

AKADEMIJA ZNANOSTI IN UMETNOSTI V LJUBLJANI  
MATEMATIČNO - PRIRODOSLOVNI RAZRED

D E L A

2

# VELETRANSFORMATORSKI PROBLEMI

MILAN VIDMAR



LJUBLJANA

1943



VELETRANSFORMATORSKI  
PROBLEMI



# VELETRANSFORMATORSKI PROBLEMI

MILAN VIDMAR

1943

---

IZDALA AKADEMIJA ZNANOSTI IN UMETNOSTI  
V LJUBLJANI

VELETRAJNSPORMATORSKI  
PROBLEMI

MILAN VIDMAR

NATISNILI J. BLASNIKA NASL.,  
UNIVERZITETNA TISKARNA, LITOGRAFIJA D. D. V LJUBLJANI  
ODGOVOREN V. JERŠEK

## PREDGOVOR

Nekako pred tridesetimi leti me je v Budimpešti stanovski tovariš presenetil z vprašanjem, da li ima transformatorska panoga res še nerazčiščene probleme, o katerih naj pišemo razprave. Menda je na moji mizi zagledal rokopis, ki sem ga ravno zaključeval. Takrat sem začel priobčevati svoje prve članke o transformatorskih problemih.

Ne vem več, kaj sem v prvi zmedi odgovoril. Toda nevede sem nedvomno dolgih trideset let odgovarjal, ker sem o transformatorjih mnogo pisal: članke, razprave in obsežne knjige. Pa bi danes brez odlašanja odgovoril, da je še obilo transformatorskih problemov, ki jih bo treba opisati.

V juniju 1941. l., po tridesetletnem specialnem znanstvenem delu, torej razmeroma pozno, sem se nenadoma zavedel potrebe, ogledati si transformatorsko panogo tudi od zunaj. Kdor se preveč zakoplje v svojo stroko, vidi njene probleme samo od znotraj in zato le v delni svetlobi. Sredi vojnega trušča me je slika, ki sem jo zagledal s svojega novega razgledišča, silno zagrabila. Z vso vnemo sem jo začel opisovati. Obširno delo o transformaciji in prenašanju električne energije mi je takó začelo nastajati.

Ne vem, kdaj ga bom dokončal, čeprav se mi zdi, da že dozoreva. Toda to dozorevajoče delo je sprožilo nazadnje tudi zamotana vprašanja o še možnih zelo velikih transformatorskih konstrukcijah in vstavilo se je pred njimi.

Seveda sem se zapreke takoj lotil. Spomnil sem se pa hkratu nekaterih sijajnih vrinkov, ki jih je Galsworthy kot nekakšne pravljичne otoke postavil v morje svojih velikih romanov. Spomnil sem se tudi intermezzov v operah, ki jih ljubim in že sem bil na tem, da postavim v knjigo o transformaciji in prenašanju električne energije popolnoma samostojno poglavje o veletransformatorskih problemih.

Premislil sem se. Nisem praktik, ki išče v knjigah o tehničnih problemih suhoparno naštevanje doseženih izsledkov ter pozablja, da ima tudi tehnika svojo poezijo in filozofijo, brez katerih tehnik ne more živeti. Bolj kot kedaj prej sem danes prepričan, da je obširna razprava o zamotanih tehničnih

problemskih kompleksih prav lahko simfonija idej — če jo piše dovolj razgledna glava. Toda intermezzo uspe le mojstru. Zato sem ubral drugo pot.

Kompleks veletransformatorskih problemov zasluži itak svojo samostojno razpravo. Veliki elektrifikacijski problemi, ki se obetajo civiliziranemu svetu, ki bodo prav gotovo z vso silo pritisnili, ko bo končana sedanja svetovna vojna, kriče po zelo velikih transformatorjih. Brez njih bi nastal zastoj, ki ga izmučeno človeštvo ne bi brez škode preneslo.

Zdi se mi, da se mi je posrečilo osvetliti idejo velikega transformatorja z vseh strani in načeti vse važne veletransformatorske probleme. Marsikatero med njimi sem našel že pravilno rešene, druge sem rešil sam. Pred vsem pa sem po svoje ugotovil razvojno smer veletransformatorske panoge in jo opisal.

Razprava vodi vse do današnje bojne črte. Tam je še vse negotovo in nedognano: vsaka prava borba je pač negotova. Zdi se mi pa, da sem tudi drzno posvetil v temo, v katero prodira današnja transformatorska panoga.

Zagledal sem, vsaj zdi se mi takó, končni smoter veletransformatorskih problemov in konec razpravljanja o njih: transformatorska panoga mi namreč vidno dozoreva in mi kot živa tvorba celó že umira. Že se ji plaho oglašajo spomini na prve začetke: najstarejše njene ideje poskušajo postati najnovejše. Življenjski krog se torej kompleksu transformatorskih problemov vidno sklepa.

Razpravica, ki jo s temi uvodnimi besedami spremljam do vrat v strokovni svet, bi bila najbrže čakala na milejše čase, da je ni slovenska Akademija znanosti in umetnosti prevzela v svoj publikacijski program. Hvaležen sem za pomoč, ki sem jo našel na domačih tleh.

Iz domačih tal so zrastle strokovni izrazi, ki jih razpravica uporablja. Pred leti jih je v krogu učiteljev Elektrotehniškega instituta na naši univerzi pregledal prof. dr. A. Breznik. Ko pa sem dovrševal rokopis te knjige, sem se pogosto zatekal k prof. dr. F. Ramovšu, ki mi je vselej rad pomagal in nazadnje tudi pregledal slovarček na koncu knjige. Obema mojstroma našega jezika se iskreno zahvaljujem za ljubeznjivo pomoč.

Hvaležen pa sem tudi svojemu zvestemu pomočniku, g. inž. Romanu Ponižu, ki je verno sledil mojemu raziskavanju, pazljivo ponavljal moje račune, opozarjal na nedostatke in sestavljal po mojih površnih skicah z večjo roko jasne rizbe.

ki spremljajo besedilo te razprave. Rad se zahvaljujem tudi g. dr. inž. V. Bedjaniču, docentu v Ljubljani, ki je pazljivo bral moj rokopis in mi z marsikatero koristno opombo izdatno pomagal.

Upam, da sem zgradil vsaj zdravo ogrodje problemskemu kompleksu, ki objema na videz le zelo tanko vejico elektrotehnične panoge. Če se mi je to res posrečilo, sem pa dosegel več kot se zdi: veletransformatorski problemi vodijo namreč vso transformatorsko panogo, ta pa usmerja od nekdanje vso prenosno tehniko.

Ljubljana, 6. januarja 1943.

Milan Vidmar.

---



## VSEBINA

	Stran
I. Ideja velikega transformatorja . . . . .	1
1. Ideja velikega transformatorja . . . . .	1
2. Zakaj gradimo velike transformatorje . . . . .	3
3. Gospodarska vsebina ideje velikega transformatorja . . . . .	5
4. Napetostni problem veletransformatorja . . . . .	7
II. Poglobljena ideja velikega transformatorja . . . . .	10
5. Napetostni in temperaturni pritisk. Morebitno popuščanje elektromagnetnih gostot . . . . .	10
6. Omejevanje elektromagnetnih gostot v transformatorski panogi . . . . .	12
7. Gospodarski pomen elektromagnetnih gostot . . . . .	14
8. Razkosavanje navitij na tuljavnice . . . . .	16
9. Vzbujaalni problem in napetostne izgube . . . . .	19
10. Kratkostični problemi . . . . .	22
11. Zaključna slika poglobljene ideje velikega transformatorja . . . . .	25
III. Transformacijski stroški ob predpisanih elektromagnetnih gostotah . . . . .	28
12. Problem transformacijskih stroškov . . . . .	28
13. Raziskovalni postopek problema. Vpliv močnosti na osnutek . . . . .	30
14. Prvi vpogledi v teorijo transformacijskih stroškov . . . . .	33
15. Poglobljena slika . . . . .	35
16. Transformacijski stroški in oblika transformatorja . . . . .	39
17. Konstruktivna invarianta . . . . .	43
18. Zakon o jarmih . . . . .	45
19. Najugodnejši relativni premer stebra . . . . .	48
20. Zaključna razmotrivanja . . . . .	51
IV. Vpliv elektromagnetnih gostot na transformacijske stroške . . . . .	54
21. Vpliv elektromagnetnih gostot na konstruktivno invarianto . . . . .	54
22. Statične in dinamične enotne cene železnih jeder in navitij . . . . .	57
23. Najugodnejši elektromagnetni gostoti. Starejši vidiki . . . . .	59
24. Težave, ki zavirajo magnetno gostoto . . . . .	62
25. Poseben primer najugodnejših elektromagnetnih gostot . . . . .	65
26. Najugodnejši relativni premer stebra ob svobodnih elektromagnetnih gostotah . . . . .	68

	Stran
V. Pot transformatorske panoge skozi deset- letja . . . . .	73
27. Primer suhega transformatorja za 10 kVA, 10.000 V, 50 Hz . . . . .	73
28. Vpliv polnilnega faktorja navitja na osnutek . . . . .	73
29. Sodobna utemeljitev nekdanjega osnutka za suhi trans- formator 10 kVA, 10.000 V, 50 Hz . . . . .	78
30. Bremenski diagrami in enotne cene za v transforma- torju potrošene kilovatne ure . . . . .	80
31. Letne obratne ure, ki ustrezajo Jouleovi toploti v navitju . . . . .	84
32. Enotne cene za letne kilovate v velikih električnih go- spodarstvih . . . . .	88
33. Prestop transformatorja iz zraka v olje . . . . .	91
34. Stremljenja graditeljev v zadnjih letih pred prvo sve- tovno vojno . . . . .	93
35. Vpliv relativnega premera stebra na elektromagnetne gostote. Pomen zmanjšanih električnih gostot . . . . .	95
VI. Osnutek z zadržano magnetno gostoto . . . . .	101
36. Veletransformator za 16.000 kVA, 4.000/56.000 V, 50 Hz. Dodatne energijske izgube v železu in bakru . . . . .	101
37. Dosegljiva magnetna gostota v veletransformatorskem območju . . . . .	104
38. Kritika nekdanjega osnutka za 16.000 kVA, 4.000/56.000 V, 50 Hz . . . . .	107
39. Pretirane električne gostote v nekdanjih veletransfor- matorjih . . . . .	109
40. Gospodarske korenine pretiranih gostot . . . . .	112
41. Najpriporočljivejše elektromagnetne gostote transfor- matorja za 16.000 kVA. Zakon o energijskih izgubah v železu . . . . .	114
42. Vpliv eksponenta v zakonu za energijske izgube že- leznih jeder na osnutek . . . . .	116
43. Vpliv eksponenta v zakonu za energijske izgube že- leznih jeder na najpriporočljivejšo magnetno gostoto . . . . .	121
44. Osnutek z zadržano magnetno gostoto . . . . .	123
VII. Resnični vzgon ideje velikega transfor- matorja . . . . .	125
45. Rastoči polnilni faktor navitja in transformacijski stroški . . . . .	126
46. Polnilni faktor navitja in konstruktivna invarianta . . . . .	128
47. Navadna in boljša transformatorska pločevina . . . . .	131
48. Polnilni faktor navitja kot osrednji čimtelj transfor- matorskih osnutkov . . . . .	135
49. Transformacijski stroški velikega transformatorja . . . . .	136
VIII. Potujoči veletransformator . . . . .	139
50. Pojem transformatorske močnosti . . . . .	139
51. Dopustna in gospodarska močnost . . . . .	141

	Stran
52. Reguliranje močnosti . . . . .	145
53. Problem obratne varnosti. Rezervni transformatorji . . . . .	145
54. Ali naj rezervni transformator trajno sodeluje . . . . .	147
55. Ideja potujočega transformatorja . . . . .	151
56. Zunanji ukrepi proti pritisku železniškega profila . . . . .	153
57. Transformator na kolesih . . . . .	153
58. Možne najvišje transformatorske močnosti v električnem gospodarstvu . . . . .	158
<b>IX. Zaključni veletransformatorski problemi</b>	<b>161</b>
59. Realnost zaključnih veletransformatorskih problemov . . . . .	161
60. Peterostebrno jedro . . . . .	163
61. Zmanjšana konstruktivna višina peterostebrnega transformatorja . . . . .	166
62. Vdor čez doslej zadržane magnetne gostote . . . . .	169
63. Izločitev trojnofrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosne proge . . . . .	172
64. Izločitev petero- in sedmerofrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosne proge . . . . .	175
65. Dosegljive magnetne gostote in zakon o energijskih izgubah v železu . . . . .	178
66. Nesimetrija dosedanjih trofaznih železnih jeder. Tempeljska tipa . . . . .	181
67. Zadnji sodobni konstruktivni poskusi v veletransformatorski panogi . . . . .	184
Posnetek . . . . .	187
Riassunto . . . . .	195
Zusammenfassung . . . . .	199
Slovarček . . . . .	205
Znaki . . . . .	210



## I. IDEJA VELIKEGA TRANSFORMATORJA

1. Ob prehodu iz devetnajstega v dvajseto stoletje se je transformatorska panoga že ponašala s konstrukcijami, ki so zmogle nekako tisoč kilovoltamperjev (kVA). Znano delo „Die Transformatoren“ E. Arnolda in I. L. la Courja (J. Springer, Berlin), izdano 1904. leta, n. pr., opisuje trofazni transformator tvrdke Maschinenfabrik Oerlikon za 1000 kVA, 27000/3000 voltov (V), 50 hercev (Hz), pa tudi trofazni transformator tvrdke Brown, Boveri & Co za 1400 kVA, 26000/3000 V, 50 Hz. Švicarska elektroindustrija je očitvidno že zgodaj gojila idejo velikega transformatorja.

V tistih časih, pa tudi skozi vse prvo desetletje našega stoletja, je odvajanje obratne toplote izdatno zaviralo grajenje velikih transformatorjev. Oba pravkar omenjena primera očitujeta izredne napore v smer hlajenja navitij in železnih jeder. Ti naporu pa so bili seveda še neokretni in nepopolni: transformatorska panoga je potrebovala obilo časa, poskusov in teoretskih raziskavanj za svoj prvi veliki problem, ki nima prav za prav nobene domovinske pravice v svetu električnih tokov in magnetnih fluksov.

Tik pred prvo svetovno vojno je v Budimpešti odvajanju obratne toplote velikega transformatorja dozorela rešitev. Leta 1912. je dogradila tvrdka Ganz villamosági r. t. trofazni transformator za 8000 kVA in leto kasneje orjaški trofazni transformator za 16000 kVA. Kako temeljito je dr. techn. h. c. O. T. Bláthy v teh dveh konstrukcijah premagal vse težkoče hlajenja, izpričuje najzgovorneje dejstvo, da je transformator za 16000 kVA zmogel trajno tudi 20800 kVA, če je bilo treba.

