopustne višine najnižje točke povešene vodnika nad zemljo, Y_0 (m), in povesa Δy (m):

$$Y = Y_0 + \Delta y. \quad \dots \dots \dots 4)$$

Prav za prav pa je stanovitni del višine Y zamotanaje sestavljen. Vodniki, ki so pritrjeni na verižne izolatorje, ne upogibajo stebrov neposredno. Obešališče verižnega izolatorja leži vselej nad resničnim obešališčem vodnika, in ustrezna višinska razlika je del višine Y_0 . Fazni vodniki tudi ne leže običajno v isti vodoravni ravnini. Prerez skozi prenosno prog

jim odreja čisto oglednakostraničnega trikotnika z dokaj veliko stranico d (slika 4). Težišče tega trikotnika določa srednjo višino obešališč, ki je seveda za $d/2\sqrt{3}$ metrov večja od najmanjše. Tudi ta dodatek k višini najnižjega obešališča je del višine Y_0 . Vse to je treba v konkretnih primerih skrbno upoštevati.

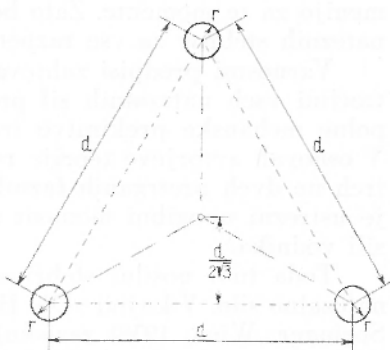
Ker pa je v progi, ki si je dokončno izbrala obliko svojega prereza, Y_0 vsekakor stanovitni del celotne višine Y , je problemu najvarčnejše razpetine načelno važna le odvisnost povesa Zy od natezalne sile H in razpetine x (m). To odvisnost pa opisuje povescna teorija.

Zamudimo se nekoliko ob še nedovršeni sliki, ki jo tu gradimo! Predpostavljali smo okrogle stebre s polnim prerezom. Leseni stebri so nekako takšni. Tudi betonskim smo že dajali to obliko. V velikih prenosnih progah pa uporabljamo kletkaste jeklene stebre. In prav za prav je stebel s polnim krožnim kritičnim prerezom dokaj redek pojav v sodobnih prenosnih progah. Krožni prerez pa nam je omogočil enačbo 3).

Ko iščemo najugodnejšo razpetino, nas zanimajo le odnosi med činitelji problema, nevažne pa so nam absolutne vrednosti odločujočih izrazov. Zato je na primer resnično nevažno ali dobi stebel s krožnim kritičnim prerezom obliko valja ali stožca ali pa odsekanega stožca: vselej je prostornina njegovega aktivnega dela sorazmerna zmnožku kritičnega prereza in višine Y .

Ali ni zelo verjetno, da bo v vsakem primeru, tudi v primeru stebra, katerega kritični prerez je daleč od polnega krožnega, enačba 3) pravilna? Saj se opira vselej na isto mehansko ozadje. Avtor se je odločil za to trditve, ko je pisal zgoraj omenjeni članek o oblikovanju prenosnih prog. In ker je fizikalno utemeljena, jo bo tudi tu uporabljal. Seveda predpostavlja, da so prenosni stebri pametno, to se pravi varčno, zgrajeni.

Proti uporabi enačbe 3) kot osnove razpetinskega problema so možni ugovori. Z njimi se moramo baviti, če hočemo imeti zanesljivo teorijo problema, ki se je doslej umikal znanstve-



Slika 4.

nemu raziskavanju. Saj hočemo položiti zoženemu problemu prenosnih kovin zanesljive temelje.

Praktik bo predvsem mislil na dejstvo, da so prav za prav le natezni stebri v prenosni progi pod vplivom upogibnih momentov vodoravnih natezalnih sil H , ki vlečejo iz prenosnih vodnikov, da pa se mnogo številnejši vmesni nosilni stebri ne menijo za te momente. Zato bo skušal odklanjati odgovornost natezних stebrov za vse razpetine v progi.

Varnostni predpisi zahtevajo, da zdrže natezni stebri dve tretjini vseh natezalnih sil proge, ker se jim zdi primer popolne mehanske prekinitve trofazne proge premalo verjeten. V osnovah avtorjeve teorije razpetinskega problema pa ni ne treh ne dveh pretrganih faznih vodnikov: važno jim je le, da je ustrezní upogibni moment sorazmeren vodoravni natezalni sili vodnika.

Toda tudi nosilni stebri se le na videz ne menijo za to natezalno silo. V knjigi »Die Hochspannungs-Freileitungen« (J. Springer, Wien, 1958) raziskujeta avtorja prof. dr. inž. Karl Girkmann in dr. Erwin Königshofer oblikovanje nosilnih stebrov po predpisih Zveze nemških elektrotehnikov, pa ugotavljata, da obeta upoštevanje polovice vseh vodoravnih natezalnih sil prenosnih vodnikov vse, kar zahtevajo ti predpisi (str. 117). Med nateznimi in nosilnimi stebri bi bila potemtakem le varnostna razlika v razmerju 2:15. Ta razlika je pa seveda enačbi 3) popolnoma nepomembna.

Važno je enačbi 3) določeno razmerje števil natezних in nosilnih stebrov. Važno ji je tudi dejstvo, da se v sodobnih veleprenosnih progah odmikamo razlikovanju med nateznimi in nosilnimi stebri, ker v njih odklanjamo silno nevšečne poškodbe nosilnih stebrov, torej posledice pretrganega faznega vodnika ali pa zimske razbremenitve v razpetini, katere sosede obdrže svoje ledne plašče.

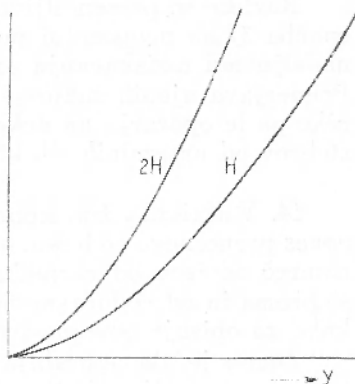
Ugovoru praktika, da je kritični prerez kletkastega jeklenega stebra bistveno različen od kritičnega prereza navadnega lesenega stebra in da je zato enačba 3) v sodobni prenosni elektrotehniki neuporabljiva, je treba seveda dati zadovoljiv odgovor. Prav za prav si ga je praktična prenosna elektrotehnika že zdavnaj sama dala, le opazila ga ni.

Kaj trdi enačba 3)? Da je teža aktivnega dela stebra T_n sorazmerna dvetretjinski potenci vodoravne specifične natezalne sile (H) in pettretjinski potenci višine obešališča vodnika nad zemljo (Y). Torej zahteva odnose, ki jih nazorno opisuje slika 5. S prerezom F prenosnega vodnika raste seveda resnična natezalna sila $H \cdot F$. Nji se prilagodeva teža T_n , z njo pa cena aktivnega dela stebra.

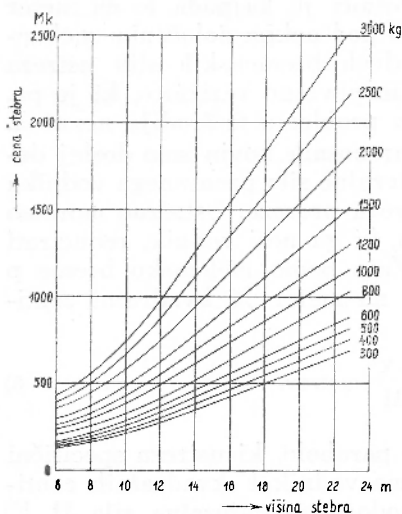
V svoji knjigi »Die wirtschaftlich günstigste Spannung für Fernübertragungen mittelst Freileitungen« (J. Springer, Berlin, 1914) prinaša dr. H. Eimer, ki raziskuje gospodarske prenosne probleme popolnoma realno, to se pravi s pomočjo podatkov iz takratne prenosne elektrotehnike, zelo poučen diagram, zgrajen na isti osnovi kakor slika 5. V tem diagramu pa združuje stroške aktivnega in neaktivnega dela stebra, stroške transporta na stavbišče in izdatke za potrebne temelje (slika 6). Seveda misli na klet-kaste jeklene stebre.

Razume se, da je neaktivni del stebra odgovoren za dvig krivulj v diagramu nad os, ki niza višine stebrov. Jasno je tudi, da je celotna višina stebra vselej večja od aktivne višine Y. Vse to je treba upoštevati, ko primerjamo sliki 5. in 6. Toda že bežna primerjava pripoveduje, da je slika 5. zelo bližnja resnici.

Če se preprosto ne menimo za razliko v gospodarskih okvirih 5. in 6. slike ter predpostavljamo sorazmernost višine stebra v diagramu 6. z aktivno višino Y, stroškov vsega stebra pa s stroški aktivnega dela, dobimo naslednjo sliko. V diagramu 6. je potem na primer v krivulji za 3000 kg natezalne sile:



Slika 5



Slika 6.

$$Y = 12 \text{ m} \quad S = 990 \text{ M}$$

$$Y = 22 \text{ m} \quad S = 2400 \text{ M.}$$

Je pa:

$$\frac{2400}{990} = \left(\frac{22}{12}\right)^3 \cdot 0,88.$$

Višina stebra 22 metrov prilagodeva v diagramu 6.:

natezalni sili 3000 kg in 1000 kg stroškom S 2400 Mk in 1100 Mk.

Je pa:

$$\frac{2400}{1100} = \left(\frac{3000}{1000} \right)^{1,05}$$

Razlike so presenetljivo skromne. Potemtakem je osnovna enačba 3) na neoporečni poti in zelo zanesljiva opora vsemu nadaljnemu raziskavanju zoženega problema prenosnih kovin. Primerjava njenih zahtev s podatki žive prenosne elektrotehnike pa le opozarja na neko rahlo odvisnost neaktivnega dela stebrov od natezalnih sil, ki je ne smemo pozabiti.

14. V aktivni višini stebra, Y , je, kakor ugotavlja enačba 4), povs prenosnega vodnika, Δy , važnejši del, ker je spremenljiv, namreč odvisen od razpetine x (m) med dvema zaporednima stebroma in od vodoravne natezalne sile H (kg/cm²). Poglejmo, kako ga opisuje povesna teorija!

Znano je, da uporablja povesna teorija poleg natančnega tudi poenostavljen parabolno postopek. Z natančnim dobi verižnico, s poenostavljenim parabolno kot povesno krivuljo. Dognala je, da praktična elektrotehnika ne potrebuje natančnih povesnih slik, dokler ne dvigne razpetin znatno nad 500 metrov. Problemu prenosnih kovin so pa izredno velike razpetine nevažne. Zato se sme brez skrbi zaupati povesni paraboli.

Povesno parabolno dobimo, če predpostavljamo na en meter dolgem koščku razpetine določeno mehansko obremenitev prenosnega vodnika. V resnici je kajpada le en meter dolg košček povešenega vodnika pod nekim določenim mehanskim bremenom. Razliki teh dveh bremenskih slik ustreza razlika med povesno parabolo in povesno verižnico, ki je pa, kakor smo pravkar ugotovili, v problemu te študije nevažna.

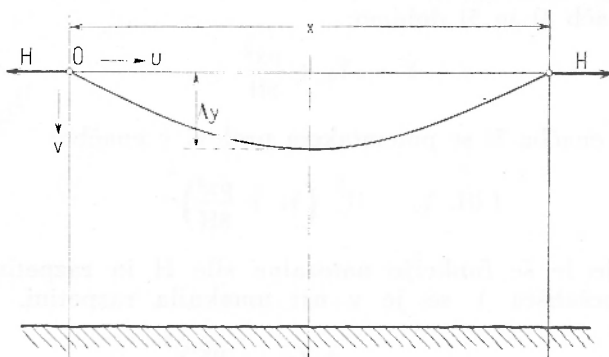
V raziskovanju problema prenosnih kovin smo doslej dosledno reducirali vodoravno natezalno silo prenosnega vodnika na kvadratni centimeter njegovega prereza. Ustrezno moramo seveda tudi mehansko breme p , ki ga nosi vodnik, reducirati na isti kvadratni centimeter. Zato bomo mehansko breme p dosledno izražali v kilogramih na meter \times kvadratni centimeter. Tako dobimo poves:

$$\Delta y = \frac{p \cdot x^2}{8 H} \text{ metrov.} \quad \dots \dots \dots 5)$$

Na sliki 7. vidimo povesno parabolno, ki ustreza specifični natezalni sili H (kg/cm²). Če ima vodnik F kvadratnih centimetrov prereza, je resnična vodoravna natezalna sila $H \cdot F$. Ta sila je seveda vzdolž vse vrvi stanovitna. V najnižji točki

povešene vrvi določa povesni krivulji vodoravno tangento, ker vrv ne prenese sile, ki bi ne imela njene smeri.

V obešališču se vodoravni natezalni sili $H \cdot F$ seveda pridruži sila, ki nosi polovico vsega mehanskega bremena raz-



Slika 7.

petine. Ta sila vleče kajpada navpično navzgor in doseže $p \cdot F \cdot \frac{x}{2}$ kilogramov. Potemtakem potrebuje povesna krivulja v obešališču smer, ki jo določa izraz:

$$\operatorname{tge} = \frac{p \cdot F \cdot x}{2 \cdot H \cdot F} = \frac{px}{2H}$$

Če uporabimo koordinatni sistem, ki ga opisuje slika 7., moramo povesni paraboli prilagoditi enačbo:

$$\Delta y - v = k \cdot \left(\frac{x}{2} - u \right)^2$$

ki vidno približa najvažnejšo točko parabole $u = x/2$, $v = \Delta y$.

Je pa:

$$-\frac{dv}{du} = 2k \left(\frac{x}{2} - u \right)$$

oziroma:

$$-\frac{dv}{du} = 2 \cdot \left(\frac{x}{2} - u \right) \cdot \frac{\Delta y - v}{\left(\frac{x}{2} - u \right)^2} = 2 \cdot \frac{\Delta y - v}{\frac{x}{2} - u}$$

V točki $u = 0$, $v = 0$ je:

$$\frac{dv}{du} = 4 \cdot \frac{\Delta y}{x}$$

Če naj bo torej:

$$4. \frac{\Delta y}{x} = \frac{1}{2H} = \frac{px}{2H},$$

mora veljati enačba 5).

Iz enačb 4) in 5) dobimo:

$$Y = Y_0 + \frac{px^2}{8H}. \quad \dots \dots \dots 6)$$

Osnovna enačba 5) se potemtakem prelevi v enačbo:

$$f(H, Y) = H^{\frac{1}{3}} \left(Y_0 + \frac{px^2}{8H} \right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots \dots \dots 3a)$$

ki opisuje le še funkcijo natezalne sile H in razpetine x : višina obešališča Y se je v nji umaknila razpetini. Nova funkcija:

$$\psi(H, x) = H^{\frac{2}{3}} \left(Y_0 + \frac{px^2}{8H} \right)^3 \quad \dots \dots \dots 7)$$

meri potemtakem po vsem videzu stroške prenosnega stebra.

Ta dozdevna osnova razpetinskega problema je praktiku presenetljiva. Saj načenja predvsem vprašanja, katera natezalna sila je najvarčnejša. Tega vprašanja si živa prenosna tehnika ni prav za prav nikoli postavljala. Od nekdanj ji je samo po sebi razumljivo, da je treba prevodne vodnike do skrajnosti natezati. Drugače povedano: praktik hoče izkoristiti vso mehansko zmogljivost prenosne kovine in odklanja načelno vse druge možnosti.

Teoretik pa vidi v enačbi 7) dve spremenljivki H in x , ki sta po vsem videzu popolnoma neodvisni druga od druge. Zato ga zanimata oba ustrezna najmanjša dosegljiva iznosa funkcije $\psi(H, x)$. Obema bo poskušal prilagoditi rešitev problema varčnih razpetin.

V tej načelni razliki stališč praktika in teoretika se izraža nedvomno neka posebnost razpetinskega problema. Saj je malo verjetno, da bi izkušena sodobna prenosna elektrotehnika uveljavljala pogrešno stališče. Jasno je, da ni mogla in ne bo mogla natezati prenosnih vodnikov čez dopustno mero. Torej je mogla in bo mogla le skromneje izkoriščati mehansko zmogljivost prenosnih kovin, kakor jih je dejansko izkoriščala. Ta možnost pa se upira praktiku in teoretiku. V čem je torej skrivnost osnovne enačbe 7)?

Dokler teorija te skrivnosti ne razvozla, ne sme pričakovati, da ji bo praktična elektrotehnika zaupala. Praktična elektrotehnika bo seveda tako kritično primerjala izsledke

novi teorije s plodovi svojih izkušenj. Po vsem videzu je torej nova teorija že s svojo osnovno enačbo 7) dosegla svojo kritično točko.

15. V enačbi 7) pa tiči še druga nerazumljiva zahteva. Iznos funkcije $\psi(H, x)$ je — to vidimo takoj — najmanjši, če razpetina x izgine. Ta dozdevna rešitev razpetinskega problema je seveda praktično popolnoma neuporabna. Prehod iz osnovne enačbe 5) v enačbo 7) je bil očitno pomanjkljiv.

Eneačba 5) računa nedvomno z določeno razpetino in le s to predpostavko je neoporečna. Če pa postane razpetina spremenljiva, kar izsiljuje enačba 7), se v osnovi obračunavanja stroškov, ki jih povzročajo stebri oziroma aktivni deli stebrov, začneja uveljavljati število stebrov v prenosni progi. To število pa je nedvomno obratno sorazmerno razpetini.

Takoj je jasno, da je treba osnovno enačbo 7) izpopolniti. Nespremenjena, meri le stroške aktivnega dela dveh stebrov, tistih dveh seveda, med katerima je razpetina x . Razpetinski problem pa postane resničen problem šele tedaj, ko začne iskati najnižje dosegljive stroške vseh stebrov prenosne proge. Zato se mora okleniti osnovne enačbe:

$$\psi(H, x) = H^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\left(Y_0 + \frac{px^2}{8H} \right)^{\frac{3}{2}}}{x} \dots \dots \dots 8)$$

Kaj mu obeta najugodnejša natezalna sila? Iz:

$$\frac{\delta \psi(H, x)}{\delta H} = 0$$

dobimo:

$$\frac{px^2}{8H} = \Delta y = \frac{2}{3} Y_0 \dots \dots \dots 9)$$

Tista natezalna sila H (kg/cm^2), ki dvigne povos Δy na dve tretjini nespremenljivega dela v višini obešališča prenosnega vodnika nad zemljo, je torej najvarčnejša! Kolikšna je, mora povedati razpetina x , za katero se je prenosna proga odločila.

To je nedvomno zanimiv in izredno prozoren izsledok razpetinskega problema. Njegove zahteve se tudi izkušenemu praktiku ne bodo zdele nesprejemljive. Da ne zahteva natezalne sile, ki jo prenosna kovina ravno še zdrži, je teoretiku popolnoma razumljivo. Toda teoretika in praktika zanima tem bolj druga delna rešitev razpetinskega problema, ki jo obeta enačba 8).

Ta druga delna rešitev pa je resnično presenetljiva. Iz:

$$\frac{\partial \varphi(H, x)}{\partial x} = 0$$

dobimo namreč:

$$\frac{px^2}{8H} = Ay = \frac{3}{7} \cdot Y_0, \dots \dots \dots 10)$$

torej vnovič nek najugodnejši poves. Ker pa je ta drugi relativno najugodnejši poves različen od prvega, ki ga zahteva enačba 9), stoji razpetinski problem nenadoma pred uganko. Ali je nazadnje teoretsko resnično nerešljiv?

Od treh sedmin do dveh tretjin je razmeroma dolga pot. Res je sicer, da sledi razpetina le kvadratnemu korenu iz določenega povesa, da zahtevata torej enačbi 9) in 10) razpetini, ki sta le v razmerju:

$$\sqrt{\frac{2}{3} \frac{7}{3}} = 1.245 : 1,$$

toda to razmerje je nedvomno tudi praktiku še preširoko. Predvsem pa je jasno, da važen tehniški problem ne more imeti dveh različnih rešitev.

Ne pozablajmo, da raziskujemo prav za prav le aktivni del prenosnih stebrov in da smo morali tudi v neaktivnem delu teh stebrov priznati nek vpliv natezalne sile H in razpetine x! Ne pozablajmo pa predvsem, da so prenosni izolatorji na stebrih zelo važen del prenosne proge!

V 12. odseku smo ugotovili, da bi smeli združiti aktivni in neaktivni del prenosnih stebrov, ne da bi morali bistveno popravljati osnovno enačbo razpetinskega problema. Stroški prenosnih izolatorjev pa so prav gotovo popolnoma neodvisni od natezalne sile H in prav gotovo so obratno sorazmerni razpetini prog. Potemtakem je enačba 9) pravilnejša rešitev razpetinskega problema.

Ker zahteva enačba 9) znatno večjo razpetino kakor enačba 10), zahteva ob določeni mehanski obremenitvi (p) tudi večjo natezalno silo (H). Njen poves bi smel seveda postati še nekoliko večji, da bi dodatno zmanjšal stroške prenosnih izolatorjev. Če pa že izčrpava mehansko zmogljivost prenosne kovine, je seveda izčrpal vse gospodarske možnosti.

Po vsem tem je enačba 9) v zvezi z ravno še dopustno natezalno silo H dokončna praktična rešitev razpetinskega problema in hkrati dokončna osnova zoženega problema prenosnih kovin. V nji pa se skriva vselej stremljenje po še

večjih razpetinah, ki bi jih omogočala povečana mehanska zmogljivost prenosne kovine, če bi bila dosegljiva.

S tako oblikovano rešitvijo razpetinskega problema bo praktična prenosna elektrotehnika načelno nedvomno sporazumna. Saj najde v nji priznanje dosedanjega izkoriščanja mehanske zmogljivosti prenosnih kovin in stremljenje po kar se da velikih razpetinah, pa tudi iskanje sredstev, ki bi mehansko ojačili prenosne vodnike.

Načelni sporazum med teoretsko in praktično prenosno elektrotehniko pa še ne pomeni popolne skladnosti. Teorija zahteva točno odmerjen povos, ki naj izčrpa dve tretjini tistega dela v višini obešališč prenosnih vodnikov nad zemljo, v katerem sta natezalna sila H in razpetina x brez moči. Praktiki tako točno odmerjenih povosov ne pozna ali pa se jih ne zaveda.

V tem položaju se razpetinska teorija ne more izogniti primerjanju povosov oziroma razpetin, ki jih zahteva njena rešitev, s povosi oziroma razpetinami, ki jih je uveljavila živa prenosna elektrotehnika. To primerjanje seveda ne more dokazati popolne skladnosti. Če se mu pa posreči zadovoljiva slika, je nova razpetinska teorija nedvomno dokončno utrjena. V tem primeru sme prevzeti vodstvo v oblikovanju sodobnih prenosnih prog.

16. V trušču druge svetovne vojne je imela teorija prenosne elektrotehnike seveda izredno težavno življenje. Kakor nekakšen otok sredi razburkanega morja ji je bil elektrotehniški kongres v Curihu 15. decembra 1941. l. V poročilu o tem kongresu najdemo dragocene izsledke (Bericht über die Diskussionsversammlung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins vom 13. Dezember 1941 in Zürich über Höchstleistungsübertragung auf grosse Distanzen, Sonderabdruck aus dem Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, Jahrgang 1942, Nr. 5, 6, 7, 9. A. G. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zürich).

Razpetinskemu problemu, ki ga tu raziskujemo, omogoča poročilo, ki ga je na omenjenem kongresu podal W. Howald, »Der Stand der Höchstleistungs-Übertragung in den Vereinigten Staaten von Amerika«, primerjanje teoretskega izsledka z važnim doprinosom sodobne žive veleprenosne elektrotehnike. Howald opisuje namreč dokaj izčrpno 450 kilometrov dolgo progo Boulder—Dam—Los Angeles, ki se je lotila prenosa 300.000 kilovatov s prenosno napetostjo 287.000 voltov.

Prenosni vodniki te silne proge leže v isti vodoravni ravnini. Razdalja najnižje točke na povešenem vodniku od zem-

lje je 14 metrov. Izolatorska veriga ima 24 členov in je 3 metre dolga. Ker uporabljajo navadni stebri te proge le po eno verigo za fazo, je treba njeno polno dolžino uveljaviti v višini obeshališča prenosnih vodnikov nad zemljo. Torej je:

$$Y_0 = 14 + 3 = 17 \text{ metrov.}$$

Enačba 9) bi ustrezno zahtevala povos:

$$Ay = \frac{2}{3} Y_0 = \frac{2}{3} \times 17 = 11,33 \text{ metra.}$$

Silna prenosna napetost je kajpada izsilila uporabo votlih prenosnih vodnikov. Graditelji so se odločili za baker kot prenosno kovino in dali vodnikom zunanji premer 36 milimetrov ter prerez 254 kvadratnih milimetrov. Kako so napenjali prenosne vodnike, pa zgoraj omenjeno poročilo ne pripoveduje.

Ko govori o višini najnižje točke na povešenem vodniku nad zemljo, misli praktična prenosna elektrotehnika seveda na največji povos, ki se v normalnih prilikah lahko pojavi, ne misli pa na katastrofalne zimske plašče na prenosnih vodnikih, ker nepreračunljivih katastrof iz gospodarskih razlogov ne more konstruktivno upoštevati. Povos pa postane velik, če ga izsiljuje močno mehansko breme ali pa, če ga zahteva povečana dolžina prenosne vrvi. Največja mehanska bremena se pojavijo, ko se prenosni vodnik zavije v ledni plašč, kar pa je praktično le nekako ob -5°C možno. Dolžina prenosne vrvi pa raste pod vplivom rastočih temperatur.

Pod močnimi mehanskimi bremenami se prenosni vodnik tudi prožno nategne. Prožni nategi se v prenosnih vrveh vselej bore s toplotnimi. Zato je večinoma ob -5°C pod vplivom lednega plašča povos praktično največji. Na ta povos misli torej navadno prenosna elektrotehnika, ko govori o višini najnižje točke na bakrenem vodniku nad zemljo. Na ta povos misli seveda tudi razpetinska teorija.

Po vsem tem moramo v enački 5) »p« istovetiti z normalnim mehanskim bremenom, ki ga pričakujemo ob -5°C pod vplivom lednega plašča, seveda reduciranim na en meter razpetine in kvadratni centimeter v prerezu vodnika. »H« pa je hkrati dopustni specifični nateg trdega bakra, izražen v kilogramih/cm². Kolikšno je normalno mehansko breme pod vplivom zimskega plašča in kolikšen je dopustni specifični nateg trdega bakra, pa povedo tako imenovani varnostni predpisi.

Iz varnostnih predpisov govore kajpada dolgoletne izkušnje, ki se opirajo na opazovanja »normalnih« zimskih dodat-

nih bremen. Lahko si je predstavljati, da znašajo izkušnje zelo pestro gradivo, ki vnaša v povescu problem veliko negotovost. Jasnó je pa tudi, da morajo biti izkušnje, zbrane pod različnimi podnebjí, močno različne. Pa tudi oblika zemeljske površine se nujno izraža v njih: v goratih pokrajinah so nedvomno neprijetnejše.

Praktiki različnih držav bodo po vsem tem istemu povesu prikrójevali različne razpetine. Razlike postanejo prav lahko znatne. To dokazujejo varnostni predpisi civiliziranih držav, ki se močno razlikujejo med seboj. Zato bo primerjanje teoretskega izsledka razpetinske teorije z doprinosom sodobne veleprenosne elektrotehnike le tedaj prepričevalno, če bo uporabljalo tiste ali pa zelo sorodne varnostne predpise, ki so po vsem videzu vodili graditelje primerjanc veleprenosne proge.

Evropski raziskovalci povescnih problemov predpostavljajo radi, da se normalnemu zimskemu dodatnemu bremenu, ki se pojavi nekako ob -5°C , ne pridružuje pritisk vetra. Angleži pa mislijo na vodoraven pritisk, ki ustreza nekako 40 kilogramom na kvadratni meter projekcijske površine vodnika. S tem dodatnim vodoravnim bremenom vdíra v razpetinski problem zanimiv zapletljaj, ki ga ne smemo prezreti.

Dodatno vodoravno pritiskajoče breme izsili povesc v ravnini, ki ne more biti navpična. Razpetinsko teorijo pa zanima samo navpični povesc, ki večá višino obešališča prenosnega vodnika. Jasnó je, da ustreza navpični delni povesc navpičnim bremenom, vodoravni pa vodoravnim. Potemtakem se razpetinski teoriji preprosto ni treba meniti za vodoravni pritisk vetra.

Dodatna zimska mehanska bremena, ki se vlečejo na prenosne vodnike, vnašajo v razpetinski problem veliko negotovost, ker jo vnašajo neposredno v povescu teorijo. Jugoslavija še nima svojih povescnih varnostnih predpisov. Stara Jugoslavija se je nekritično oklepala varnostnih predpisov Zveze nemških elektrotehnikov, ki upoštevajo seveda nemško podnebje in nemško pokrajino. Naše podnebje je različno od nemškega in površina zemlje je v Jugoslaviji drugače razgibana, kakor je v Nemčiji. Zato ne bo odveč izkoristiti primerjavo izsledka nove razpetinske teorije z doprinosi sodobne veleprenosne elektrotehnike za bežen opis stališč, ki so jih v povescnem problemu poleg Nemčije zavzele druge evropske države. Iz takšnega opisa si jugoslovanska prenosna elektrotehnika prav lahko pridobi dragocena navodila.

17. Angleži računajo, da doseže »normalni« ledni plašč na prenosnem vodniku debelino treh osmink cole, kar je nekako en centimeter, in upoštevajo preprosto in vestno usirezno dodatno

težo vodnika. Vodnik veleprenosne proge Boulder—Dam—Los Angeles je imel, kakor smo povedali, zunanji premer 56 milimetrov. Vzdolž en meter dolgega koščka vodnika bi torej našli Angleži:

$$(3.6 + 1) \times \pi \times 100 \times 10^{-3} \doteq 1445 \text{ kubičnega decimetra}$$

ledu in najbrže bi mu prisodili težo okroglega 1.4 kilograma.