Ta dodatna, pa neizkoriščena zmogljivost velikega transformatorja je prav za prav važen problem zase, vsaj takrat. pred tridesetimi leti, je bila problem. Vprašanje, zakaj naj stroj ne obratuje z vso svojo dopustno zmogljivostjo, z vso svojo dopustno navidezno močnostjo, zanima seveda vsakega praktika. Odgovor bo dozorel mimogredé v tej razpravi, kakor se ji je vprašanje vsililo mimogredé.

Med prvo svetovno vojno so na temelju Bláthyjevih idej v nemških tovarnah zrastle nadaljni transformatorski velikani. Dosegli so 30.000 kVA. Potrebni so bili za ogromne tvornice za

dušik, ki jih je ustvarila vojna. Sicer pa je vojna seveda zavirala grajenje velikih transformatorjev.

V tretjem desetletju tekočega stoletja, po končani svetovni vojni, je transformatorska panoga nadaljevala z nesluteno energijo svoje delo. Elektrifikacija dežel in celih držav je takrat pač že postajala neodločljiv problem. Veliki elektrifikacijski načrti pa ostanejo neizvršljivi, dokler ne dozore ustrezajoče transformatorske konstrukcije.

Od nekdanj potrebuje prenos električne energije v daljavo transformacijo. Kar zmore transformator, zmore tudi prenosna proga. Transformator je zato elektrotehnik v pravem pomenu besede „pacemaker“.

Navidezna močnost transformatorja je kmalu po prvi svetovni vojni dosegla 60.000 kVA, nato celo 100.000 kVA. Hkratu so ti transformatorski velikani postali kos visokim napetostim: 100.000 V ni bil zanje noben problem več. Povzpeli so se na 220.000 voltov in omogočili s tem prenos električne energije čez cela državna ozemlja, n. pr. iz Tirolske v Porurje.

Danes se transformatorska panoga muči s problemom transformatorja za 150.000 kVA, 400.000 V, 50 Hz. Nesporno je zašla v nekakšno zagato. Polet, ki jo je vodil s presenetljivo hitrostjo navzgor, je nekako strtl. Občutek, da se žetvi bliža konec, da čez neko najvišjo močnost ne bo mogoče večati velikih transformatorjev, tesni vse izkušene graditelje.

V takšnem položaju dozoreva nehoté kritika ideje, ki je bila gonilna sila na strmi poti. Misli, ki so bile tako dolgo usmerjene navzgor, se pač nujno obrnejo navzdol, če zagledajo pred seboj neprodarno steno. Kaj je prav za prav ideja velikega transformatorja? Zakaj smo toliko časa gradili večje in večje transformatorje? Kaj bomo počeli, če se razvoj, ki se nam je zdel takó potreben, takó nujen, takó nezadržen, resnično ustavi?

Ali pomeni kriza velikega transformatorja, ki se že izraža v različnih presenetljivih spremembah starih onovnih gradbenih načel transformatorske panoge, krizo izmeničnega, bolj rečeno vrtilnega toka v elektrifikacijskih problemih? Saj je transformator doslej resnično utiral pot celokupni elektrotehniki.

Ni golo naključje, da so zadnja leta polna razprav o prenašanju električne energije z enosmernim tokom. Prenosna tehnika nekako slutí, da ji je dosedanji voditelj, transformator, opešal. V resnici peša sicer samo ideja velikega, vse večjega transformatorja. Toda morda tiči za njo še kaj. Kakšna pa je prav za prav? Kako je nastala? Od kod je jemala svojo nesporno gonilno silo?

2. Zakaj gradimo velike transformatorje? Ker jih potrebujemo? Ker gradimo večje in večje elektrarne, daljše in daljše prenosne proge, ker prenašamo večje in večje močnosti, ki jih seveda moramo transformirati, da postanejo prenosu užitne?

Vsaka močnost je deljiva. Sporedno obratovanje transformatorjev je tako staro kakor transformator sam. Transformacijo 100.000 kVA naprtim lahko enemu samemu velikemu transformatorju ali pa n. pr. desetim transformatorjem, izmed katerih vsaki zmore 10.000 kVA. Potrebe, resnične, nujne potrebe, velikega transformatorja torej ni. Elektrotehnika bi lahko nadaljevala svojo pot, če bi se ji močnost velikega transformatorja ustavila. O tem ne more biti dvoma.

Elektrotehnika posega dandanes tako vsestransko v vsakdanje življenje, da ni treba obširno razpravljati, kako važna je obratna zanesljivost elektrarn, prenosnih prog in razdeljevalnih omrežij. Vsakdo ve, kako neprijetne, kako škodljive so obratne motnje. Torej je važno, torej je izredno važno, da transformator zanesljivo opravlja svojo službo. Torej je važno, da se transformatorju, ki oskrbuje razdeljevalno omrežje, nič ne dogodi, kar bi ga vrglo iz obrata. Torej je še važnejše, da se velikemu transformatorju ob začetku in ob koncu dolge prenosne proge, ki oskrbuje številna posamezna razdeljevalna omrežja s posredovanjem njihovih malih transformatorjev, nič neprijetnega ne primeri.

Vsak stroj, tudi vsak transformator, je ranljiv. Ali ni tedaj pametneje razdeliti močnost prenosne proge na več manjših transformatorjev kot jo zaupati nerazkosano enemu samemu velikanu? Če se temu kaj pripeti, je vsa naprava mrtva, če se ponesreči eden izmed sporedno delujočih manjših transformatorjev, nesreča ni velika. Čemu kopičimo tedaj kilovoltamperje?

Da poenostavljamo transformatorske postaje? Da ne potrebujemo preveč prostora, prevelikih zgradb zanje? Da v njih ne zaposlujemo preveč strokovnega osebja? Da imamo preglednejše, preprostejše transformacijske naprave?

Res je, da potrebuje več manjših transformatorjev več prostora kot en sam velik za isto skupno močnost. Toda velike transformatorske postaje navadno ne potrebujejo zidanih bivališč, njihova obratovališča so kar na prostem. Res je, da je transformacijska naprava z enim samim velikim transformatorjem zelo pregledna in preprosta. Toda transformatorji obratujejo skoraj brez nadzorstva. Transformatorsko postajo zakleneš in jo prepustiš samo sebi. Torej ne smemo utemelje-

vati potrebnosti velikih transformatorjev z manjšimi izdatki za strokovno osebje, ki ga prav za prav ni.

Ne, vse to: potrebni obratni prostor, preglednost naprav, oskrbovanje obratujočih transformatorjev, ne utemeljuje stremjenja, ki ga je očitno sprožila ideja velikega transformatorja. Vsi ti oziroma oblede, če jih postavimo poleg dejstva, da obratuje več manjših transformatorjev zanesljiveje od enega samega velikega. Če hočemo torej res razumeti kopicenje kilovoltamperjev, ki je tako značilno za razvoj transformatorske panoge, moramo iskati globlje. Ideja velikega transformatorja je očitno zamotanejša kot se zdi, ali pa je utvara.

Morda pa smo res le zato segali po večjih in večjih močnostih, ker se nam je zdelo imenitno graditi velike transformatorje. Človeku, in ne samo preprostemu, zbuja vse spoštovanje, kar je veliko. Vsi strmimo v vesoljstvo; pa tudi, če stojimo pred velikansko palačo, pred ogromnim mostom. Vsi živimo v „veliki“ dobi, če nas premetavajo močni dogodki. Zato ima tudi velik transformator za nas nek poseben pomen, ki ga težko opišemo. Velik je pač.

Svobodno tekmovanje velikih tvrdk, ki so v preteklih desetletjih gradile transformatorje, je rodilo marsikaj, kar ni zasidrano v resničnih, nujnih potrebah elektrotehnike. Poseglo je tudi po čaru velikih konstrukcij. Kdor zmore veliko zgradbo, zmore seveda tudi vse manjše. Kdor je kos največjemu doslej zgrajenemu transformatorju, je seveda sposobnejši graditelj manjših transformatorjev kot njegovi tekmeči. To je logika vsakdanjega življenja, logika poslovnega človeka, ki se oklepa videza, kjer mu manjka strokovnega vpogleda.

Nedvomno je zrastel dobršen del stremjenja po velikih močnostih — seveda ne samo v transformatorski panogi — iz kalnih vod nebrzdanega kapitalističnega gospodarstva, ki je vodilo vsa mlada, pa tudi zrelejša leta elektrotehnike. Toda misliti, da je ideja velikega transformatorja v resnici samo spreten reklamni domislek, bi bilo vendarle naivno. Preveč resnega, trudapolnega, občudovanja vrednega dela preštevilnih treznih, iznajdljivih, zelo resnih glav tiči v neštetih transformatorjih, da bi bilo mogoče tako preprosto, tako porazno preprosto, odpraviti idejo, ki se je zgodaj pojavila v transformatorski panogi, prebolela svoje začetne bolezni, se bujno razvila, žela uspehe, dozorevala, idejo, ki sedaj nekako peša, ker se je morda preživela, ki pa je ravno zato gotovo imela svoje resnično življenje.

Raziskavanje ideje velikega transformatorja je potrebno. To dokazujejo že bežna, površna razpravljanja teh vrstic. Pa

saj obeta izsledke, ki bodo gotovo marsikaj razjasnili, kar je ostalo doslej megleno, ki bodo marsikaj našli, kar še iščemo. Sicer pa, če smo z velikim transformatorjem res zašli v zagato, moramo vendar dognati, zakaj smo zašli, in če ni izhoda, moramo vedeti, da ga res ni.

3. Denimo, da smo zgradili transformator, ki zmore močnost  $N_0$  (kVA). Dodajmo, da ustreza konstrukcija vsem zahtevam, da potrebuje kar se dá malo železa in bakra, da se v obratu ne segreje preveč, da ne troši v nemar energije, ki naj jo preoblikuje. Kaj bomo ukrenili, če naj zgradimo transformator za večjo močnost?

Najbrže bomo preprosto spremenili merilo gradbenega načrta, ki nas je vodil do prvega uspeha. Gotovo ne bomo spreminjali oblike stroja, ki je že dokazala, da je dobra. Obdržali jo bomo. Novi transformator naj postane samo večji, ostane pa naj dober.

Toda transformator ni samo kup železa in bakra, ki ima svojo posebno obliko. Po njegovih bakrenih ovojih se pretakajo električni toki, po njegovem železnem jedru polje magnetni fluks. Gostota toka, merjena v amperjih na  $\text{mm}^2$  ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) in gostota fluksa, merjena v smernicah na  $\text{cm}^2$ , v gausih (G) kakor pravimo, označujeta transformator ravno takó, kakor ga označujejo njegove poglavitne mere.

Neradi bomo spreminjali ustroj električnega toka in magnetnega fluksa v transformatorju, če vemo, da sta bili dosedanji gostoti obeh dobri, prikladni. Navaliti več amperjev na  $\text{mm}^2$ , oziroma več smernic na  $\text{cm}^2$ , je seveda tudi pot do večje močnosti. Most, ki zdrži 10 ton, postane „večji“, če mu navalimo 15 ton. Pa če se zruši pod prevelikim bremenom?

Prava pot do večje močnosti je tedaj v transformatorski panogi po vsem videzu tale: vse mere že preizkušene konstrukcije je treba enakomerno, recimo  $x$ -krat, povečati, elektromagnetni gostoti pa hkratu obdržati. Kam vodi ta pot, je problem: problem velikega transformatorja.

Če povečam vse mere transformatorju, ki zmore  $N_0$  kVA,  $x$ -krat, povečam vse njegove prereze, torej tudi prerez ovoja in prerez železnega jedra,  $x^2$ -krat. Če potem obdržim stari gostoti toka in fluksa, postaneta hkratu tok in fluks  $x^2$ -krat močnejša: močnost se poveča  $x^4$ -krat.

Seveda postaneta takó navitje kot jedro transformatorja  $x^3$ -krat težja, če so vse mere  $x$ -krat porastle. Povečani transformator je po vsem tem  $x^4$ -krat zmogljivejši, toda samó  $x^3$ -krat težji. Za tem dejstvom se skriva ideja velikega transformatorja.

Gradbeni stroški ostanejo prilično proporcionalni teži transformatorja, dokler se njegova oblika ne spremeni. Stroški energijskih izgub v obratujočem transformatorju pa so tudi proporcionalni njegovi teži, dokler ne spremenimo elektromagnetnih gostot in oblike konstrukcije. Očividno je transformator tem cenejši sotrudnik električnega gospodarstva, čim večji je.

Transformiranje enega kilovoltamperja postane 10-krat cenejše, če ga poverimo transformatorju za 100.000 kVA, namesto da bi ga prepustili majhnemu transformatorju za 10 kVA. Transformacijski stroški enega kilovoltamperja so pač obratno proporcionalni četrtemu korenu iz močnosti vprežnega transformatorja. Ideja velikega transformatorja je po vsem tem gospodarska ideja. Njena gonilna sila pa je očitno izdatna.

Problemu velikega transformatorja je potrebna posebna oblika pravkar ugotovljene odvisnosti transformacijskih stroškov  $S$  od močnosti  $N$ . Izraz:

$$\frac{S}{N^{\frac{1}{4}}} = \text{konst.} \quad \dots \dots \dots 1)$$

je nekakšna transformatorska invarianta določene oblike in določenih elektromagnetnih gostot.

Ta invarianta je hkratu edino neoporečno merilo gospodarnosti transformatorja. Vsaka sprememba oblike in vsaka sprememba gostot spremenita konstrukcijsko invarianto po enačbi 1). Graditelj transformatorjev išče neumorno varčne konstrukcije. Zato skrbno opazuje konstrukcijsko invarianto, ne pa gradbene stroške, ki se itak sami zmanjšujejo z rastočo močnóstjo.

Človek bi mislil, da je ideja velikega transformatorja takó prozorna, preprosta in močna, da mora biti odveč, razpravljati na dolgo in široko o problemu velikega transformatorja. Saj uče izkušnje desetletij, da ji je težko oporekati. Vsak izkušen graditelj transformatorjev ve, da rastejo transformatorju mere res s četrim korenom iz močnosti.

Toda že sama ugotovitev ideje velikega transformatorja opozarja mimogredé na možnosti, ki utegnejo delati pregla-vice. Stroški transformacije rastejo drugače kot močnóst. Morda pa rastejo tudi druge važne lastnosti transformatorja — transformacijski stroški so le ena izmed njih — drugače kot močnóst, morda celó po zelo nevšečnih zakonih.