To dodatno breme reducira povsesna teorija na kvadratni centimeter v prerezu vodnika. Lastna teža bakrenega vodnika, ki ima prerez kvadratnega centimetra in dolžino metra, je 0.89 kilograma. Votli vodniki pa imajo mehansko opremo: podporne vibe v votlini in bandaže na površini. Teža te opreme se vleže seveda na reducirano lastno težo bakrenega vodnika in jo dvigne, recimo od 0.89 na 1.1 kilograma. Tako bi dobili celotno zimsko normalno breme, če bi upoštevali prerez vodnika (2.54 cm²):

$$p = 1.1 + \frac{1.4}{2.54} \doteq 1.65 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

To je seveda le navpično navzdol pritiskajoče breme. Angleži pa računajo z dodatnim vodoravnim pritiskom vetra. Zunanji premer v normalni zimski plašč zavitega vodnika je $5.6 + 2 \times 1.0 = 5.6$ cm. Projekcijska površina tega vodnika, seveda z dolžino metra, izziva po angleških predpisih (40 kg/m²) pritisk:

$$5.6 \times 10^{-2} \times 40 = 2.24 \text{ kilograma}$$

in na kvadratni centimeter v prerezu vodnika reducirano dodatno vodoravno breme:

$$\frac{2.24}{2.54} = 0.883 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

Vse breme je torej:

$$p' = \sqrt{1.65^2 + 0.883^2} \doteq 1.87 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

To pomeni, da je treba računati s celotnim povsesom, ki je v razmerju $1.65 : 1.87 = 1 : 1.133$ večji od navpičnega. Dopustna vodoravna natezalna sila pa je po angleških varnostnih predpisih polovica največje, ki jo prenosna kovina zdrži. Druga polovica jim je rezerva za katastrofalna dodatna bremena.

Angleži pričakujejo mehansko katastrofo v bakrenem vodniku v bližini natega s 3750 kilogrami/cm². Temu nategu bi ustrezala dopustna vodoravna natezalna sila:

$$H = \frac{3750}{2} = 1875 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Če je torej gospodarski navpični povos 11'53 metra, kakor smo videli v 15. odseku, je najvarčnejša razpetina po enačbi 5):

$$x = \sqrt{\frac{11'33 \times 8 \times 1875}{1'65}} = 321 \text{ metrov.}$$

Povprečna razpetina v veleprogi Boulder—Dam—Los Angeles je 500 metrov!

Skladnost teoretskega izsledka in važnega doprinosa žive sodobne veleprenosne elektrotehnike je praktično tolikšna, da bi nezaupljiv opazovalec utegnil v angleških varnostnih predpisih iskati njeno oporo. Milo angleško podnebje morda resnično ni skladno s podnebjem v okolici reke Colorado in vzdolž dolge poti do pacifiške obale. Toda pogledjmo, kako bi reševali problem Švicarji, ki imajo nedvomno trdo podnebje!

Švicarji računajo preprosto z dodatno normalno zimsko obtežbo 2 kilogramov/m in se ne menijo za premer prenosne vrvi. To dodatno breme bi pomenilo v enačbi 5):

$$p = 1'1 + \frac{2}{2'54} = 1'1 + 0'79 = 1'89 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

in zahtevalo bi razpetino:

$$x = \sqrt{\frac{11'33 \times 8 \times 1875}{1'89}} = 300 \text{ metrov.}$$

Kaj pa bi rekli Nemci? Po nemških varnostnih predpisih tehta zimski normalni plašč en meter dolgega koščka vodnika:

$$0'18 \cdot \sqrt{2r} \text{ kilogramov,}$$

če je r polumer prenosne vrvi v milimetrih. Ameriška prenosna vrv, ki nas tu zanima, ima 56 mm v premeru. Nemci bi ji potemtakem prisojali reducirano normalno zimsko breme:

$$p = 1'1 + \frac{0'18 \cdot \sqrt{36}}{2'54} = 1'52 \text{ kilograma/m, cm}^2.$$

Dopustna vodoravna natezalna sila v bakrenih vrveh je po nemških predpisih:

$$H = 1900 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Nemci mislijo namreč na katastrofalna dodatna bremena, ki dosežejo le dvojno višino normalnih. Potemtakem bi si Nemci izbrali, če bi gradili ameriško progo doma in če bi zaupali novi razpetinski teoriji, razpetino:

$$x = \sqrt{\frac{11 \cdot 33 \times 8 \times 1900}{1 \cdot 51}} = 338 \text{ metrov.}$$

Češkoslovaška prenosna elektrotehnika je ubrala v povsemnem problemu presenetljivo pot. Dodatna normalna zimska bremena ocenjuje namreč izredno milo: le 450 gramov naj dosežejo na en meter dolgem koščku prenosnega vodnika, ki ima v prerezu manj kakor 50 mm² in 650 gramov, če ima več. Zato pa vidi izdatna katastrofalna bremena, ki so odvisna od prereza F (mm²) vodnika:

$$2000 + 10 \cdot F \text{ gramov/m.}$$

Katastrofalno reducirano zimsko breme ameriškega vodnika, ki ga opisujemo, bi bilo po češkoslovaških predpisih:

$$P_k = 1 \cdot 1 + \frac{2000 + 10 \times 254}{2 \cdot 54} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 89 \text{ kilograma/m, cm}^2.$$

Torej bi bilo nekako tolikšno kakor po nemških predpisih. Potemtakem bi izsililo nekako isto razpetino, kakor jo obetajo nemški varnostni predpisi.

Vse te slike dokazujejo, da so si graditelji veleprenosne proge Boulder—Dam—Los Angeles izbrali povprečno razpetino, ki je skladna z varnostnimi predpisi važnih civiliziranih držav in hkrati z rešitvijo nove razpetinske teorije. Ali smemo, oprti na to skladnost, trditi, da je živa sodobna prenosna elektrotehnika popolnoma odobrila teorijo?

Možen bi bil ugovor, da so dvignili Američani najnižjo točko povešenega vodnika presenetljivo visoko (14 m) in da je le zato po novi teoriji potreben razmeroma velik navpični povos. Nemški varnostni predpisi zahtevajo na primer le 6 metrov med najnižjo točko povešenega vodnika in zemljo.

Ne pozablajmo, da obratuje proga Boulder—Dam—Los Angeles z medfazno napetostjo 287 kV! Njeni fazni vodniki so zato v svoji vodoravni ravnini razmaknjeni za 15 m. Teorija prenosne elektrotehnike je ugotovila, da pomeni 15 m med vodniki v isti vodoravni ravnini povprečno razdaljo osi v trofazni prosti s trikotniškim prerezom:

$$d = \sqrt[3]{15 \times 15 \times 2 \times 15} = 18 \cdot 9 \text{ metra.}$$

Nekako isto povprečno razdaljo od zemlje pa potrebuje prenosni vodnik, da se zemeljska površina ne začne nevshečno uveljavljati v obratnih električnih poljih trofazne proge. Razmeroma velika razdalja najnižje točke prenosne vrvi od zemlje potemtakem v tem primeru ni naključna in nepotrebna.

Poročilo o veleprenosni progi Boulder—Dam—Los Angeles pripoveduje, da so dosegli nosilni stebri 55'5 m višine. Povese, ki ga zahteva nova razpetinska teorija, prispeva k tej višini 11'35 m, najmanjša razdalja med povešeno prenosno vrvjo in zemljo 14 m, izolatorska veriga pa 5 m. Tako dobimo 28'35 m. Nad izolatorsko verigo pa je na nosilnem stebri močan kletkasti prečni nosilec. Torej je navpični povese 11'35 m lepo skladen tudi s tem podatkom poročila.

18. Zelo poučen je primer normalne angleške veleprenosne proge (British Grid Line), ki obratuje s prenosno napetostjo 132.000 voltov. Njen prenosni vodnik je vrv iz aluminija, ki ima jekleno jedro. Poglejmo, kako bi se razpetina te proge sporazumela z avtorjevo razpetinsko teorijo!

V prerezu ojačene aluminijske vrvi, ki so jo uporabili graditelji, vidimo 37 krožnih prereзов žic, ki sestavljajo vrv. 30 teh žic je iz aluminija, 7 iz pocinkanega jekla. Vse imajo premer 0'11 cole, torej nekako 2'8 milimetra. Zunanji premer vrvi je 0'77 = 7 × 0'11 cole ali 19'6 milimetrov.

Okoli osrednje jeklene žice leži plast 6 jeklenih žic. Tako sestavljeno jekleno jedro pokriva plast 12 aluminijskih žic, nad njo pa je zunanja plast 18 žic iz aluminija. Dviganje števil žic v plasteh za 6 je kajpada zasidrano v geometriji sestavljenega krožnega prereza vrvi, ki ne mara nepotrebnih votlin.

Specifična teža aluminija je 2'7 kg/dm³, jekla pa 7'8 kg/dm³. Specifična teža vrvi je potemtakem:

$$\frac{2'7 \times 30 + 7 \times 7'8}{37} = 3'66 \text{ kilograma/dm}^3.$$

Ali naj torej razpetinska teorija računa z reduciranim osnovnim bremenom:

$$0'366 \text{ kilograma/m, cm}^2?$$

Nedvomno. Računati pa sme — navidezno vsaj — tudi z ustrezno sestavljeno mehansko odpornostjo ojačene vrvi. Aluminijske in jeklene žice se v vrsti tako tesno prepletajo, da prevzame vrv ves nateg kakor enotna tvorba. Angleži ji pripisujejo skrajni, ravno še dopustni nateg:

$$H = 3500 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Očitno so aluminij s pomočjo jeklenege jedra mehansko tako ojačili, da zdrži ojačena aluminijska vrv nekako toliko kakor bakrena.

Na vrvi s premerom 1'96 centimetra leži vzdolž enega metra po angleških predpisih normalni zimski plašč s prostornino:

$$(1.96 + 1) \times \pi \times 10^{-3} \times 10 = 0.93 \text{ kubičnih decimetrov}$$

in težo:

$$0.93 \times 0.915 \doteq 0.85 \text{ kilograma.}$$

Prerez vrvi je:

$$37 \times 0.28^2 \times \frac{\pi}{4} \doteq 2.27 \text{ kvadratnega centimetra.}$$

Potemtakem je reducirano navpično navzdol pritiskajoče mehansko breme:

$$p = 0.366 + \frac{0.85}{2.27} \doteq 0.74 \text{ kilograma/m, cm}^2.$$

Ker prilagodevajo Angleži normalni zimski obremenitvi polovico ravno še dopustnega natega vrvi, dobé v tu opisani prigi:

$$H \doteq 1750 \text{ kilogramov/cm}^2$$

in z razpetino:

$$X = 900 \text{ čevljev} = 900 \times 0.305 = 275 \text{ metrov}$$

zimski navpični povos:

$$\Delta y = \frac{0.74 \times 275}{8 \times 1750} = 4.0 \text{ metrov.}$$

Aluminij pa ima razmeroma velik toplotni raztezni koeficient ($\alpha = 2.3 \times 10^{-5}$). Zato so njegovi poletni povesi običajno nevarnejši od zimskih. Graditelji proge ki jo tu raziskujemo, so ugotovili, da je treba ob $+50^\circ\text{C}$ znižati vodoravno natezalno silo na:

$$H_{+50} = 707 \text{ kilogramov/cm}^2,$$

ker je le v tem primeru skrčena vrv ob -5°C in polno normalno zimsko obtežbo še pravilno nategnjena ($H = 1750 \text{ kg/cm}^2$). Ustrezni poletni povos je torej:

$$\Delta y = \frac{0.366 \times 275^2}{8 \times 707} \doteq 4.88 \text{ metra.}$$

(Glej: »The Transmission and Distribution of Electrical Energy«, H. Cotton, Hodder and Stoughton LTD. London. 1945, str. 177!)

Po avtorjevi razpetinski teoriji naj bo največji povese enak dvema tretjinama stanovitnega dela v višini obešališča prenosnega vodnika nad zemljo. Torej bi moralo biti:

$$Y_0 = \frac{3}{2} \times 4.88 = 7.32 \text{ metra.}$$

Razdalja najnižje točke na povešenem vodniku od zemlje je v angleških progah 22 čevljev ali 6.7 metra. 4 čevlje ali 1.22 metra prispeva tretjina višine v trikotniku, ki drži prereze faznih vodnikov. Potemtakem zahteva nova razpetinska teorija tudi v tem važnem primeru razpetino, ki se le za nekaj odstotkov razlikuje od uresničene.

Dva zelo važna primera iz sodobne veleprenosne elektrotehnike potrjujeta po vsem tem z zelo zadovoljivo skladnostjo pravilnost nove razpetinske teorije. Drugi primer pa je posebno važen. Saj govori o veleprenosni proggi, ki se je zaupala aluminiju kot prenosni kovini in je celó posegla po mehanski ojačitvi aluminijske prenosne vrvi. Torej je razpetina, ki omogoča povese po enačbi 9) resnično neodvisna od prenosne kovine in celó od ustroja prenosnih kovinskih zmesi. Po vsem videzu je tudi resnično neodvisna od prenosne napetosti in posebnih podnebnih ter pokrajinskih razmer, ki usmerjajo oblikovanje prenosnih prog.

19. Primera iz sodobne veleprenosne elektrotehnike, ki smo ju opisali v zadnjih dveh odsekih, priporočata izsledek nove razpetinske teorije kot zelo uporaben, oba pa se sučeta okoli 500 m razpetine, čeprav sta po vsi svoji vsebini silno različna. Kritiki označbe 9), ki se opira na osnovno enačbo 5) bo morda oporekal, da postaja rešitev razpetinskega problema, zgoščena v enačbi 9), po vsem videzu manj uporabna, če začne vdirati v skromnejše predele prenosne elektrotehnike, vse tja do razmeroma majhnih razpetin.

No, vzemimo najmanjši praktično dopustni prerez bakrenega prenosnega vodnika: 10 mm²! Ta prerez zmore ena sama okrogla žica, če ji damo premer okroglih 3.6 milimetra. Po nemških varnostnih predpisih bo nabrala vzdolž enega metra:

$$0.18 \times \sqrt{3.6} = 0.342 \text{ kilograma}$$

ledu.

Reducirana normalna zimska mehanska obremenitev bo v tem primeru:

$$p = 0.89 + \frac{0.342}{0.1} = 4.31 \text{ kilograma/m, cm}^2.$$

Nemški varnostni predpisi dovoljujejo masivnim prenosnim žicam vodoravni nateg:

$$H = 1200 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Ti predpisi zahtevajo najmanj 6 metrov med najnižjo točko na povešenem vodniku in zemljo. Razmestitev faznih vodnikov v oglah enakostraničnega trikotnika bo dodala najmanj:

$$\frac{0.8}{2\sqrt{3}} \doteq 0.231 \text{ metra}$$

k stanovitnemu delu v višini obešališča nad zemljo, ker morajo biti bakreni vodniki po predpisih za najmanj 0.8 metra razmaknjeni. Torej smemo računati z:

$$Y_0 = 6.3 \text{ metra.}$$

Razpetinska teorija zahteva poves:

$$\Delta y = \frac{2}{3} \cdot Y_0 = \frac{2}{3} \times 6.3 = 4.2 \text{ metra.}$$

Temu povesu in zgornjim podatkom pa ustreza razpetina:

$$x = \sqrt{\frac{4.2 \times 8 \times 1200}{4.31}} = 96.5 \text{ metra.}$$

Največja po nemških predpisih ravno še dopustna razpetina bi bila v tem zanimivem primeru 100 metrov!

Vzemimo drug primer še zelo skromne prenosne proge! Prerez bakrenega vodnika naj bo 25 mm². Tega prereza ne zmore masivna žica, ki doseže največ 16 mm². Vrv pa bo potrebovala premer 6.3 milimetra. Torej bo vzdolž metra dobila:

$$0.18 \times \sqrt{6.3} \doteq 0.452 \text{ kilograma}$$

težak normalni ledni plašč, če verjamemo nemškim predpisom.

Razmaknitvi faznih vodnikov za 2 metra bi ustrezal dodatek:

$$\frac{2}{2 \times \sqrt{3}} = 0.58 \text{ metra}$$

k stanovitnemu delu v višini obešališč. Torej bi bilo:

$$Y_0 = 6 + 0.58 \doteq 6.6 \text{ metra}$$

in

$$fy = \frac{2}{3} \cdot Y_0 = \frac{2}{3} \times 6.6 = 4.4 \text{ metra.}$$

Nemški predpisi dovoljujejo bakrenim vrvcem nateg:

$$H = 1900 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Razpetinska teorija zahteva po vsem tem razpetino:

$$x = \sqrt{\frac{4.4 \times 8 \times 1900}{2.7}} = 157 \text{ metrov.}$$

ker je normalna zimska mehanska obremenitev:

$$p = 0.89 + \frac{0.453}{0.25} = 0.89 + 1.81 = 2.7 \text{ kilograma/m, cm}^2.$$

Znana knjiga »Landeselektrizitätswerke«, ki sta jo napisala Schönberg in Glung (R. Oldenburg, München und Berlin, 1926), pripisuje v svoji 40. razpredelnici opisanemu primeru razpetino 160 metrov! Po nemških predpisih je ustrezna največja ravno še dopustna razpetina 240 metrov.

Švicarji računajo brez ozira na premer prenosnega vodnika z normalnim dodatnim zimskim bremenom 2 kilogramov/m. Zato bi v primeru masivne žice s prerezom 10 mm² dobili:

$$p = 0.89 + \frac{2}{0.1} = 20.89 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

in razpetino:

$$x = \sqrt{\frac{4.4 \times 8 \times 1200}{20.89}} = 45 \text{ metrov.}$$

V primeru bakrene vrvi s prerezom 25 mm² pa bi dobili:

$$p = 0.89 + \frac{2}{0.25} = 8.89 \text{ kilograma/m, cm}^2$$

in

$$x = \sqrt{\frac{4.4 \times 8 \times 1900}{8.89}} = 86.7 \text{ metra.}$$

če bi sicer upoštevali nemške predpise.

Vse to dokazuje, da je nova razpetinska teorija tudi skromnemu okviru starejše prenosne elektrotehniike kos in da

se njena rešitev zelo dobro ujema z izkušnjami, ki so jih znošila desetletja. Iz izračunanih primerov skromnih prenosnih prog pa je razvidno, da je tako imenovani sistem razmeroma velikih razpetin le odsev praktičnega spoznanja, da so varčne razpetine mnogo večje od nekdanjih, ki so prav za prav iz telegrafске tehnike prišle v energijsko. Razpetinska teorija, ki smo jo tu zanesljivo podprli in zavarovali, pa usmerja oblikovanje prenosnih prog nedvomno zanesljiveje kakor omenjeni »sistem«.

S to ugotovitvijo je zoženemu problemu prenosnih kovin dokončno zagotovljen dragocen pripomoček, brez katerega bi bilo neoporečno primerjanje prog iz bakra in aluminija prav za prav nemogoče. Saj je jasno, da smemo primerjati le takšne proge, ki so neoporečno oblikovane. To pa predpostavlja neoporečno razpetino v obeh taborih.

20. Oblikovalec prenosnih prog, ki se lahko opre na neoporečno razpetinsko teorijo, razčisti brez težav važno vprašanje, s katerim ima zoženi problem prenosnih kovin dovolj opravka, namreč vprašanje, v kakšnem razmerju naj se gibljejo stroški stebrov do stroškov prenosne kovine.

Praktiki vedo, da zahteva prenosni baker prav za prav le skromen del gradbenih stroškov vse prenosne proge zase, in govore radi o razmerju 3 : 1. Seveda so že zdavnaj opazili, da je prenosni baker včasih mnogo zahtevnejši, včasih pa mnogo skromnejši, skratka, da je razmerje stroškov, ki jih povzročajo stebri, in stroškov, ki jih zahteva prenosni baker, zelo spremenljivo.

Razpetinska teorija vidi, da je reducirano zimsko mehansko breme prenosnih vodnikov močno odvisno od premera prenosne vrvi. V tej odvisnosti ji je zasidrano pojemanje varčne razpetine ob manjšajočem se premeru prenosne vrvi. V tej odvisnosti pa je nedvomno zasidrano tudi razmerje stroškov stebrov in bakra.

Vzemimo nemške varnostne predpise! Dodatno zimsko breme je v njih sorazmerno kvadratnemu korenu iz v milimetrih izraženega premera $2r$ prenosne vrvi in doseže:

$$0,18 \cdot \sqrt{2r} \text{ kilogramov/m.}$$

Če izrazimo premer vrvi s presežkom F (mm^2) in upoštevamo, da izkoriščajo žice vrvi geometrični prerez le nekako v razmerju $\pi : 4$, dobimo:

$$(2r)^2 \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\pi}{4} = F$$

oziroma:

$$2r \doteq \sqrt{1.6 F}.$$

Potemtakem je normalno reducirano zimsko breme bakrene vrvi:

$$p = 0.89 + \frac{0.18 \cdot \sqrt[4]{1.6 F}}{F \cdot 10^{-2}} = 0.89 \left[1 + \frac{22.7}{F^{\frac{3}{4}}} \right] \text{ kilogramov/m, cm}^2 \quad 11)$$

Praktika, ki uporablja nemške predpise, bo gotovo zanimalo, da obeta prerez:

$$F \doteq 65 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

bakreni prenosni vrvi normalno reducirano dodatno breme, ki je ravno nekako enako osnovnemu. Temu prerezu pa ustreza premer vrvi:

$$2r = \sqrt{1.6 \times 65} \doteq 10.2 \text{ milimetra.}$$

Kasneje bomo videli, da je ravno ta premer v bakrenih progah kritičen.

Enačbi 11) damo lahko tudi obliko:

$$p = 0.89 \left[1 + \left(\frac{65}{F} \right)^{\frac{3}{4}} \right] \text{ kilogramov/m, cm}^2 \quad 11a)$$

Po razpetinski teoriji je najvarčnejša razpetina obratno sorazmerna kvadratnemu korenu izraza v oglatem oklepaju enačbe 11a). Temu kvadratnemu korenu so torej stroški stebrov sorazmerni. Ti stroški pa rastejo tudi z dvetretjinsko potenco vodoravne natezalne sile H . F . Dokler se torej višina obešališča prenosnega vodnika ne spremeni in dokler je H stano- viten, so stroški stebrov vse prenosne proge sorazmerni izrazu:

$$F^{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt[4]{1 + \left(\frac{65}{F} \right)^{\frac{3}{4}}}.$$

Razpetinska teorija zahteva poves:

$$\Delta y = \frac{2}{3} \cdot Y_0 \cdot$$

Zato zahteva višino obešališča:

$$Y = Y_0 + \frac{2}{3} Y_0 = \frac{5}{3} Y_0 \cdot$$

Dokler se torej »stanovitni« del te višine, Y_0 , ne spremeni, bo pravkar sestavljeni izraz dobro meril stroške stebrov. Ker pa rastejo stroški bakra sorazmerno s presežkom F , bo izraz:

$$\sqrt[3]{\frac{F^3}{1 + \left(\frac{65}{F}\right)^3}}$$

sorazmeren najvarčnejšemu razmerju med stroški prenosnega bakra in stroški prenosnih stebrov. Takoj vidimo, da se bo to razmerje večalo, če bo prežek prenosnega vodnika rasteł.

Raziskavanju zoženega problema prenosne kovine je zelo važna ugotovitev, da je kritični prežek 65 mm^2 v enačbi 11a) obratno sorazmeren tričetrtinski potenci specifične težce, ki jo ima prenosna kovina, kar je iz enačbe 11) takoj razvidno. Torej je reducirano normalno zimsko breme vrvi iz aluminija:

$$p_{al} = 0,27 + \frac{0,18 \cdot \sqrt[4]{1,6 F_{al}}}{F_{al} \cdot 10^{-3}} = 0,27 \left[1 + \frac{75}{F_{al}^{\frac{3}{4}}} \right] \quad \dots \quad 12)$$

oziroma:

$$p_{al} = 0,27 \left[1 + \left(\frac{316}{F_{al}}\right)^{\frac{3}{4}} \right] \quad \dots \quad 12a)$$

Nemški varnostni predpisi dovoljujejo vrvm iz aluminija nateg z 800 kg/cm^2 . Po osnovnih predpostavkah razpetinske teorije dobimo torej razmerje stroškov stebrov, ki osešajo aluminijske oziroma bakrene vodnike enako visoko:

$$\frac{S_{al}}{S_b} = \left(\frac{F_{al} \cdot 800}{F_b \cdot 1900}\right)^{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt{\frac{p_{al} \cdot 1900}{p_b \cdot 800}} = 0,486 \cdot \left(\frac{F_{al}}{F_b}\right)^{\frac{3}{4}} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{316}{F_{al}}\right)^{\frac{3}{4}}}{1 + \left(\frac{65}{F_b}\right)^{\frac{3}{4}}}} \quad \dots \quad 13)$$

in če postavimo:

$$F_{al} = \xi \cdot F_b, \quad \dots \quad 14)$$

$$\frac{S_{al}}{S_b} = 0,486 \cdot \xi^{\frac{3}{4}} \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{316}{\xi F_b}\right)^{\frac{3}{4}}}{1 + \left(\frac{65}{F_b}\right)^{\frac{3}{4}}}} \quad \dots \quad 15)$$

IV. BAKER IN ALUMINIJ V KELVINOVEM PRAVILU

21. Prenosno progo opisuje nazorno in točno njen prerez (slika 4.), medtem ko je njena dolžina v okviru določenega prereza nedvomno spremenljiva. V prerezu pa najdemo zaradi predpostavljene geometrične oblike le dve meri:

razdaljo osi dveh vzporednih sosednih vodnikov: d (cm)
in polmer okroglega vodnika: r (cm).

To velja očitno tudi v primeru, da leže osi vseh treh faznih vodnikov v isti vodoravni ravnini (slika 8).

Ti dve meri določata ravno še dopustno medfazno prenosno napetost U (kV) na koncu proge. Ker sodobna prenosna elektrotehnika načelno odklanja trajno korono in ker je treba misliti na neizbežne napetosne dvige vzdolž proge, ter morebitno jalovo dodatno prenosno moč, moramo zahtevati nekako:

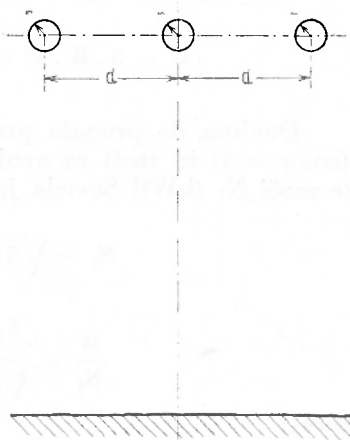
$$r \cdot \ln \frac{d}{r} \cong \frac{U}{20,8} \quad \dots \quad 16)$$

Podrobnosti tega vprašanja najde bralec v avtorjevi knjigi »Problemi prenašanja električne energije« (Državna založba, Ljubljana, 1947).

Polmer okroglega vodnika r določa seveda prerez F (mm^2), ki služi prenosnemu toku. To velja v primeru polne žice, to velja v primeru prenosne vrvi, velja pa tudi, kakor bomo še videli, v primeru votlega prenosnega vodnika. Potemtakem opišemo trofazno prenosno progo nazorno in točno tudi s:

prenosno medfazno napetostjo na koncu proge U (kV)
in prerezom prenosnega vodnika F (mm^2).

Seveda: v območju skromnih prenosnih napetosti zaide razdalja d v oblast mehanskih vplivov in postane napetosti ne-



Slika 8.

potrebno velika. Varnostni predpisi mislijo na nihanja prenosnih vodnikov pod vplivom vetra in odpadanja zimskih ledenih plaščev ter zahtevajo v primeru bakrenih vodnikov najmanj $d = 0,8$ m, v primeru aluminijevih pa $d = 1,0$ m. Ta dodatek je pač treba upoštevati.

Osnovna podatka U in F omogočata zanimiv vpogled v možna obratovanja proge. Predvsem je omški upor L kilometrov dolgega faznega prenosnega vodnika:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{F} \cdot 10^3 \text{ omov,} \quad \dots \quad (17)$$

če je ρ njegova specifična omska upornost. Nadalje je džaulska toplota prenosnega toka I (A) v vseh treh faznih vodnikih:

$$W = 3 \cdot R \cdot I^2 = 3 \cdot \rho \cdot \frac{L}{F} \cdot I^2 \text{ kilovatov.} \quad \dots \quad (18)$$

Denimo, da prenaša proga energijo s čisto žlahtno močjo ($\cos \varphi = 1$) in troši za svojo džaulsko toploto le en odstotek te moči N_1 (kW)! Seveda je potem:

$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \text{ kilovatov} \quad \dots \quad (19)$$

$$\frac{W}{N_1} = \frac{3 \rho \cdot \frac{L}{F} \cdot I^2}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I} = 0,01, \quad \dots \quad (20)$$

torej:

$$N_1 \cdot L = \frac{U^2 \cdot F}{100 \cdot \rho} \text{ kilovatkilometrov} \quad \dots \quad (21)$$

Če pa dovolimo progi ε odstotkov energijskih (džaulskih) izgub, dobimo zmnožek ustrezne prenosne moči N_ε (kW) in prenosne razdalje L (km):

$$N_\varepsilon \cdot L = \varepsilon \cdot \frac{U^2 \cdot F}{100 \cdot \rho} \text{ kilovatkilometrov} \quad \dots \quad (22)$$

Ta zmnožek imenuje teorija prenosni moment.

Izračunani prenosni moment je očitno neodvisen od odnosa prenosne napetosti do razdalje (d) osi dveh sosednjih prenosnih vodnikov: kakor hitro si izberemo prenosno napetost (U) in prerez prenosnega vodnika (F), smo že približili prenosni moment. Ta moment pa je odvisen od prenosne kovine, ker je obratno sorazmeren njeni specifični omski upornosti.

Če računamo z upornostjo:

$$\rho = 0.0175 \frac{\text{omov} \times \text{mm}^2}{\text{m}}$$

bakra, dobimo:

$$M_{p,b} = N_{\varepsilon} \cdot L = \varepsilon \cdot \frac{U^2 \cdot F}{1.75} \text{ kilovatkilometrov,} \quad \dots \quad 22a)$$

zaradi 1.7-krat večje omske upornosti aluminija pa dobimo:

$$M_{p,al} = M_{\varepsilon} \cdot L = \varepsilon \cdot \frac{U^2 \cdot F}{1.7 \times 1.75} = \varepsilon \cdot \frac{U^2 \cdot F}{3} \text{ kilovatkilometrov.} \quad 22b)$$

V okviru določenega prenosnega momenta, praktično torej v okviru določene prenosne napetosti, določenega prereza prenosnega vodnika in določenih odstotkov energijskih izgub, so pa možni najrazličnejši pari prenosne moči in prenosne razdalje.

Če je na primer:

$$U = 25.000 \text{ voltov} = 25 \text{ kilovoltov.}$$

$$F = 50 \text{ kvadratnih milimetrov,}$$

$$\varepsilon = 5 \text{ odstotkov,}$$

je:

$$M_{p,b} = 5 \times \frac{25^2 \times 50}{1.75} = 90.000 \text{ kilovatkilometrov,}$$

kar dovoljuje načelno ravno tako:

$$N_{\varepsilon} = 9000 \text{ kilovatov in } L = 10 \text{ kilometrov}$$

kakor:

$$N_{\varepsilon} = 900 \text{ kilovatov in } L = 100 \text{ kilometrov.}$$

Seveda: prevelikih prenosnih moči ne dovoljujejo oziri na neizbežno segrevanje prenosnih vodnikov, premajhnih pa gospodarski oziri. Okvir prenosnega momenta pa daje vsekakor prenosni razdalji presenetljivo gibčnost, ki je teoretik ne more prezreti. Zato je teoretski prenosni elektrotehnik utesnitev tega okvira važen problem.

Iz enačb 22a) in 22b) pa razvidimo takoj, da se obeta prenosni progi, ki posega po aluminiju, isti prenosni moment ob isti prenosni napetosti in istih odstotkih energijskih izgub, kakor bakreni, če dobi tolikokrat večji prerez prenosnega vodnika, kolikorkrat je aluminij električno upornejši od bakra.

Tudi v tem dejstvu je potemtakem zasidrano stališče prakatika, ki zamenjava baker z aluminijem v prereznem razmerju omskih specifičnih upornosti.

22. Pojav segrevanja vodnikov v prosti prenosni progi pod vplivom obratne džaulske toplote je v teoriji prenosne elektrotehnike še dokaj zanemarjen: praktik in teoretik vidita, da je goli vodnik dober odvajalec obratne toplote in ne pričakujeta pomembnih temperaturnih dvigov v njem. Prosti goli vodnik izžareva svojo toploto skoraj popolnoma neovirano. Razen tega ima zaradi svoje oblike razmeroma veliko površino.

Problem odvajanja obratne toplote zanima elektrotehniko predvsem v območju električnih strojev, kjer ima obilo opravka s slabotnimi prevajalci toplote, namreč z izolacijskimi plašči vodnikov. Je pa vsekakor zamotan problem. Morda se mu je prenosna elektrotehnika tudi zato izogibala.

Že v prvi izdaji svoje knjige »Die Transformatoren« (J. Springer, Berlin, 1920) je avtor zgradil teorijo odvajanja obratne toplote iz vodnikov, predvsem iz vodnikov v navitjih transformatorjev. To teorijo je v drugi izdaji te knjige, 1925. l., poglobil. Z obsežnimi laboratorijskimi poizkusi jo je nekaj let kasneje v ljubljanskem elektrotehniškem inštitutu preiskal prof. dr. inž. Roman Poniž, ki je svoje ustrezno delo opisal v svoji doktorski disertaciji. Našel je zelo zadovoljivo skladnost avtorjevih teoretskih izsledkov s svojimi poizkusnimi. Avtorjevo teorijo je pa že pred desetletji prevzela tudi svetovna strokovna literatura. Zato se v naslednjih slikah lahko opremo nanjo.

Najvažnejša veličina v problemu odvajanja obratne toplote je vsekakor število vatov, ki jih oddaja kvadratni decimeter hladilne površine. To sekundno toplotno množino prevzame deloma izžarevanje, deloma pa konvekcijsko odvajanje, ki ga vrši tok hladilne tekočine ob segreti površini vodnika.

Vzemimo primer bakrene prenosne vrvi, ki ima prerez 50 mm²! Njen premer bo nekako 9 mm, ustrezno polnilnemu faktorju $\pi/4$:

$$50 = \frac{9^2 \cdot \pi}{4} \times \frac{\pi}{4}$$

Površina en meter dolgega koščka te vrvi bo:

$$0.09 \times \pi \times 10 = 2.83 \text{ kvadratnega decimetra.}$$

Omski upor tega koščka vrvi je:

$$0.0175 \times \frac{1}{50} = 0.00035 \text{ oma,}$$

dokler je specifična upornost 0'0175. Prenosni tok I amperjev bo potemtakem natovoril kvadratnemu decimetru površine:

$$q = \frac{0'00035 \cdot I^2}{2'83} \doteq 0'000123 I^2 \doteq 1'23 \left(\frac{I}{100}\right)^2 \text{ vatov.}$$

Ker ne pričakujemo gostot prenosnega toka nad 2 amperjema na kvadratni milimeter, vidimo takoj, da bo obremenitev hladilne površine skromna: ostala bo pod vatom na kvadratni decimeter.

Če se dvigne temperatura na površini vodnika za $\Delta\tau^\circ\text{C}$ nad temperaturo okolice, zmore žarenje po omenjeni teoriji:

$$q_z = 6'8 \cdot \Delta\tau \cdot 10^{-2} \text{ vatov/dm}^2. \quad \dots \quad 23)$$

Konvekcijski zračni tok pa prevzame:

$$q_k = 7'3 \cdot \Delta\tau \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{h^{\frac{1}{4}}} \text{ vatov/dm}^2, \quad \dots \quad 24)$$

in »h« pomeni v decimetrih izraženo dolžino hladilnega tekočinskega (ter zračnega) toka ob razgreti površini.

Na sliki 9. vidimo takoj, da je »h« v primeru prostega prenosnega vodnika polovični obod njegovega prereza. Torej je:

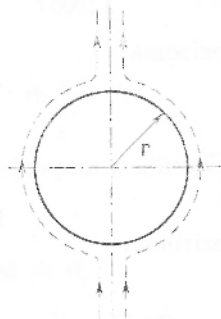
$$h = 0'045 \times \pi \doteq 0'141 \text{ dm}$$

in:

$$h^{\frac{1}{4}} \doteq 0'612.$$

Tako dobimo:

$$q = 1'23 \left(\frac{I}{100}\right)^2 = q_z + q_k = 10^{-2} \times \left(6'8 + \frac{7'3}{0'612}\right) \Delta\tau$$



Slika 9.

oziroma:

$$\Delta\tau \doteq 6'6 \left(\frac{I}{100}\right)^2 \text{ Celzijevih stopinj.}$$

Če damo prenosnemu toku gostoto 2 amperjev na kvadratni milimeter, če ga torej dvignemo na:

$$2 \times 50 = 100 \text{ amperjev,}$$

se bo vodnik segrel za 6'6°C. V resnici se bo povprečno še mnogo manj segreval, ker ozračje ni mirno kakor v tu uporabljeni teoriji odvajanja toplote, ker bo, drugače povedano, konvekcijsko odvajanje gotovo živahnije.

Toda vzemimo primer z drugega konca lestvice prenosnih vodnikov: votel bakreni vodnik s premerom 40 milimetrov in debelino stene skromnih 2·8 mm! Takšen vodnik bi imel le:

$$(40 - 2\cdot8) \times \pi \times 2\cdot8 \doteq 328 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

prereza.

To pot bi bila hladilna površina obremenjena z:

$$\frac{0\cdot0175 \cdot I^2}{328 \times 0\cdot4 \times \pi \times 10} = 4\cdot25 \left(\frac{I}{1000}\right)^2 \text{ vatov/dm}^2.$$

in konvekcija bi imela opravlka s:

$$h = 0\cdot2 \times \pi \doteq 0\cdot628 \text{ decimetra}$$

oziroma:

$$h^{\frac{1}{4}} \doteq 0\cdot89.$$

Potemtakem bi bilo:

$$q = 4\cdot25 \left(\frac{I}{1000}\right)^2 = q_s + q_c = 10^{-2} \cdot \left(6\cdot8 + \frac{7\cdot3}{0\cdot89}\right) \cdot \Delta t \text{ vatov/dm}^2$$

oziroma:

$$\Delta t \doteq 28\cdot3 \cdot \left(\frac{I}{1000}\right)^2 \text{ Celzijevih stopinj.}$$

Gostota 2 amperjev na mm² bi zahtevala tok:

$$I = 328 \times 2 = 656 \text{ amperjev}$$

oziroma:

$$\Delta t \doteq 28\cdot3 \times 0\cdot656^2 \doteq 12\cdot3 \text{ Celzijevih stopinj.}$$

Če bi pa vso votlino prenosne cevi napolnili z bakrom, bi dvignili prerez na:

$$40^2 \times \frac{\pi}{4} \doteq 1255 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

in dobili ustrezno:

$$\Delta t \doteq 28\cdot3 \times \frac{228}{1255} \times \left(\frac{I}{1000}\right)^2 = 7\cdot4 \left(\frac{I}{1000}\right)^2 \text{ Celzijevih stopinj.}$$

Gostota dveh amperjev na kvadratni milimeter bi pa potem zahtevala:

$$\Delta t \doteq 7\cdot4 \times \left(\frac{1255 \times 2}{1000}\right)^2 = 46\cdot7 \text{ Celzijevih stopinj!}$$

Votli vodniki so po vsem tem v boju z obratno toploto mnogo odpornejši od polnih.

Vse te slike svaré pred pretiranimi gostotami prenosnih tokov. Ne pozabljajmo, da dvigne vsaka stopinja Celzijeve temperaturne lestvice specifično upornost bakra za nekako 0'4 odstotka, z njo pa džaulske energijske izgube! Zato moramo gostote znatno nad 2 amperjema na kvadratni milimeter kritično presoјati, če imamo opravka z bakrenimi prostimi prenosnimi vodniki.

25. Gospodarski oziri ožijo okvir prenosnega momenta znatno ostreje kakor oziri na odvajanje obratne toplote. To je ugotovil, kakor že vemo, Kelvin. Njegovo pravilo, poglobljeno ustrezno potrebam prenosne elektrotehnike, potiska gostoto prenosnega toka običajno globoko pod mejo, ki jo oziri na odvajanje toplote le ohlapno postavljajo.

Vzemimo kilometer proge, ki je določena s prenosno medfazno napetostjo na svojem koncu U (kV) in prerezom faznih vodnikov F (mm²)! Prenosna kovina tega kosa proge naj stane K_0 dinarjev, potrebni stebri S_0 dinarjev, džaulska toplota ob nameravani prenosni moči N_0 pa naj zahteva W_0 kilovatov. Če obrestujemo ter odpisujemo s »p« odstotki, letni kilovat pa ocenjujemo s »k« dinarji, dobimo letne prenosne stroške:

$$P = \frac{P}{100} \cdot \left(K_0 + S_0 \right) + k \cdot W_0 \text{ dinarjev.}$$

Naknadni dvig gostote prenosnega toka na x -kratno višino bi zahteval x -kratno zmanjšanje prereza F . Prenosna moč bi s tem obstala na prvotni višini. Pač pa bi se seveda vrednost prenosne kovine x -krat zmanjšala, medtem ko bi postale energijske izgube x -krat večje. Po v prejšnjem poglavju zgrajeni razpetinski teoriji bi pa stebri postali $x^{\frac{2}{3}}$ -krat cenejši, če bi se gospodarska razpetina ne spremenila.

Predpostavljajmo najprej, da bi ostala, kakršna je bila! Novi letni prenosni stroški bi bili:

$$P_x = \frac{P}{100} \cdot \left(\frac{K_0}{x} + \frac{S_0}{x^{\frac{2}{3}}} \right) + k \cdot W_0 x.$$

Iz:

$$\frac{dP_x}{dx} = - \frac{P}{100} \cdot \left(\frac{K_0}{x^2} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{x^{\frac{5}{3}}} \right) + k \cdot W_0 = 0$$

bi pa takoj lahko sklepali, da obratuje prenosna proga s tisto gostoto toka najvarčneje, ki obeta odnos:

$$k \cdot W_0 \cdot x = \frac{P}{100} \cdot \left(\frac{K_0}{x} + \frac{2}{3} \frac{S_0}{x^{\frac{5}{3}}} \right), \quad \dots \dots \dots 25)$$

ki zahteva, drugače povedano, iste izdatke za letne energijske izgube kakor za obrestovanje ter odpisovanje vsote, sestavljene iz vrednosti prenosne kovine in dveh tretjin vrednosti stebrov. To je poglobljeno Kelvinovo pravilo prenosne elektrotehnike.

Z:

$$W_0 \cdot x = W, \\ \frac{K_0}{x} = K, \dots \dots \dots 26)$$

in

$$\frac{S_0}{x^3} = S$$

dobimo preprosteje:

$$k \cdot W = \frac{P}{100} \left(K + \frac{2}{3} S \right)$$

oziroma:

$$k \cdot W = \frac{P}{100} \cdot K \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \frac{S}{K} \right), \dots \dots \dots 27)$$

kar izpopolnjuje ugotovitve 10. odseka: gostota prenosnega toka je po vsem videzu gospodarsko soodgovorna za dve tretjini stroškov podpornih stebrov.

Toda izsledek enačbe 27) ni neoporečen. V 13. odseku smo ugotovili, da so stroški neaktivnega dela stebrov nekoliko šibkeje povezani s prerezom prenosnih vodnikov kakor stroški aktivnega dela. V 19. odseku pa smo našli, da se stroški stebrov tudi zaradi spreminjajoče se najpriporočljivejše razpetine dodatno spreminjajo, če vodnikom večamo ali manjšamo prerez. Povečan prerez zahteva nekoliko večjo razpetino, ki manjša stroške stebrov. Tako nastane dodaten, čeprav skromen pritisk na dvetretjinsko potenco, ki se skriva v enačbi 27).

Praktična prenosna elektrotehnika seveda ne išče pretirane natančnosti v problemu gospodarsko neoporečne gostote prenosnega toka. Teorija tega problema pa vidi, da bi bilo nespametno vdirati globlje s pomočjo dokaj nezanesljivih opor in se zato nujno zadovoljuje s prikladno oceno: dvetretjinsko potenco, ki je omogočila enačbo 27) bo preprosto zamenjala s polovično. Tako nastane izraz:

$$k \cdot W = \frac{P}{100} \cdot K \cdot \left(1 + \frac{S}{2K} \right) \dots \dots \dots 28)$$

oziroma ugotovitev:

Gostota prenosnega toka je v poglobljenem Kelvinovem pravilu gospodarsko odgovorna za stroške montirane prenosne kovine in za polovične stroške postavljenih stebrov.

rov. V tem odnosu pa predpostavlja gospodarsko neoporečno razpetino.

Vzemimo primer bakrene proge s prenosno medfazno napetostjo 25.000 voltov in prerezom 25 mm² prenosnih vodnikov! V 18. odseku smo izračunali najpriporočljivejšo razpetino: 157 m. V svoji 40. razpredelnici ugotavlja knjiga »Landeselektrizitätswerke«, ki smo jo omenili že v 18. odseku, da potrebuje kilometer takšne proge:

750 kilogramov bakrene vrvi in

5.000 kilogramov postavljenih in popolnoma opremljenih stebrov.

Če predpostavljamo razmerje 5:1 med enotnimi (kilogramskimi) cenami — razmerja enotnih cen so vselej mnogo stanovitnejša od cen samih — dobimo:

$$\frac{S}{2K} = \frac{5000}{2 \times 5 \times 750} = 0.67.$$

V 10. odseku pa smo ugotovili, da zahteva nepoglabljeno Kelvinovo pravilo, ki se ne meni za mehansko opremo prenosne kovine, v bakrenem vodniku gostoto toka v višini okroglega amperja na mm².

V enačbi 28) ustreza izraz v oklepaju podražitvi prenosne kovine zaradi upoštevanja mehanske opreme. V enačbi 2) je gospodarsko neoporečna gostota sorazmerna kvadratnemu korenu iz enotne cene prenosne kovine (c_x). Potemtakem dobimo najpriporočljivejšo gostoto v zgoraj opisani progi:

$$g = 1 \times \sqrt{1 + 0.67} = 1.3 \text{ amperja/mm}^2.$$

Poglabljeno Kelvinovo pravilo zagradi prenosno moč po vsem tem neposredno. Pravkar izračunani gostoti ustreza prenosni tok:

$$25 \times 1.3 = 32.5 \text{ amperja.}$$

njemu pa prenosna moč:

$$N_g = \sqrt{3} \times 25 \times 32.5 = 1400 \text{ kilovatov.}$$

24. Enačbo 22), ki določa prenosni moment, razširimo lahko tako, da dobi obliko:

$$k \cdot \frac{N_g}{100} = c^2 \cdot \left(\frac{U}{L}\right)^2 \cdot \frac{k}{100 \rho \cdot \gamma \cdot c' \cdot p \cdot 3} \cdot \left(3 \cdot F \cdot L \cdot \gamma \cdot c \cdot \frac{P}{100}\right)$$

. 29.

Hkrati sme pomeniti:

- k ... vrednost letnega kilovata (din/kW)
- ε ... odstotke džaulskih energijskih izgub
- γ ... specifično težo prenosne kovine (kg/dm³)
- c' ... z odgovornostjo za mehansko opremo obremenjeno vrednost kilograma montirane prenosne kovine (din/kg)
- p ... odstotke obrestovanja ter odpisovanja.

Nedvomno zahteva enačba 29) isto kakor Kelvinova enačba 28), če je:

$$\varepsilon^2 \cdot \left(\frac{U}{L}\right)^2 \cdot \frac{k}{100 \cdot \varrho \cdot \gamma \cdot c' \cdot p \cdot 3} = 1$$

oziroma:

$$\varepsilon = \frac{L}{U} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{100 \varrho \cdot \gamma \cdot c' \cdot p}{k}} \quad \dots \quad 30)$$

Kelvinovo pravilo določa potemtakem tudi odstotne prenosne energijske izgube in oži s tem okvir prenosnega momenta.

Če pa vstavimo izraz 30) v enačbo 22), vidimo takoj, da prenosna razdalja izgine:

$$N = U \cdot F \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot \gamma \cdot c' \cdot p}{100 \varrho \cdot k}} \quad \dots \quad 31)$$

Prenosna proga, ki jo nazorno in točno opisujeta medfazna prenosna napetost U (kV) in prerez faznega vodnika F (mm²), izgubi torej pod pritiskom Kelvinovega pravila vso svojo gibljivost v okviru prenosnega momenta in se mora okleniti določene prenosne moči.

Seveda: Kelvinova prenosna moč (enačba 31) je le ideal, ki se mu bolj ali manj približujemo. Ko pa niha živa proga okoli te moči, se giblje v okviru svojega prenosnega momenta. In če ne more spreminjati ročice tega momenta, namreč prenosne razdalje L, spreminja pač odstotne prenosne energijske izgube.

Starejši prenosni elektrotehniki so bile odstotne energijske izgube izredno važne, ker so v primeru žlahtne prenosne moči hkrati pomenile odstotno napetostno izgubo. Sodobna prenosna elektrotehnika rešuje problem nevšečnih napetostnih padcev z izdatnejšimi pripomočki. Zato ji je tista odstotna energijska izguba (enačba 30) najljubša, ki obeta najcenejši prenos.

Če vstavimo skladno z računskim primerom zadnjega odseka v enačbo 31):

$$\begin{aligned} U &= 25 \text{ kV} \\ F &= 25 \text{ mm}^2 \\ \gamma &= 9 \text{ kg/dm}^3 \text{ (zaradi povesa in vib v prenosni vrvi)} \\ p &= 10\% \end{aligned}$$

$$\rho = 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$c' = 20 \cdot (1 + 0.67) \text{ din/kg}$$

$$k = 1000 \text{ din/kW},$$

dobimo:

$$N = 25 \times 25 \times \sqrt{\frac{3 \times 9 \times 20 \times 1.67 \times 10}{100 \times 0.0175 \times 1000}} = 1400 \text{ kW}$$

kakor na koncu zadnjega odseka.

Iz enačbe 31) pa dobimo tudi takoj najpriporočljivejše razmerje preprezov $F_{al} : F_b$ za vodnike iz aluminija in bakra, ki prevzamejo isto prenosno moč (N) s pomočjo iste medfazne prenosne napetosti:

$$\epsilon_{cr} = \frac{F_{al}}{F_b} = \sqrt{\frac{\gamma_b \cdot \epsilon_{al} \cdot c'_b}{\gamma_{al} \cdot \epsilon_b \cdot c'_{al}}} \dots \dots \dots 32)$$

V tem izrazu sta le enotni ceni c'_b in c'_{al} , ki se pa kajpada ne ujemata s kilogramskima cenama bakra in aluminija, spremljivi. Mahinacijam kovinskih kartelov sta neposredno dosegljivi le v tistem svojem delu, ki ne izraža gospodarske odgovornosti za mehansko opremo prenosne proge.

$$\begin{aligned} \zeta: \quad \gamma_b &= 8.9 \text{ kg/dm}^3 \\ \gamma_{al} &= 2.7 \text{ kg/dm}^3 \\ \epsilon_b &= 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \\ \epsilon_{al} &= 1.7 \times 0.0175 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \end{aligned}$$

se obrazec 32) poenostavi v:

$$\epsilon_{cr} = \frac{F_{al}}{F_b} = \sqrt{\frac{8.9}{2.7} \times 1.7 \times \frac{c'_b}{c'_{al}}} = 2.36 \sqrt{\frac{c'_b}{c'_{al}}} \dots \dots 32a)$$

V enačbi 28) pa bi seveda smeli nadomestiti vrednost prenosne kovine K z vrednostjo B montiranega prenosnega bakra ali pa z vrednostjo A montiranega prenosnega aluminija, če bi le hkrati razlikovali med stroški S_b in S_{al} montiranih ustreznih stebrov. Če torej imenujemo resnični enotni ceni montiranega bakra in aluminija c_b in c_{al} , je:

$$\frac{c'_b}{c'_{al}} = \frac{c_b \cdot \left(1 + \frac{S_b}{2B}\right)}{c_{al} \cdot \left(1 + \frac{S_{al}}{2A}\right)}$$

in

$$c_{cr} = 2,36 \cdot \sqrt{\frac{c_b \cdot \left(1 + \frac{S_b}{2B}\right)}{c_{al} \cdot \left(1 + \frac{S_{al}}{2A}\right)}} \dots \dots \dots 32b)$$

Z enačbo 32 b) smo dosegli rešitev prve stopnje v zoženem problemu prenosnih kovin. Praktik, ki vidi pod kvadratnim korenem enačbe 32 a) preprosto razmerje enotnih cen bakra in aluminija ter ga ocenjuje nekako z 1 : 2, pričakuje seveda:

$$c_{cr} = \frac{F_{al}}{F_b} = 2,36 \sqrt{\frac{1}{2}} \approx 1,67.$$

torej skladnost z razmerjem specifičnih omskih upornosti.

25. Denimo, da bi bilo razmerje prerezov ustreznih prenosnih vodnikov iz aluminija in bakra:

$$\xi = F_{al} : F_b = 1,7 : 1$$

resnično skladno s poglobljenim Kelvinovim pravilom, torej:

$$c'_{al} : c'_b = 1,94.$$

kar zahteva enačba 32a)! V tem primeru, v primeru, ki ga praktik prvenstveno upošteva, bi seveda progi iz aluminija in bakra zmogli isto prenosno moč z istimi energijskimi izgubami. In če bi dozdevna enotna cena bakra, c'_b , resnično pravilno upoštevala stroške stebrov, bi bila nadomestna proga iz aluminija ravno tako neoporečna kakor bakrena — če bi njeni stebri povzročali iste stroške.

Na tem mestu je treba poseči po enačbi 15) na koncu prejšnjega poglavja, ki opisuje razmerje stroškov stebrov v primeru dveh prog iz aluminija oziroma bakra s prereznim odnosom $\xi = F_{al} : F_b$. Ta enačba je nekoliko nepregledna in zahteva izračunanje vrste konkretnih primerov. Za $\xi = 1,7$ daje naslednjo:

razpredelnico št. 5.	
F_b	$S_{al} : S_b$
25 mm ²	0,91
50 mm ²	0,88
65 mm ²	0,85
100 mm ²	0,83
200 mm ²	0,79.

Aluminij obeta potemtakem kljub neugodnemu razmerju enotnih cen, ki ga predpostavlja $\xi = 1.7$, cenejše prenašanje energije, ker potrebuje cenejše stebre. Razpredelnica št. 5 pa pripoveduje, da je prednost aluminija tem večja, čim večji je ustrezni prerez bakrenega prenosnega vodnika. Ta prednost je po vsem videzu neodvisna od prenosne napetosti. Ker pa pričakujemo velike prereze prenosnih vodnikov predvsem v velikih progah, obeta aluminij prvenstveno veleprenosni elektrotehniki pomembne prihranke.

Slika, ki smo jo pravkar sestavili, pa je nepopolna. Izkušeni graditelji prenosnih prog vedo, da je poleg stroškov, ki jih povzročajo stebri, potrebna razpetina zelo važna. Omenili smo že, da se boje izolatorjev, na katere se obešajo prenosni vodniki, ker vidijo v njih električno najšibkejše točke prenosne proge. Zato povečujejo razpetine, kjer le morejo. In če bi ogledovali razpredelnico št. 5 bi nedvomno takoj mislili na razmerje razpetin, ki spremlja razmerje $S_{al} : S_b$.

V 19. odseku smo to razmerje upoštevali, toda zakopali smo ga v razmerje $S_{al} : S_b$. Če ga zdaj izkopljemo dobimo:

$$\frac{x_{al}}{x_b} = \sqrt{\frac{8.9 \times 800}{2.7 \times 1900} \cdot \frac{1 + \left(\frac{65}{F_b}\right)^{\frac{3}{4}}}{1 + \left(\frac{316}{\xi F_b}\right)^{\frac{3}{4}}}} \dots \dots \dots 33)$$

Tudi ta enačba je dokaj nepregledna. Če vstavimo:

$$\xi = 1.7,$$

moramo vnovič izračunati vrsto primerov, da dobimo praktično uporabljivo razpredelnico.

Zaradi ugotovljene povezanosti stroškov in razpetin stebričevja v prenosnih progah iz aluminija pa je vsekakor treba združiti razmerji stroškov in razpetin v skupni razpredelnici, ki je seveda le razširjena in izpopolnjena razpredelnica št. 5. Tako dobimo:

razpredelnico št. 6.

$$\xi = F_{al} : F_b = 1.7$$

F_b	$S_{al} : S_b$	$x_{al} : x_b$
25 mm ²	0.91	0.88
50 mm ²	0.88	0.91
65 mm ²	0.85	0.94
100 mm ²	0.83	0.96
200 mm ²	0.79	1.01.

Zdaj je slika ostrejša: stroški stebrov padajo v progi iz aluminija, ustrezne razpetine pa rastejo, ko se dviga prerez prenosnega vodnika. Dokler se mora aluminij zadovoljevati z manjšo razpetino kakor baker, je zagovorniku bakra število potrebnih izolatorjev še važno orožje. Toda ko se razpetini bakra in aluminija izenačita, je prednost aluminija nesporna. Ustrezni prerez bakrenega vodnika v razpredelnici št. 6 ni neposredno izražen. Zato ga je treba ugotoviti.

Iz enačbe 55) dobimo, če postavimo:

$$x_{al} = x_b,$$

pogojno enačbo:

$$\frac{8.9 \times 800}{2.7 \times 1900} \cdot \left[1 + \left(\frac{65}{F_b} \right)^{\frac{2}{3}} \right] = 1 + \left(\frac{316}{1.7 \cdot F_b} \right)^{\frac{2}{3}},$$

iz nje pa:

$$F_b = 162 \text{ mm}^2.$$

Razpredelnica št. 6 obeta v primeru tolikšnega bakrenega prereza aluminiju že za nekako dvajset odstotkov cenejše stebre. Po vsem videzu leži torej gospodarska meja med bakrom in aluminijem znatno nižje, najbrž v bližini 100 mm^2 prereza bakrenega vodnika.

Vsekakor: šibkih prenosnih prog aluminij ne bo iztrgal bakru, dokler se znatno ne poceni. Prenosne proge so pa tem šibkejše, čim krajše so. Ker pa zahtevajo proge v območju skromnejših prenosnih razdalj prenosne napetosti, ki so razdaljam nekako sorazmerne — staro pravilo zahteva za vsako miljo (16 km) prenosne razdalje kilovolt prenosne napetosti — je aluminij v tekmi z bakrom praktično tem šibkejši, čim nižja je prenosna napetost.

V tej zvezi je treba omeniti prijem, ki ga graditelji skromnejših prog radi uporabljajo. Najprej namreč posežejo po aluminiju, stebre pa dimenzionirajo tako, da so kos tudi bakrenim vodnikom istega prereza. Dokler je progla mlada in še zbira odjemalce, prenaša energijo s skromno močjo. Kasneje, ko ji postaja prenosno breme pretežko, zamenja preprosto aluminij z bakrom, obdrži pa prerez prenosnega vodnika. S tem si seveda dvigne zmogljivo prenosno moč v razmerju 1.7 : 1. Takšne proge so kajpada le na videz aluminijske. V njih je aluminij le most čez začetno dobo, ki zmanjšuje obrestovanje in odpisovanje prenosne kovine.

26. Ugotovitev, da je bakreni prerez okroglih 100 mm^2 nekakšna meja med bakrom in aluminijem, je zelo prozoren

izsledek zoženega problema prenosnih kovin, je pa še dokaj nepopolna rešitev tega važnega vprašanja prenosne elektrotehnike.