Vzemimo za primer odvajanje obratne toplote. Če res ne smemo v transformatorju prekoračiti neke temperature ( $110^{\circ}\text{C}$ ), smemo računati ne gledé na velikost konstrukcije le z določeno temperaturno napetostjo, ki naj goni toploto iz bakra in železa. Torej so hladilne površine navitij, jedra, kotla izredno

važne. Če ne rastejo tako kot energijske izgube, morajo nastati težave.

Z  $x$ -kratnim povečanjem vseh mer konstrukcije rastejo hladilne površine seveda tako kot  $x^2$ . Energijske izgube pa se dvigajo, kakor smo zgoraj ugotovili, tako kot  $x^3$ . Čim večji je torej transformator, tem težje se bori s svojo obratno toploto.

Primer naj zadostuje. Problem velikega transformatorja je očitvidno resničen problem. Ima pa, kakor bomo videli, globine, ki mu jih je težko prisoditi. Celó resnična presenečenja ima pripravljena za raziskovalca, ki se pogloblja v njegove posebnosti.

4. Ideja velikega transformatorja je tako preprosta in prozorna, da ji vidi do dna tudi človek, ki ni nikoli gradil transformatorjev. Njena gospodarska tvorna sila je neoporečno zelo izdatna. Toda graditelj transformatorjev vidi v nji še nekaj, kar mu je zelo dragoceno, kar podžiga njegove napore. Ideja velikega transformatorja namreč ni čista gospodarska ideja, njen skriti tehnični privesek jo celó izdatno oplemenjuje.

Transformator je prenosu električne energije steber. Vdril je v mlado elektrotehniko, ko se je izkazalo, da enosmerni tok ne zmore prenosnih razdalj čez nekako dva kilometra. Prenosna proga potrebuje pač svojo obratno napetost, razdeljevalno omrežje pa svojo.

Prenosna tehnika je seveda neprestano večala dolžine svojih prog. Zgodaj pa je spoznala, da mora večati prenosno napetost nekako proporcionalno prenosni dolžini. Staro preizkušeno pravilo zahteva tisoč voltov za vsako miljo, torej na primer 6000 voltov za nekako 10 km. V tem pravilu, ki je dobro vodilo vso mlado prenosno tehniko, nima prenesena močnost nobene besede.

Problem prenosa električne energije pa seveda ni tako preprost, da bi bilo mogoče ga odpraviti z enim samim preprostim pravilom. Prenosna močnost pride poleg prenosne razdalje nazadnje gotovo tudi do besede. Saj je prišla. V največjih prenosnih problemih odloča dandanes močnost, prenosna razdalja pa molči poleg nje.

Na kratko povedano: prenos malega formata ima svoje posebnosti, oni velikega formata pa svoje. V vseh prenosnih problemih sodelujeta močnost in razdalja, toda vpliv se jima spreminja z velikostjo problema. Problem je krenil na svojo pot pod izključno oblastjo razdalje, kasneje sta ga mučili razdalja in močnost, nazadnje, ko so razdalje in močnosti postale ogromne, pa je močnost prevzela skoraj vso oblast.

Danes merimo prenosne močnosti z megavati (MW), prenosne napetosti pa s kilovolti (kV); pred desetletji sta bila kilovat (kW) in volt (V), tisočkrat manjši merilni enoti torej, dovolj velika. Danes imamo za največje prenosne probleme novo, zopet dokaj preprosto pravilo. Če računamo kar z megavati in kilovolti, namesto da bi govorili o močnostih in napetostih, dobimo nekako:

$$kV \doteq 40 \cdot \sqrt[5]{MW} \dots \dots \dots 2)$$

Po tem pravilu bi potrebovali na pr. za prenos 800 MW = 800.000 kW prenosno napetost 571 kV = 571.000 voltov ne glede na dolžino prenosne proge. Za 200 MW bi bilo 234 kV dovolj, za 100 MW pa bi potrebovali nekako 184 kV.

To pravilo ni slabše, pa tudi ni boljše od onega starega pravila, ki je v svojem delokrogu prilagodevalo prenosne napetosti milijam prenosne proge. Dolžina prenosne proge nima v novem pravilu, veljavnem za velike prenosne proge, nobene besede. V resnici pa je prenos čez 200 km vendarle različen od prenosa čez 1500 km, čeprav ne zeló.

Za problem velikega transformatorja je seveda dejstvo, da raste potrebna prenosna napetost s tretjim korenom iz prenesene močnosti, če je le prenosni problem dovolj velik, to se pravi takšen, da mora poseči po velikih transformatorjih, izredno važno. Saj mu cepi nalogo: večanje močnosti je in ostane njegov poglavitni smoter, toda večanje napetosti ga mora spremljati.

Res se sodobna transformatorska tehnika zelo muči z napetostnimi problemi: 400.000 voltov bi rada čim prej dosegla. Specialisti mnogo govore o težavah, ki leže med doseženimi 220.000 in zaželenimi 400.000 volti. Toda nepoučeni opazovalec ne zve, da je vrzel manjša kot se zdi. Ideja velikega transformatorja prinaša namreč izdaten prispevek k napetostnemu problemu, prispevek, ki pade graditelju nekako mimogredé v roke.

Napetostni problem transformatorja nima prav za prav nobenih posebnosti. Preboji z navitja za visoko napetost na železno jedro in na navitje na nizko napetost rušijo tudi v transformatorju vmesne plasti zeló odpornih izolacijskih snovi. Jakost teh izolacijskih plasti mora rasti proporcionalno z napetostjo, ki jih ogroža.

Res je, da se je transformatorska panoga dolgo mučila s površinskimi preboji, ki, kakor znano, ne napadajo naravnost, temveč po, včasih presenetljivo dolgih, ovinkih. Ti ovinki so zahtevali dolžine, ki so rastle kar s tretjo potenco napetosti. Toda površinski preboji nastajajo le tam, kjer ima sila električnega polja površini izolacijske plasti sporedno komponento.

Graditelji transformatorjev so zato že pred desetletji začeli spretno oblikovati električna polja visoko napetih navitij. Sodobni veliki transformatorji smejo tedaj računati z linearnim naraščanjem izolacijskih plasti, ko jim napetost raste.

Če povečam transformatorju vse mere  $x$ -krat, postanejo seveda tudi vse izolacijske plasti  $x$ -krat debelejšje. Povečani transformator znore torej  $x$ -kratno napetost brez posebnih konstrukcijskih naporov. Drugače povedano: dopustna visoka napetost transformatorja raste s četrnim korenem iz močnosti.

Transformator za 10 kVA, 10.000 V in veliki transformator za 100.000 kVA, 100.000 V imata tako rekoč isti napetostni problem. Napori sodobne transformatorske tehnike, ki naj dvignejo napetost od 220.000 do 400.000 voltov, so tedaj mnogo manjši kot se nepoučenemu opazovalcu zde. Zaželeno višjo napetost potrebujemo vendar po pravilu, izraženem z enačbo 2), za naprave, ki naj prenašajo 6-krat večjo močnost. V njih bomo uporabljali z vso pravico 6-krat večje transformatorje. Ti pa bodo itak, brez novih naporov, zmogli  $\sqrt[4]{6} = 1,565$ -kratno napetost, to se pravi 345.000 voltov. Resnični, dodatni napetostni problem velja po vsem tem samó vrzeli med 345 in 400 kV.

Lahko je si predstavljati vnemo graditelja transformatorjev, ki kopiči kilovoltamperje v velikih edinicah. Saj bi ga napetostni problem zadel z vso svojo ogromno težo, če bi morali v 6-krat večji prenosni napravi obratovati transformatorji iste zmogljivosti kot v manjši napravi. Ideja velikega transformatorja ima tedaj res tudi zelo izdatno tehnično gonilno silo.

O nji pa navadno ne govorimo. Morda zató, ker je poslovnemu človeku precej odmaknjena, morda pa tudi zató, ker neradi kratimo graditeljem velikih strojev zasluge, čeprav samó navidezne. Teorija velikega transformatorja mora seveda objektivno opisati vso vsebino svojega problema, nji je tehnični del ideje velikega transformatorja prav takó važen kakor njen gospodarski del.

## II. POGLOBLJENA IDEJA VELIKEGA TRANSFORMATORJA

5. V svoji prvotni preprosti obliki ideja velikega transformatorja žal ni uporabljiva. Treba jo je preoblikovati, boljše rečeno, poglobiti ali pa zavreči. Da pa je zmožna poglobitve, je prav za prav njena najčudovitejša lastnost.

Tehnični del ideje velikega transformatorja prinaša, kakor smo videli, naraščanje dopustne visoke napetosti s četrtim korenem iz močnosti. Toda, če preprosto povečamo vse mere transformatorja, ne da bi spremenili gostoti električnega toka in magnetnega fluksa, raste visoka napetost hitreje. Število ovojev se po tem preprostem postopku seveda ne spremeni. Pač pa raste ovaju napetost tako kot fluks, torej s kvadratnim korenem iz močnosti, in prav tako raste napetost vsemu navitju.

Napetostni problem velikega transformatorja pa nikakor ne dopušča naraščanja napetosti, ki ga po vsem videzu zahteva ideja velikega transformatorja. Nasprotstvo je dokaj ostro. Kako ga naj premostimo, ne da bi se odrekli zapeljivim možnostim, ki jih obeta velika močnost?

Napetostni problem celó ni edini nasprotnik ideje, to se pravi, prvotne preproste ideje velikega transformatorja. Že v 3. oddelku smo bežno omenili in opisali pritisk obratne toplote, ki raste s četrtim korenem iz močnosti in kopiči konstruktivne težave.

Če tedaj res samó povečamo vse mere transformatorja  $x$ -krat in držimo elektromagnetni gostoti nespremenjeni, raste z ene strani pritisk električnega polja na izolacijske plasti  $x$ -krat hitreje kot jakost in z njo odpornost teh plasti, z druge strani pa potrebni pritisk toplotnega polja, tudi  $x$ -krat, ne da bi hkratu rastle temperaturna napetost.

Iz težavnega položaja je možen naslednji izhod: hkratu z  $x$ -kratnim povečanjem vseh mer transformatorja zmanjšamo elektromagnetni gostoti  $x^{\frac{1}{2}}$ -krat. Napetost se dvigne potem samó še  $x^{\frac{3}{2}}$ -krat, energijske izgube v železu in bakru, ki so kvadratoma gostot proporcionalne, pa se povečajo samó še  $x^2$ -krat. Pritisk električnega polja pride boljše v sklad s povečano odpornostjo izolacijskih plasti, gostota toplotnega toka pa ostane neizpremenjena.

Toda ta postopek bi zelo oslabil idejo velikega transformatorja. Močnost zraste samo še  $x^3$ -krat, če zredčimo fluks in električni tok  $x^{\frac{1}{2}}$ -krat. Vsa gospodarska plat ideje se razblini s tem v nič. Pač pa ostane tehnična plat ideje nedotaknjena. Prav za prav postane gospodarsko oslabljena ideja velikega transformatorja tehnično celo učinkovitejša: dopustna visoka napetost ji raste prej ko slej z merami transformatorja ( $x$ -krat), toda ne več s četrtim, temveč s tretjim korenem iz močnosti. S tem pa bi se problem velikega transformatorja popolnoma prilagodil napetostnemu problemu v velikem prenosu električne energije. Bi mu li ostalo dovolj vzgona, da bi res še dvigal močnost transformatorja?

Vprašanje je zelo važno. Vsa zgodovina transformatorske panoge zahteva odklonilen odgovor. Nepristanski raziskovalec seveda ne more prezirati bogatih izkušenj dolgih desetletij, ne sme pa tudi braniti zaključkov, ki niso skrbno utemeljeni, ki slone morda le na zmotnih, čeprav ukoreninjenih, mnenjih. Zato mora previdno iskati svoj odgovor in pretehtati vse, kar bi moglo vplivati nanj.

Po trdem delu desetletij je transformatorska panoga ugotovila, da naj obratuje transformator za 100 kVA nekako z gostotama  $B = 14000$  G v železu in  $g = 3.5$  A/mm<sup>2</sup> v bakru. Tako čvrsto je prepričana, da je našla najboljšo rešitev, da že poskuša normirati, uzakonjevati, kar je našla. Zaupajmo se ji! Kaj pomeni potem zgoraj nakazana prilagoditev ideje velikega transformatorja zahtevam napetostnega in toplotnega problema?

Poglejmo navzgor od 100 do 100.000 kVA! Vse mere transformatorja vidimo:

$$x = \sqrt[3]{\frac{100000}{100}} \doteq 10 \text{ krat}$$

večje, gostote pa:

$$x^{\frac{1}{2}} = \sqrt[6]{\frac{100000}{100}} \doteq 3.16 \text{ krat}$$

manjše. Torej bi železo transformatorja za 100 MVA obratovalo z:

$$B = \frac{14000}{3.16} \doteq 4430 \text{ G,}$$

baker pa z:

$$g = \frac{3.5}{3.16} \doteq 1.11 \text{ A/mm}^2.$$

Tako skromne gostote bo vsak izkušen graditelj velikih transformatorjev ogorčeno in odločno odklonil. Povedal nam

bo, da misli na višje gostote kot jih ima mali transformator, ne pa na nižje. V železu mu bo celo 15000 G premalo, v bakru pa bo morda hotel imeti najmanj 4, če ne 5 A/mm<sup>2</sup>. Skliceval se bo na izdatno umetno hlajenje, ki ga pozna sodobna tehnika, govoril bo o varčnem uporabljanju dragega bakra in skrbno legiranega železa.

Torej ni misliti na pohlevno večanje močnosti, ki ne obeta nobenih gospodarskih dobičkov, ki ne pocenjuje transformacijskih stroškov kilovoltamperja, ki pa jih tudi ne draži? Torej ne smemo postopoma redčiti fluksov in električnih tokov, če se dvigamo od visokih do še višjih močnosti?

Teorija velikega transformatorja ni tako preprosta kot se zdi, tudi ni tako prozorna kot jo vidi nekritični graditelj transformatorjev. Ta teorija mora najprej ugotoviti, zakaj so izkušenim graditeljem gostote fluksov in električnih tokov vedno premajhne. Kritika razvoja transformatorske panoge mora biti njen prvi korak po poti, ki vodi do rešitve problema velikega transformatorja. Ta pot je daljša kot se zdi.

6. Transformatorska panoga je začela svoje življenje z majhnimi močnostmi. Model vsakega stroja je majhen stroj. Graditelj je zadovoljen, če mu prvi zgrajeni stroj sploh obratuje. Graditelj prvih transformatorjev je bil vesel, da so transformirali, malo pa ga je zanimalo, s kakšnimi elektromagnetnimi gostotami delujejo.