Predvsem mora raziskovalec opozoriti na temelje svojega izsledka, da omogoči kritiko delo. Vsa raziskavanja tega poglavja se opirajo na nemške varnostne predpise. Opirajo se nadalje na avtorjevo razpetinsko teorijo. V tej teoriji pa se skriva predpostavka, da se pojavi največji povos pod dodatnim, lednim plaščem ob -5°C zračne temperature.

Prvenstveno upoštevanje nemških varnostnih predpisov vestnega kritika ne bo motilo. Varnostni predpisi vseh civiliziranih držav slone na ugibanju, na tolmačenju dolgoletnih izkušenj. Nemški predpisi so na dobrem glasu in nedvomno so skrbno sestavljeni. Praktična prenosna elektrotehnika jim priznava tudi v območju povosnih problemov zadovoljivo zanesljivost. So pa seveda prikrojeni nemškemu podnebjju in razgibanosti nemške pokrajine.

Avtorjeva razpetinska teorija je po vsem videzu zadovoljivo skladna s praktičnimi izkušnjami. V prejšnjem poglavju smo jo vestno preizkusili in jo našli v redu. Tudi s te strani potemtakem ne grozi začasni rešitvi zoženega problema prenosnih kovin, ki smo jo izoblikovali v prejšnjem odseku, resna nevarnost.

Slika se pa raziskovalcu nekoliko zamegljuje, ko začenja kritično opazovati povos, ki ga izsili zimski plašč ob -5°C . Izkušeni praktiki trdijo, da je treba misliti na najvišjo poletno temperaturo, če prekorači bakreni prerez nekako 50 mm^2 . Toraj je treba tudi v območju ustreznih vodnikov iz aluminija misliti na največji poletni povos. Tem bolj, ker nadkriljuje toplotni raztezni koeficient aluminija svojega tekmeča v bakru izdatno.

Toplotna raztezna koeficienta sta:

$$\begin{aligned} \alpha_b &= 1.7 \cdot 10^{-5} \\ \alpha_{al} &= 2.3 \cdot 10^{-5} \end{aligned} \quad \dots \quad 34)$$

Bakreni vodnik se potegne za tisočinko, če se segreje za 60°C , vodniku iz aluminija pa zadostuje za isti poteg 44.5°C . V 17. odseku smo morali resnično upoštevati največji poletni povos.

Če pa je treba v razpetinski teoriji zamenjati največji zimski z največjim poletnim povosom in če se poletni povos aluminija močneje razlikuje od zimskega kakor ustrezni povos bakra, mora najpriporočljivejša razpetina v progi iz aluminija postati skromnejša. Tako se v prejšnjem odseku zgrajena slika aluminija nedvomno poslabša.

Še neprijetnejši pa je aluminiju pritisk z neke druge strani povsesnega problema. Povesna teorija izkorišča mehansko zmogljivost prenosne kovine z dokajšnjo previdnostjo, ker ve, da se pojavljajo poleg običajnih zimskih dodatnih mehanskih bremen tudi katastrofalna. Ta bremena so seveda nepreračunljiva. Sodobna prenosna elektrotehnika je odločena kljubovati katastrofalnim bremenom, ki dosežejo dvojno višino »običajnih«. Še večja bremena pa prepušča neizbežnim obratnim motnjam.

To stališče, ki je zasidrano v gospodarskih obzirih, pa seveda ne potiska natega v prenosni kovini pod običajnim dodatnim zimskim bremenom na polovico ravno še dopustnega. V mehanskem bremenu prenosnega vodnika se skriva tudi lastna teža prenosne kovine, ki se v primeru praktično še priznane katastrofe ne podvoji. Zato dovoljujejo nemški varnostni predpisi bakru, ki jim zdrži trajno nateg s 3000 kg/cm^2 , pod običajnim dodatnim bremenom več kakor polovični skrajni nateg, namreč 1900 kg/cm^2 .

Aluminij prenese trajno 1200 kg/cm^2 . Vrv iz aluminija pripeva celotnemu bremenu ob -5°C pod lednim plaščem mnogo skromnejšo lastno težo kakor bakrena vrv. Potemtakem bi smeli aluminiju dovoliti prav za prav običajni nateg, ki je skromnejši od:

$$1200 \times \frac{1900}{3000} = 760 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Nemški predpisi dovoljujejo 800 kg/cm^2 ! Zakaj? Zakaj so nedosledni in se ne omejeje na 700. morda celo na 650 kg/cm^2 ? Preprosto zato, ker praktično ne morejo, ker bi aluminiju naptavali preskromne razpetine in ga potiskali v senco bakra. Praktik, ki vidi to početje, je seveda nemiren. Zato toži, da je aluminij mehansko sumljivo šibek. Praktik ve, da mu varnostni predpisi ožijo okvir katastrofalnih bremen na progah iz aluminija. Ustrezni gospodarski riziko pa leži kakor temna senca na primerjalni sliki aluminija in bakra, ki smo jo zgradili v tem poglavju.

Ta slika je torej resnično še nepopolna in potrebna je temeljite poglabitve. Takšna, kakršna je, opravičuje nezaupanje, s katerim posegajo starejši praktiki po aluminiju. Če bi ne prenesla dodatkov, ki potiskajo aluminij v ospredje, bi po vsem videzu obetala bakru kot prenosni kovini prednost.

V. POSEG PRENOSNE NAPETOSTI V TEKMO ALUMINIJA Z BAKROM

27. V nepopolni sliki, ki smo jo zgradili v zadnjem poglavju, ne igra prenosna napetost vidne vloge: neodvisno od nje je 100 mm^2 nekakšen kritični prerez bakrenega vodnika. Na tem prerezu, ki obeta aluminiju marsikaj, je resda obležala temna senca zaradi mehanske šibkosti bele prenosne kovine. Nenadoma, neposredno po prvi svetovni vojni, pa se je obzorje aluminiju zjasnilo: prenosna napetost ga je potisnila v ospredje.

Dozorevajoča prenosna elektrotehnika je skozi desetletja neumorno dvigala prenosno napetost. Enačba 22) pripoveduje, da raste prenosni moment s kvadratom medfazne napetosti na koncu proge, prenosni moment pa je sorazmeren prenosni moči, če se prenosna razdalja ne spremeni. Enačba 50) zahteva naraščanje prenosne napetosti sorazmerno s prenosno razdaljo, če se naj odstopne energijske prenosne izgube ne spremené. Vse to je bilo prenosni elektrotehniki že zdavnaj jasno. Njena razvojna pot je šla zato jasno v smer višjih in višjih prenosnih napetosti.

Nedvomno je prodirajočo elektrotehniko potiskal tudi strah pred električnimi napadi iz ozračja v smer naraščajočih prenosnih napetosti. Vpliv ozračja je, kakršen je. Proga za visoko napetost pa je seveda električno mnogo odpornejša kakor proga za skromno napetost: električna varnost proge raste nedvomno z dvigajočo se prenosno napetostjo.

Dolgo se tehnika prostih prenosnih prog ni menila za možne proboje med svojimi faznimi vodniki. Saj so jo ozirni na možne nezaželene dotike nihajočih faznih vodnikov, s katerimi se igra veter, ki se radi močno vznemirijo, ko jim nenadoma odpade ledni plašč, že zgodaj prisilili, da je vzporedne fazne vodnike močno razmaknila. Nemški predpisi zahtevajo tudi danes najmanj 0,8 m med bakrenimi in najmanj 1,0 m med aluminijskimi vodniki.

Te razdalje pa so nenadoma postale premajhne, ko je postala prenosna napetost dovolj močna. Probojev med faznimi vodniki tehnika prostih prenosnih prog sicer ni doživela, toda pojav k o r o n e jo je začel nadlegovati: v prejakem električnem polju se zavijajo prenosni vodniki v ognjeni plašč sv.

Elma. Korona pa troši energijo. Razen tega kvari korona prenosnim tokom zaželeno enobarvno sinusno časovno obliko.

Nekaj let so praktiki oklevali. Korona se jim je zdela kar koristna. vsekakor pa nekakšen električen varnostni ventil. Sodobna prenosna elektrotehnika pa ve, da korona ne sme postati trajen obratni pojav V bežnih nevarnih trenutkih naj le prevzame vlogo varnostnega ventila. V normalnem obratu pa se na prenosni progi ne sme več pojaviti.

Problem korone je prav za prav šele sprožil napetostni problem prenosnih prog. V svoji knjigi »Problemi prenašanja električne energije« (Državna založba. Ljubljana, 1947) je avtor ta problem obširno opisal. Tu bomo izkoristili le dokončni izsledek napetostnega problema, ki zahteva v primeru faznega vodnika s polumerom r (cm), razdalje d (cm) med osmi faznih vodnikov in medfazne napetosti U (kV) na koncu trofazne proge:

$$\frac{U}{\sqrt{3} \cdot r \ln \frac{d}{r}} \leq 12 \dots \dots \dots 35)$$

Ta enačba je istovetna z enačbo 16). Le če jo izpolnimo, na progi ne bo trajne korone.

Vzemimo primer! Medfazna prenosna napetost na koncu proge naj bo 25.000 voltov, prerez bakrene prenosne vrvi 25 mm², razdalja med faznimi vodniki pa samo 0'8 m! Torej bo:

$$\begin{aligned} U &= 25 \text{ kV} \\ r &= 0'32 \text{ cm} \\ d &= 80 \text{ cm} \end{aligned}$$

in:

$$\frac{25}{\sqrt{3} \times 0'32 \times \ln \frac{80}{0'32}} = \frac{25}{\sqrt{3} \times 0'32 \times 5'52} = 8'2 < 12.$$

Prenosna napetost 35.000 voltov bi spravila progo v nevarno bližino korone, še višja napetost pa bi zahtevala močnejše razmikanje faznih vodnikov. Ker pa raste logaritem razmerja $d : r$ silno počasi, vidimo takoj, da je moral napetosni problem prostih prenosnih prog postati izredno neprijeten.

Izkušenemu graditelju prenosnih prog se bo zdela konstanta na desni strani enačbe 35) morda preskromno odmerjena, saj ustreza električni sili 12 kV/cm v zraku. Zrak zdrži pod tlakom 760 mm živosrebrnega stebrička in ob 20° C nekoliko manj kakor 30 kV/cm. Ustrezna efektivna odpornost je seveda $50 : \sqrt{2} = 21'2$ kV/cm. Po P e e k o v i h raziskavanjih pa

je treba misliti v problemu korone ne samo na spreminjanje zračnega tlaku in temperature, temveč tudi na razjedanje prvotno gladke površine vodnika, na vremenske neprilike, na prah, ivje. Zato je treba računati le z nekako 15 kV/cm. Ker pa govorimo o prenosni napetosti na koncu proge, moramo misliti vrh vsega še na napetostne izgube vzdolž proge in na neizbežne dodatke jalove moči. Avtor pa priznava, da je 12 kV/cm varno izbrana opora napetostnega problema prostih prenosnih prog.

Vsekakor: napetostni problem postane nedvomno neprijeten, če se medfazna prenosna napetost dvigne na 60, na 110 kV in še više. Ker pa mu z razmikanjem faznih vodnikov očitno ne pridemo zlepa do živoga, postane nenadoma polumer prereza, ki ga prenosni vodnik prilagodeva prenosnemu toku, njegov edini konstrukcijski pripomoček. Toda Kelvinovo pravilo je premočna ovira.

Aluminij, ki naj zamenja baker z 17-kratnim prerezom, obeta 13-kratni polumer in z njim nekako 13-kratno dopustno prenosno napetost. Ta njegova prednost je izredno važna. V trenutku, ko nas napetostni problem prisili, da jo upoštevamo, postane prav lahko odločilna. S posegom prenosne napetosti v tekmo aluminija z bakrom se dvigne zoženi problem prenosne kovine vsekakor na višjo stopnjo.

28. Praktik starejšega kova bo rad priznal, da v močnih prenosnih progah opravičeno odklanjamo jalove dodatke prenosne moči. Ustrezen kondenzator na koncu proge jih uspešno odvrta: večje proge imajo dandanes pred svojim začetkom žlahtno, na svojem koncu pa jalovo elektrarno. Prenosna moč takšnih prog N (kW) je torej praktično žlahtna moč in zato v odnosu:

$$N = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad \dots \dots \dots 36)$$

do medfazne napetosti U (kV) na koncu proge ter do prenosnega toka I (A). Napetostni problem dobi torej v rokah starejše prenosne elektrotehnike naslednjo preprosto obliko.

Gospodarsko opravičljive gostote prenosnega toka so prenosni elektrotehniki že dolgo znane. Saj jih je z neštetimi pozizkusi ugotovila. Imenujmo torej gostoto toka, ki je praktično ne moremo pomembno spreminjati, g (A/mm²)! Prenosna vrv ima okrogel prerez. Polumer r (cm) tega prereza obeta s polnilnim faktorjem $\pi/4$:

$$F = \frac{r^2 \cdot \pi^2}{4} \cdot 100 = 250 r^2 \text{ kvadratnih milimetrov.}$$

Je pa seveda:

$$F \cdot g = 250 r^2 \cdot g = I \text{ amperjev.} \quad \dots \quad 37)$$

Ker zahteva enačba 35)

$$r = \frac{U}{20,8 \cdot \ln \frac{d}{r}},$$

je najslabotnejši možni prenosni tok:

$$I = 250 \cdot g \cdot \frac{U^2}{\left(20,8 \cdot \ln \frac{d}{r}\right)^2} \cdot \frac{g}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U^2}{\left(\ln \frac{d}{r}\right)^2}$$

in zato:

$$N = \frac{g}{\left(\ln \frac{d}{r}\right)^2} \cdot U^3. \quad \dots \quad 38)$$

Tako bi dobili z:

$$\frac{1}{g} \cdot \left(\ln \frac{d}{r}\right)^2 \doteq 27,$$

kar bi ustrezalo na primer:

$$d : r = 500$$

in

$$g = 1,43 \text{ amperja/mm}^2,$$

preprosti obrazec za ravno še zmogljivo medfazno napetost na koncu proge:

$$U = 3 \sqrt[3]{N}. \quad \dots \quad 39$$

Ta rešitev napetostnega problema v duhu starejše prenosne elektrotehnike uničuje ves vpliv prenosne razdalje na prenosno napetost. Starejša prenosna elektrotehnika pa je rada uporabljala načelo kilovolta za miljo. To načelo ji je varovalo znosne odstotne energijske izgube in hkrati znosne napetostne izgube. Enačba 39) pa je skrb za energijske izgube nedvomno že prevabila na preizkušeno gostoto prenosnega toka, in vendar pomeni poseg prenosne napetosti v oblikovanje prenosnega vodnika začetek nove dobe v prenosni elektrotehniki, dobe, ki odreja prenosni razdalji povsem novo vlogo.

Vzemimo primer! Prenosna (žlahtna) moč naj bo 10.000 kW! Enačba 39) omejuje prenosno medfazno napetost z:

$$U = 3 \times \sqrt[3]{10.000} \doteq 64,6 \text{ kilovolta}$$

Moč 10.000 kW bomo torej vsekakor prenašali s 60 kilovolti, — če bomo hoteli imeti bakrene prenosne vodnike. Smeli bomo pa poseči po:

$$U = 64,6 \times \sqrt[3]{1,7} \doteq 77 \text{ kilovoltih,}$$

če bomo vpregli vodnike iz aluminija in se zadovoljili z gostoto:

$$g_{al} = \frac{g_b}{1,7}$$

Tretji koren iz gostote namestu na videz potrebnega drugega je seveda zasidran v spreminjanju prenosnega toka ob dviganju prenosne napetosti.

Razmeroma počasno naraščanje dopustne prenosne napetosti s tretjim korenem iz prenosne moči je kajpada dokaj neprijetno. V ozadju tega naraščanja opazimo prav lahko dviganje prenosnega toka s kvadratom prenosne napetosti. Nehoté se nam vsiljuje slika neznosno naglo naraščajočih prerezov prenosnih vodnikov. In praktik, ki je prepričan, da mora prenosna napetost ostati sorazmerna prenosni razdalji, vidi, da mora prenosna moč rasti kar s tretjo potenco te razdalje.

Ali je torej prenosna elektrotehnika zašla v zagato, ko se je začela boriti s korono? Ali se ji baker in aluminij zapletata v bistveno iste nepremostljive težave, ko se prenosna napetost dovolj dvigne? Po vsem videzu je treba obema vprašanjema dati pritrdilen odgovor. Nekako v območju 80.000 voltov prenosne napetosti je, kakor dobro ve vsak praktik, prenosna elektrotehnika resnično zašla v težko krizo.

V dobi intenzivne elektrifikacije moramo misliti na območje, ki ga naj velika elektrarna oskrbuje z električno energijo. Če predpostavljamo, da je energijska množina, ki jo neko območje potrebuje, sorazmerna njegovi površini, prenosna razdalja pa sorazmerna njegovemu polumeru, bi nam naraščanje prenosne napetosti s kvadratnim korenem iz prenosne moči obetalo pravilen odnos. Le v oskrbovalnem območju, ki bi imelo tri razsežnosti, bi bila potemtakem enačba 59) znosna.

Opisano krizo dozorevajoče prenosne elektrotehnike je presenetljivo razvozlalo novo spoznanje oziroma nov pojem, namreč pojem na ravne prenosne moči. Ta pojem, s katerim je menda Nemeč prof. dr. inž. R. Rüdenberg obogatil prenosno elektrotehniko, je zamenjal v enačbi 59) tretji koren s kvadratnim. Hkrati pa je močno posgel v tekmo aluminija kot prenosne kovine z bakrom. Problem prenosne kovine se je z njegovo pomočjo vnovič dvignil na višjo stopnjo, hkrati pa se je izredno zaostрил.

29. Pojem naravne prenosne moči, ki je med možnimi žlahtnimi prenosnimi močmi kraljica, je avtor v svoji knjigi »Problemi prenašanja električne energije« (Državna založba, Ljubljana, 1947) obširno opisal. Opisal je v nji tudi vse sodobne prenosne probleme, ki so povezani z naravno prenosno močjo in dokazal, da sodobna veleprenosna elektrotehnika ne more več živeti brez te svojevrstne žlahtne prenosne moči. Pa saj jo živa sodobna veleprenosna elektrotehnika z vso doslednostjo uveljavlja.

Tu se ne moremo poglobljati v teorijo te moči. Zadovoljiti se moramo z bežnim opisom, s površno skico, ki je zoženemu problemu prenosne kovine vsekakor potrebna. Bralec bo moral vzeti zgoraj omenjeno avtorjevo knjigo v roke, če bo hotel dobiti globlji vpogled.

Kaj razlikuje starejšo prenosno elektrotehniko od sodobne? Prav za prav le neupoštevanje tam, skrbno upoštevanje tu dejstva, da je prenosna proga prostorna tvorba, da je dolga, da so upornost, induktivnost in kapacitivnost vzdolž proge enakomerno porazdeljene.

Starejši prenosni elektrotehniki je bila proga spočetka preprosto omski upor, brez kakršne koli prostorne razsežnosti, kasneje iz omske in induktivne upornosti sestavljen izmenični upor, nazadnje izmeničen upor, v katerem se je uveljavila tudi kapacitivnost, toda še upor brez prostorne razsežnosti. Ta upor je starejši elektrotehniki določal napetostne izgube, njegov omski del pa energijske.

Zanikanje prostorne razsežnosti v teoretskih slikah starejše prenosne elektrotehnike je prav za prav presenetljivo. Tej tehniki je bila vendar prenosna razdalja najvažnejši problem. Seveda: starejša prenosna elektrotehnika se je borila le posredno s prenosno razdaljo. Zavirale so jo pač predvsem prenosne energijske in napetostne izgube.

Dolgo pred prenosno je telegrafska oziroma telefonska elektrotehnika uvidela, da v zelo dolgih progah ni več dopustno zanikati, da so upornosti, induktivnosti in kapacitivnosti porazdeljene in da se je treba lotiti ustreznih, dokaj zamotanih problemov. Ko pa se je vznemirjena prenosna elektrotehnika le začela ozirati po stari »telegrafski značbi«, je vdrla prenosna razdalja v njene teoretske slike z druge strani.

Dokler se ne menimo za prostorno razsežnost proge, ko ji opisujemo elektromagnetne pojave, povezane s prenašanjem energije, imajo ti pojavi tako rekoč neskončno potovalno brzino. Prav za prav v progi brez dolžine sploh nič ne potuje. Ko pa uvidimo, da je treba misliti na resnično dolžino proge,

se nehoté vprašamo, kako hiti elektromagnetni vpliv, ki ga sprožimo na začetku proge, vzdolž nje.

V obliki potujočega vala seveda. Na prosti prenosni progi prodira potujoči val nekako s svetlobno brzino. Napetost U , ki jo pritiskem na začetek proge, je v tisočinki sekunde že 300 km daleč v progi. Razširjajočo se napetost pa nujno spremlja prodirajoča elektrenina. Med vzporednimi vodniki je napetost nemožna, če se ne zberejo ustrezne elektrenine različnih predznakov na njihovih površinah. Zberejo se pa le, če jih prinese prodirajoči potujoči val.

Val prodira, donša elektrenino, je torej tok z natančno določeno jakostjo (I), mora pa seveda donšati tudi energijo. Tam kjer omogoči s prineseno elektrenino napetost, napolni ustrezno električno polje s potrebno energijo. Ravno tam pa napolni tudi podaljšajoče se mu magnetno polje, ki ga spremlja, kakor spremlja vsak tok, s potrebno energijo.

Ta bežna slika dokazuje, da se uveljavljata v potujočem valu, ki nima opravka z omsko upornostjo prenosnega vodnika — predpostavljajmo, da je tako! — induktivnost in kapacitivnost dolžinske enote proge, l (H/km) in c (F/km). Teorija potujočih valov je resnično dokazala, da je v primeru nepomembne omske upornosti napetost potujočega vala v odnosu do njegovega toka pokorna Ohmovemu zakonu:

$$U = I \cdot \sqrt{\frac{l}{c}} = I \cdot z.$$

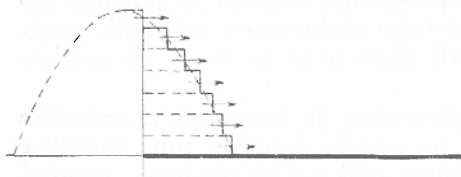
Nedvomno je »z« nekakšen upor, vsekakor mora imeti razsežnost omskega upora. Značilno smo mu nadeli ime: valovni upor. Merimo ga pa seveda z omi. V prostih prenosnih progah se suče ta važni upor, ki je popolnoma preoblikoval slike prenosne elektrotehnike, okoli 375 omov. V kabelskih progah je mnogo manjši in doseže včasih s težavo 50 omov.

Kaj sklepa sodobna veleprenosna elektrotehnika, ko vidi sliko potujočega vala, čeprav le poenostavljeno sliko, ki se ne meni za omsko upornost prenosnih vodnikov? Predvsem, da val nosi energijo. Da odklada to energijo sicer v električno in magnetno polje proge, dokler ne doseže njenega konca, da je pa seveda voljan, oddajati na koncu proge moč $U \cdot I$.

Nehoté si začne teoretik, ki je začel upoštevati prostorno razsežnost proge v svojih prenosnih slikah, predstavljati prenašanje energije kot opravke potujočih valov. Toda ko poskuša spraviti novo sliko v sklad s starejšo, se mu pojavijo težave. V potujočem valu sta napetost in tok očitno v fazi in

vrh vsega v določenem odnosu. Prenosne proge pa poznajo jalove prenosne moči poleg žlahtnih in najrazličnejša razmerja med prenosnim tokom in prenosno napetostjo.

Morda pa vnaša izmeničnost tokov in napetosti težave v novo nastajajočo prenosno sliko: v zgornji bežni skici potujočega vala smo predpostavljali stanovitno napetost na začetku



Slika 10.

proge? Ne. Sinusno napetost na začetku proge si prav lahko zgradimo s pomočjo stopničaste napetosti (slika 10.), če ji le damo dovolj stopnic. S tem razkosamo sinusni val na neštete stanovitne. In

ker brže vsi z isto hitrostjo v isto smer. bo vzdolž proge povsod ista sinusna napetost in isti sinusni tok.

V svoji študiji »Električne veleprenosne proge v svetlobi telegrafске enačbe« (Akademija znanosti in umetnosti, Ljubljana, 1947) je avtor dokazal, da lahko opišemo poljuben obrat na prenosni progi s pomočjo dveh potujočih valov, ki vdirata vsak s svojega konca v progo in drvita drug proti drugemu. V tej študiji je zgradil prozoren most iz starejše prenosne teorije v novo. Njegova slika dveh nasprotujočih si potujočih valov vodi pa nujno v spoznanje, da je treba prenašati energijo s tako imenovano naravno prenosno močjo.

Zakaj naj prenašata v prenosni progi dva vala energijo v dveh, nasprotnih si smereh, ko je vendar nedvomna naloga proge, pošiljati energijo v določeno smer? Če naj železniška proga prenese 1000 ton tovora iz Ljubljane v Beograd, gotovo ne bo nosila 1200 ton v pravo, 200 pa v nasprotno smer. Viis, da je potreben en sam potujoči val za neoporečno prenašanje energije, je neubranljiv.

Seveda: če bi prevažanje tovorov ne obrabljalo strojev in voz, ne kvarilo proge, ne trošilo premoga in mazil ter ne zaposljevalo ljudi, bi navsezadnje tudi prevoz 1200 ton v pravo in sočasni prevoz 200 ton v napačno smer ne bil gospodarsko neopravičljiv. Zato sta tudi dva prenosna potujoča vala, ki drvita v nasprotnih smereh, znosna, dokler ne zahtevata energijskih izgub. Te pa se pojavijo šele v progi, ki ima omsko upornost.

Teorija naravne moči je resnično dokazala, da je prednost naravne prenosne moči pred vsemi drugimi možnimi žlahtnimi v tem, da povzroča najvarčnejši energijski prenos. Ravno zaradi te prednosti pa je postala najpriporočljivejša prenosna

moč, zaradi nje gradimo sodobne veleprenosne proge načelno za naravno prenosno moč.

To pa pomeni določen odnos med prenosno napetostjo in prenosnim tokom. Potujoči val, ki pridrvi do konca proge z napetostjo $U = Iz$, odloži svojo moč neoporečno le tedaj, če je vsa razdeljevalna mreža za progo nadomestljiva z omskim uporom:

$$R = z.$$

V tem primeru je seveda prenosna moč:

$$N = I^2 R = I^2 z \text{ vatov}$$

oziroma:

$$N = \frac{U^2}{z} \text{ vatov.}$$

V trofaznih progah se skrivajo prav za prav tri enako-pravne proge. V vsaki izmed njih je fazna napetost:

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ kilovoltov}$$

gonilna in hkrati napetost faznega potujočega vala, če je prenosna moč naravna. Torej je:

$$N_n = 3 \cdot U_f \cdot I = 3 I^2 z \cdot 10^3 = 3 \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{z}{z^2} \cdot 10^3 = \frac{U^2}{z} \cdot 10^3 \text{ kilovatov}$$

oziroma:

$$U = \sqrt{\frac{z}{10^3} \cdot N_n} \text{ kilovoltov. 40)}$$

50. Teorija trofaznih prenosnih prog si poenostavlja svoje račune s tem, da predpostavlja popolno elektromagnetno enakopravnost vseh treh faz, kar ji dovoljuje opazovati le eno fazo. V nji je fazna napetost $U/\sqrt{3}$ obratna napetost, resnični prenosni tok pa fazni tok. Tej poenostavljeni sliki pa mora teorija seveda prikrojiti induktivnost in kapacitivnost dolžinske enote. Tako nastaneta znana pomožna pojma o b r a t n e induktivnosti in kapacitivnosti.

V pro-tih trofaznih progah je z zadovoljivo natančnostjo:

$$\text{obratna induktivnost . . . } l = 2 \cdot 10^{-1} \cdot \ln \frac{d}{r} \text{ henrijev/km . . . 41)}$$

$$\text{obratna kapacitivnost pa } c = \frac{1}{2 \cdot 9 \cdot 10^6 \cdot \ln \frac{d}{r}} \text{ faradov/km . . . 42)}$$

in
$$\frac{1}{\sqrt{1. c}} = 300.000 \text{ kilometrov/sek.}$$

skladno s svetlobno hitrostjo, ki je praktično hitrost potujočih valov.

Važnejši je izraz:

$$z = \sqrt{\frac{1}{c} - 60 \ln \frac{d}{r}} \text{ omov,} \quad \dots \dots \dots 43)$$

ki določa valovni upor. V vseh teh izrazih je seveda d (cm) razdalja med osmi faznih vodnikov, r (cm) pa polmer prereza faznega vodnika. Zgoraj omenjena vrednost:

$$z = 375 \text{ omov}$$

ustreza nekako razmerju:

$$d : r = 500 : 1.$$

Prenosna napetost, ki jo zahteva moč N (kW) kot naravna prenosna moč, je potemtakem skladno z enačbo 40), če računamo preprosto s 360 omi valovne upornosti:

$$U = 0.6 \sqrt{N}. \quad \dots \dots \dots 44)$$

Naravna prenosna moč je očitno vsilila veleprenosni elektrotehniki tisti odnos med prenosno močjo in prenosno napetostjo, ki si jo želi kritični opazovalec.

Starejša rešitev napetostnega problema, izražena v enačbi 39) ima presečišče s sodobno. Najdemo ga, če združimo enačbi 39) in 44), kar vodi do kritične prenosne moči N_k (kW):

$$3 \sqrt{N_k} = 0.6 \sqrt{N_k}$$

torej do:

$$N_k = 5^6 = 15.600 \text{ kilovatov}$$

oziroma do kritične prenosne napetosti:

$$U_k = 3 \sqrt{5^6} = 0.6 \sqrt{5^8} = 75 \text{ kilovoltov}$$

in nazadnje do kritičnega prenosnega toka:

$$I_k = \frac{U_k \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot z} = \frac{75 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 360} = 120 \text{ amperjev,}$$

če računamo z valovnim uporom 360 omov, ki ustreza natančno enačbi 44).

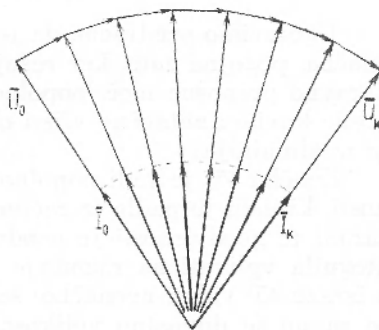
V teh kritičnih vrednostih se očituje prav za prav vse, kar loči sodobno veleprenosno elektrotehniko od starejše tehnike skromnejših prog. Kritična napetost 75 kV soupada skoraj natančno z napetostjo, ki je po praktičnih izkušnjah resno sprožila napetostni problem, ker je načela problem korone. Kritični prenosni tok 120 amperjev vodi v neposredno bližino bakrenega prereza 100 mm^2 prenosnih vodnikov, ki začenja odpirati, kakor smo videli, aluminiju vrata v prenosne proge. Kritična prenosna moč 15'6 megavatov pa že vodi v veleprenos.

Pod temi kritičnimi vrednostmi smemo gledati v prenosne proge s starejšimi očali. Nad njimi je naravna prenosna moč vsemogočna. Pod njimi ni resnih napetostnih problemov in oblikovanje prenosnih vodnikov je preprosto. Nad njimi leži na polumeru v krožnem prerezu prenosnega vodnika silen pritisk. Ravno zato pa so se odprle v sodobni veleprenosni elektrotehniko aluminiju, ki potrebuje debelejšje vodnike kakor baker, neslutene možnosti.

Med slikama starejše in sodobne prenosne elektrotehnike pa stoji še nekaj, kar daje naravni prenosni moči poseben sijaj. Starejša prenosna elektrotehnika se je borila predvsem z napetostnimi padci. Sprva so ji bili omski napetostni padci važni, kasneje pa so jih induktivni močno zatemnili. Nazadnje so induktivni napetostni padci postali kar neznosni. Toda naravna prenosna moč jih je preprosto uničila!

Omski napetostni padci so v kilometru proge neodvisni od jakosti prenosnega toka, ki ima določeno gostoto. Induktivni padci v kilometru proge so jakosti prenosnega toka sorazmerni, dokler se razmerje $d:r$ ne spremeni. Naraščajoči prenosni tok tira torej neizprosno induktivne napetostne izgube v ospredje.

Naravna prenosna moč pa je moč potujočega vala, ki drži svojo napetost v fazi s tokom, ki vzdolž proge nedvomno nima napetostnih izgub, če v progih ni omske upornosti. Zaradi končne potovalne hitrosti se resda napetost vzdolž proge v fazi premika, ravno tako pa tudi tok, 1500 kilometrov pomeni fazno razliko četrte periode, če je obratna frekvenca 50. Kazalčni diagram obratnih napetosti in tokov vzdolž proge (slika 11.) je torej preprost.



Slika 11.

V tem diagramu, ki seveda ne upošteva omske upornosti proge in njenih napetostnih izgub, izsledimo nekoč tako neprijetne induktivne napetostne izgube v vsoti kazalcev, ki sestavljajo krožni lok med napetostima na obeh koncih proge. Naravna prenosna moč jih prav za prav ni uničila, vzela jim je le ves praktični pomen.

Tako prepričevalna je ta dodatna slika, da si veleprenosne proge resnično ne moremo več predstavljati brez naravne prenosne moči. Zato pa tudi zoženi problem prenosnih kovin, problem bakra in aluminija, ki postaja po vsem videzu ravno na pragu veleprenosne elektrotehnike izredno zanimiv in živ, ne more sestavljati svojih zaključnih slik brez upoštevanja naravne prenosne moči.

51. Če preoblikujemo osnovno enačbo 55) napetostnega problema v:

$$\frac{60 U}{\sqrt{3} \cdot r \cdot 60 \cdot \ln \frac{d}{r}} \leq 12,$$

uporabimo enačbo 45) in uveljavimo naravno prenosno moč z zahtevo:

$$I = \frac{U \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot z} \text{ amperjev,}$$

dobimo:

$$I \leq 200 \cdot r \text{ amperjev.} \quad \dots \dots \dots 45)$$

Ugotovimo predvsem, da je ta dokaj presenetljiva pogojna enačba, pogojna zato, ker rešuje napetostni problem in varuje naravno prenosno moč, popolnoma neodvisna od lastnosti prenosne kovine: natančno v isti obliki oblikuje vodnike iz bakra in iz aluminija!

Enačba 45) je tudi popolnoma neodvisna od valovne upornosti, ki nam je padla iz računa, ko smo enačbo gradili: ravno zaradi te neodvisnosti je neodvisna od prenosne kovine, ki bi utegnila vplivati na razmerje $d : r$. Prav za prav pa moramo v izrazu 45) videti nenačbo: saj določa polumeru (r) najmanjšo ravno še dopustno velikost.

Poleg rešitve napetostnega problema in naravne prenosne moči je seveda Kelvinovo pravilo nepogrešljivo, če oblikujemo prenosni vodnik. V 22. odseku smo videli, kako se uveljavlja. Gostoto prenosnega toka, ki jo pravilo zahteva, imenujmo g (A/mm²)!

Prerez prenosne vrvi je:

$$F = r^2 \cdot \pi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^4 = \frac{r^2 \cdot 10000}{4} \text{ kvadratnih milimetrov.}$$

Ker pa je:

$$I = F \cdot g,$$

zahteva enačba 45):

$$r_k \leq \frac{0.8}{g} \text{ centimetrov.} \quad \dots \quad 45a)$$

Ta zahteva je v prvem trenutku presenetljiva: človek bi pričakoval, da naj bo r večji ne pa manjši od tistega, ki ga do-
loča v izrazu 42 a) enačaj. Če pa pogledamo v globino ra-
čuna, vidimo, da večji polumeri od 0.8/g preprosto ne dovolju-
jejo sočasnega upoštevanja naravne prenosne moči, Kelvino-
vega pravila in rešitve napetostnega problema. Skratka: ba-
krene prenosne vrvi s premerom nad okroglih 10 mm so v so-
dobni velprenosni elektrotehniki neuporabne!

Oglejmo si ta kritični premer! Iz enačbe 45 a) ga dobimo,
če vstavimo:

$$g = 1.6 \text{ amperja/mm}^2.$$

Prerez ustrezne vrvi je:

$$F = \frac{0.5^2 \times 1000}{4} = 62.5 \text{ kvadratnih milimetrov,}$$

ustrezni prenosni tok pa doseže:

$$I = 62.5 \times 1.6 = 100 \text{ amperjev.}$$

Ravno takrat torej, ko postane aluminij po rešitvi zoženega
problema prenosnih kovin, ki smo jo našli v 24. odseku, poleg
bakra resnično zanimiv, se njegovemu tekmeču v sodobni velp-
prenosni progi uporabljivost nenadoma zruši. Zruši se pa prav
za prav ravno pred v prejšnjem odseku opisanim pragom so-
dobne velprenosne elektrotehnike.

Toda ali se aluminiju ne dvignejo podobne zapreke? Da.
Ugotovili smo, da velja enačba 45a) za vse prenosne kovine.
Aluminij pa ne zmore gostote toka, ki je dovoljena bakru. Nje-
gova 1.7-kratna omska upornost zahteva po splošnem mnenju
praktikov 1.7-krat manjšo gostoto. Torej je vrvi iz aluminija
dovoljen 1.7-kratni premer bakrene. To pa pomeni skoraj tri-
kratni prerez in vsekakor 1.7-kratni prenosni tok.

Če pa prodre vrv iz aluminija do 170 amperjev, med tem
ko se bakrena vrv ustavi ob 100 amperjih, zmore 1.7²-kratno
naravno moč. In ker je skrajna naravna prenosna moč ba-
krene vrvi:

$$N_b = 3 \times 100^2 \times 360 \times 10^{-3} = 10.800 \text{ kW.}$$

če je valovna upornost 360 omov, je skrajna naravna prenosna moč vrvi iz aluminija:

$$N_{al} = 1,7^2 \times 10.800 = 31.200 \text{ kW.}$$

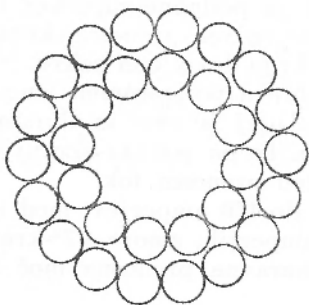
V območju med 10.000 in 50.000 kilovati je potemtakem aluminij neomejen gospodar. Tako vsaj se zdi.

Prenosna vrv iz aluminija pa le ne doseže prenosne medfazne napetosti 220.000 voltov, ki jo je elektrotehnika že zdavnaj uresničila, še manj pa je seveda kos 400.000 voltom, ki jih bomo v veleprenosnih progah gotovo prav kmalu uveljavili. Ljudi aluminij torej nima proste poti pred seboj.

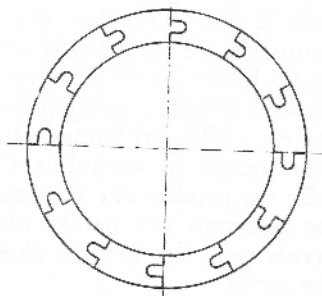
Prenosna elektrotehnika seveda ni nikoli mislila na to, da bi se ustavila pred dozdevnimi nepremostljivimi zaprekami. V vrzel med 10 in 50 megavatov je rada vrgla aluminij. Ker pa ji je bila prenosna moč 50.000 kilovatom že zgodaj preskromna, je morala iskati pot iz zagate. Našla jo je. Pot, ki se odpre aluminiju, se odpre seveda hkrati bakru. Zato tudi bakru ni bilo treba položiti orožja, ko je dosegel svoj kritični premer vrvi.

52. Med enačbama oziroma necnačbama 45) in 45 a) leži odnos prereza F prenosnega vodnika do polmera r tega prereza. Nedvomno bi se problemu oblikovanja prenosnih vodnikov vse spremenilo, če bi se ta odnos spremenil. To se pa zdi nemogoče: krožnega prereza prenosni vodniki ne bodo zapustili in oblika vrvi jim je zaradi nujnih tehnoloških ozirov nepogrešljiva: močnih prenosnih vodnikov ne moremo v zadostni dolžini transportirati, če niso tako upogljivi, da jih lahko navijamo na transportne bobne.

In vendar je prenosna elektrotehnika rešila na videz nerešljivi problem: posegla je po votlih vodnikih. Saj je votel vodnik lahko votla vrv (slika 12.), lahko je pa tudi votla cev.



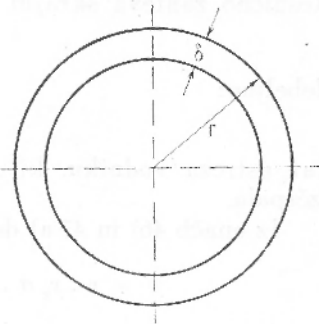
Slika 12.



Slika 15.

ki jo razrežemo v segmente (slika 13), zavite v vibre, da postane dovolj upogljiva.

Teorijo votlih prenosnih vodnikov je avtor prvič opisal v članku »Oblikovanje prenosnih vodnikov« (Elektrotehniški Vestnik, Ljubljana, 1947, št. 2.). Tu jo bomo videli izpopolnjeno in prilagodeno zoženemu problemu prenosnih kovin. Maršikaj zanimivega je v njej, in tuja strokovna literatura je prav za prav še ne pozna.



Slika 14.

Na sliki 14. vidimo model prereza votlega vodnika. Njegov polmer je r (cm), debelina stene δ (cm). Prerez meri:

$$F = (2r - \delta) \cdot \pi \cdot \delta \cdot 10^3 \text{ kvadratnih milimetrov.} \quad . \quad . \quad 46)$$

Ta izraz je treba uveljaviti v enačbi 45).

Iz:

$$l = F \cdot g = g (2r - \delta) \cdot \pi \cdot \delta \cdot 10^3 \leq 200 r$$

pa sledi:

$$\delta \leq r \left[1 - \sqrt{1 - \frac{g}{g\pi r}} \right] \text{ centimetrov.} \quad . \quad . \quad . \quad 47)$$

Če bi bili v prejšnjem odstavku iskali kritični polmer polne žice ne pa vrvi in zato namestu polnilnega faktorja $\pi/4$, ki ga zahteva prerez vrvi, upoštevali faktor 1, bi bili seveda dobili izraz:

$$r_k \leq \frac{2}{g\pi} \text{ centimetrov.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 45b)$$

Če bi pa v enačbi 46) uveljavili polnilni faktor $\pi/4$, da bi se prilagodili primeru votle vrvi, bi namestu enačbe 47) nastala enačba:

$$\delta \leq r \left[1 - \sqrt{1 - \frac{0.8}{gr}} \right]. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 47a)$$

Potemtakem lahko izrazimo potrebno debelino stene votle prenosne cevi in votle prenosne vrvi z izrazom:

$$\delta \leq r \left[1 - \sqrt{1 - \frac{r_k}{r}} \right] \text{ centimetrov.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 47a)$$

Resnično zahteva skrajni primer:

$$\begin{aligned} r &= r_k \\ \text{debelino:} \quad \delta &= r. \end{aligned}$$

kar ustreza vodniku, ki se mu je votlina ravno popolnoma izčrpala.

Iz enačb 46) in 47 a) dobimo še:

$$F = r \cdot r_k \pi \cdot 10^3 \text{ kvadratnih milimetrov. 46a)}$$

toda le v zvezi z enačbo 45 b), torej:

$$F = \frac{200 r}{g}, \text{ 46b)}$$

kar se ujema z enačbo 45). V primeru votle vrvi bi bilo

$$F = r \cdot r_k \pi \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 10^3 = \frac{r \cdot r_k}{4} \cdot 10^3,$$

kar pa vodi v zvezi z enačbo 45 a) seveda vnovič k izrazu 45).

Ker je kritični polumer r_k odvisen le od gostote prenosnega toka, je v območju določene prenosne kovine nekakšna konstrukcijska konstanta. Prerez votlega prenosnega vodnika postane na ta način praktično sorazmeren polumeru oziroma premeru, r oziroma $2r$. Vsekakor je temu polumeru sorazmeren prenosni tok (enačba 45). Votli prenosni vodniki omogočajo potemtakem pravičen odnos med prenosno napetostjo in prenosnim tokom vzdolž vse lestvice prenosnih naravnih moči, po kateri se sodobna veleprenosna elektrotehnika vzpenja višje in višje.

Najvažnejši izsledek teorije votlih prenosnih vodnikov pa je le enačba oziroma neenačba 45). Čeprav je zelo preprosta, ji damo lahko za praktično uporabo še preprostejšo obliko. Praktik meri rad polumer oziroma premer krožnega prereza, ki ga potrebuje prenosni vodnik, z milimetri. Zato bo bral enačbo 45) takole:

$$\text{premer votlega prenosnega vodnika (mm)} \geq \frac{\text{jakost prenosnega toka (A)}}{10} \text{ 45c)}$$

Enačaj pomeni v tem izrazu, da se je premer vodnika ravno prilagodil še dopustni sili v električnem polju trofazne proge.

Enačba 45) pa dobi lahko še drugo obliko. Ker uveljavlja naravno prenosno moč, priznava seveda, da združuje valovni upor proge fazno prenosno napetost s prenosnim tokom v Ohmovem zakonu. Valovni upor sodobnih prenosnih prog je dokaj stanovit. Če ga ocenimo s 560 omi, dobimo:

$$\text{premer votlega prenosnega vodnika (mm)} \geq 0.16 \times \text{medfazna napetost na koncu proge (kV)}. \quad 45d)$$

Vse te enačbe oziroma enačbe so popolnoma neodvisne od ustroja prenosnega vodnika in zahtevajo isti premer za prenosno cev in za prenosno vrv. Neodvisne so pa — kar je še pomembnejše — tudi od prenosne kovine. Vse pa predpostavljajo naravno prenosno moč. Zato se opazovalcu nhoté vsiljuje odnos premera votlega vodnika do naravne prenosne moči N_n (kW), katero naj vodnik prevzame. Enačba 44) in obrazec 45 d) zahtevata združena:

$$\text{premer votlega prenosnega vodnika (mm)} \geq 0.1 \cdot \sqrt{N_n}. \quad 45e)$$

Tudi ta zahteva je seveda neodvisna od oblike prereza in kovine, ki jo damo prenosnemu vodniku.

35. Izsledki zadnjega odseka so tako presenetljivi, da se opazovalec nujno začne ozirati po oporah v živi prenosni elektrotehniki, ko ogledujejo skupino enačb 45). Saj je skoraj neverjetno, da bi mogel premer prenosnega vodnika v sodobni prenosni elektrotehniki resnično doseči v teh enačbah opisano samostojnost.

V 16. odseku smo govorili o veliki ameriški prenosni progi Boulder—Dam—Los Angeles, ki je posegla po medfazni prenosni napetosti 287 kV. Opis te proge omenja votle bakrene prenosne vodnike s premerom 36 mm. Ali ni:

$$36 = 0.1255 \times 287.$$

kar je precej daleč od v enačbi 45 d) izražene zahteve?

V opisu ameriške proge smo pa našli razmeroma veliko razmaknitev faznih prenosnih vodnikov. Izračunali smo, da ustreza nekakšni povprečni razdalji osi prenosnih vodnikov — upoštevajoč seveda znana navodila teoretske elektrotehnike — 189 metrov.

Valovni upor je potemtakem v tem primeru:

$$z = 60 \times \ln \frac{1890}{18} = 420 \text{ omov}$$

in ne 360, kar smo podtaknili skupini enačb 45). Zato bi seveda morali v enačbi 45 d) faktor 0'16 popraviti na:

$$0.16 \times \frac{360}{420} \doteq 0.137,$$

ki je resničnemu že zelo blizu. V razmerju:

$$\frac{0.137}{0.1255} \doteq 1.09$$

so pač Američani pogumneje reševali napetostni problem. namestu avtorjeve dopustne električne sile na površini vodnikov, 12 kV/cm, so pripustili $1.09 \times 12 = 13.1$ kV/cm. Ta razlika seveda ni vznemirljiva.

V 17. odseku smo nadalje ogledovali normalno angleško veleprenosno progo (British Grid Line), ugotovili medfazno prenosno napetost 152 kV in našli prenosne vodnike iz aluminija, ojačene z jeklenim jedrom, ki imajo premer 19'6 milimetrov. Ker je premer votlega prenosnega vodnika po avtorjevi teoriji neodvisen od ustroja vodnika, nas zanima seveda odnos:

$$19.6 \doteq 0.1485 \times 132.$$

V opisu te proge smo omenili, da prispeva višina v trikotniku, ki drži s svojimi ogli prereze faznih vodnikov, 1'22 metra k razdalji obešališča od zemlje. Torej je:

$$\frac{d}{2 \cdot \sqrt{3}} = 1220 \text{ milimetrov}$$

oziroma:

$$d \doteq 4230 \text{ milimetrov.}$$

To pot je valovni upor:

$$z = 60 \times \ln \frac{4230}{9.8} \doteq 363 \text{ omov,}$$

zato smemo ugotoviti, da se Angleži v razmerju:

$$\frac{0.16}{0.1485} \doteq 1.08$$

pogumnejši od avtorja. Tudi Angleži dopuščajo na površini vodnikov nekako 13 kV/cm.

Zakaj je avtor previdnejši? Ker misli ne samo na neizbežne napetostne izgube vzdolž proge, temveč tudi na neiz-

bežne dodatne jalove prenosne moči. Kdor misli, da zaslužijo dodatne jalove moči, ki se gotovo kljub kompenziranju na koncu proge vtihotapljuje vanjo, kazen in opozorilo v obliki korone, ima prav, da posega po tistih 10 odstotkih, ki jih vidimo izkoriščene v zgoraj omenjeni ameriški in v pravkar pregledani angleški progi.

Vsekakor pa dajeta oba primera iz žive veleprenosne elektrotehniške teoriji votlih vodnikov, ki smo jo zgradili v zadnjih odsekih, močno oporo. Saj dokazujeta, da je neoporečna. Hkrati potrjujeta nazorno, da je premer votlega prenosnega vodnika resnično neodvisen od prenosne kovine, pa tudi od ustroja svojega prereza.

Zdaj pa je jasno, da izgine v območju votlih vodnikov vsa večja prostorna zahtevnost aluminija, ki je v območju prenosnih moči 10.000 do 50.000 kilovatov, kakor smo ugotovili v 30. odseku, tako izredno koristna beli prenosni kovini. Na to območje pa pada zdaj nova svetloba: v njem se kosajo bakreni votli prenosni vodniki s polnimi vrvmi iz aluminija. Tudi v tem območju pa dobé votli bakreni prenosni vodniki isti premer kakor morebitni votli aluminijiški.

Kje pa se izživlja po vsem tem razlika med še na videz polnimi, ker z jeklenim jedrom ojačenimi aluminijiškimi in že očitno votlimi bakrenimi vodniki, med že nesporno votlimi vodniki iz obeh kovin, med prenosnimi cevmi in votlimi vrvmi? Seveda samo v debelini stene votlega vodnika. Še polna vrv iz aluminija je teoretično že votla, toda debelina njene stene je enaka njenemu polumeru. V enačbah 47) in 47a) pa vidimo, da posegata v dimenzioniranje debeline δ , ki naj jo dobi stena votlega vodnika, gostota prenosnega toka, ki je v aluminiju mnogo manjša kakor v bakru in polnilni faktor prereza, ki je v primeru votle vrvi manjši kakor v primeru cevi.

Vse te ugotovitve usmerjajo zgoraj še nezaključeni problem votlih vodnikov v nazornejši opis odvisnosti debeline stene δ od zunanjšega polumera r votlega vodnika. Tudi to nalogo je rešil avtor že v zgoraj omenjenem članku »Oblikovanje prenosnih vodnikov«. Tu naj rešitev omogoči nadaljnjo poglobitev zoženega problema prenosnih kovin.

54. Splošno veljavno enačbo 47a) razkosamo lahko na enačbi:

$$\delta_1 = r \quad \dots \dots \dots 48)$$

in

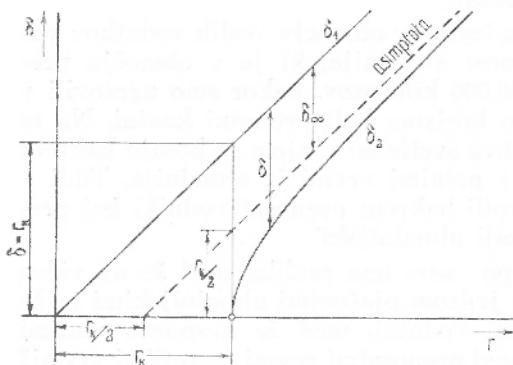
$$\delta_2 = r \cdot \sqrt{1 - \frac{r_k}{r}} \quad \dots \dots \dots 49)$$

če razčlenimo δ ustrezno:

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \quad 50)$$

Odnos δ_1 do r ne potrebuje opisa. Zamotanejši odnos δ_2 do r pa razvozlamo, če preoblikujemo enačbo 49) v:

$$\frac{\left(r - \frac{r_k}{2}\right)^2}{\left(\frac{r_k}{2}\right)^2} - \frac{\delta_2^2}{\left(\frac{r_k}{2}\right)^2} = 1 \quad 49a)$$



Slika 15.

V pravokotnem koordinatnem sistemu gradita absisa r in ordinata δ , enakostranično hiperbolo. Središče te hiperbole ima koordinati:

$$\delta_2 = 0 \quad r = \frac{r_k}{2}$$

obe polovični osi pa merita $r_k/2$. Asimptota, ki nas praktično zanima, ima seveda enačbo:

$$\delta_2 = r - \frac{r_k}{2}$$

Vse to vidimo na sliki 15., ki opisuje tudi odnos δ_1 do r . Asimptota (δ_2, r) hiperbole je kajpada vzporedna premici (δ_1, r). Med njima je povsod odlomek ordinat:

$$\Delta\delta = \frac{r_k}{2}$$

Ta odlomek je enak najmanjši teoretsko možni debelini stene δ ki je pa praktično nedosegljiva:

$$\delta_\infty = \frac{r_k}{2} \quad 51)$$

Teorija votlih prenosnih vodnikov zahteva po vsem tem debeline stene, ki postajajo tem manjše, čim večji je zunanji premer prereza. Ta izsledek je nedvomno presenetljiv in do neke mere nevšečen.

Raziskavanja, ki ne sodijo v okvir te študije, so dognala, da bakrena prenosna cev ne sme dobiti nerazkosane nad 45 mm debele stene, če noče imeti opravka s tako imenovanim kožnim pojavom, ki veča džaulske energijske izgube. Debelejše stene izsiljujejo torej v ceveh segmentiranje v dveh plasteh. Aluminij ima zaradi svoje večje omske upornosti znatno slabotnejši kožni pojav, zato smejo aluminijske cevi dobiti do 6 mm debele stene.

Z druge strani je treba misliti na konstrukcijske oziroma tehnološke težave, ki ne dopuščajo pretankih sten v votlih vodnikih. Nekateri avtorji menijo, da je težko podkoračiti 3 mm v debelini cevne stene, vendar pa najdemo tudi $\delta = 2,5$ mm v uresničenih prenosnih ceveh.

Cev ima to prednost pred votlo prenosno vrervo, da se njena stena lahko sama nosi, votlo vrervo pa je treba znotraj podpreti s posebno podporno vibo, vrh vsega pa še zunaj skrbneje bandažirati. Vrv ima znatno manj težav s kožnim pojavom in s tehnološkimi omejitvami, zato pa je težja in dražja. Mehanska oprema vodlega vodnika dviga nedvomno dozdevno enotno ceno montirane prenosne kovine, hkrati ji takorekoč veča specifično težo in pritiska s tem na razpetino. Mehanska oprema pa se uveljavlja v votlem bakrenem vodniku povsem drugače kakor v votlem vodniku iz aluminija.

Vzemimo primer! Poscizimo v območje prenosne moči med 10.000 in 50.000 kW, kjer pričakujemo še polno vrvo iz aluminija, toda že votel bakreni vodnik! Prenosna moč naj bo 28.000 kW! Vsekakor bo torej zunanji premer votlega prenosnega vodnika skladno z enačbo 45 d):

$$0,1 \times \sqrt{28.000} \doteq 16,7 \text{ milimetra.}$$

Če mislimo na bakreno cev in se odločimo za gostoto:

$$g = 1,6 \text{ amperja/mm}^2,$$

dobimo s pomočjo enačbe 45 b):

$$r_k = \frac{2}{1,6 \times \pi} = 0,4 \text{ centimetra} = 4 \text{ milimetre}$$

in debelino stene:

$$\delta = \frac{16,7}{2} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{4 \times 2}{16,7}} \right] \doteq 2,31 \text{ milimetra,}$$

ki je sumljivo skromna.

Seveda: Še večje prenosne moči, bi zahtevale še tanjše stene, dokler ne spremenimo gostote prenosnega toka. Enačba 51) obeta v nedosegljivem skrajnem primeru:

$$\delta_{\infty} = 2 \text{ milimetra.}$$

In vrv iz aluminija? Če naj pomeni predpostavljjenih 28.000 kW naravno prenosno moč in če pričakujemo, da bo valovni upor dosegel 360 omov, bo prenosni tok:

$$I = \sqrt{\frac{28.000 \times 10^3}{3 \times 360}} = 161 \text{ amperjev.}$$

Ker smo bakrenemu vodniku vsilili gostoto toka 1'6 amperja/mm², smemo po starem praktičnem načelu dovoliti aluminiju:

$$\frac{1'6}{1'7} = 0'942 \text{ amperja/mm}^2,$$

kar bi ustrezalo prerezu:

$$F = \frac{161}{0'942} = 172 \text{ kvadratnih milimetrov.}$$

S polnilnim faktorjem $\pi/4$ dobimo torej polmer polne vrvi iz aluminija:

$$172 \times 10^{-2} = r^2 \cdot \pi \cdot \frac{\pi}{4},$$

$$r = 0'828 \text{ centimetra,}$$

ki je ravno na meji še dopustnih polnih vrvnih prerezov iz aluminija.

Slika je izredno živa: bakrena prenosna cev je že v tehnoloških neprilikah, ustreza vrv iz aluminija pa še ni zašla v območje votlih vodnikov. Saj ni dvoma: v veleprenosni elektrotehniki je aluminij znatno in nesporno prikladnejša prenosna kovina.

VI. OJAČENI PRENOSNI VODNIKI IZ ALUMINIJA

35. Preden dvignemo problem bakra in aluminija kot prenosnih kovin na najvišjo stopnjo, si hočemo zgraditi zgoščeno sliko izsledkov, ki smo jih pridobili na pripravljajalnih stopnjah, ker si moramo zavarovati smer, v kateri naj prodiramo.

V skromnejših prenosnih progah, ki se ne bore z napetostnimi problemi, ker jim mehanski oziri narekujejo razmeroma izdatne razmaknitve vzporednih faznih vodnikov, ki tudi še ne posegajo po plodovih naravne prenosne moči, ker jim ustrezno nadziranje prenosnih bremen še ne obeta resničnih gospodarskih uspehov, smo našli aluminij v razmeroma slabotni vlogi. V tem območju prenosne tehnike sta enotni ceni bakra in aluminija, seveda preračunani na kilogram montiranega bakra oziroma aluminija izredno močni, aluminij pa je postal v toku zadnjih let razmeroma draga prenosna kovina.

Videli smo, da se je enotna cena aluminija nekako prilagodila praktičnemu načelu, da je treba postaviti prenosna prereza bakrenega in aluminijskega vodnika v razmerje specifičnih upornosti, torej v razmerje 1 : 17. Našli smo sicer, da zahteva aluminij v tem primeru cenejše stebre. Ta prednost aluminija pa je, kakor smo videli, v območju skromnih prenosnih moči le navidezna: cenejšim stebrom stoje manjše razpetine, z njimi pa številnejši izolatorji nasproti.