Najbrže ga je obratna toplota transformatorja iznenadila in gotovo se je je ustrašil. Razumel je takoj, da mora previdno nakladati transformacijska bremena. Železu in bakru, jedru in navitju je zato dovolil le pohlevne gostote.

V tistih časih, v osemdesetih letih preteklega stoletja, starejša strojna tehnika ni dovoljevala visokih obratnih temperatur. Ležaji strojev in transmisij so se ji le preradi zapekali. Takratna, še mlada, elektrotehnika pa je živela v večnem strahu pred kratkim stiki in slutila jih je povsod, kjer so se ji stroji in naprave ogrevali. Neizkušeni elektrotehnik je neprestano pokladal svojo roko na navitja in na železna jedra in meril z njo obratno temperaturo. Videl je pač izkušenega strojnega tehnika pokladati roko na ležaje.

Roka zdrži 45, morda 50 Celzijevih stopinj. To je dovolj za ležaj, ne pomeni pa skoraj nič navitju in jedru transformatorja. Začetne gostote transformatorske panoge so bile zelo pohlevne, ker so jih tlačili predsodki, bolje rečeno, izkušnje starejših panog strojne tehnike.

Ne smemo pozabiti, da je elektrotehnika vedno uporabljala baker za navitja svojih strojev, da pa je gradila prva železna

jedra z navadno, tako imenovano črno, pločevino, ki jo je šele kasno postopoma zamenjavala z boljšo in boljšo, legirano. Kilogram črne pločevine trosi 6 do 7 vatov, če mu pri 50 Hz naprtnimo 10000 G. Navadna legirana pločevina je potisnila specifične energijske izgube na 3, kasneje na 23 vata. Tako imenovani močno legirani pločevini je uspelo znižati izgube na 17, na 13 in nazadnje na 1 vat pri 50 Hz in 10000 G. Transformatorska panoga je torej imela prav posebne začetne preglavice z obratno temperaturo železnih jeder.

Ko pa je spoznala, da železu in bakru visoke temperature ne škodujejo, ko je nekako ugotovila, da 110° C sicer tudi izolacijskim snovem še ne ruši vidno ustroja, da pa je nevarno, v neposredni bližini izolacijskih plasti imeti baker ali železo s še višjo temperaturo, je začela drzno dvigati gostote v bakru in železu in kritična temperatura 110° C ji je postala trda zavora, ki je brzdala elektromagnetno obremenjevanje.

Sodobna elektrotehnika ve, da je malce naivno pripisovati izolacijskim snovem popolno neobčutljivost pod in takojšnjo smrt nad 110° C. Toda več desetletij so graditelji transformatorjev verjeli, da sme temperatura v navitju in v jedru zrasti do te meje in da je pod njo trajno dovoljena vsaka dosegljiva elektromagnetna gostota.

V tej veri so pred vsem obremenjevali baker in železo do dozdevne skrajne meje. Nató so začeli izboljševati hlajenje. Razkosavali so navitja na tuljavice in povečevali s tem celokupno hladilno površino. Med navitje in železno jedro so vrinili hladilni kanal. Nadomestili so zrak kot hladilno snov z oljem. Nazadnje so posegli po umetnem hlajenju s hladilno snovjo, ki jo goni stroj — sesalka ali ventilator —, da hitreje in s tem izdatneje odnaša toploto.

Vsako doseženo izboljšanje hlajenja je bilo povod za povečanje elektromagnetnih gostot. Od prvotnih 6000 do 8000 G je takó gostota v železu zrastle na nekako 14000 G, od prvotnega 1 A/mm<sup>2</sup> pa na nekako 4 A/mm<sup>2</sup>.

Najpreprostejša pot do večje močnosti je seveda zvišanje gostot. Če povečam takó gostoto fluksa kakor gostoto toka v navitju x-krat, dobim x<sup>2</sup>-krat večjo močnost, gradbeni stroški transformatorja pa se mi prav nič ne zvišajo. Kdo bi ne krenil po tej udobni poti?

Graditelj mostov ima tudi svoje „gostote“. Železo na pr., ki je njegova gradbena snov, nosi 1000 kg/cm<sup>2</sup> prereza. Zakaj mu ne naprtnimo 1500, 2000, 3000 kg/cm<sup>2</sup>? Ker se bojimo, da se bo zrušilo pod prevelikim bremenom. Ali se železo tudi zruši, če ga obremenimo z 20000 G in baker, če mu navalimo 10 A/mm<sup>2</sup>?

Ne, mehanskih poškodb se graditelj transformatorjev ne boji, ko dviga gostote v železu in bakru. Zato se mu zde vse gostote dovoljene, če le temperatura ne nagaja. Zato hladi z vsemi dosegljivimi sredstvi in navija neusmiljeno svoj gostotni vijak.

Tako usmerjenemu pa naj predlagamo večanje močnosti, ki manjša gostote? Ali ga ne zavajamo v lahkomišlno zapravljanje dragocenih gradbenih snovi? Ali ne zahtevamo, da naj se odreče načelu, ki ga je vodilo od uspeha do uspeha, načelu, kateremu je posvetil toliko dela in iznajdljivosti?

Res je, da je bil smoter dolgoletnega dviganja elektromagnetnih gostot transformator za določeno močnost, ki naj potrebuje kar se dá malo železa in bakra, ne pa večji transformator z isto porabo teh dveh gradbenih snovi. Morda ima torej problem velikega transformatorja vendarle svoje posebne možnosti, čeprav ni bistvene razlike med navedenima smotroma.

Pred vsem pa se vsiljuje naslednje vprašanje: kje pa naj se ustavi dviganje gostot, če zmore hlajenje vse, kar zahtevajo oziri na kritično temperaturo ( $110^{\circ}\text{C}$ )? Je li ta temperatura res edina zavora, načelno pa vsaka še tako visoka gostota fluksa in električnega toka dovoljena in celo priporočljiva, ker pocenjuje transformator za določeno močnost?

7. Dviganje gostot magnetnih fluksov se je v transformatorski panogi zgodaj ustavilo. Transformator potrebuje, tudi če je neobremenjen, vzbujaalni tok, ki mu vzdržuje fluks. Ta tok je nevšečen dodatek vsake transformacije. Pred vsem je, kakor pravimo, jalov. V prenosnih žilah odjeda prostor tokom, ki prenašajo energijo. Zato je naloga graditelja transformatorjev uporabljati vzbujalne toke, ki so skromni, ki so vsaj 10-krat šibkejši od pravih bremenskih tokov.

Magnetiziranje železa ima svoje posebnosti. Za dvakratno gostoto dvojen vzbujalni tok nikakor ni zadosten. Za 15000 G potrebujemo včasih 7-krat jačji vzbujalni tok kot za 10000 G. Zato je dviganje gostot v železu nevarno. Transformatorska panoga se je previdno ustavila nekako pri 14000 G.

Oplemenjevanje železa je prinašalo, kakor smo že omenili, manjše in manjše specifične energijske izgube, ni pa dušilo potrebnih vzbujalnih tokov. Nasprotno. Močno legirana pločevina je prinesla celo slabšo magnetno propustnost (permeabiliteto). Zato se zgodaj dosežena gostota okroglih 14000 G desetletja ni premaknila navzgor. Le zelo veliki transformatorji se povzpnejo na 15000 G.

Teh muh, ki jih ima železo v transformatorskem jedru, baker ne pozna. Gostote električnih tokov so zato ostale še

dolgo žive, ko je gostota fluksa otrpnila. Pa tudi dviganje gostot v bakru se je nazadnje vendarle ustavilo. Zakaj?

Gradbeni stroški, ki padajo, če rastejo gostote, določajo transformatorju nabavno ceno. Toda nabavna cena meri samo del letnih transformacijskih stroškov. Kdor kupuje transformator, ne namerava ga hraniti v zaboju, pač pa hoče transformirati. Letne energijske izgube, ki jih povzročajo kupljeni stroj, so zato važno breme. Prav tako jih je treba plačati, kakor obresti in odpise, ki ustrezajo nabavni ceni. Energijske izgube v bakru in železu pa rastejo, če se dvigajo gostote. Saj so proporcionalne kvadratom gostot, med tem ko so množine potrebne bakra in železa prav za prav indirektno proporcionalne gostotam samim.

Ne da bi se že tu spuščali v podrobnosti, vidimo gospodarsko tehniko pred seboj, kateri nakladajo dvigajoče se gostote rastoče uteži na eni strani, med tem ko drugo stran razbremenjujejo. Ravnotežje te tehnice pa nas nehoté zanima. Saj mu nedvomno ustrezajo določene gostote.

Kdor kupuje cenen transformator, mora pričakovati drage energijske izgube. Nabavna cena transformatorja očividno res ni vse. Zato se je dviganje elektromagnetnih gostot ustavilo, čeprav se je odvajanje obratne toplote izredno izpopolnilo. Zato bi bile magnetne gostote tudi tedaj otrpnile, če bi ne bilo spremenljive magnetne propustnosti železa in jalovih vzbujalnih tokov.

Zato je Bláthy 1915. leta omejil močnosť svojega velikanškega transformatorja s 16000 kVA, čeprav je vedel, da stroj zdrži dražjo tudi 20.800 kVA, čeprav je torej vedel, da se pod tem znatno večjim bremenom ne ogreje preko dopustne temperature.

Vse to je avtor razjasnil v svoji knjižici „Moderne Transformatorfragen“ (Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig) že 1915. leta. Toda številni graditelji transformatorjev sanjajo še danes o neopravičljivih višjih gostotah v železu in bakru.

Ta slika, ki naj pove, zakaj se je dviganje gostot ustavilo, je površna, morda celo zelo pomanjkljiva. Toda, če ji verjamemo, da so oziri na celokupne transformacijske stroške zavrli razvoj, ki še danes ni popolnoma mrtev, ji moramo vsekakor tudi verjeti, da ne smemo nižati gostot v velikih transformatorjih. Kdor dokazuje, da se je dviganje gostot ustavilo, ker je gospodarska tehnika zahtevala ravnotežje, sme zahtevati nižanje gostot le tedaj, če z njim doseže zahtevano ravnotežje.

Laik ne ve, da povzročajo letne energijske izgube mnogo višje stroške kot obrestovanje in odpisovanje v nakupni ceni

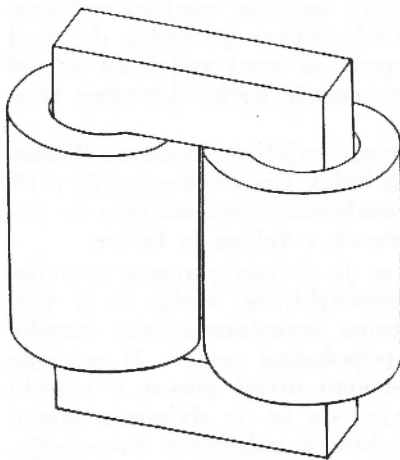
transformatorja zakopane glavnice. Kasneje bomo videli, da je najboljše razmerje teh delnih transformacijskih stroškov 5 : 1. Najmanj do tega razmerja pa so že pred desetletji narastle gostote transformatorjev.

Kako pa ustreza prvotna ideja velikega transformatorja gospodarsko pravilni delitvi transformacijskih stroškov? Postavimo, da imamo transformator, ki ima pravilno razmerje delnih letnih transformacijskih stroškov. Če mu povečamo vse mere  $x$ -krat in obdržimo gostote, zrastejo teže in energijske izgube  $x^3$ -krat. Težam proporcionalno rastejo obresti in odpisi, izgubam pa stroški v transformatorju porabljene energije. Torej je večji transformator še ravno takó skrben gospodar kot je bil nepovečani manjši.

Tega spričevala pa bi večjemu transformatorju ne mogli več dati, če bi spremenili prvotno idejo in začeli mu manjšati gostote. Čim večji bi postajal transformator, tem pohlevnejši bi vendar postajali stroški energijskih izgub poleg obresti in odpisov.

Torej moramo zavreči predlagano preoblikovanje prvotne ideje velikega transformatorja? Kako pa naj si pomagamo v zagati, v katero nas potiskata napetostni in toplotni problem? Oglejmo si še druge možnosti, če jih sploh najdemo!

8. Transformator je zelo podoben kosu verige, ki ima tri člene. Njegovo jedro je železen obroč. Skozi odprtino tega



Slika 1.

obročja se sklepata dva druga, bakrena, obroča: primarno in sekundarno navitje (slika 1). Poučeni opazovalec vé, da se skriva za tem preprostim ustrojem transformatorja elektromagnetni sklep fluksa in tokov.

Prav za prav ima transformator en sam primarni in en sam sekundarni ovoj. Celokupni obratni tok primarnega obroča mora biti vselej natanko takó jak kakor celokupni tok sekundarnega. Vzbujalni tok je pač nevšečen nameček,

nameček, ki ga mora primarni obroč dodatno prevzeti, ni pa bistven, čeprav je nepogrešljiv, dodatek transformacije.

Če razkosam prerez primarnega obroča na  $n_1$ , prerez sekundarnega na  $n_2$  delov, dobim primarno  $n_1$ , sekundarno  $n_2$  ovojev. Hkratu pa postane seveda primarni tok  $n_2 : n_1$ -krat močnejši od sekundarnega, ne da bi celokupna toka obeh obročev padla iz magnetnega ravnotežja.

Torej ni važno, kakšno prestavo  $n_1 : n_2$ , dobi transformator? Prestava je gotovo važna za transformacijo, saj določa razmerje ( $n_1 : n_2$ ) primarne do sekundarne napetosti. Je pa nevažna za obliko, za prostornino, za težo navitij, nevažna je tudi za gostoto primarnega in sekundarnega toka. Skratka, problemu velikega transformatorja in njegovi ideji je prestava brez pomena, lahko si jo brez nevarnosti predstavljamo v najpreprostejši obliki 1 : 1, lahko torej računamo takó, kot da bi imeli res opravka z enim samim primarnim in enim samim sekundarnim ovojem.

Kakor hitro pa spoznamo, da se ideja velikega transformatorja ne meni za število primarnih in sekundarnih ovojev, zagledamo takoj rešitev iz težav, ki jih kopiči — očitno samó navidezno — napetostni problem. Saj nam ni treba obdržati števila ovojev, če povečamo vse mere transformatorja  $x$ -krat. Saj lahko navitju za visoko napetost hkratu  $x$ -krat zmanjšamo število ovojev. Če smo obdržali magnetno gostoto, kakor smo nameravali, zraste napetost tega navitja  $x^2$ -krat, ker se takó ojači fluks, hkratu pa se zmanjša  $x$ -krat, če jo sestavlja  $x$ -krat manj ovojnih napetosti. V celem postane torej samó še  $x$ -krat večja, tolikokrat jačeje pa postanejo itak vse izolacijske plasti.

Ta prva poglobitev prvotne ideje velikega transformatorja je izredno preprosta, pa tudi izredno izdatna. Očitno ne zahteva prav nobenih gospodarskih žrtev. Zató jo bomo radi sprejeli. Saj nas igraje pobotava z napetostnim problemom.

Teže je prvotni ideji velikega transformatorja izmotati se iz težav rastočega toplotnega pritiska na hladilno površino navitij in železnega jedra. Toda tudi v tem boju je transformatorska panoga izkoristila spoznanje, da sme razkosavati primarno in sekundarno navitje, kakor hoče.

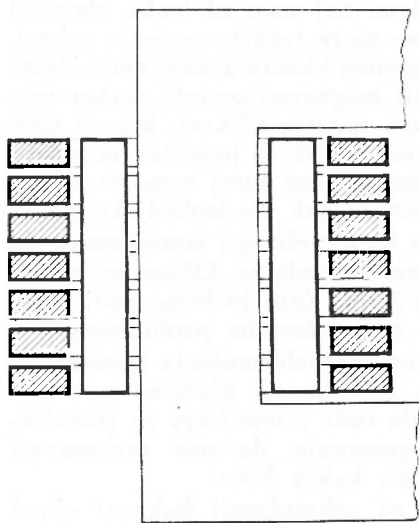
Nerazkosani primarni (ali pa sekundarni) bakreni obroč ima razmeroma majhno površino. Razdeljen na več delov — tuljavic —, ki jih ločijo vmesni kanali, v katere lahko vdira hladeči zrak ali pa hladeče olje, ima neprimerno večjo hladilno površino. Torej so tudi na videz takó neizprosne težave hladilnega problema premostljive.

Transformatorska panoga je res že zgodaj spoznala, da mora razkosavati navitja na tuljavice. Videla je sicer, da potrebuje tem več izolacijske snovi, čim več tuljavic nastane iz navitja, videla je tudi, da je treba prostor, ki ga potrebujejo vmesni

hladilni kanali, plačati z dodatnim železom za jedro — čim slabše izkorišča bakreni prerez navitja odprtino v železnem obroču, tem večji in težji postane seveda ta obroč — toda vedela je, da sicer ne doseže višjih gostot v železu in bakru.

Veliki transformatorji imajo silno razkosana navitja. Širina hladilnih kanalov pa je lahko vedno ista, v velikem in majhnem transformatorju. Zrak in olje odvajata toploto s konvekcijskimi toki, ki se pomikajo v razmeroma tankih plasteh vzdolž razgrete površine navitja in jedra. Jakost dveh takšnih plasti določa hladilnemu kanalu širino, ker ga oklepata skoraj vselej dve razgreti ploskvi. Olje potrebuje  $2 \times 3 = 6$  mm široke kanale, zrak pa  $2 \times 7,5 = 15$  mm. Te podrobnosti je ugotovil avtor že v prvi izdaji svoje knjige „Die Transformatoren“ (J. Springer, Berlin, 1919), in sicer v poglavju, ki obravnava transformatorsko teorijo hlajenja.

Slika 2) prikazuje prerez navitja za visoko napetost velikega transformatorja, ki razpada na številne tuljavične prereze.



Slika 2.

Hladilnih kanalov, širokih po 6 mm, je kajpak lahko tem več, čim večji je transformator, čeprav računamo z isto dejansko izrabo razpoložljivega prostora. Če tedaj  $x$ -krat povečamo vse mere transformatorja, širine hladilnega kanala pa ne, dobimo pač  $x$ -krat več kanalov, torej  $x$ -krat več stranskih hladilnih površin tuljavic in s tem praktično nekako  $x^3$ -kratno celokupno površino navitja.

Uspeh takšnega razkosavanja navitij na tuljavične je skoraj kos težavam toplotnega problema. Vendar pa le ni dovolj, da raste število tuljavic tako kakor rastejo vse mere transformatorja. Lahko je namreč uvideti, da zaostaja celokupna površina navitja nekoliko za stranskimi površinami tuljavic. Razen tega je konvekcija na površini navitja in jedra samó del celokupnega odvajanja toplote iz transformatorja.

Veliki transformatorji posegajo radi po umetnem hlajenju. Lene konvekcijske toke olja v kotlu in zraka ob zunanji po-

vršini kotla je treba pač umetno poživljati, če dela hlajenje preglavice. Konvekcija zmore ob isti hladilni površini z isto temperaturno napetostjo dvojno toplotno množino v sekundi, če povečamo hitrost konvekcijskega toka  $2^2 = 4$ -krat. Skrb za primerno konvekcijsko hitrost prevzamejo sesalke ali pa ventilatorji. Energija, ki jo trosijo ti hladilni stroji, pa seveda obremenjuje energijsko gospodarstvo transformatorja.

Po vsem tem smemo trditi, da je ideja velikega transformatorja kos napetostnemu in toplotnemu problemu, če se ne vmešava po nepotrebem v ustroj navitja, ravno tako pa tudi ne v ustroj železnega jedra, ki potrebuje seveda svoje hladilne kanale, da se lahko uspešno brani naraščajočega toplotnega pritiska.

9. Poglobljena ideja velikega transformatorja obdrži, kakor smo ugotovili, vso vsebino prvotne ideje. Razkosavanje navitij na ovoje in tuljavice je itak tudi malemu transformatorju potrebno in zato ne zahteva gospodarskih žrtev, če postaja z rastočo močnostjo izdatnejše in izdatnejše. Toda preden dokončno odobrimo večanje vseh mer s četrtim koreninom iz močnósti ter ustaljenje elektromagnetnih gostot na višini, ki jo določa pravilno medsebojno razmerje delnih letnih transformacijskih stroškov, moramo vendarle še pogledati, kako se spreminjajo ostale važne lastnosti transformatorja pod vodstvom poglobljene ideje velikega transformatorja.

Omenili smo že, da je vzbujalni tok primarnega navitja zelo nevšečen nameček transformacije. Ali raste ta jalovi spremljevalec potrebnega toka primarnega navitja hitreje ali počasneje od svojega koristnega druga? Z drugimi besedami: ali stavlja ideja velikega transformatorja tudi nevšečne vzbujalne probleme?

Dovoljeno nam je, kakor smo videli, smatrati, da je vse primarno navitje en sam ovoj. Njegov celokupni koristni tok — imenujmo ga pretok — raste ob stalni gostoti s kvadratom mer transformatorja ( $x^2$ ). Ob stalni magnetni gostoti pa raste potrebni vzbujalni tok z dolžino magnetnih smernic, torej takó kot vse mere transformatorja. Torej zaostaja vzbujalni tok za bremenskim, če se transformator veča!

V odstotkih bremenskega toka merjeni vzbujalni tok pada s četrtim koreninom iz močnósti, če ga vodi prvotna ali pa poglobljena ideja velikega transformatorja. To dejstvo je zelo razveseljivo. Lahko bi ga uvrstili med dele vodilne ideje. Praktične izkušnje potrjujejo v polni meri, kar obeta preprosti račun.

Vsak transformator pa ima poleg vzbujalnega toka tudi še napetostne izgube kot neizbežne namečke transformacije. Kako je z njimi, če prepustimo večanje močnosti poglobljeni ideji velikega transformatorja? Zahtevajo li žrtve?

Navitje transformatorja, primarno kot sekundarno, ima pred vsem svoj Ohmov upor. Drobcu napetosti, ki gonijo toke čez te upore, tvorijo delne napetostne izgube. Zaradi njih je transformirana napetost manjša od one, ki jo obeta čisti transformacijski zakon.

Napetostne izgube pa praktično prav za prav niso neizbežne izgube transformacije. Saj je, načelno vsaj, prav lahko jim prilagoditi prestavo transformatorja. Neprilike nastanejo zaradi njih le zato, ker se breme transformatorja spreminja, z njim pa napetostne izgube, med tem ko se prestava transformatorja seveda normalno ne premika.

Praktik vidi, da oskrbuje polno obremenjeni transformator na pr. 10.000 žarnic in skriva hkratu napetostno izgubo, denimo 10 V. Praktik pa misli tudi na možnost, da ostane ena sama žarnica v obratu. Zanj ni omembe vrednih napetostnih izgub v transformatorju. Če tedaj vseh 10.000 žarnic dobi 220 V, kakor treba, gori ena sama pod napetostjo  $220 + 8 = 230$  V in živi seveda v nekakšni vročici, ki ji izdatno krajša življenjsko dobo.

Po vsem tem je vendarle zelo važno brzdati napetostne izgube v transformatorju, zato pa je tudi važno vedeti, kako vodi ideja velikega transformatorja ta nevšečni dodatek transformacije.

Imenujmo:

$U_2$  napetost na sekundarnih sponkah (V),

$I_2$  jakost sekundarnega toka (A),

$R_2$  Ohmov upor sekundarnega navitja ( $\Omega$ )

in predpostavljajmo, da vise na transformatorju kot breme same žarnice ( $\cos \varphi = 1$ ).

Napetostna izguba sekundarnega navitja obsega nedvomno:

$$\Delta U_2 = I_2 R_2 \text{ voltov,}$$

v odstotkih torej:

$$100 \cdot \frac{I_2 R_2}{U_2} = 100 \cdot \frac{i_2^2 R_2}{I_2 U_2}$$

Sekundarno navitje izgubi potemtakem natanko toliko odstotkov napetosti, kolikor potrosi (v Jouleovi toploti) odstotkov prenesene močnosti. Seveda ima tudi primarno navitje svoje napetostne izgube, ki pa so na isti način povezane z Jouleovo toploto. V celem so tedaj Ohmove napetostne izgube, izražene

v odstotkih sekundarne napetosti, enake v odstotkih transformirane močnosti izraženim energijskim izgubam vsega navitja.

Ideja velikega transformatorja pa obeta padanje procentualnih energijskih izgub navitja s četrtim korenem iz močnosti. Torej nam obeta padanje procentualnih Ohmovih napetostnih izgub z istim četrtim korenem iz močnosti. Tudi to dejstvo je zelo razveseljivo in nov dragocen del ideje velikega transformatorja.

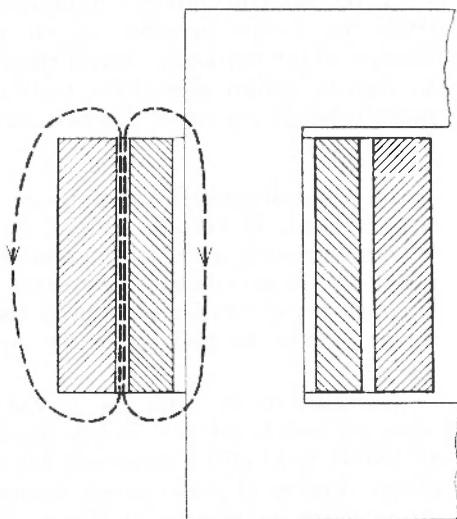
Poglavje zase tvorijo induktivne napetostne izgube v navitjih. Tudi te delne napetostne izgube bremené prestavo transformatorja. Tudi njim gre v kvar, da so odvisne od vsakokratne obremenitve transformatorja, da se zato spreminjajo in da jim enkratna prilagoditev prestave ne more biti kos.

Induktivnost vodnika, v katerem se pretaka električni tok, je prav za prav nekakšna geometrična lastnost. Saj je proporcionalna številu magnetnih smernic, ki se opredeje okoli vodnika, če ima tok v njem jakost 1 A. Oblika vodnika in njegove soseščine pa določa to število smernic. Odločilen je torej obseg nekakšnega magnetnega upora prostora, v katerem se te smernice sklepajo.

Pojem magnetnega upora je dokaj pomanjkljiv, je pa praktično zelo uporabljiv. Zgrajen po analogiji z električnim, z Ohmovim uporom, pripisuje magnetnemu proporcionalnost s povprečno dolžino smernic in obratno proporcionalnost z velikostjo prereza fluksa, ki ga smernice sestavljajo.

Problem velikega transformatorja ni važno, kako določamo na pr. povprečno dolžino smernic, ki oklepajo bodisi samó primarno ali pa samó sekundarno navitje (slika 3), ki torej ne sodijo v sestav delavnega fluksa transformatorja. Dovolj mu je vedeti, da ideja velikega transformatorja ne spreminja oblike navitij in jedra.

Če povečamo vse mere transformatorja  $x$ -krat, se zmanjša magnetni upor stranskih, lastnih, fluksov navitij  $x$ -krat, ker



Slika 3.

postanejo prerezi  $x^2$ -krat večji, smernice pa  $x$ -krat daljše. Induktivnost navitja raste tedaj s četrtrim korenem iz močnosti.

Vnovič si lahko predstavljamo navitje kot en sam ovoj. Njegov tok — pretok — raste s kvadratnim korenem iz močnosti. Ker pa določa zmnožek induktivnosti, električne kotne hitrosti in tokove jakosti induktivno napetostno izgubo, moramo pričakovati, da bo ta izguba rastla s tričetrtinsko potenco iz močnosti.

V navitju inducira delavni fluks po istem zakonu delavno napetost navitja, kakor inducira stranski fluks induktivno napetostno izgubo. Delavni fluks pa raste ob nespremenjeni gostoti s kvadratnim korenem iz močnosti, torej počasneje kot oba stranska fluksa. Zató mora procentualna induktivna napetostna izguba naraščati s četrtrim korenem iz močnosti.

Torej hodijo Ohmove napetostne izgube svojo pot, induktivne pa svojo, namreč ravno naprosto! Torej vstaja iz ozadja ideje velikega transformatorja vendarle nov problem, ki ogroža toliko obetajočo vodilno idejo? Bomo li vendarle morali temeljito preoblikovati prvotno idejo velikega transformatorja?

10. Pred desetletji, preden so se pojavili prvi transformatorski velikani, je veljalo načelo, da je treba napetostne izgube v transformatorju dušiti z vsemi konstruktivnimi sredstvi. To načelo pa je seveda motilo v nemo, s katero so graditelji transformatorjev dvigali električnim tokom gostote. Ohmove napetostne izgube so pač rastle, če so rastle energijske izgube v navitjih.

Razumljivo je zató, da je takratna transformatorska panoga poskušala odvzeti induktivnim napetostnim izgubam, kar je hotela nakloniti Ohmovim, saj se je zavedala, da obe vrsti izgub skupno obremenjujeta transformirano napetost. Iz tega stremljenja so zrastle za današnje pojme izredno nizke procentualne induktivne napetostne izgube. Graditelji transformatorjev so se dokopali do njih s svojevrstnim razkosavanjem navitij in pomešavanjem primarnih tuljavic med sekundarne.