Poglobljena slika je dokazala, da kopne razlike med najpriporočljivejšimi razpetinami bakrenih in aluminijskih prog z rastočo prenosno močjo: nekako 100 mm² bakrenega prenosnega prereza obeta bakru in ustreznemu aluminiju isto razpetino. Nad tem prerezom se aluminij lahko sklicuje na cenejše stebre. Nad tem prerezom pa vdira že v veleprenosno elektrotehniko, ki prinaša nove smernice.

Tu, na pragu veleprenosne tehnike, ko se aluminij v svetlobi starejših načel po vsem videzu pripravlja, da bo začel odrivati svojega starejšega tekmeca, pa smo našli v progah iz aluminija temno senco: aluminij je mehansko šibek. Videli smo, da so katastrofalna zimska mehanska bremena aluminiju mnogo nevarnejša kakor bakru. Aluminij, ki obeta normalno cenejše proge, če so potrebne dovolj izdatne prenosne moči, plaši torej praktika z nepreračunljivimi stroški številnejših možnih obratnih motenj. Ničesar se pa izkušeni praktik ne

boji bolj kakor nevšečnih poškodb proge. Dokler mu ne dokažemo, da sta kosajoči se progi iz aluminija in bakra enako varni, ne bo rad posegel po aluminiju, čeprav bo videl, da mu prinaša normalno cenejšo progo.

Mehanska šibkost aluminija je ostala kakor nevšečna senca na beli prenosni kovini, ko smo se povzpeli više in začeli upoštevati napetostni problem ter naravno prenosno moč. Ugotovili smo, da potisne že nekako 10.000 prenosnih kilovatov baker v težko zagato, v kateri so potrebni svojevrstni ukrepi, da pa ima aluminij vse do nekako 50.000 kilovatov neovirano prodiranje pred seboj.

Drugače povedano: nad 10.000 kilovati zahteva veleprenosna elektrotehnika votle bakrene prenosne vodnike, aluminiju pa dovoljuje polne prenosne vrvi vse do nekako 50.000 kilovatov. V tem dejstvu tiči dodatna prednost aluminija, ki postaja, kakor smo videli, že brez nje gospodarsko močnejši in močnejši, ko raste prenosna moč.

V čem je prav za prav zasidrana ta dodatna prednost? Zakaj je votli vodnik neprijetnejši od polnega? Ali ne posegamo po votlini v prerezu prenosnega vodnika samo zato, da dobimo dovolj velik polmer, ker ga potrebujemo v napetostnem problemu, da ne trosimo hkrati drage prenosne kovine, ki je ne potrebujemo, ker je Kelvinovo pravilo ne zahteva? Ali povzroča votlina, s katero se umikamo nepotrebnim stroškom, posredno vendarle gospodarska bremena?

Seveda jih povzroča. Omenili smo že, da potrebuje votla vrv notranjo mehansko oporo v obliki vib, ki podpirajo notranjo plast vrvnih žic, da pa je potrebna tudi skrbne zunanje bandaže. Ta mehanska oprema, ki jo polna vrv lahko pogreša, dviga težo prenosnega vodnika: čisti teži bakra moramo zaradi nje pribiti nekako deset odstotkov. Ker pa se bakru na ta način specifična teža na videz za deset odstotkov poveča, se mu povpesna slika ustrezno poslabša: najpriporočljivejša razpetina postane nekoliko manjša.

Potrebna mehanska oprema votle bakrene vrvi pa prinaša še drugo nevšečno breme. Votla vrv je dokaj dražja od polne. Če reduciramo ceno votle vrvi na kilogram njenega bakra in jo primerjamo z enotno ceno bakra v polni vrvi, dobimo prav lahko razmerje 14 : 1.

To pomeni seveda, da se aluminij polne vrvi v tekmi z bakrom votle vrvi v tem razmerju poceni. To pomeni, da se razmerje prenosnih prerezov aluminija in bakra, ki je morda bilo 17 : 1, znatno premakne. V kritičnem območju 10.000 do 50.000 kilovatov prenosne moči je potemtakem staro pravilo, ki zahteva neposredno uveljavljanje specifičnih upornosti v

prenosnih prerezih. prav gotovo pomanjkljivo, če je nekoč bilo dobro.

Na koncu zadnjega poglavja pa smo še ugotovili, da zaide baker s svojimi votlimi cevmi ravno na zgornjem koncu kritičnega območja 10.000 do 30.000 prenosnih kilovatov. v trenutku torej, ko mora aluminij sam že posegati po votlih vodnikih. v novo zagato: stene cevi mu postanejo sumljivo, najbrž že nedopustno tanke. Prenosne cevi pa imajo vsaj to prednost, da so mehansko samostojnejše od votlih vrvi. Potemtakem je aluminij tudi nad kritičnim območjem močno v prednosti. In njegova mehanska šibkost? Odpravljiva, popravljiva je. Med dviganjem prenosnih moči od 10.000 do 30.000 kilovatov se je aluminiju položaj tako izdatno izboljšal, da so že možne in znosne gospodarske žrtve za morebitno mehansko ojačenje.

56. Slika, ki smo jo sestavili v zadnjem odseku, je v svojem drugem delu vsa v oblasti tako imenovanega kritičnega polumera (r_k) v krožnem prerezu prenosnega vodnika. torej pojma, s katerim rešuje avtorjeva teorija problem sodobnega oblikovanja prenosnih vodnikov. Kljub skladnosti tega pojma z oblikovanjem sodobnih velikih prog (Boulder—Dam—Los Angeles, British Grid Line). ki smo jo zgoraj ugotovili, potrebuje ogledovalec slike, ki opisuje tekmo aluminija in bakra v prenosni elektrotehniki, dodatnih pojasnil: praktik ve, da uporablja prenosna elektrotehniška tudi polne vrvi iz bakra in aluminija, ki imajo znatno večje polumere od kritičnih.

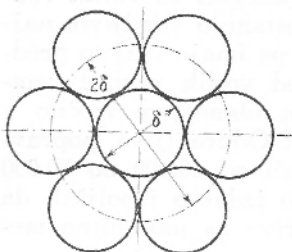
Vzemimo na primer norme Zveze nemških elektrotehnikov za polne vrvi iz bakra in aluminija! Opisuje jih naslednja

r a z p r e d e l n i c a št. 7.

Nazivni prerez (mm ²)	Zahtevani prerez (mm ²)	Žice v prerezu		Zunanji premer (mm)	Teža (kg/km)	
		število,	premer (mm)		baker	aluminij
10	10	7	1·35	4·1	84 - 99	—
16	15·9	7	1·7	5·1	135 - 155	41 - 47
25	24·2	7	2·1	6·3	206 - 235	63 - 72
35	34	7	2·5	7·5	295 - 330	91 - 101
50	49	7	3·0	9	430 - 475	132 - 145
50	48	19	1·8	9	413 - 470	127 - 143
70	66	19	2·1	10·5	562 - 644	170 - 195
95	93	19	2·5	12·5	802 - 905	245 - 275
120	117	19	2·8	14	1018 - 1130	310 - 340
150	147	37	2·25	15·8	1265 - 1435	385 - 440
185	182	37	2·5	17·5	1570 - 1765	480 - 535
240	228	37	2·8	19·6	1975 - 2200	605 - 670
240	243	61	2·25	20·3	2080 - 2360	635 - 720
300	290	61	2·5	22·5	2590 - 2900	790 - 885.

Marsikaj zanimivega najdemo v nji.

Ugotovimo predvsem, da v ustroju prerezov ni geometričnih razlik med bakrom in aluminijem! Geometrija posega kajpada izdatno v prerez vrvi, ki je sestavljen iz številnih krožnih žičnih prerezov in se ne meni za prenosno kovino. Če se odločimo, da uporabljamo same enake žice za prenosno



Slika 16.

vrvi, vse torej s premerom δ , moramo poslušati geometrijo, ko nizamo žične plasti drugo vrh druge.

Običajno prevzame vlogo jedra oziroma nekakšne osi v vrvi ena sama žica (slika 16). Prva žična plast, ki se opre na to jedro, dobi nujno premer 2δ , če imajo vse sestavne žice premer δ . V to plast postavimo lahko 6 žic. Toda vsaka naslednja plast dobi za 2δ večji premer in na obodu svojega kroga dodaten prostor za 6 žic.

Zato vidimo v tretjem stolpcu razpredelnice št. 7 števila:

$$7 = 1 + 6$$

$$19 = 1 + 6 + (6 + 6)$$

$$37 = 1 + 6 + (6 + 6) + (6 + 6 + 6)$$

$$61 = 1 + 6 + (6 + 6) + (6 + 6 + 6) + (6 + 6 + 6 + 6).$$

Majhne nenatančnosti so v tej geometriji. V višjih žičnih plasteh so loki, ki nizajo male krožne prereze, manj in manj zakrivljeni in zato vse laže izkoristljivi. V vrvi, ki je spletena iz žic, potujejo sestavne žice v vibah. Te vibe dobé dolžino, ki doseže 11 do 14-kratni premer vrvi. Krožni prerez žice torej ni čisto vzporeden krožnemu prerezu vrvi. Zaradi nestanovitne dolžine žičnih vib je seveda tudi teža kilometra vrvi nestanovitna. Vrtilna smer vib se spreminja od plasti do plasti. Zunanja plast pa suče svoje žične vibe na desno kakor vijak.

Razpredelnica št. 7 pripoveduje, da ne uporabljamo radi žic s premerom nad 2,5 mm. Zato vsebujejo nemške norme po dve obliki prerezov 50 mm² in 240 mm². Predebele sestavne žice manjšajo upogibljivost svoje vrvi tako izdatno, da jim onemogočajo navijanje na uporabljive transportne bobne.

Toda lotimo se vprašanja, ki je sprožilo poseg po razpredelnici št. 7! Ali niso v nji vse vrvi z bakrenim prerezom nad 70 mm² oziroma vse vrvi z aluminijemskim prerezom nad 120 mm² odveč, ker zahtevajo po vsem videzu nadkritične premere? Saj smo našli, da je kritični premer bakrene vrvi nekako 10 mm.

Kritični premer prenosne vrvi je plod napetostnega problema, naravne prenosne moči in Kelvinovega pravila. Če popusti le eden izmed teh treh činiteljev, postane premer prenosne vrvi svoboden. Če na primer ni napetostnega problema, ni potrebnega premera vrvi v električnem polju trofazne proge. V razdeljevalni progi, ki obratuje z medfazno napetostjo 380 voltov prav gotovo ni napetostnega problema. V nji pa je morda potrebna moč:

$$N = 250 \text{ kilovatov}$$

oziroma tok:

$$\frac{250.000}{\sqrt{3} \times 380} = 380 \text{ amperjev.}$$

Razdeljevalne proge so zelo občutljive in dopuščajo le skromne napetostne padce. Njihovi vodniki visé na skromnih lesenih stebrih. Gostota toka bo torej v njih skromna. S pomočjo največjega bakrenega prereza v razpredelnici št. 7 bi dosegla:

$$\frac{380}{290} = 1.31 \text{ amperja/mm}^2.$$

Pa tudi v skromnih, razmeroma kratkih prenosnih progah ni napetostnega problema, pač pa so v njih možne prenosne moči, ki zahtevajo močne bakrene prenosne prereze. Razumljivo je torej, da mislijo norme za prenosne vrvi na primere, ki se odmikajo napetostnemu problemu.

Kritični polumer prenosne vrvi pa je vrh vsega, kakor smo videli, obratno sorazmeren gostoti prenosnega toka. Kritični polumer 5 mm bakrene vrvi smo dobili, ker smo predpostavljali gostoto 1'6 amperja/mm². Z 1'55 A/mm² bi se dvignil na 6 mm.

Ali nismo v uvodnem poglavju ugotovili, da enotna cena bakra pada? Kelvin pravi, da je najpriporočljivejša gostota prenosnega toka sorazmerna kvadratnemu korenu iz cene montiranega kilograma prenosnega bakra, ki pa nosi gospodarsko odgovornost za nekako polovične stroške stebrov. Padajoča gostota dviga prenosni prerez, dviga pa stroške stebrov le z dvetretjinsko potenco. Potemtakem bo tudi v poglobljenem Kelvinovem pravilu sledila padanju enote cene bakra.

Pred dvajsetimi leti so nemški strokovnjaki zahtevali v veleprenosnih progah gostoto okroglih 1'7 A/mm². Mislili so seveda na drage bakrene votle vodnike. Kaj pa pravijo Ame-

ričani, ki so zgradili veleprenosno progo Boulder—Dam—Los Angeles in uporabili bakrene votle vodnike? V 15. odseku smo omenili njihov prenosni prerez:

$$F = 254 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

in njihovo prenosno napetost:

$$U = 287.000 \text{ voltov.}$$

V 32. odseku smo ugotovili da ima njihova proga valovni upor:

$$z = 420 \text{ omov.}$$

Ker je nedvomno, da so mislili na prenašanje energije z naravno močjo, so gradili za prenosni tok:

$$\frac{287.000}{\sqrt{3} \times 420} = 394 \text{ amperjev.}$$

torej z gostoto:

$$\frac{394}{254} = 1.55 \text{ amperja/mm}^2.$$

Američani imajo veliko oblast nad bakrom. Zato smejo računati s cenejšim bakrom kakor Nemci. In proga Boulder—Dam—Los Angeles je začela obratovati 1937. l. torej tik pred izbruhom zadnje svetovne vojne. Z gostoto 1.6 A/mm² smo torej v tej študiji morda le pravilno zagrabili oblikovanje votlih bakrenih prenosnih vodnikov.

57. Nemška industrija je malo pred drugo svetovno vojno predlagala nekakšne norme za votle bakrene prenosne vodnike v obliki naslednje:

razpredelnice št. 8.

Zunanji premer vrvi (mm)	Nazivni prerez (mm ²)
25	185 ali 200
28	210 ali 240
32	260 ali 300
36	320 ali 380
42	400 ali 480
50	520 ali 600.

Če vprežemo enačbo 46 a), pa dobimo:

r a z p r e d e l n i c o št. 9.

Zunanji premer vrvi (mm)	Nazivni prerez (mm ²)	Kritični polumer (mm)
25	185 ali 200	4·72 ali 5·1
28	210 ali 240	4·78 ali 5·46
32	260 ali 300	5·18 ali 5·98
36	320 ali 380	5·67 ali 6·75
42	400 ali 480	6·07 ali 7·27
50	520 ali 600	6·63 ali 7·65.

Nemški predlogi predpostavljajo nedvomno padanje gostote prenosnega toka ob naraščanju prereza votlega vodnika. Kritični polumer je namreč obratno sorazmeren tej gostoti. Od najmanjšega do največjega predlaganega prereza pade gostota kar v razmerju 1·5 : 1! Zakaj?

Ali nismo v 54. odseku dohnali, da zaide bakrena prenosna cev zaradi debeline svoje stene že v zagato, ko ustrezna aluminjska prenosna vrvi ravno začinja posegati po votlem prerezu? Kako pa dvignemo debelino stene v votlem prenosnem vodniku, če postane tehnologiji preskromna? Očitno le s povečanjem kritičnega polumera, ki pa je obratno sorazmeren gostoti prenosnega toka.

V 31. odseku smo videli, da pada debelina stene δ v votlem prenosnem vodniku neizprosno, ko mu raste premer, če ostane kritični polumer, to se pravi gostota prenosnega toka, stanovitna. Ali ne zahteva tehnologija naraščanja debeline stene δ ob naraščanju zunanjega premera vrvi?

Slika je po vsem tem jasna: votli bakreni prenosni vodnik niža bolj in bolj gostoto prenosnega toka, ko mu raste zunanji premer. S tem se nedvomno bolj in bolj oddaljuje od Kelvinovega pravila. Ker pa zaide baker ob naraščajoči prenosni moči mnogo prej v ustrezno zagato kakor aluminij in ker ima aluminij zaradi svoje večje omske upornosti ustrezno večji kritični polumer, z njim pa vsekakor večjo debelino stene v votlem vodniku, mu baker v sodobni veleprenosni progi nikakor ne more biti kos — če je le mogoče popraviti mehansko šibkost aluminjskih vrvi.

Poglobimo to velevažno sličico! Enačba 46a) pravi, da je prerez votlega vodnika sorazmeren zmnožku zunanjega polumera vrvi in kritičnega polumera prenosne kovine. Ista prenosna napetost zahteva seveda isti zunanji polumer votle bakrene in aluminjske vrvi. Prereza teh vrvi stopita torej nujno v obratno razmerje gostot istega prenosnega toka. To razmerje pa je po

mnenju vseh praktikov 1 : 1'7. Votla vrvi iz aluminija dobi potemtakem ob istem zunanjem premeru 1'7-kratni prerez bakrene.

Geometrija zahteva seveda v teh okoliščinah v aluminijski votli prenosni vrvi debelino stene, ki je več kakor 1'7-krat večja od debeline stene v bakreni vrvi. Ustrezna razlika je kajpada tem manjša, čim večji postane zunanji premer vrvi. Toda tudi v skrajnem primeru ostane aluminijska stena 1'7-krat debelejša.

Tehnologija po vsem videzu aluminijskih votlih prenosnih vrvi ne bo nadlegovala, kakor nadleguje bakrene, dokler ne bomo potrebovali izrednih prenosnih moči. Tem se pa praktično odmikamo s tem, da jih razpolavljamo in nalagamo dvojnimi program, obešenim običajno na isto stebričevje.

Saj je jasno: tehnologija bo prej ali slej odklonila votle vodnike s prevelikim zunanjim premerom, ki bodo postali transportu preokorni. Ker pa votli aluminijski vodnik ne zahteva večjega zunanjega premera kakor bakreni, bo postal hkrati s tem preokoren.

Vse to dokazuje, da je aluminij kot prenosna kovina v veleprenosni elektrotehniki ne samo mnogo uporabljivejši, temveč tudi mnogo, mnogo boljši gospodar. Njegove veleprenosne proge postajajo v primeri z bakrenimi tem cenejše, čim silnejše so, čim večja je prenosna moč. Zato pa sme misliti na dodatne stroške, ki naj mu popravijo nevšečno mehansko šibkost, ne da bi mu podrli gospodarsko prednost pred bakrom.

Priznajmo: nižanje gostot prenosnega toka v bakrenih votlih prenosnih vodnikih, ki ga izsiljuje tehnologija, se zdi poraznejše, kakor je v resnici. Kelvinovo pravilo se suče okoli enega izmed neštetihih gospodarsko-konstruktivnih optimov, ki jih je našla teoretska elektrotehnika, ki pa so vsi, kakor vemo, dokaj šibko oblikovani. Zato smemo upati, da znižanje najpriporočljivejše gostote prenosnega toka v razmerju 1 : 1'5 ne bo imelo prehudih gospodarskih posledic.

Kelvinova gospodarska tehtnica ima v svoji prvi skodelici vrednost letne džaulske toplote, ki spremlja prenosni tok, v svoji drugi skodelici pa obresti in odpise z gospodarsko odgovornostjo za polovične stroške stebrov obremenjene montirane prenosne kovine. Če je tehtnica uravnovešena, nosita skodelici vsaka 50 odstotkov vseh letnih prenosnih stroškov:

$$50 + 50 = 100.$$

Ko znižamo gostoto prenosnega toka v razmerju 1'5 : 1 in povečamo hkrati v tem razmerju prerez vodnikov, postane

letna džaulska toplota 1'5-krat cenejša, obresti z odpisi pa 1'5-krat večji. Letni prenosni stroški se torej dvignejo na:

$$\frac{50}{1'5} + 50 \times 1'5 = 33'3 + 75 = 108'3 \text{ odstotka}$$

prvotnih.

Seveda: podražitev prenosa za več kakor 8 odstotkov je zelo resna zadeva. Z osmimi odstotki letnih prenosnih stroškov bomo kaj lahko obrestovali in odpisovali izdatno ojačevalno napravo, ki jo morda potrebuje aluminij; tudi s petimi, z dvemi. Gospodarsko-konstruktivni optimi teoretske elektrotehnike resnično niso strogi in dopuščajo precejšnje prestopke, ne da bi jih občutno kaznovali. Delovno območje v okolici omenjenih optimov pa je graditelju, ki mora često hkrati misliti na več samostojnih gospodarsko-konstruktivnih predpisov, potrebno. Brez njega bi bilo nemogoče zadovoljivo upoštevati vse ustrezne zahteve. Zato je odmikanje, pa še močno odmikanje od važnega optima pod pritiskom zunanjega čimtelja, nedvomno sumljivo. Drugače povedano: votel bakreni vodnik z velikim zunanjim premerom postane po svoje mehansko prešibek in mora svoji šibkosti žrtvovati Kelvinovo gostoto. Mehansko šibki aluminij sme potemtakem tudi misliti na žrtve. Videli bomo, da so njegove žrtve odločno opravičljivejše.

38. Votli vodnik, ki bi moral dobiti pretanko steno, se brani, kakor smo videli, z manjšanjem gostote prenosnega toka. Kako se pa brani vodnik, ki bi moral dobiti predebelo steno? Z dviganjem gostote, ki mu jo priporoča Kelvin? Seveda, če hoče. V tem primeru pa si nakopava očitke, ki smo jih iznesli na koncu zadnjega odseka. Dviganje gostote pomeni ravno tako oddaljevanje od važnega gospodarsko-konstruktivnega optima kakor nižanje.

Predebelo steno pa odpraviš v votlem vodniku tudi s tem, da povečaš zunanji premer, ne da bi spreminjal velikosti preseza. Povečan premer prenosnega vodnika ni neprijeten. Nasprotno, napetostnemu problemu milí nesporno pritisk. Zato pa je manjšanje potrebnega zunanjega premera, ki ravno še kljubuje električnim silam, neuporabno orožje v boju s pretankimi stenami.

Iz te ugotovitve pa lahko izkopljemo zanimivo in važno idejo. Vsako polno prenosno vrv spremenimo lahko, če hočemo, v prenosno cev ali pa v votlo vrv z istim prenosnim prevezom. Votlega prenosnega vodnika pa ne moremo preoblikovati v polno vrv, če ne spremenimo prenosne kovine oziroma prenosnega toka. Kaj če bi polne aluminijske vrvi spremenili v

votle, votlino pa izkoristili za zaželeno mehansko ojačitev, na primer za jekleno jedro?

Ideja je seveda uporabljiva tudi tedaj, če je vrv iz aluminija pod pritiskom napetosnega problema že votla. In če je potrebna votlina v aluminijski vrvi že preobilna, da bi jo smeli napolniti z jeklenim jedrom? V tem primeru je treba misliti na možnost, da aluminij mehansko popolnoma razbremenimo. Problem ojačene prenosne vrvi iz aluminija je vsekakor zanimiv.

Aluminij je občutljiva kovina. Predvsem ne prenese sožitja z bakrom. V valjarnah, ki pridobivajo aluminijske žice, je treba skrbno paziti, da se v telo aluminija ne vtihotapljaajo drobci bakra in bakrenih zlitin. Celo na montažah je treba skrbno očistiti orodje, ki je bilo v rabi za oblikovanje bakrenih prog, preden je resnično uporabljivo v aluminijskih.

Skrbno pridelani aluminijski prenosni vodniki kljubujejo vsem vplivom ozračja in so še po desetletjih neoporečno uporabljivi. Njihov aluminij pa mora biti praktično čist, to se pravi: neizbežni primeski drugih kovin normalno ne smejo v njem doseči pol odstotka teže.

Kljub opisani občutljivosti pa je aluminiju možno neoporečno sožitje z železom. Sožitje dveh kovin se vselej opira na medsebojno kemijsko neodvisnost. Med aluminijem in železom ni kemijske odvisnosti. Zato je jekleno jedro v prenosni vrvi iz aluminija načelno možno in neoporečno. Kaj obeta prenosni elektrotehniki, pa je seveda zamotan problem.

Na samem pragu tega problema zagledamo težavo, ki resno ograža uporabljanje jeklenih jeder v aluminijskih vrveh: sestavne žice vrvi obkrožajo v svojih vibah jedro in ga magnetizirajo. Čeprav torej ne mislimo na morebitno pomoč jeklenega jedra kot soprevodnika, soprenašalca prenosnega toka, moramo misliti na nevšečne pojave v magnetiziranem jedru. Ustrezni vrtinčasti toki bi povzročali energijske izgube in s tem na videz dvigali specifično upornost aluminija.

S tem nevšečnim pojavom so se ojačene aluminijske vrvi spočetka res naporno borile. Kasneje je prenosna tehnika našla zvijačo: aluminijski plašč mora vsekakor dobiti dve plasti žic, v katerih obkrožajo žice jedro v nasprotnih smereh. Ta zvijača nadomešča vsoto pretoka obeh plasti z njuno razliko.

Pa tudi ta razlika izgine, če jo spretno zagrabimo. Zunanja plast ima seveda več žic kakor notranja. Če ji pa damo v istem razmerju daljše vobe, bo ravno tako poskušala magnetizirati jedro kakor notranja plast, le seveda v nasprotno smer. Tako je nazadnje jekleno jedro v aluminijski vrvi postalo ne-

nevarno in ojačena aluminijška vrv ima dandanes praktično isto električno prevodnost kakor njen aluminijški plašč.

Potemtakem so prenosne energijske izgube ojačene aluminijške vrvi praktično enake izgubam neojačene aluminijške vrvi, ki ima isti prerez iz aluminija. Ojačena vrv pa je seveda toliko dražja, kolikor stane jedro v nji. Dodatni izdatek seveda ni važen, dokler je prerez jedra v primeri s prerezom aluminija skromen.

Resnejši je kajpada vpliv jeklenega jedra na stebre. Natezna sila, ki jo jedro dodatno prevzame, zahteva ojačitev stebrov. Če pa omogoči jedro povečanje razpetine, se dodatni stroški v stebrih zmanjšajo. Ves problem ojačene aluminijške vrvi se suče po vsem videzu okoli povesenega problema oziroma okoli dodatnih stroškov v stebrih. To pa ne more biti presenetljivo: z jeklenim jedrom načenjamo mehanski problem, mehanski problem prenosne proge pa se izživlja v najpriporočljivejši razpetini in v stroških stebrov.

Kaj je po vsem tem osrednja točka v problemu z jeklenim jedrom ojačenih prenosnih vrvi iz aluminija? Nedvomno pravilno razmerje jeklenega in aluminijškega delnega prereza v vsem prerezu ojačene vrvi. Do tega pravilnega razmerja pa ni prav lahke poti.

Le v prvem trenutku bi utegnil raziskovalec misliti, da posega geometrija odločilno v odrejanje razmerij med jeklenimi in aluminijškimi delnimi prerezi. V 17. odseku smo raziskovali normalno angleško veleprenosno progo (British Grid Line), ki uporablja z jeklenim jedrom ojačeno aluminijško vrv. Videli smo, da je vrv spletena iz aluminijških in jeklenih žic, ki imajo vse isti premer. V tem primeru je bila seveda geometrija zelo močna.

Zakaj? Ena sama jeklena žica bi pomenila prešibko jedro. V dveh plasteh pa dobi jedro nujno $1 + 6 = 7$ žic. Aluminijški plašč potrebuje najmanj dve plasti, da lahko preprečuje magnetiziranje jedra. Njegova prva plast dobi seveda $6 + 6 = 12$, druga pa $6 + 6 + 6 = 18$ žic. Tako nastane prerezno razmerje:

$$\frac{7}{30} = 0,2335,$$

ki ga skoraj docela izsiljuje geometrija.

Pa saj ni treba aluminijškim žicam vsiljevati istega premera kakor jeklenim. Geometrija omogoča najrazličnejše ustrezne sestave. Zato so nedvomno dosegljiva najrazličnejša razmerja med delnimi prerezi v prerezu ojačene vrvi. Zato je le treba prvenstveno razčistiti vprašanje, katero razmerje je

najpriporočljivejše. Tisto seveda, ki obeta ob zadostni mehan-
ski ojačitvi aluminija najmanjše prenosne stroške.

59. Izredno važno je v problemu ojačene aluminijske pre-
nosne vrvi načelno vprašanje ali je takšna vrv neoporečna
zmes aluminija in jekla, torej nekakšna zlitina. Odgovor ni
prav lahek. Ojačena vrv ima toliko važnih lastnosti, da je treba
vsako posebej ogledati.

Vzemimo najprej njeno specifično upornost! V razmerju
delnih prereзов aluminija in jekla:

$$1 : \mu$$

je μ električno mrtev. Dodatek jeklenega jedra pa poveča pre-
rez vrvi $(1 + \mu)$ -krat. Potemtakem je specifična upornost oja-
čene vrvi $(1 + \mu)$ -krat večja od upornosti neojačene vrvi:

$$\rho_{al,j} = \rho_{al} \cdot (1 + \mu) \quad \dots \dots \dots 52)$$

V tej ugotovitvi, ki popolnoma zanemarja električno pre-
vodnost jeklenega jedra, tiči kajpada predpostavka, da raču-
namo z vsem kovinskim prerezom ojačene prenosne vrvi:

$$F_{al,j} = (1 + \mu) \cdot F_{al} \quad \dots \dots \dots 53)$$

da mislimo tako rekoč na nekakšno zlitino aluminija in jekla,
skratka na svojevrstno prenosno kovino.

Ta kovina ima seveda tudi svojo specifično težo. Specifična
teža aluminija je 2.7 kg/dm^3 , jekla pa 7.8 kg/dm^3 . Specifična
teža ojačene vrvi je potemtakem:

$$\gamma_{al,j} = \frac{2.7 + \mu \cdot 7.8}{1 + \mu} = 2.7 \cdot \frac{1 + 2.89\mu}{1 + \mu} \quad \dots \dots \dots 54)$$

Zmes na primer, ki jo priporočajo Nemci:

$$1 : \mu = 6 : 1,$$

poveča specifično težo aluminija:

$$\frac{1 + \frac{2.89}{6}}{1 + \frac{1}{6}} = 1.27 \text{ krat.}$$

torej na:

$$2.7 \times 1.27 = 3.43 \text{ kilograma/dm}^3.$$

Težje od teh preprostih zmesnih problemčkov je vprašanje, kako se porazdelé v vrvi natezne sile na aluminij in jeklo. Zmotno bi bilo na primer misliti na nekakšno zmes ravno še dopustnih nategov z upoštevanjem razmerja delnih prerezov. Jeklo zdrži trajno 3200, 5600, 9000, 11000 kg/cm² v tistih kakovostnih razredih, ki jih pozna nemška prenosna elektrotehnika, aluminij pa, kakor že vemo, le 1200. Zmes:

$$\frac{1200 + \frac{9000}{6}}{1 + \frac{1}{6}} = 2320 \text{ kilogramov/cm}^2$$

ni ravno še dopustni trajni nateg v vrvi, ki je ojačena po nemških predpisih!