Vsemu temu početju je naredil veliki transformator konec. Nenadoma je postalo namreč jasno, da potrebuje transformator izdatne napetostne izgube. Ker pa Ohmove napetostne izgube ne morejo rasti, ne da bi hkratu rastle tudi energijske izgube v navitjih, je transformatorska panoga energično potisnila krmilo v obratno smer in začela večati induktivne napetostne izgube.

Od kod ta nenadni preokret? Kaj se je zgodilo, ko je stopil na pozornico prvi resnični veletransformator? Skriva li ideja

velikega transformatorja svojevrsten problem napetostnih izgub? Toda, zakaj so postale po izbruhu prve svetovne vojne, po zgraditvi prvih transformatorjev-velikanov, induktivne napetostne izgube vseh transformatorjev, tudi malih, obilne?

Transformatorska panoga se je ustrašila kratkega stika, ko je ugotovila, da nastajajo v kratko sklenjenih velikih transformatorjih mehanske sile, ki udarjajo kar z milijoni kilogramov. Ustrašila se je razen tega kopičenja kratkostične Jouleove toplote v navitju veletransformatorja. Saj je vedela, da mora veliki transformator dalj ostati kratko sklenjen kot mali. Selektivnost avtomatske zaščite pred izredno jakimi toki je bila že takrat, kakor je še danes, zelo utemeljena zahteva obratne tehnike.

Kratkostične mehanske sile so proporcionalne kvadratu kratkostičnega toka, bolje rečeno kratkostičnega pretoka, navitja. Isto proporcionalnost očitujejo seveda tudi Jouleove energijske izgube v navitju. Torej je izredno važno, da kratko sklenjeni transformator ne dobi prejakega toka, oz. pretoka, iz primarnega omrežja.

Na primarne sponke kratko sklenjenega transformatorja pritiska — teoretično vsaj — ista napetost, ki jo v normalnem nemotenem obratu transformiramo. Ker pa pomeni kratki stik na sekundarnih sponkah, da transformirana napetost sploh izgine, morajo postati v kratko sklenjenem transformatorju napetostne izgube tako velike, da ostane transformacija praznih rok.

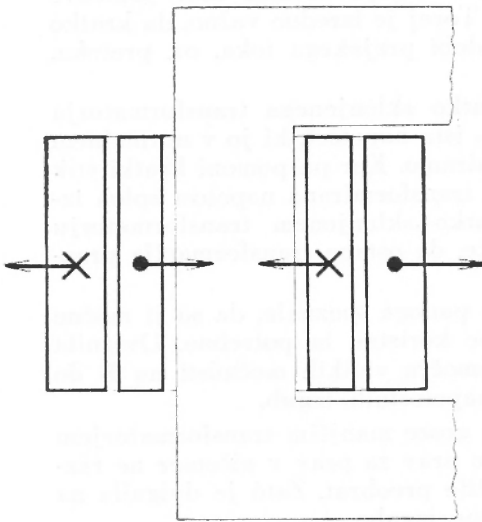
Tako je transformatorska panoga spoznala, da so ji močne induktivne napetostne izgube koristne in potrebne. Dvignila jih je v prvem strahu v območju velikih močnosti na 5- do 10-kratno višino Ohmovih napetostnih izgub.

Kmalu pa je spoznala, da groze manjšim transformatorjem kratkostične nevarnosti, ki se prav za prav v ničemer ne razlikujejo od onih, ki so sprožile preobrat. Zato je dvignila na celi črti induktivne napetostne izgube.

Strah ima velike oči. Dviganje induktivnih napetostnih izgub je zašlo po mnenju avtorja odločno predaleč. V zadnjih letih je prenosna tehnika zadela ob problem statične in dinamične stabilnosti velikih prenosnih prog in ugotovila, da je treba energično krajšati nekdanje, razmeroma dolge, kratkostične dobe selektivne tokovne zaščite. Danes velikemu transformatorju ni treba več zdržati 6 do 10 sekund v kratkostični nesreči, preden ga avtomat prekine. Avtor je razen tega dožgal, da so kratkostične mehanske sile mnogo manj nevarne kot se zde. Dokazal je (glej knjižico „Transformatorenkurzschlüsse“, Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1940), da ima

problem kratkostičnih mehanskih sil poleg statične tudi svojo dinamično plat. Dinamična pa je nedvomno realna plat tega problema, saj je važno le razdiralno delo kratkostičnih sil, ne pa njihov statični pritisk. Za svoje razdiralno delo pa imajo kratkostične sile, kakor je avtor dognal, razmeroma skromna energijska sredstva pri roki, zaradi česar hitro pojemajo, ko začenjajo rušiti.

Podoba je, da grozé kratko sklenjenemu transformatorju pred vsem mehanske poškodbe, čeprav manjše od onih, ki so svoj čas narekemale dviganje induktivnih napetostnih izgub. Kratkostične dobe so se v zadnjem času močno skrčile, z njimi pa seveda tudi toplotne težave kratkega stika. Dovolj je tedaj, če se problem velikega transformatorja prilagodi zahtevam mehanske veje problema kratkostičnih transformatorskih težav.



Slika 4.

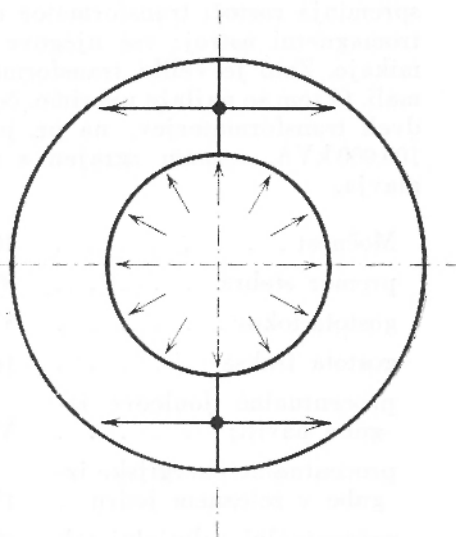
Znano je, da tvorita primarno in sekundarno navitje transformatorja dva konaksialna valja (slika 4). Znano pa je tudi, da se pretoka obeh navitij odbijata, ker okrožata železno jedro v nasprotnih smereh (slika 4). Iz vsega tega sledi takoj, da pritiska kratkostična mehanska sila na zunanje navitje nekako tako, kakor pritiska para na stene parnega kotla. Saj gradimo tej sliki na ljubo stebre transformatorskih jeder z okroglimi prerezi: valj parnega kotla je okrogel, zato naj bo tudi valj zunanjega navitja okrogel.

Radialno navzven usmerjeni pritisk kratkostične sile skuša raztrgati ogroženo navitje. Baker v njem se zoperstavlja. Problem je v tem, da dvojni prerez navitja zdrži mehansko napetost (slika 5), torej, krajše povedano, v tem, da ostane bakreni prerez navitja vedno v skladu z mehansko kratkostično silo.

Če povečamo vse mere transformatorja  $x$ -krat, postane pretok navitja ob stalni tokovni gostoti  $x^2$ -krat večji, njegov

kvadrat  $x^4$ -krat. Bakreni prerez navitja postane hkratu samo  $x^2$ -krat večji. Mehanska nevarnost raste.

Ta nevarnost je v normalnem obratu neznatna. V kratkem stiku pa se pretok navitja prilagodi procentualnim napetostnim izgubam, pred vsem induktivnim, če jih umetno dvigamo. Če rastejo procentualne induktivne napetostne izgube s četrtim korenem iz močnosti, in če poleg njih Ohmove napetostne izgube nimajo pravega pomena, ker ostanejo preneznatne, raste tudi kratkostični pretok navitja samo še s četrtim korenem iz močnosti, njegov kvadrat s kvadratnim korenem, prav tako torej kakor bakreni prerez navitja.



Slika 5.

Če po vsem tem večamo procentualne induktivne napetostne izgube tako kakor po ideji velikega transformatorja itak same rastejo, to se pravi s četrtim korenem iz močnosti — to smo ugotovili na koncu prejšnjega oddelka — ne zahteva kratkostični problem nobene dodatne poglobitve ideje velikega transformatorja.

11. Pregled vseh važnih lastnosti transformatorja z vidika ideje velikega transformatorja vsiljuje ugotovitev, da je večanje vseh mer s četrtim korenem iz močnosti ob stalnih elektromagnetnih gostotah presenetljivo vsestransko priporočljivo, če le ne posega v podrobnosti, ki so za idejo velikega transformatorja brez pomena. Težko je si predstavljati boljši postopek za dviganje močnosti.

Ta pregled pa pripoveduje tudi zanimive stvari, ki jih laik ne pričakuje. Večajoči se transformator ostaja na videz sam sebi zvest, saj zvesto hrani svojo obliko. Laik ne loči v pomajjšani sliki velikega transformatorja od majhnega, tako zelo sta si podobna.

Pa tudi tehnik, ki sam ne gradi transformatorjev, ne vidi razlik, če primerja veliki transformator z malim. Saj vidi ne

samo skoraj isto obliko navitij in jedra, temveč celó skoraj iste elektromagnetne gostote.

Vkjub vsi ti varljivi stalnosti svojega vidnega ustroja, pa spreminja rastoči transformator nenehoma svoj resnični elektromagnetni ustroj: vse njegove lastnosti se neprestano premikajo. Zató je veliki transformator povsem drugačen kakor mali. O tem se najlaže uverimo, če si ogledamo seznam lastnosti dveh transformatorjev, na pr. prvega za 10. drugega pa za 100.000 kVA, seznam zgrajen s pomočjo izsledkov tega poglavja.

Močnosť . . . . .	10 kVA	100.000 kVA
premer stebra . . . . .	85 mm	850 mm
gostota tokov . . . . .	5'5 A/mm <sup>2</sup>	5'5 A/mm <sup>2</sup>
gostota fluksa . . . . .	14000 G	14000 G
procentualne Jouleove izgube navitij . . . . .	3'7%	0'37%
procentualne energijske izgube v železnem jedru . . . . .	1'2%	0'12%
procentualni vzbujaľni tok . . . . .	10%	1'0%
procentualne Ohmove napetostne izgube . . . . .	3'7%	0'37%
procentualne induktivne napetostne izgube . . . . .	1'2%	12%
visoka napetost . . . . .	10.000 V	100.000 V

V svojem nastopnem predavanju na ljubljanski univerzi je torej avtor 1919. leta utemeljeno karakteriziral problem velikega stroja s premikanjem težišča obratnih lastnosti in iskanjem ravnotežja teh premikajočih se lastnosti.

Transformatorska panoga je res doživljala problem za problemom, ko se ji je v naravnem razvoju močnosť dvigala. Najprej je imela mnogo opravka z vzbujaľnimi toki in Ohmovimi napetostnimi izgubami. Pozneje se je zamotala v napetostni problem. Nazadnje so jo velike močností opozorile na kratke stike in v zvezi z njimi na induktivne napetostne izgube.

Da je mogoče čez vso pestro sliko premikajočih se obratnih lastnosti rastočega transformatorja razpresti nepopustljivo povečevalno idejo, hraniti obliko navitij in jedra in vrh vsega prikleniti elektromagnetne gostote, je čudovito, je najboljši

dokaz, da je transformatorska panoga našla resnično vsebino svojega problemskega kompleksa in zgradila vsi svoji stavbi čvrsto ogrodje.

Poglobitev prvotne ideje velikega transformatorja, ki sta jo zahtevala napestostni in toplotni problem, ni zrahljala tega čvrstega ogrodja. Tudi ni zahtevala žrtev. Poglobljena ideja velikega transformatorja ima še ves svoj prvotni čar, vso svojo prvotno gospodarsko in tehnično vsebino. Težko je prav za prav si predstavljati, da se tako močna in zdrava vodilna ideja navsezadnje vendarle izživi in iztrosi.

Problem velikega transformatorja ima gotovo še neslutene globine, če je vkljub svoji močni vodilni ideji zašel v zagato. Zató ga je treba raziskati v vseh njegovih podrobnostih. Pred vsem pa je treba najti kal bolezni, ki ga je popadla. Tem raziskavam veljajo naslednja poglavja te razprave.

### III. TRANSFORMACIJSKI STROŠKI OB PREDPISANIH ELEKTROMAGNETNIH GOSTOTAH

12. Vsi smotri tehnike so gospodarski smotri. Brez njih bi ne bilo strojev in aparatov, daljnovodov in omrežij, brez njih bi ne bilo transformatorjev, seveda tudi ne velikih transformatorjev. Včasih so gospodarski smotri tehnike tvorni, osvajaajoči, napadalni, včasih ohranjujoči, obrambni. Graditelj transformatorjev misli predvsem na kar se da majhne gospodarske žrtve, na znosne transformacijske stroške. Njegovi smotri sodijo torej v drugo izmed pravkar navedenih dveh skupin tehničnih smotrov.

Raziskavanje globin v problemu velikega transformatorja bi tavalo v temi, če bi mu ne svetili gospodarski smotri transformatorske panoge. Slika ideje velikega transformatorja, ki je nastala v prvih dveh poglavjih, zavaja sicer v domnevo, da so gospodarski smotri velikega transformatorja popolnoma jasni, kakor hitro je razčiščeno vprašanje transformacijskih stroškov manjšega transformatorja, torej transformatorja sploh. Toda kal morebitne bolezni, staranja, izživiljanja, pešanja ideje velikega transformatorja se ne more skrivati samó v gospodarskih problemih transformatorske panoge — brez njih bi vendar transformatorjev ne bilo —, in če je gospodarski smoter velikega transformatorja res popolnoma jaseen, je pač treba poseči globlje: v gospodarske probleme transformatorja sploh, torej v problem transformacijskih stroškov.

Temu problemu je posvetil avtor pred leti posebno razpravo, ki je prav za prav nadaljevanje njegove knjige „Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine“ (J. Springer, Berlin, 1918). Knjižica „Der kupferarme Transformator“ (J. Springer, Berlin, 1935) pa vendarle ne izčrpava vprašanj, ki naj odpró pot v globine problema velikega transformatorja. Zato je tu potrebno posebno raziskavanje, ki mora ubrati svojo posebno pot.

Le na videz je problem transformacijskih stroškov izredno preprost. Laik na pr. bi sodil tako-le: gospodarstvo ima svoje letne obračune. Treba je torej predvsem določiti letne transformacijske stroške. No, prav! Nabavno ceno transformatorja je treba primerno obrestovati, pa tudi odpisavati. To je zelo preprosta zadeva. Razen tega pa je treba seveda misliti na

letne energijske izgube transformacije. No, izgubljene kilovatne ure zapisuje števec in cena kilovatne ure je vendar znana.

Res je takó. Toda vse to je šele začetek nastavka v problemu transformacijskih stroškov. Naknadno določevanje letnih transformacijskih stroškov je res preprosta računsko naloga. Predvidevanje vseh okolnosti, ki omogočajo najmanjše možne letne transformacijske stroške, pa je problem.

Ta problem bi kajpak ne bil takó zamotan, kakor je dejansko, če bi ne bil obremenjen z vsemi nevšečnostmi gospodarskih problemov, z nevšečnostmi, ki so zasidrane v posebnosti človeškega gospodarstva. Človeško gospodarstvo je pač celokupnost vseh dejanj življenjske borbe, in čim bolj je borba članov človeške družbe zamotana, nepregledna, polna zablod, motenj in nesreč, tem šibkejše so opore gospodarskih obračunov.

Tehnik pozna natanko na pr. električno prevodnost bakra ali pa specifične energijske izgube v kilogramu železa. Koliko stane kilovatna ura električne energije, koliko velja kilogram bakra, kakšne so, oziroma bodo, obremenitve transformatorja v teku poslovnega leta, so pa vprašanja, ki jih je težko zanesljivo rešiti.

Gospodarski podatki, na katere se opirajo tehnični problemi, so vedno dokaj nestalni. Gospodarska statistika jih nadzira, popravlja, spreminja. Izkušnje desetletij se zrealijo naposled v gospodarskih rešitvah tehničnih problemov. Kot izraz človeške življenjske borbe je gospodarstvo vedno živo, nemirno, nestalno. Zató so rešitve tehničnih problemov, ki imajo vsi gospodarske smotre, nujno žive, nemirne in nestalne.

Vse to velja kajpak tudi za rešitev problema transformacijskih stroškov. Toda človek bi mislil, da nemir gospodarskih vplivov ne more segati preko problema transformacijskih stroškov v sam problem velikega transformatorja. Sodil bi, da je ideja velikega transformatorja popolnoma odmaknjena preusmerjanju vidikov, ki določajo letne transformacijske stroške, češ, če se ti spremene za transformator sploh, ostanejo prednosti velikih močností relativno iste, kakršne so bile.

To bi bilo res takó, če bi teorija velikega transformatorja mogla z gotovostjo izključevati vsako odvisnost gospodarskih podatkov, ki služijo problemu transformacijskih stroškov, od velikosti transformatorja, od višine njegove močností.

To vprašanje je treba razčistiti. Zató pa je treba najprej nakratko opisati splošni problem transformacijskih stroškov in nato natančno pregledati rešitev. Le če v tej rešitvi višina

močnósti nima nobenega vpliva, ostane ideja velikega transformatorja, ki jo opisujeta prva dva poglavja, neomajna, zdrava in večno mlada.

V prvih dveh poglavjih tiči predpostavka, da so gospodarski podatki, na katerih so zgrajeni transformacijski stroški, za vse transformatorje, za velike in majhne, isti, to se pravi, v nekem določenem času, v neki določeni razvojni fazi človeškega gospodarstva isti. Zanimati se moramo torej predvsem za kritiko te predpostavke.

13. Vsak transformator ima svoje železno jedro in svoje bakreno navitje. Graditelj transformatorjev vé, da je mogoče ob določenih elektromagnetnih gostotah doseči isto močnóst z obilico železa in majhno množino bakra, ali pa narobe, s šibkim železnim jedrom in obilnim navitjem. Med neštetiimi možnimi razmerji uporabljenih množin železa in bakra je gotovo ena, edina, ki obeta najmanjše letne transformacijske stroške.

Zakaj? Vsak kilogram uporabljenega železa ima svojo vrednost in prav tako vsak kilogram uporabljenega bakra. To vrednost je treba v letnih obračunih transformacijskih stroškov obrestovati in odpisovati. Toda vsak kilogram uporabljenega železa in bakra ima ob določenih elektromagnetnih gostotah tudi svoje letne energijske izgube, ki dodatno obremenjujejo obračune transformacijskih stroškov. Torej je res važno najti najugodnejšo kombinacijo množin uporabljenega železa in bakra.

Pred nekako desetimi leti je našel avtor zanimivo možnost spreminjanja transformatorskega sestava, v katerem igra razmerje uporabljenih množin železa in bakra odločilno, tako rekoč parametersko vlogo. To raziskovalno idejo bomo uveljavili v naslednjih vrsticah.

Najpreprosteje je, obravnavati tehnično-gospodarske probleme transformatorske panoge v primeru enofaznega transformatorja. Slika 6) prikazuje jedro enofaznega transformatorja, ki ima dva stebra in dva jarma. Jedro naj ima povsod isti železni prerez, toda v stebrih naj ima prerez okroglo, v jarmih štirioglasto obliko.

Očividno zadostujejo tri mere popolnoma, če hočemo geometrično opisati takšno jedro enofaznega transformatorja, namreč:

h . . . . . višina stebra (cm),  
l . . . . . dolžina jarma (cm)  
in x . . . . . premer stebra (cm).

Te tri mere pa omogočajo problemu, ki ga nameravamo raziskovati, tudi v polni meri natančen matematični nastavek.

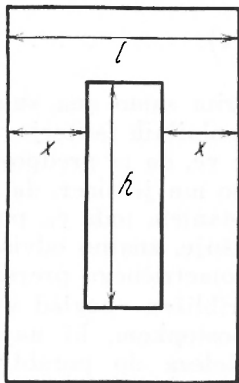
Železo ne polni popolnoma razpoložljivega geometričnega prereza stebra:

$$\frac{x^2\pi}{4} \text{ kvadratnih centimetrov.}$$

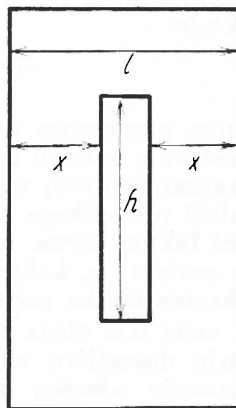
Ravno tako bakreni prerez navitja ne zavzema vsega razpoložljivega geometričnega prereza:

$$\left(\frac{1}{2} - x\right) \cdot h \text{ kvadratnih centimetrov,}$$

ki ga nudi polovica (drugo polovico sme zasesti navitje na drugem stebri) odprtine v železnem jedru (slika 6). Jedro je sestavljeno iz odrezkov tanke pločevine, med katerimi so potrebne izolacijske plasti, ovoji navitja pa morajo prav tako biti obdani z izolacijskimi plašči. Izolacijske snovi tvorijo torej pomembne dele razpoložljivih geometričnih prerezov. Le



Slika 6.



Slika 7.

če so ugotovljeni ustrezajoči polnilni faktorji, je računu možen prehod od geometričnih prerezov do železnih, oziroma bakrenih in s tem od prostornin do tež jedra in navitja.

Zgoraj omenjeno spreminjanje transformatorskega sestava uporablja ta-le načrt: dolžina stebra  $h$  in dolžina jarma  $l$  naj ostaneta kakršni sta. Spreminja naj se premer stebra  $x$ , toda tako, da se z naraščajočim  $x$  seveda krči širina okna v železnem jedru  $(l-2x)$ . Prerez jarmov naj se sproti prilagodeva prerezu stebrov, kar je očitno možno brez spreminjanja dolžine  $l$  jarma. Gostoti fluksa,  $B$  (G), in električnega toka v ovojih,  $g$  (A/mm<sup>2</sup>), naj vrhu vsega ostaneta vseskozi na isti

višini. Slika 7) prikazuje jedro istega enofaznega transformatorja, kateremu velja slika 6), po izvršenem povečanju premera stebra in ustrežajočem povečanju višine jarma.

Postavimo, da polni tudi v debelejšem stebri železo z istim uspehom razpoložljivi geometrični prerez. Polnilni faktor  $c_z$ , ki omogoča prehod do železnega prereza:

$$c_z \cdot \frac{x^2 \pi}{4} \text{ kvadratnih centimetrov,}$$

naj torej ostane konstanten. Postavimo nadalje, da sprememba premera stebra tudi ne spremeni polnilnega faktorja  $c_b$ , faktorja, ki vodi do bakrenega prereza navitja na enem stebri:

$$c_b \cdot \left( \frac{1}{2} - x \right) \cdot h \text{ kvadratnih centimetrov.}$$

Ob stalnih elektromagnetnih gostotah B in g smemo potem z neko konstanto K izraziti močnost transformatorja N preprosto tako-le:

$$N = K \cdot x^2 \cdot \left( \frac{1}{2} - x \right). \quad \dots \dots \dots 5)$$

V tem preprostem nastavku je skrita samo ena sumljiva predpostavka, namreč vera v stalnost polnilnih faktorjev  $c_z$  in  $c_b$ . Izkušeni graditelj transformatorjev vé, da ta predpostavka ne zasluži prevelikega zaupanja. Znano mu je sicer, da je  $c_z$ , polnilni faktor železa, res skoraj konstanten, toda  $c_b$ , polnilni faktor navitja, je, kakor uče vse izkušnje, znatno odvisen od vsakokratne oblike razpoložljivega geometričnega prereza.

Po vsem tem obeta enačba 5) le približen vpogled v spreminjanje dosegljive močnosti med postopkom, ki naj vodi raziskavanje odnosov porabljenega železa do porabljenega bakra. Toda ta prvi vpogled je vendarle dragocen. Brez posebnih naporov ga bomo izpopolnili. Pa saj prvi korak v globine problema transformacijskih stroškov ne more biti tudi že zadnji.

Če pa se hočemo začasno zadovoljiti s prvo približno sliko, se moramo zavedati, da nas v enačbi 5) zanima prav za prav razmerje:

$$x : \frac{1}{2} = y, \quad \dots \dots \dots 4)$$

ne pa spremenljivi premer stebra  $x$  poleg stalne dolžine jarma  $l$ . Zató moramo z neko novo konstanto  $K_1$  nastaviti uporabljivejšo enačbo:

$$N = K_1 \cdot y^2 \cdot (1 - y) \dots \dots \dots 5)$$

Kaj neki pripoveduje ta enačba?

14. Krivulja tretjega reda, ki ustreza enačbi 5) ima pred vsem najzanimivejšo točko:

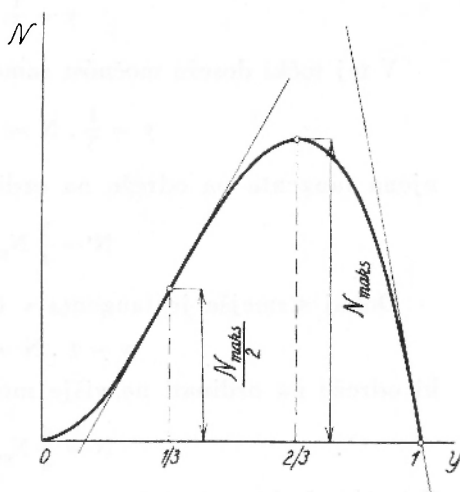
$$N = N_{\max}, y = \frac{2}{3}$$

(slika 8), točko, ki obeta največjo močnost, torej, vsaj na videz, največji gospodarski uspeh. Dve tretjini polovične dolžine jarma bi torej kazalo prepustiti premeru stebra in samo eno tretjino širini geometričnega prereza navitja, ki naj sedi na tem stebri.

Ta izsledek, ki seveda nikakor še ne dovoljuje dokončne sodbe, določuje hkratu „najpriporočljivejšo“ razdaljo osi obeh stebrov in pa tudi zunanji premer navitja. Če naj bo širina prereza navitja za polovico manjša od premera stebra, mora dobiti navitje dvojni premer stebra kot svoj zunanji premer. Dvojni premer stebra pa naj potemtakem loči tudi osi obeh stebrov.

Vse te določbe so presenetljivo skladne z onimi, ki so jih izkušnje dolgih desetletij pridobile transformatorski panogi. Graditelji transformatorjev pa seveda v svojem delu niso poslušali nasvetov teorije, ki je ni bilo, ki je nastala šele, ko je dosegla transformatorska panoga svoja zrelejša leta, pač pa so neumorno preizkušali različne možne oblike transformatorskih jeder. Če so torej našli, kar priporoča enačba 5), so pripravili zagotovilo, da je naše raziskovanje ubralo pravo pot.

To nedvomno dragoceno zagotovilo pa ne more zadušiti pomislekov, ki se vsiljujejo pazljivemu raziskovalcu problema transformacijskih stroškov. Je li največja dosegljiva močnost res vse? Kaj pa, če največja močnost sovпада z največjo ali pa zelo veliko porabo železa in bakra? Saj ni dvoma, da raste z rastočim premerom stebra ( $x$ ) teža železnega jedra v kvadratnem razmerju, med tem ko pada teža bakra v navitju samo proporcionalno z  $(l-2x)$ . Najugodnejša oblika jedra bo torej



Slika 8.

verjetno le v izjemnem primeru tista, ki obeta največjo močnost.

Torej je treba raziskati krivuljo tretjega reda, ki ustreza enačbi 5), v vsem njenem obsegu. Saj moramo pričakovati, da se bo problem transformacijskih stroškov vsekakor naslajal na visoke dosegljive močnosti  $N$ , čeprav morda ne na najvišjo. Zato moramo ugotoviti območje visokih močnosti, kar pa zahteva pregled čez vso krivuljo  $f(N, y) = 0$ .

Ta krivulja ima infleksijsko točko z absciso:

$$y = \frac{1}{5}.$$

V tej točki doseže močnost samo še polovico svojega viška:

$$y = \frac{1}{5}, N = \frac{N_{\max}}{2},$$

njena tangenta pa odreže na ordinati najvišje močnosti:

$$N = \frac{5}{4} N_{\max}.$$

Dokaj strmejša je tangenta v točki:

$$y = 1, N = 0,$$

ki odreže na ordinati najvišje močnosti:

$$N = \frac{9}{4} N_{\max}.$$

Vsi ti podatki opisujejo precej zadovoljivo obliko krivulje (slika 8). Dodamo jim lahko še ugotovitev, da je točka:

$$y = \frac{1}{3}, N = K_1 \cdot \frac{2}{27} - \frac{N_{\max}}{2}$$

nekakšno središče krivulje, ki se razvija na obe strani tako, da se tako rekoč obrnjeno zrcali v premici:

$$N = \frac{2}{27} K_1$$

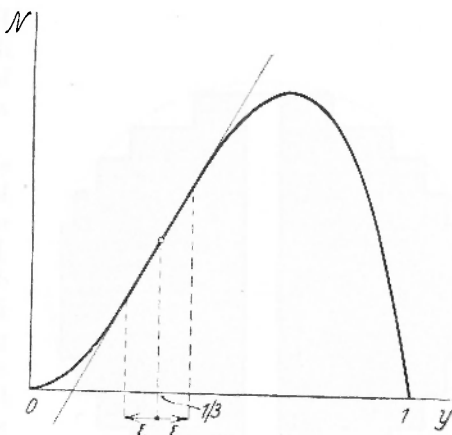
Res je:

$$\frac{2}{27} K_1 - K_1 \left( \frac{1}{3} - \varepsilon \right)^2 \left( \frac{2}{3} + \varepsilon \right) = K_1 \left( \frac{1}{3} + \varepsilon \right)^2 \left( \frac{2}{3} - \varepsilon \right) - \frac{2}{27} K_1,$$

kar ustreza enačbam slike 9).