V ojačeni vrvi se prepletajo sestavne žice iz aluminija in jekla v dolgih vibah. Trenje med njimi je nedvomno tolikšno, da se vsa vrv enakomerno nategne, če jo zagrabijo natezne sile. Prožni nategi pa so obratno sorazmerni prožnostnim koeficientom. Zato posegata v mehanske probleme ojačene vrvi prožnostna koeficienta aluminija in jekla.

Koeficient aluminija je:

$$E_{al} = 560.000 \text{ kilogramov/cm}^2,$$

jekla pa:

$$E_j = 1.960.000 \text{ kilogramov/cm}^2.$$

Natezna sila H_{al} (kg/cm²) v aluminiju povzroči prožni nateg, ki ga jeklo doseže s:

$$H_{al} \cdot \frac{1.960.000}{560.000} \text{ kilogrami/cm}^2.$$

Ta slika vodi neposredno do odnosa med specifično natezno silo $H_{al,j}$ v ojačeni vrvi in ustrezno silo H_{al} v aluminij-skem delu vrvi:

$$H_{al,j} = H_{al} \frac{1 + \frac{1.960.000}{560.000} \mu}{1 + \mu} = H_{al} \cdot \frac{1 + 3,5\mu}{1 + \mu} \text{ kilogramov/cm}^2. \quad 55)$$

Z:

$$\mu = \frac{1}{6} \text{ in } H_{al} = 800$$

bi dobili:

$$H_{al,j} = 800 \times \frac{1 + \frac{3,5}{6}}{1 + \frac{1}{6}} = 1084 \text{ kilogramov/cm}^2$$

Nemški varnostni predpisi, ki dovoljujejo aluminijskim vrvem pod normalno dodatno obtežbo nateg 800 kg/cm^2 in mislijo na zmesno razmerje 1:6, dovoljujejo ojačenim aluminijskim vrvem resnično 1100 kg/cm^2 .

Zanimive in važne zapletljaje pa vnaša v pravkar opisani mehanski problem toplotno raztezanje in krčenje aluminija in jekla v ojačeni vrvi. Aluminij ima toplotni raztezni koeficient

$$\alpha_{Al} = 2,3 \times 10^{-5} \text{ za } 1^\circ \text{ C,}$$

jeklo pa:

$$\alpha_j = 1,1 \times 10^{-5}$$

jeklo se torej le nekako polovično razteza in krči, ko se spreminja temperatura, nekako tretjinsko pa, ko se spreminjajo natezne sile. V ojačeni vrvi so torej notranje mehanske napetosti neizbežne. Trenje med aluminijskim plaščem in jeklenim jedrom pa posreduje.

Denimo, da bi ob -5° C in pod dodatnim mehanskim bremenom v vrvi ne bilo notranje mehanske napetosti med aluminijem in jeklom! V tem primeru bi se natezna sila tako porazdelila na obe kovini, kakor smo zgoraj računali. Pol leta kasneje bi bila temperatura za 40° C višja. Ustrezno bi se aluminij poskušal močnejše raztegniti kakor jeklo. Trenje, ki bi ga zadrževalo, bi nedvomno mehansko razbremenjevalo jeklo in obremenjevalo aluminij, da bi toplotni in mehanski nategi stopili v ravnotežje. V tem primeru bi bil torej aluminij poleti razmeroma močnejše vprežen kakor pozimi. Ker pa poleti nategi v prenosni vrvi tako močno popusté, bi prenosna vrv ne imela težav.

Če bi pa bila vrv ob najvišji poletni temperaturi brez notranjih mehanskih napetosti med aluminijem in jeklom, bi se ji aluminijski del pozimi poskušal močnejše skrčiti kakor jekleni. Trenje bi v tem primeru valilo del mehanskega bremena iz aluminija v jeklo. Ker pa razmerje prožnostnih koeficientov tako ne dovoljuje vsega izkoriščanja velike mehanske odpornosti jekla, bi tudi ta primer ne pomenil, da nastajajo dodatne težave.

Nasprotno: ravno v poseganju toplotnih raztezni koeficientov v mehanski problem ojačene vrvi tiči važna omilitev problema, ki je praktik ne bo prezrl. Zapomnil si bo pa, da je temperatura, ob kateri pletemo ojačeno vrv, važna. Takrat namreč po vsem videzu ni pomembnih notranjih mehanskih napetosti med aluminijem in jeklom.

S tem pa slika mehanskega problema ojačene vrvi še ni zaključena. Denimo, da bi bila vrv v primeru -5° C in nor-

malne zimske dodatne obtežbe tako obremenjena, da bi imela v aluminiju 800 kg/cm^2 , v jeklu pa ustrezno razmerju prožnostnih koeficientov nekako $5,5 \times 800 = 2800 \text{ kg/cm}^2$! Kako bi se zoperstavljala, če bi dodatna obtežba začela postajati katastrofalna?

Naraščajoča obtežba bi poskušala nategniti aluminij dodatno, toda nekako triinpolkrat močnejše kakor jeklo. Trenje med aluminijskim plaščem in jeklenim jedrom bo te poskuse kajpada zaviralo. Zato se bodo katastrofalna bremena ravno tako porazdeljevala na aluminij in jeklo kakor normalna. Toda v aluminiju bodo prej dosegla prožnostno mejo kakor v jeklu! Zato bo jekleno jedro v boju s katastrofalnimi zimskimi dodatnimi bremeni prevzelo izredno važno vlogo.

Katastrofalna zimska dodatna bremena pa so ves čas, odkar se bori aluminij v prenosni elektrotehniki z bakrom, izpodkopavala ugled bele prenosne kovine. V trenutku, ko se jim začno na jeklenem ojačevalnem jedru lomiti zobje, je aluminij mehansko ravno tako zanesljiv kakor baker, če ni zanesljivejši. Po vsem videzu je torej jekleno jedro v vrvi iz aluminija nekakšna dokončna rešitev zoženega problema prenosnih kovin.

40. Raziskovalec, ki se je prepričal, da je jekleno jedro v vrvi iz aluminija nekakšna dokončna rešitev zoženega problema, ker odstranjuje sumljivo mehansko šibkost bele prenosne kovine, se seveda ne more zadovoljiti s tehniško-fizikalno platjo svojega problema. Ravno tako važna, če ne važnejša, mu je tehniško-gospodarska plat. Žato hoče vedeti, koliko stane jekleno jedro v prenosni vrvi. Ne zanimajo ga pa seveda samo neposredna ustrezna gospodarska bremena, temveč tudi posredna. Koliko stane jedro v sami vrvi, je razmeroma malo važno. Mnogo važnejša je podražitev stebrov, ki jo povzroča ojačenje prenosne vrvi.

Izhodišče problema ojačene vrvi iz aluminija nam je bila polna vrv iz aluminija s prerezom, recimo, F_{al} mm². To vrv smo preoblikovali: votlo smo naredili, čeprav brez pritiska napetostnega problema. Votlini smo dali tolikšen prerez, da je lahko sprejela $\mu \cdot F_{al}$ mm² jekla. Tako je nastal celotni kovinski prerez ustrezno enačbi 53).

Enačba 53) nam je ugotovila specifično natezno silo v ojačeni vrvi. Neojačena vrv je obremenjevala steber s:

$$H_{al} \cdot F_{al} \cdot 10^{-2} \text{ kilogrami,}$$

ojačena ga pa obremenjuje s:

$$H_{al,j} \cdot F_{al,j} \cdot 10^{-2} = H_{al} \cdot F_{al} \cdot (1 + 3,5\mu) \text{ kilogrami.}$$

To pomeni po avtorjevi razpetinski teoriji:

$$(1 + 3.5^{\mu})^{\frac{2}{3}}\text{-kratno}$$

podražitev stebrov.

Takoj vidimo, da je ta neposredna podražitev neprijetno breme, da bo treba po vsem videzu previdno dimenzionirati jekleno jedro. In nelohoté si sestavimo:

razpredelnica št. 10.

μ	$1 + 3.5^{\mu}$	$(1 + 3.5^{\mu})^{\frac{2}{3}}$
$\frac{1}{20} = 0.05$	1.175	1.11
$\frac{1}{15} = 0.0667$	1.233	1.15
$\frac{1}{10} = 0.1$	1.35	1.22
$\frac{1}{9} = 0.111$	1.388	1.24
$\frac{1}{8} = 0.125$	1.437	1.27
$\frac{1}{7} = 0.143$	1.502	1.31
$\frac{1}{6} = 0.167$	1.585	1.36
$\frac{1}{5} = 0.2$	1.7	1.42
$\frac{1}{4} = 0.25$	1.875	1.515,

ki gradi dokaj resno sliko.

Toda ne pozablajmo, da so stroški mehanske opreme v vsaki prenosni progi tudi obratno sorazmerni izbrani razpetini in da ima vsaka proga svojo najpriporočljivejšo razpetino! Če omogoča jekleno jedro povečano razpetino, bodo stroški, ki jih ojačitev vrvi neposredno dodatno vsiljuje stebrom, postali znosnejši. Oglejmo si torej še drugi del mehanske slike, ki jo gradi jekleno jedro!

Dopustni specifični nateg je, kakor pripoveduje enačba 55), v ojačeni vrvi:

$$\frac{1 + 3.5^{\mu}}{1 + \mu}\text{-krat}$$

večji kakor v neojačeni. To bi obetalo večjo razpetino, če se višina obešališč vrvi nad zemljo — kar smemo predpostavljati

— zaradi ojačitve ne spremeni. Toda ojačena vriv je težja od neojačene in zato močnejše obremenjena. Ker pa dobi nujno večji zunanji premer, bo njeno dodatno zimsko breme nekoliko znosnejše.

S pomočjo enačb 12) in 54) ni težko ugotoviti, da je razmerje vseh mehanskih bremen v primeru -5°C in normalnega lednega plašča ojačene in neojačene vrvi z istim aluminijemskim prerezom F_{al} :

$$\frac{0.27 \cdot \frac{1 + 2.89\mu}{1 + \mu} + \frac{20.2}{[1 + \mu] F_{al}^{\frac{3}{4}}}}{0.27 + \frac{20.2}{F_{al}^{\frac{3}{4}}}}$$

Temelj tega razmerja so seveda nemški varnostni predpisi.

Po vsem tem dobimo razmerje najpriporočljivejših razpetin ojačene in neojačene vrvi z istim aluminijemskim prerezom:

$$\frac{x_{al,j}}{x_{al}} = \sqrt{\frac{1 + 3.5\mu}{1 + \mu} \cdot \frac{0.27 + \frac{20.2}{F_{al}^{\frac{3}{4}}}}{0.27 \cdot \frac{1 + 2.89\mu}{1 + \mu} + \frac{20.2}{[1 + \mu] F_{al}^{\frac{3}{4}}}}} \quad 56)$$

Razmerje stroškov stebričevja pa je potem:

$$\frac{S_{al,j}}{S_{al}} = \sqrt{(1 + 3.5\mu)^{\frac{1}{3}} \cdot \frac{0.27 \cdot (1 + 2.89\mu) + \frac{20.2}{F_{al}^{\frac{3}{4}}} \cdot (1 + \mu)^{\frac{1}{2}}}{0.27 \cdot \frac{20.2}{F_{al}^{\frac{3}{4}}}}} \quad 57)$$

Praktiku, ki rad manjša število potrebnih izolatorjev, je enačba 56) važnejša od enačbe 57). Nedvomno ga zanima največje praktično dosegljivo razmerje $x_{al,j} : x_{al}$. Ustrezni μ mu pomeni nekakšno rešitev problema z jeklenim jedrom ojačenih aluminijemskih vrvi. Zato bo predvsem raziskal izraz:

$$f(\mu, F_{al}) = \frac{1 + 3.5\mu}{1 + 2.89\mu + \frac{74.8}{F_{al}^{\frac{3}{4}}} \cdot (1 + \mu)^{\frac{1}{2}}}$$

V njem je:

$$F_{al,j} = (1 + \mu) F_{al} = 74.8^{\frac{4}{3}} \doteq 316 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

zelo uporabljiva oporna točka. Nji ustreza:

$$f(\mu, F_{al}) = \frac{1 + 3.5\mu}{1 + 2.89\mu + 1 + \mu} = \frac{1 + 3.5\mu}{2 + 3.89\mu}$$

Takoj je jasno, da obeta dviganje prereznega razmerja $\mu : 1$ večanje najpriporočljivejše razpetine v progi z ojačeno vrvjo. To večanje pa le ni tolikšno, kakor bi pričakoval opazovalec, ki misli samo na naraščanje dopustne specifične natezne sile. V območju zelo velikih μ postane $f(\mu, F_{al})$ le malo manjši od enote, medtem ko dovoljujejo majhni μ vrednost 0.5. V okviru posebnega prereza ojačene vrvi 515 mm² se razvija $f(\mu, F_{al})$ po vsem tem med 0.5 in 0.9. Nemška vrednost $\mu = 1 : 6$ na primer obeta:

$$f(\mu, F_{al}) = \frac{6 + 3.5}{12 + 3.89} = 0.598.$$

Ker pa je stanovitni faktor pod korenem enačbe 56):

$$1 + \frac{74.8}{F_{al}^2} > 1 + \frac{74.8}{[F_{al} \cdot (1 + \mu)]^2}$$

in zato v primeru $F_{al,j} = 516 \text{ mm}^2$ večji od 2, tem večji seveda, čim izdatnejši je μ , bo razpetina ojačene vrvi vsekakor večja od razpetine neojačene vrvi. Z:

$$\mu = \frac{1}{6}$$

dobimo, če je:

$$1 + \frac{74.8}{F_{al}^2} = \frac{74.8}{[F_{al} \cdot (1 + \mu)]^2} \cdot (1 + \mu)^2$$

preprosto:

$$1 + \left(1 + \frac{1}{6}\right)^2 = 2.125,$$

torej:

$$\frac{x_{sl,j}}{x_{al}} = \sqrt{0.598 \times 2.125} = 1.125.$$

Po razpredelnici št. 10 pričakujemo, da bo $\mu = 1/6$ zahteval neposredno podražitev stebrov za 56 odstotkov. Tu vidimo posredno pocenitev za 12.5 odstotkov. Celotna podražitev stebrov bo potemtakem ustrezala razmerju:

$$\frac{1.36}{1.125} = 1.205.$$

Ker bi bil:

$$F_{al} = \frac{F_{al,i}}{1 + \mu} = \frac{316}{1 + \frac{1}{6}} = 270 \text{ kvadratnih milimetrov.}$$

bakreni prerez pa, ki bi ga dobili, če bi uveljavili razmerje specifičnih upornosti:

$$r_b = \frac{F_{al}}{1.7} = \frac{270}{1.7} = 159 \text{ kvadratnih milimetrov,}$$

smemo s pomočjo razpredelnice št. 6 v 25. odseku ugotoviti, da bodo stebri proge z ojačeno vrvjo nekako:

$$1.205 \times 0.805 = 0.965 \text{ - krat}$$

dražji, to se pravi nekoliko cenejši od stebrov v ustrezni bakreni progi, razpetina pa:

$$1.125 \times 0.99 = 1.113 \text{ - krat}$$

večja.

Ker pa bakrenega prereza 159 mm^2 nikakor ne moremo uresničiti brez votline, če je le napetostni problem živ, bi bila ojačena aluminijaska proga nedvomno mnogo priporočljivejša — če bi njene prednosti ne dušilo dejstvo, da tudi aluminij-skega 270 mm^2 po vsem videzu ne moremo več zgraditi brez votline.

Pa saj jo ima! Ves prerez, 316 mm^2 , spravimo, če je polnilni faktor $\pi/4$, v premer:

$$2r = \sqrt{\frac{316 \times 16}{10}} = 22.4 \text{ milimetra,}$$

prerez jedra $316 - 270 = 45 \text{ mm}^2$ pa na isti način v premer:

$$\sqrt{\frac{45 \times 16}{10}} = 8.5 \text{ milimetra.}$$

Debelina stene je torej:

$$\delta = \frac{22.4 - 8.5}{2} = 6.95 \text{ milimetra.}$$

Če vstavimo izračunana r in δ v enačbo 47 a), dobimo:

$r_k \doteq 9.57$ milimetra.

Temu kritičnemu polumeru pa pripisuje enačba 45a) gostoto prenosnega toka:

$$g = \frac{0.8}{0.957} = 0.838 \text{ amperja/mm}^2.$$

kar bi ustrezalo gostoti v bakru:

$$1.7 \times 0.838 \doteq 1.42 \text{ amperja/mm}^2.$$

Ojačena aluminijaska vrvi s celotnim prerezom 316 mm^2 ima potemtakem ravno še pravo votlino in nadkriljuje zato izdatno ustrezno bakreno. Primer:

$$\mu = \frac{1}{6}, F_{al,j} = 316 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

je po vsem tem praktično zelo pomemben.

Ker pa stoji na kritičnem mestu možnih celotnih prerezov, zanimajo praktika seveda primeri, v katerih nastopajo manjši prerezi. Vzemimo torej primer:

$$\frac{74.8}{[F_{al} \cdot (1 + \mu)]^2} = 2,$$

kar ustreza:

$$F_{al,j} = 125 \text{ kvadratnim milimetrom!}$$

Zdaj bo:

$$f(\mu, F_{aj}) = \frac{1 + 3.5\mu}{1 + 2.89\mu + 2(1 + \mu)} = \frac{1 + 3.5\mu}{3 + 4.89\mu}$$

in:

$$\frac{x_{al,j}}{x_{al}} = \sqrt{\frac{1 + 3.5\mu}{3 + 4.89\mu} \cdot \left[1 + 2(1 + \mu)^2\right]}.$$

Z:

$$\mu = \frac{1}{6}$$

dobimo:

$$\frac{x_{al,j}}{x_{al}} = \sqrt{\frac{6 + 3.5}{18 + 4.89} \times \left[1 + 2\left(1 + \frac{1}{6}\right)^2\right]} = 1.155.$$

Tudi v tem primeru postane razpetina večja: jedro s preznim razmerjem $1 : 6$ pa le ne zmore več kakor 15-odstotnega dodatka k razpetini neojačene aluminijiske vrvi. Prerez oja-

cene vrvi 125 mm² stoji namreč na drugem kritičnem mestu, ker ustreza aluminijškemu prerezu:

$$\frac{125}{1 + \frac{1}{\mu}} = 107 \text{ kvadratnih milimetrov}$$

oziroma bakrenemu prerezu:

$$\frac{107}{17} = 63 \text{ kvadratnih milimetrov,}$$

ki je, kakor vemo, ravno še brez votline izvršljiv.

41. Če raziskujemo enačbi 56) in 57) na isti način kakor v zadnjem odseku, toda s pomočjo prereznih razmerij 1 : μ , ki so različna od nemškega 6 : 1, dobimo podobne slike, ugotovimo pa hkrati prav lahko, da z naraščajočim μ razpetina sicer raste, da pa vendarle tudi stebri postajajo dražji. In če se zadovoljimo z nekoliko nenatančno sliko smemo trditi:

jedro ojačene vrvi, ki dobi ν odstotkov aluminijskega prereza, poveča razpetino neojačene vrvi za nekako 0,75 ν odstotkov, stroške stebrov pa za nekako 1,25 ν odstotkov. Seveda zmanjša hkrati stroške izolatorjev za nekako 0,75 ν odstotkov.

Razpredelnica št. 6 v 25. odseku obeta že prereznemu razmerju 6 : 1 ($\mu = 1/6$) razpetine, ki prekašajo ustrezne v bakrenih progah s prenosnim prerezom nad 65 mm², in le skromno dražje stebre, toda znatno cenejše izolatorje. V vsem območju, ki bakru že vsiljuje votle vodnike, aluminiju pa ne, je ojačena vrv nedvomno izdatno cenejša od bakrene, pa tudi vsa njena prenosna prog je cenejša.

Z rastočim μ pa se dviga mehanska varnost proge, hkrati pa tudi električna. Močnejše jekleno jedro potegne v primeru katastrofalnih zimskih dodatnih bremen njihov večji del nase, njegova najpriporočljivejša razpetina pa zmanjša število izolatorjev.

Stoječ pred to živo sliko, bo praktik okleval: obratna varnost mu je ravno tako važna, če ne važnejša, kakor normalni prenosni stroški. Marsikateremu izkušenemu graditelju prenosnih prog bo prečno razmerje 6 : 1 prev veliko. V 18. odseku smo govorili o angleški normalni veleprenosni progi (British Grid Line), ki uporablja ojačene aluminijske vrvi s prereznim razmerjem:

$$\mu = \frac{7}{30} = 0,2335.$$

V tej progi je očitno uveljavljena skrb za izdatno obratno varnost.

Nemci, ki so se po vsem videzu odločili za razmerje 6 : 1, so tudi že sestavili ustrezne norme. V teh normah mislijo na vse območje aluminijevskih prerezov pod 500 mm², kar dokazuje, da jim je ojačena aluminijevska vrv silno resna tekunica bakrene. Najvažnejši podatki teh norm so združeni v naslednji

razpredelnici št. 11

Nazivni prerez (mm ²)	Potrebni aluminijevski prerez (mm ²)	Ves prerez (mm ²)	Premer (mm)	Teža (kg/km)
16	15·3	17·8	5·4	58— 68
25	23·8	27·8	6·8	90— 105
35	34·3	40·0	8·1	132— 149
50	48·3	56·3	9·6	186— 202
70	66·2	77·8	11·6	253— 302
95	90	105	13·4	340— 405
120	122·6	143·5	15·7	474— 549
150	148·9	174·3	17·3	579— 664
185	183·8	215·5	19·2	722— 816
210	209·1	244·9	20·5	815— 931
240	236	276·1	21·7	921—1047
300	294·9	344·4	24·2	1153—1293.

Proučevalcu zoženega problema prenosnih kovin pa so kajpada zanimivi in važni tudi podatki o ustroju teh normiranih nemških ojačenih vrvi. Opisuje jih

razpredelnica št. 12

Nazivni prerez (mm ²)	prečno razmerje	aluminijevski plašč			jedro			prerez (mm ²)
		žice število	premer (mm)	vrv število plastí	žice število	vrv		
						premer (mm)	premer (mm)	
16	6 : 1	6	1·8	1	1	1·8	1·8	2·55
25	6 : 1	6	2·25	1	1	2·25	2·25	4
35	6 : 1	6	2·7	1	1	2·7	2·7	5·7
50	6 : 1	6	3·2	1	1	3·2	3·2	8
70	5·72 : 1	26	1·8	2	7	1·45	4·35	11·6
95	6·02 : 1	26	2·1	2	7	1·65	4·95	15
120	5·86 : 1	26	2·45	2	7	1·95	5·85	20·9
150	5·86 : 1	26	2·7	2	7	2·15	6·45	25·4
185	5·8 : 1	26	3·0	2	7	2·4	7·2	31·7
210	5·85 : 1	26	3·2	2	7	2·55	7·65	35·8
240	5·89 : 1	26	3·4	2	7	2·7	8·1	40·1
300	5·96 : 1	26	3·8	2	7	3·0	9	40·5.

Do nazivnega prereza 70 mm² imajo normirane nemške ojačene vrvi samo eno plast aluminjskih žic. To pomeni, da zane-marjajo v 58. odseku omenjeno magnetiziranje jeklenega je-dra. V vseh višjih nazivnih prerezih pa najdemo po dve alu-minijski plasti, kar ustreza tam opisanemu upoštevanju ma-gnetne občutljivosti jekla. V notranji plasti je povsod po 10 žic, v zunanji pa po 10 + 6 = 16, kar je skladno z zahtevami geometrije.

Prehod iz zgornje jeklene v spodnjo aluminjsko plast torej od 6 do 10 žic rešujejo Nemci s tem, da dajejo alumi-nijskim žicam nekako v razmerju:

$$\frac{10}{6 + 6} = 0,833$$

večji premer. Izkoriščajo pa nekoliko večjo geometrijsko spre-jemljivost večjih krožnih lokov. Tako najdemo na primer pri nazivnem prerezu 150:

$$\frac{2,15}{27} = 0,8 < 0,833.$$

Vse to je skladno z ugotovitvami 58. odseka. Skladno je pa tudi z raziskavanji 40. odseka, kjer smo našli aluminjski pre-rez 270 mm² žic na robu še polnih ojačenih vrvi. V razpredelnici št. 12 vidimo, da ima normirana ojačena vrv z nazivnim pre-rezom 300 mm² zunanji premer 24,2 mm, njeno jekleno jedro pa ima po razpredelnici št. 12 premer 9 mm. Ker pa imajo alu-minijske žice te vrvi premer 5,8, in je:

$$24,2 - 9 = 15,2 = 4 \times 3,8,$$

je ta vrv še polna.

42. V 51. odseku smo s pomočjo osnovne enačbe oziroma neenačbe 45) izračunali kritični polmer polne prenosne vrvi:

$$r_k \leq \frac{0,8}{g} \text{ centimetrov,}$$

ker smo predpostavljali prerezni polnilni faktor $\pi/4$. Ta fak-tor je seveda tudi v polnih ojačenih vrveh uporabljev. V pre-rezu ojačene vrvi pa delni prerez jeklenega jedra praktično ne prevaja prenosnih tokov. Zato je:

$$F = \frac{\pi^3 \cdot \pi \cdot \pi}{4(1 + \mu)} \cdot 10^3 \text{ kvadratnih milimetrov, . . . 58)}$$

če je prerezno razmerje 1 : μ .

Kritični polumer polne ojačene vrvi je po vsem tem:

$$r_k \leq \frac{0.8}{g} \cdot (1 + \mu) \text{ centimetrov, 59)}$$

kar je prav za prav presenetljivo. Nehoté mislimo namreč na polno neojačeno vrv, ki ima ravno kritični polumer, in vidimo, da dobi, če jo tako rekoč umetno naredimo votlo, ker jo hočemo ojačiti:

$$\sqrt{1 + \mu} \text{-kratni}$$

polumer. Ta vrv bi pa seveda zmogla le isti prenosni tok kakor neojačena, zato bi smela služiti le prvotni prenosni napetosti, da bi si ohranila naravno prenosno moč. Seveda bi prenesla $\sqrt{1 + \mu}$ -kratno. Če torej posežemo po vsi zmojljivi napetosti, moramo polumer vrvi vnovič $\sqrt{1 + \mu}$ -krat povečati. Zdaj bo vrv zmogla kar $(1 + \mu)$ -kratno napetost, hkrati pa tudi $(1 + \mu)$ -kratni tok, ker raste prerez cevi s kvadratom njenega polumera. Ravno to pa zahteva enačba 59).

V 31. odseku smo našli kritični premer polne bakrene vrvi 10 mm, ker smo predpostavljali gostoto prenosnega toka 1'6 A/mm². Ustrezni kritični premer polne aluminijske vrvi je bil 17 mm, ker je obratno sorazmeren gostoti in ker dajemo običajno aluminiju v razmerju specifičnih omskih upornosti, 1'7 : 1, manjšo gostoto. Ojačena vrv s prereznim razmerjem 6 : 1 bi tako dobila kritični premer:

$$17 \times \left(1 + \frac{1}{6}\right) = 19.86.$$

V prejšnjem odseku opisane nemške norme za polne ojačene aluminijske vrvi segajo do nazivnega prereza 300 mm² oziroma premera vrvi 24'2 mm. Nemci mislijo potemtakem na kritični premer 24'2 mm, mislijo torej na

$$\frac{24.2}{19.86} = 1.218 \text{-krat}$$

manjše gostote. V bakru bi to pomenilo:

$$\frac{1.6}{1.218} = 1.315 \text{ amperja/mm}^2.$$

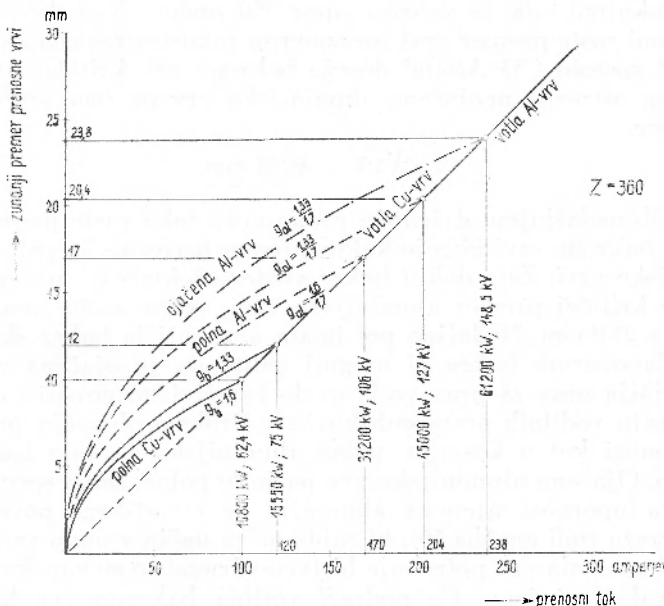
Ta gostota seveda ne preseneča. Omenili smo že, da so gostote prenosnih tokov padale, ko je v zadnjih desetletjih cena elektrolitnega bakra na videz nevzdržno padala. Številne so-

dobne bakrene veleprenosne proge se sučejo okoli te razmera skromne gostote. Sicer pa je povsem naravno, da mislijo norme tudi na manj običajne okolnosti. Praktik si bo pa rad zapomnil, da dosežejo polne ojačene aluminijske vrvi s preznim razmerjem 6 : 1 premer okroglih 20 mm.

Ker pa ima ojačena vrv $(1 + u)$ -krat večji kritični polimer, doseže $(1 + u)^2$ -kratno naravno prenosno moč neojačene aluminijske vrvi. V 31. odseku smo ocenili kritično prenosno moč bakrenih polnih vrvi z 10.800 kW, aluminijskih pa z 31.000. Ojačitev s preznim razmerjem 6 : 1 dvigne na videz polni aluminijski vrvi kritično prenosno moč na:

$$31.200 \times \left(1 + \frac{1}{6}\right)^2 = 42.500 \text{ kilovatov.}$$

V vsem razsežnem območju od nekako 10.000 do nekako 40.000 kilovatov tekmuje potemtakem polna ojačena aluminijska vrv z drago votlo bakreno.



Slika 17.

To območje pa ustreza gostoti prenosnega toka v bakru 1,6 amperja/mm² in se premakne na 15.510 do 61.200 kW, če znižamo gostoto na:

$$g = \frac{4}{3} = 1,33 \text{ amperja/mm}^2.$$

Ustrezno naravni prenosni moči ($z = 560$ omov) prilagodeno območje medfazne prenosne napetosti na koncu proge je 75 do 148,5 kV.

Vse to opisuje slika 17. Abscise v nji merijo prenosni tok, ordinate neposredno premer prenosne vrvi, posredno pa v območju nad kritičnim polumerom vrvi tudi prenosne moči in medfazne prenosne napetosti. Hrbtenica vse slike je premica, ki ustreza enačbi 45) in opisuje naraščanje premera votle vrvi s prenosnim tokom.

Ta premica je, kakor že vemo, skupna vsem prenosnim kovinam, praktično torej aluminiju in bakru. Na nji leže v sliki 17. točke, ki določajo kritične premere. Slika upošteva dve gostoti prenosnega toka v bakru, 1'6 in 1'55 A/mm², ter gostotno razmerje 1'7 : 1 bakrenih oziroma aluminijskih vrvi.

Pod kritičnimi točkami pada premer vrvi po paraboli, ker sledi stanovitni gostoti in polnemu prerezu. V tem območju seveda ni napetostnega problema, dokler so fazni vodniki tako razmaknjeni, da je valovni upor 560 omov. Nad kritičnimi točkami raste premer vrvi sorazmerno jakosti prenosnega toka.

Z gostoto 1'33 A/mm² doseže bakrena vrv kritični premer 12 mm, ustrezna neojačena aluminijska vrv pa ima seveda že premer.

$$12 \times \sqrt{1.7} = 15.65 \text{ mm.}$$

Ob nadaljnem dviganju prenosnega toka raste premer že votle bakrene vrvi hitreje kakor premer ustrezne, še polne aluminijske vrvi. Zato dobiti baker svojega tekmeca s premerom, ki je kritični premer aluminijske vrvi: polne z 20'4 mm, ojačene s 23'8 mm. Nadaljno pot imata aluminij in baker skupno.

Zagovornik bakra bi utegnil trditi, da je ojačena vrv iz aluminija prav za prav votla in da je krivično govoriti o tekmovalju vodilnih prenosnih kovin v širokem območju prenosnih moči kot o kosanju polne aluminijske z votlo bakreno vrvjo. Ojačena aluminijska vrv pa je le polna, samo specifična omska upornost njenega aluminija je $(1 + \nu)$ -krat povečana. To izraža tudi enačba 59), ki zaide na ta način v novo svetlobo. Resnično votla vrv potrebuje bistveno drugačno mehansko opremo kakor ojačena. Če podraži votlina bakreno vrv kar za 40 odstotkov, more jekleno jedro podražiti aluminijsko vrv le v razmerju $(1 + \nu) : 1$, razen če postanejo jeklene žice jedra dražje od aluminijskih v plašču.

45. Pod vplivom nedvomno izumetničenega razmerja enotnih cen aluminija in bakra je zoženi problem prenosnih kovin sprejel razmerje prenosnih prerezov, ki ustreza razmerju spe-

cifičnih omskih upornosti. Prav za prav so kovinski karteli prilagodili enotni ceni temu razmerju, ker se jim je zdelo nepremakljivo, ker obeta bakreni in aluminijški prenosni progi iste energijske izgube.

Zoženi problem prenosnih kovin pa je, kakor smo videli, globlji. Poseg napetostnega problema v oblikovanje prenosnih vodnikov je močnejši od trgovskih manipulacij, in naravna prenosna moč ima svoje posebno gospodarsko ozadje. Votlina v bakrenem prenosnem vodniku je draga.

V usodnem trenutku, ko je prenosna napetost izsilila votle bakrene prenosne vrvi, je aluminij vdrl v zgoraj opisano široko območje prenosne moči. Tu bi ga bilo zadržalo le dodatno popuščanje v ceni elektrolitnega bakra ali pa višanje njegove enotne cene. Ustrezne kretnje svetovnih kartelov so se izgubile v trušču druge svetovne vojne. Ni izključeno, da se bodo še pojavile. Toda elektrolitni baker je bil tik pred drugo svetovno vojno že obupno cenen.

Da ne bo dvoma: vse prednosti aluminija pred bakrom, ki jih opisuje ta študija, prednosti seveda le v opisanem širokem območju prenosnih moči, so zasidrane v razmerju enotnih cen aluminija in bakra, ki se je že zelo približalo 2 : 1. To razmerje pa je nekoč bilo skoraj 1 : 1. Če bo torej aluminij v načrtnih kolektivnih gospodarstvih postal razmeroma cenejši, bo z dodatno prednostjo odriaval svojega tekmeca.

Sicer pa je v prenosni elektrotehniki vse manipuliranje enotnih cen aluminija in bakra le malo zaleglo. Vse veleprenosne proge za doslej najvišje napetosti (nad 200 kV) so v Franciji in Italiji uporabile aluminij, 90 odstotkov takšnih prog pa v Zedinjenih državah. Samo Nemci so v tem območju veleprenosne elektrotehnike dolgo branili baker.

Niže, v območju prenosne napetosti 100 do 125 kV, so na primer Francozi zaupali dve tretjini svojih prog ojačeni aluminijški vrvi. V širši sliki pa, ki obsega vse prenosne proge z nad 50 kV prenosne napetosti, vidimo v Angliji 85 odstotkov v rokah aluminija, v Nemčiji in Švici pa le nekako tretjino.

Zagovornikom bakra je bila mehanska šibkost aluminija v boju s katastrofalnimi dodatnimi zimskimi bremenmi edina uteha, ko je baker postal že sumljivo cenen. To uteho je pokončalo jekleno jedro v aluminijški vrvi. Zahtevalo je sicer gospodarske žrtve, toda aluminij jih je, kakor smo videli, prenesel.

Mehanska šibkost prenosne vrvi iz čistega aluminija je zagovornikom bakra dokaj močno orožje, ker posega v zelo megleno območje izrednih zimskih mehanskih bremen. To orožje pa zagovornik aluminija prav lahko obrne, če dokaže,

da je ojačena aluminijska vrv mehansko odpornejša od bakrene vrvi. Ustrezni poskus naččenja zanimiv problem.

Enačba 55) ugotavlja, da je v ojačeni vrvi jeklo vselej (3,5-krat) močnejše mehansko obremenjeno kakor aluminij. Rob mehanske zmogljivosti aluminija, ki zdrži trajno 1200 kg/cm², doseže ojačena vrv z aluminijskim delnim prevezom F_{al} potemtakem pod natezno silo:

$$1200 \cdot (1 + 3,5\mu) \cdot F_{al} \cdot 10^{-2} \text{ kilogramov.}$$

Jedro te vrvi ima seveda prevez:

$$F_{al} \cdot \mu \cdot 10^{-2} \text{ kvadratnih centimetrov.}$$

Če bi samo prevzelo vso pravkar izračunano natezno silo, bi bilo obremenjeno s

$$H_j = 1200 \cdot \frac{1 + 3,5\mu}{\mu} \text{ kilogrami/cm.} \quad \dots \quad 60)$$

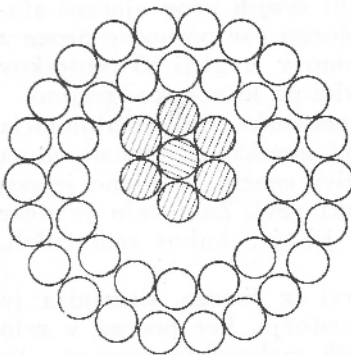
Jeklo s trajno mehansko odpornostjo:

$$1200 \times \frac{1 + \frac{3,5}{6}}{\frac{1}{6}} = 1200 \times 9,5 = 11.400 \text{ kilogramov/cm}^2$$

postane torej praktično važno.

Nemci uporabljajo v prenosni elektrotehniko štiri vrste jekla s trajnimi odpornostmi:

3200, 5600, 9000 in 11.000 kilogramov/cm².



Slika 18.

Če bi vpregli svoje najboljše jeklo, bi dosegli, kar izraža enačba 60), ker uporabljajo prerezno razmerje 6 : 1. Enačba 60) pa predpostavlja jedro, ki se je osvobodilo trenja ob aluminijem plašču, in pa seveda aluminijemski plašč, ki se je popolnoma osvobodil mehanskih bremen.

Vse to je uresničljivo. Slika 18. prikazuje prevez skozi ojačeno aluminijsko vrv, ki ima večjo votlino, kakor pa jo po-

trebuje prerez jeklenega jedra. Takšne prenosne vrvi, ki natezajo samo jedro, v katerih prevzame jedro ves povosni problem na svoje rame, so očitno prav lahko mehansko odpornejše od bakrenih. In če posežejo še po manjšem prereznem razmerju, kakor je 6 : 1, postanejo lahko močno odpornejše. Že:

$$\mu = \frac{1}{5}$$

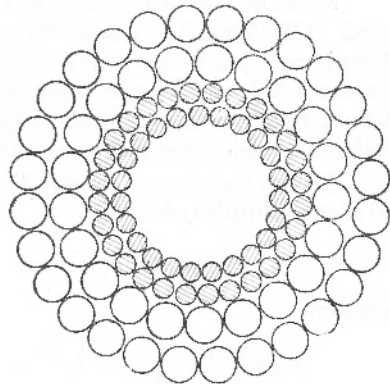
potisne v enačbi 60) potrebno trajno mehansko odpornost jekla za 1200 kg/cm² na 9200 kg/cm².

Pravkar opisana ideja postane važna, ko prekorači ojačena vrv svoj kritični premer. Votle ojačene vrvi so kajpada možne, in veleprenosna elektrotehnika jih dejansko uporablja. Ustrezni prerez prikazuje slika 19. Če pa postane samo aluminijski plašč votel, medtem ko ostane jeklena vrv polna, mora slika 19. zamenjati slika 18.

Vrvi s prerezom, ki ga predlaga slika 18., imajo še to posebnost, da zanihata v primeru nenadne mehanske razbremenitve, na primer če odpade del zimskega lednega plašča, aluminijski plašč in jekleno jedro ločeno. Vsa vrv se s tem reši nepreračunljivih nihanj, ki delajo sodobni veleprenosni elektrotehniki močne preglavice. Ustrezni problem je avtor opisal v svoji knjigi »Problemi prenašanja električne energije« (Državna založba, Ljubljana 1947).

Vse to dokazuje, da vnaša aluminij v območje največjih prenosnih moči in ustreznih prenosnih napetosti dodatno prednost pred bakrom, namreč večjo mehansko zanesljivost. To prednost bi pa lahko uveljavil tudi v območju pod kritičnim premerom svoje ojačene vrvi. Če že umetno votlí svojo vrv, da naredi v votlini prostor za jekleno jedro, sme seveda tudi pretirano votliti, da omogoči mehansko svobodno jekleno jedro. Da potisne s tem kritični premer ojačene vrvi še više, je jasno. Seveda: resnično votla prenosna vrv je vselej precej dražja od dozdevno polne.

Ali se torej velika prednost polne ojačene aluminijske vrvi pred že votlo bakreno nenadoma močno zmanjša, ko postane



Slika 19.

tudi ojačena aluminijaska vrv votla, ko tudi njo zagrabi napetostni problem? Drugače vprašano: ali je aluminij v območju najvišjih prenosnih moči in napetosti bakru manj nevaren tekmeec, ker se mora odpovedati razliki v cenah votlih in polnih vrvi?

Zagovorniku aluminija se ni treba oklepiti večje mehanske zanesljivosti ojačene aluminijske vrvi, čeprav je ravno veleprenosnim progam obratna varnost posebno dragocena. Tudi mu ni treba opozarjati na večje razpetine, ki jih zmore ojačeni aluminij, torej na povečano električno zanesljivost aluminijaskih veleprenosnih prog. V bakrenih veleprenosnih progah bo našel brez napora zelo šibko točko, ki je v aluminijaskih ni.

Kritični premer bakrene vrvi je 10, je ob zmanjšani gostoti (1755 A/mm^2) 12 mm. Skrajna debelina stene v votli bakreni vrvi je, kakor smo videli v 54. odseku (enačba 51), 2,5 oziroma 50 mm. Res je sicer, da je začetna debelina 5 oziroma 6 mm, toda na razmeroma dolgi poti, na kateri tekmuje votla bakrena z ojačeno polno aluminijasko vrvjo, pada bolj in bolj.

Če uveljavimo v enačbi 47a) kritična polmera bakrene in ojačene aluminijske vrvi:

$$r_k = 6 \text{ milimetrov in } r = \frac{23,8}{2} \text{ milimetra (slika 17.)},$$

dobimo:

$$\delta = \frac{23,8}{2} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 6}{23,8}} \right] = 3,53 \text{ milimetra.}$$

Ustrezna cev bi dobila seveda le:

$$3,53 \times \frac{1}{4} = 2,77 \text{ milimetra}$$

debelo steno.

Že na pragu območja, ki zahteva tekmevarja votlih bakrenih in votlih ojačenih aluminijaskih vrvi se potemtakem javlja v bakreni vrvi sumljivo tanka stena. O tej šibki točki bakrene votle vrvi smo razpravljali že v 32. odseku. Tu vidimo, da ima ojačena aluminijaska vrv, ko postaja votla:

$$\frac{23,8}{2} = 11,9 \text{ milimetra}$$

debelo steno, da prodira nedvomno neovirano više in više v območje največjih prenosnih moči, medtem ko mora njena tekunica manjšati gostoto prenosnega toka. In zato postane

jasno, da je aluminij tudi v območju nad kritičnim premerom svoje ojačene vrvi mnogo varčnejša prenosna kovina. Ker pa je, kakor smo videli, umetno postal tudi mehansko zanesljivejši, si je osvojil vso veleprenosno elektrotehniko.

44. Sodobna prenosna elektrotehnika se je mnogo sukala okoli mehanske šibkosti prenosnih vrvi iz čistega aluminija in je hodila tudi po potih, ki so precej daleč od z jeklenim jedrom ojačenih aluminijskih vrvi. Tako važna ji je bi'a po vsem videzu mehanska ojačitev aluminija, da je svojo skrb z vso ostrino izrazila v ustreznih rešitvah.

Aluminij je dokazal v drugih vejah sodobne tehnike, da postane lahko presenetljivo mehansko odporen. Tako imenovani duraluminij je v letalski in ladijski tehniki dosegel izredno vlogo: uspešno je nadomestil jeklo. Duraluminij je seveda v prenosni elektrotehniki sprožil zamisel aluminijske zlitine, ki dobi zaželeno mehansko odpornost, ne da bi nadlegovala s preveliko specifično omsko upornostjo.

Tako so resnično nastale svojevrstne aluminijske zlitine, zgrajene seveda drugače kakor zlitine v ostali tehniki, ki se ne meni za električno upornost. Najpomembnejša med njimi nosi ime aldrey, je švicarski izum in je pod patentno zaščito.

Aldrey ima mehansko odpornost, ki prekaša odpornost čistega aluminija za nekako dve tretjini, kar ustreza nekako 1800 kg/cm^2 . Seveda ima aldrey večjo specifično upornost kakor čisti aluminij, namreč nekako v razmerju

$$1:16 \quad 1.$$

Aldrey vsebuje 98,7 odstotkov aluminija, največ 0,3 odstotka železa, ostanek pa dajeta primeska magnezija in silicija. Ti dve prvini vstopata s pomočjo ustreznega pridobivanja v prostorno kristalno kletko aluminija, kar daje zlitini večjo odpornost proti zunanjim kemijskim vplivom.

V čem je razlika med mehansko in kemijsko ojačeno vrvjo iz aluminija, med vrvjo z jeklenim jedrom in vrvjo iz zlitine aldrey? Prerezuo razmerje 6:1, ki so ga Nemci dali svojim mehansko ojačenim vrvem, večja specifično omsko upornost nekako ravno tako kakor kemijski primeski v zlitini aldrey. S te strani torej ni razlike.

Mehanska odpornost se dvigne v zlitini za dve tretjini nad upornost čistega aluminija, morda celo za sto odstotkov. Varnostni predpisi pa le ne zaupajo popolnoma morebitni stoodstetni ojačitvi in potiskajo dopustni normalni nateg vrvi iz zlitine aldrey na 1200 kg/cm^2 . To je nekoliko več kakor v pri-

meru mehansko ojačene vrvi s prereznim razmerjem 6 : 1. Aldrey pa seveda ne prenese v katastrofalnih primerih več kakor 1800 oziroma 2400 kg/cm², medtem ko kljubuje jekleno jedro mehansko ojačeni vrvi, kakor smo videli, z vso svojo odpornostjo. Aldrey tudi ne premore popolne mehanske razbremenitve aluminija, ki je v mehansko ojačenih vrveh dosegljiva. Ločljivost jedra od aluminijskega plašča je nedvomno važna lastnost mehansko ojačenih vrvi.

Aldrey obdrži specifično težo aluminija (27 kg/dm³), mehansko ojačena vrv jo pa znatno dvigne. Ali ni ustrezno večje mehansko breme neprijeten dodatek mehanske ojačitve? Seveda: železo v zlitini aldrey ne tehta skoraj nič. jekleno jedro pa ima skoraj polovico teže aluminijskega plašča. Obe vrvi, kemijsko in mehansko ojačena, pa dobita nekako isti premer.

Aldrey obeta po vsem tem nekoliko večjo razpetino kakor vrv z jeklenim jedrom. To je nedvomna prednost. Ta prednost pa lahko izgine pod vplivom večje enotne cene. Kemijski postopek, ki ga potrebuje aldrey, povzroča dodatne stroške, in patenta zaščita je vselej gospodarsko breme.

Izredna kemijska občutljivost aluminija narekuje izkušenemu graditelju prenosnih prog veliko previdnost. Ta previdnost je potrebna že v primeru tako imenovanega čistega aluminija, še potrebnejša je v primeru zlitine aldrey. Varnejša pot vodi nedvomno do mehansko ojačene aluminijske vrvi.

Avtor meni, da je neprimerno večja prilagodljivost mehanske ojačitve važna prednost. Zato je prepričan, da bo jekleno jedro v aluminijski vrvi odrinilo zlitino aldrey, ki pa je vendarle kos bakru v veleprenosnih progah. Če je to mnenje neoporečno, nastane naslednja zaključna slika zoženega polkroga prenosnih kovin:

Baker in aluminij obetata nekako iste prenosne stroške, če je enotna cena aluminija skoraj za sto odstotkov nad enotno ceno bakra. Aluminij pa je mehansko nezanesljivejši. V območju nizkih napetosti in razmeroma skromnih prenosnih moči je zato baker aluminiju kos. V tem območju odločajo v borbi med aluminijem in bakrom postranski gospodarski motivi kakor na primer oziri na tuja plačilna sredstva.

Ko doseže bakrena prenosna vrv svoj kritični premer, (10 do 12 mm), postane aluminij nedvomno močnejši in prenese tudi dodatne stroške za svojo ojačitev. V širokem območju prenosnih moči (10.000 do 42.500 oziroma 15.500 do 61.200 kW) je bakrena vrv votla, ojačena aluminijska pa še polna.

Ko doseže tudi ojačena aluminijska vrv svoj kritični premer, (20 do 24 mm), se bori sicer votla aluminijska z votlo

bakreno vrhvo, bakrena pa se že začenja udajati težavam, ki izvirajo iz premajhne debeline stene v votlem prerezu, in mora bolj in bolj nižati gospodarsko najpriporočljivejšo (Keivino-vo) gostoto prenosnega toka. V tem zgornjem veleprenosnem območju pa postaja mehansko ojačena aluminijaska vrv tudi mehansko zanesljivejša od bakrene: s sproščenim jedrom kljubuje katastrofalnim bremenom z vso mehansko odpor-
nostjo jekla in preprečuje izredna nihanja vodnikov, ki vzne-
mirjajo obrat, če odpade zimsko dodatno breme le na delu
razpetine. Sproščeno jekleno jedro omogoča celo povečane raz-
petine.

Vsa ta slika se seveda premakne, če se premakneta pred-
postavljeni enotni ceni bakra in aluminija. Podoba je, da so
svetovni karteli umetno omogočili razmerje enotnih cen, ki
je temelj raziskovanj te študije, in da bo v načrtnem kolek-
tivnem gospodarstvu nastalo pravično razmerje, ki bo še do-
datno podprlo aluminij.

Nova Jugoslavija bo pridobivala baker in aluminij. V
svojem načrtnem kolektivnem gospodarstvu bo našla pravični
odnos aluminija do bakra. Vsekakor pa mora že v začetkih
svojega prvega petletnega gospodarskega načrta misliti na
ogromne množine prenosnih kovin, ki jih bo zahtevala elek-
trifikacija, misliti mora na baker in aluminij in prilagoditi
mora pridobivanje bakra ter aluminija elektrifikaciji. Elektri-
fikacija, ki bi ne upoštevala izsledkov zožnega problema pre-
nosnih kovin, bi pa nedvomno zašla pod nepotrebna gospodar-
ska bremena.

Summary

Planned collective electrification requires extraordinary quantities of transmitting metals. The problem of a most suitable, that means least expensive, metal undoubtedly counts among fundamental problems of electrification. At the starting of the first quinquennial economic plan of the New Yugoslavia, the author is making his researches into this problem.

On principle, as to the problem of the most suitable transmitting metal, it is necessary to examine all metals. There must be made a comprehensive fundamental survey of specific prices, specific weights, and specific ohmic resistances. In such a survey copper and aluminium are leading as a matter of course. On this account the evolution of the specific prices for these two metals during decennial periods is very important for the author's examination.

In the second chapter the author describes the economic structure of transmitting lines. Above all, he considers as important the so called rule of Kelvin determining the most economic density of the transmitting current. Nevertheless, the author demonstrates that in the transmitting electrotechnics, as well as in electrotechnics generally, the primary rule of Kelvin must be completed: economic responsibility for the mechanic support of the conductor is extremely important. As the costs for the supporting poles of a transmitting line are strictly connected with the economic density of the transmitting current, and, jointly, inversely proportional to the corresponding span, i. e. the distance between two neighbouring poles, the author, in the third chapter, has elaborated his theory of span. Results of this theory are concordant with the experiences from the sphere of the real transmitting lines, which is demonstrated by concording comparisons. This new span theory delivers a very important researching instrument for the restricted problem of transmitting metals, i. e. transmitting copper and aluminium.

By means of this instrument, the author, in the fourth chapter, sifts the primary rule of Kelvin and penetrates deeper to most economic densities of the transmitting current in copper and aluminium. At the same time he is successful in deter-

mining the proportion of the costs caused by the poles to the lines of copper and aluminium. Thus a solution of the first degree is obtained for the problem of copper and aluminium. A copper cross-section of some 100 mm² represents the limit between copper and aluminium. The lower reach naturally belonging to copper.

The restricted problem of transmitting metals is raised to a higher degree when wants and necessities of actual long transmission lines are taken into account; first of all the problem of voltage. By the problem of voltage, involving the question of the diameter of the transmission rope, aluminium is obviously coming to the foreground. But the voltage problem is not the only factor in the raised problem of copper and aluminium.

The author has drawn up a cursory sketch of a problem which is extraordinarily important for the actual long transmission lines electrotechnics, i. e. the problem of the so called natural transmitting power. Putting up the natural transmitting power and demands of the voltage problem to forming of transmitting conductors, which, of course, are all contained in the sifted rule of Kelvin, the author obtains surprising results, namely: transmitting conductors have critic diameters which, apparently, they are not permitted to exceed.

The author's theory does not convey to the critic diameters only, but also to a peculiar representation of hollow transmitting conductors. As particularly important, in this theory, there must be considered the results describing the relations between the diameter of a hollow conductor and the intensity of the transmitting current, or the height of the transmission voltage or transmitting power. Here, for the first time, and in connexion with this theory, there appears a sphere where a full transmitting rope of aluminium is competing with a hollow copper rope. This reach is between some 10000 and 30000 kW, it is, of course, very favourable to aluminium.

For gaining ground, aluminium meets great obstacles for its own mechanic weakness. Therefore, in the sixth chapter, the author seizes the problem of an enforced aluminium rope. He, so to say, hollows the aluminium rope in order to put into the cavity a steel core. Thus he examines hollow transmitting ropes demonstrating, by the way, that the walls of hollow copper conductors are quickly thinning out so as to cause a lowering of the transmission current densities, and, consequently, deviating from the conditions of the Kelvin rule. Of course, the author finds out an increased critic diameter in the en-

forced rope and, jointly, an increased reach where a full enforced aluminium rope is still competing with a hollow copper rope.

There are, of course, particular problems concerning the mechanically enforced aluminium rope. The author describes them conformingly with experiences of the actual transmission electrotechnics, he supposes the friction between the aluminium coat and steel core is making up a mechanically uniform rope. On this basis he examines the question of the most favourable proportion of the cross-sections defined by Germans as 6:1.

According to final conclusions of the author, aluminium is obviously coming to the foreground of long transmission lines electrotechnics promising a victory also in the sphere of super-critic diameters of enforced ropes. Finally there are, moreover, enforced hollow aluminium ropes with a free steel core and, naturally, also chemically enforced aluminium ropes (Aldrey).

VSEBINA

<i>Uvod</i>	5
1. Pomen elektrifikacije za načrtno kolektivno gospodarstvo. Problem prenosne kovine kot osnovni elektrifikacijski problem	5
2. Vpliv gospodarskih sistemov na reševanje osnovnih tehniških problemov	7
3. Množina bakra, ki jo bo potreboval prvi petletni gospodarski načrt nove Jugoslavije za elektrifikacijo	9
I. Osnovna slika problema	13
4. Osnovne lastnosti prenosnih kovin	13
5. Aluminij. Njegova razvojna slika. Možne prenosne kovine	15
6. Aluminij in elektrotehnika	18
7. Zožitev problema prenosnih kovin	21
II. Gospodarski stroj prenosnih prog	26
8. Kelvinovo pravilo	26
9. Poglobljeno Kelvinovo pravilo	28
10. Najvarčnejša gostota prenosnega toka v prvotem Kelvinovem pravilu	30
11. Dozdevna podražitev prevodne kovine v poglobljenem Kelvinovem pravilu. Primer transformatorja	33
III. Problem gospodarske razpetine	37
12. „Sistem velikih razpetin“	37
15. Osnova avtorjeve razpetinske teorije. Kritika te osnove	39
14. Razpetina in povse	44
15. Najvarčnejša razpetina	47
16. Razpetina v veleprenosni progi Boulder-Dam-Los Angeles	49
17. Angleški varnostni predpisi in progga Boulder-Dam-Los Angeles	51
18. Razpetina v normalni angleški veleprenosni progi (British Grid Line)	55
19. Razpetine v skromnih prenosnih progah	57
20. Stroški stebrov v bakrenih in aluminijskih progah	60
IV. Baker in aluminij v Kelvinovem pravilu	65
21. Značilne lastnosti prenosnih prog. Prenosni moment	65
22. Segrevanje prenosnih vodnikov	66
23. Poglobljeno Kelvinovo pravilo v teoriji prenosnih prog	69
24. Dozdevne cnotne cene prenosnega bakra in aluminija	71
25. Razmerje stroškov stebrov v progah iz bakra oziroma aluminija. Razmerje ustreznih razpetin	74
26. Kritični bakreni prenosni prerez 100 mm ² . Mehanska šibkost aluminija	76

V. <i>Poseg prenosne napetosti v tekmo aluminija z bakrom</i>	79
27. Razmikanje vzporednih prenosnih vodnikov	79
28. Stališče starejše prenosne elektrotehnike v napetostnem problemu	81
29. Naravna prenosna moč	84
30. Valovni upor. Prenosna napetost in prenosna moč. Stališče sodobne veleprenosne elektrotehnike	87
31. Kritični polmer prenosnega vodnika	90
32. Votli prenosni vodniki	92
33. Votli vodnik proge Poulter—Dam—Los Angeles in normalne angleške veleprenosne proge	95
34. Debelina stene v prerezu votlega prenosnega vodnika	97
VI. <i>Ojačeni prenosni vodniki iz aluminija</i>	101
35. Pregled čez že dograjeni del zoženega problema prenosnih kovin	101
36. Norme Zvezo nemških elektrotehnikov za polne prenosne vrvi	103
37. Predlagane nemške norme za votle bakrene prenosne vodnike. Nižanje gostote prenosnega toka v prid debelini stene v votlem prerezu	106
38. Dozdevna votlina v mehansko ojačeni aluminjski prenosni vrvi. Jekleno jedro	109
39. Značilne lastnosti mehansko ojačene aluminjske vrvi	112
40. Stroški mehanske ojačitve aluminjskih prenosnih vrvi. Priporočljivo prerezno razmerje	115
41. Nemške norme za mehansko ojačene prenosne vrvi iz aluminija	121
42. Kritični premer mehansko ojačene aluminjske vrvi. Tekmovalno območje že votle bakrene in še polne aluminjske vrvi	123
43. Jekleno jedro v ojačeni vrvi. Sproščeno jedro. Votla ojačena vrv iz aluminija	126
44. Aldrey. Primerjava mehansko in kemijsko ojačene aluminjske vrvi. Zaključna slika	111

*Sprejeto na seji razreda za matematične, prirodoslovne,
medicinske in tehnične vede dne 16. julija 1947*

Received July 16, 1947