Krivulja pada s svojega viška v območju  $y = \frac{2}{3}$  do  $\frac{1}{3}$  dokaj položneje kot v območju  $y = \frac{2}{3}$  do 1. Torej bi smeli pričakovati, da bo problem transformacijskih stroškov izkoriščal predvsem prvo izmed označenih dveh območij.

Izkušnje transformatorske panoge pa ne potrjujejo domnev, ki jih vsiljuje oblika prve karakteristične krivulje problema transformacijskih stroškov. Premeri velikih stebrov so domala vsi večji od dveh tretjin polovične dolžine jarma. Toda krivulja, ki nam je omogočila prvi vpogled v globine problema transformacijskih stroškov, osvetljuje nesporno samo eno plat tega problema.



Slika 9.

Pozabiti tudi ne smemo, da je ta krivulja izraz prvega računskega poskusa. Če je polnilni faktor  $c_b$  navitja res, kakor smo že zgoraj pripomnili, nezanesljiva konstanta, se skriva morda za njegovo morebitno odvisnostjo od računске spremenljivke  $y$  to, kar je dognala živa transformatorska panoga, in kar odriva domneve, ki se dvigajo iz prvega površnega računa.

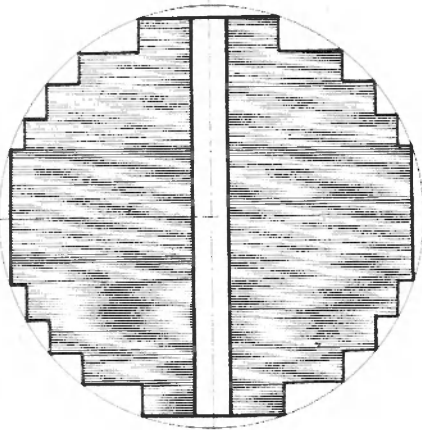
Po vsem tem se nam vsiljuje naloga, poglobiti račun, ki vzbuja sumnjo, da je površen in zato varljiv. Treba je torej pogledati, ali sta polnilna faktorja  $c_z$  in  $c_b$ , ki sta zgoraj kot dozdevni konstanti preprosto padla iz računa, res brez vpliva na najvišjo močnost, ki jo moremo doseči z izključnim spreminjanjem premera stebra ( $x$ ) ob stalnih ostalih dveh merah ( $h$  in  $l$ ) transformatorskega jedra.

15. Transformatorska jedra gradimo z odrezki pločevine, ki ima včasih samo 0,3 mm debeline. Pločevina ni nikoli popolnoma ravna, tudi ni gladka. Med odrezki so potrebne tanke izolacijske plasti. Zato potrebuje odrezek nekako 0,34 mm geometrične jakosti, če ima 0,3 mm resnične, železne.

Polnilni faktor železa bi bil v primeru 0,3 mm debele pločevine:

$$c_z = \frac{0,3}{0,34}$$

če bi ne bilo tehnoloških ovir pri sestavljanju okroglih stebrov. Da ne potrebujemo preveč različnih širin pločevinskih odrezkov, sestavljamo namreč okrogle prereze le približno. Slika 10) prikazuje okrogel prerez s petimi širinskimi stopnjami.



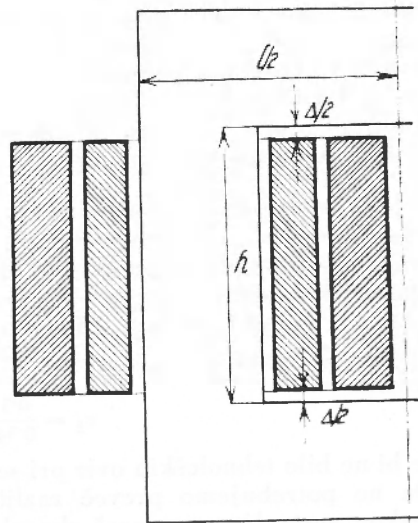
Slika 10.

Navitja sodobnih transformatorjev so skoraj izključno „koncentrična“, to se pravi, navitje za nizko napetost obdaja steber po vsi njegovi dolžini, navitje za visoko napetost pa ravno takó ves valj navitja za nizko napetost (slika 11). Med notranjim navitjem in železnim stebrom je potreben cilindričen izolacijski presledek. Drug tak izolacijski presledek loči notranje navitje od zunanjega. Ker pa je potreben tudi še izolacijski presledek med obema povitima sosednima stebroma, mora biti zunanji premer zunanjega navitja manjši od geometrično možnega.

Ker mislimo, ko gradimo transformator, vselej ne samo na določeno močnosť,

Postopek zahteva žrtve: del geometričnega razpoložljivega prereza gre v zgubo.

Polnilni faktor okroglih stebrov je tedaj manjši kot ga po zgoraj označenem računu pričakujemo. Je pa praktično stalen, dokler se ne spremenita jakost pločevine in število prereznih stopenj. Način spreminjanja oblike transformatorskega jedra, ki smo si ga izbrali za raziskavanje problema transformacijskih stroškov pa očitvidno ne zahteva ne spreminjanja debeline pločevine ne nestalnosti prereznih stopenj. Zató sme z vso pravico računati s stalnim popolnim faktorjem  $c_z$ .



Slika 11.

temveč tudi na določeno napetost, moramo predvidevati stalno vsoto razsežnosti pravkar opisanih treh presledkov, torej stalno izgubo na nestalni širini pravokotnika, ki naj služi prerezu vsega navitja. Zato pa polnilni faktor navitja  $c_b$  kot razmerje bakrenega prereza vsega navitja in ploščine omejenega pravokotnika v izbranem raziskovalnem postopku ne more ostati stalen.

Brez računa je jasno, da se skriva za to ugotovitvijo resna pomanjkljivost doslej, v prvem naskoku, osvojenih izsledkov naše teorije transformacijskih stroškov. Lahko pa je tudi si pomagati v navidez zelo neprijetnem položaju. Prav zato namreč, ker ostane vsota radialnih širin vseh treh zgoraj omejenih, nedvomno potrebnih, izolacijskih presledkov stalna, takó da znaša recimo  $\delta$  centimetrov, lahko v površnem računu zadnjih dveh oddelkov preprosto nadomestimo:

$$\frac{1}{2} z \frac{1}{2} - \delta,$$

razen tega:

$$y = \frac{x}{\frac{1}{2}} \quad z \quad y' = \frac{x}{\frac{1}{2} - \delta} \quad \dots \dots \dots 6)$$

in dobimo novi nastavek:

$$N = K_1 \cdot y'^2 \cdot (1 - y'), \quad \dots \dots \dots 7)$$

ki ne prinaša prav za prav nič novega.

Ker pa je vsakokratni  $y'$  natančni, ustrezajoči  $y$ :

$$y = y' \cdot \frac{\frac{1}{2} - \delta}{\frac{1}{2}} \quad \dots \dots \dots 8)$$

pa tako rekoč izboljšanja potrebni izsledek površnega prvega računa, dobimo v celoti manjše premere stebra kot smo jih sprva pričakovali.

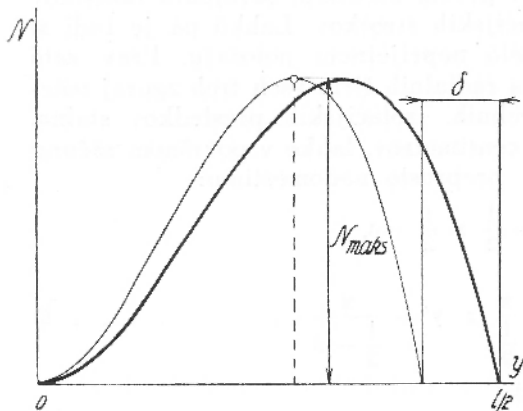
Izkušnje transformatorske panoge veljajo seveda natančnejšim vrednostim, torej  $y'$  ne pa  $y$ . Tem bolj nas mora zato presenečati, da merijo vse izkušnje čez kritično vrednost:

$$y = \frac{2}{3}.$$

Torej bo res treba pregledati še drugo plat problema transformacijskih stroškov in ugotoviti vpliv porabljenega železa in bakra.

V sliki 12) je nazorno prikazan vpliv skupnega izolacijskega presledka  $\delta$  na krivuljo, ki spravlja dosegljivi učinek  $N$  v odvisnost od relativnega premera  $y$  stebra. Tanjša krivulja velja natančnim ( $y'$ ), debelejša surovim vrednostim ( $y$ ) računa.

Po izločitvi motečih izolacijskih presledkov ( $\delta$ ) iz raziskovalnega računa postane polnilni faktor navitja  $c_b$  res praktično stalen. Saj lahko predpostavljamo, da vpliva nanj samo še izolacija posameznih ovojev. Ovojev pa bo tem manj, čim



Slika 12.

ožji bo postal pravokotnik, v katerem naj leži prerez navitja. Za praktične svrhe je vsekakor popravljena računska podlaga popolnoma neoporečna.

Preden pa zaključimo prvi račun v problemu transformacijskih stroškov, moramo spraviti še neko drugo važno ugotovitev na varno, ugotovitev, ki daje izbranemu raziskovalnemu postopku

vidno vrednost. Iz slike 6) je namreč razvidno, da ostane srednja dolžina ovoja nespremenjena:

$$\frac{1}{2} \cdot \pi \text{ centimetrov,}$$

kakor koli se ob stalni dolžini jarma spreminja premer  $x$  stebra. Iz slike 11) pa razberemo brez težave, da smemo računati z isto srednjo dolžino ovoja tudi tedaj, če smo izločili stalne izolacijske presledke ( $\delta$ ) iz računa.

Postopek izločuje eno prostorno razsežnost. Saj ostane v njem tudi srednja dolžina železnega obroča, namreč vsota dolžin obeh stebrov in obeh jarmov, nespremenjena. To pomeni, da je razmerje tež porabljenega bakra in železa izrazljivo z razmerjem prerezov stebra in navitja.

Za prvi, pravkar opravljeni račun problema transformacijskih stroškov ta opisana posebnost raziskovalnega postopka ni važna. Pomembna pa je za račun, ki stoji pred nami, ki naj velja težam železa in bakra ter z njimi povezanim stroškom.

16. Vsak kilogram železa v transformatorskem jedru in vsak kilogram bakra v navitju povzročata iste letne transformacijske stroške svoje skupine. Seveda so stroški kilograma bakra različni od stroškov kilograma železa. Pot do celokupnih transformacijskih stroškov pa vodi vsekakor čez teže vsega železa v jedru in vsega bakra v navitju.

Račun se seveda lahko omejuje na en sam steber. Nasloniti se mora na znane tri mere jedra,  $h$ ,  $l$  in  $x$ , na oba polnilna faktorja  $c_z$  in  $c_b$  ter na specifični teži:

$$\gamma_z = 7.4 \text{ kg/dm}^3 \text{ železa}$$

$$\text{in } \gamma_b = 8.9 \text{ kg/dm}^3 \text{ bakra.}$$

Iz slike 11) je teža železa, ki je potrebno vpoštevemu delu jedra, takoj določljiva:

$$G_z = \frac{x^2 \cdot \pi}{4} c_z \cdot (h + 1) \cdot 10^{-3} \cdot \gamma_z \text{ kilogramov. . . . . 9)}$$

Če pa poskušamo določiti težo bakra, moramo najprej točno povedati, na kateri polnilni faktor  $c_b$  merimo. Jasno je, da bomo izločili vsoto izolacijskih presledkov  $\delta$  iz širine  $\frac{1}{2} - x$  razpoložljivega prereza navitja, kakor v prejšnjem oddelku. Toda navitje mora tudi na obeh koncih stebra zahtevati izolacijska presledka, katerih skupna višina  $A$  (cm) ostane stalna, dokler se transformatorju napetost ne spremeni (slika 11).

Na razpoložljivi prerez navitja:

$$\left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) (h - A)$$

kaže torej postaviti popravljen vrednost polnilnega faktorja  $c_b$ , da bo res ostala stalna. V tem primeru dobimo za težo bakra vsega navitja na enem stebri izraz:

$$G_b = \left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) (h - A) \cdot c_b \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \gamma_b \text{ . . . . . 10)}$$

Treba je samo vedeti, koliko transformacijskih stroškov povzročata v letu kilogram bakra, koliko kilogram železa. Recimo, da pričakujemo:

$$s_b \text{ . . . . . denarnih enot za kg bakra}$$

$$\text{in } s_z \text{ . . . . . denarnih enot za kg železa.}$$

Potem znašajo celokupni letni transformacijski stroški:

$$S = \frac{\pi}{4} x^2 (h + 1) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z +$$

$$+ \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) (h - A) \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b \text{ . . . . . 11)}$$

denarnih enot.

Takoj vidimo, da so delni stroški, ki jih povzroča železo, povsem drugače odvisni od premera stebra  $x$  kot delni stroški, ki jih kopiči baker. V skrajnem primeru:

$$x = 0$$

izgine železo, z njim stroški jedra, transformacijski stroški prihajajo vsi iz bakra in dosežejo skrajno višino:

$$S_{b0} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \cdot (h - \mathcal{A}) \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b \text{ denarnih enot} \quad . \quad . \quad 12)$$

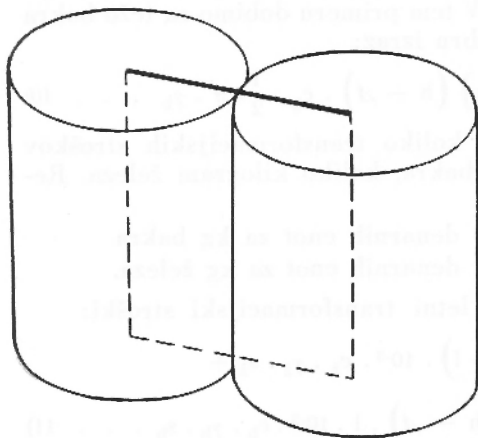
V nasprotnem skrajnem primeru:

$$x = \frac{1}{2} - \delta$$

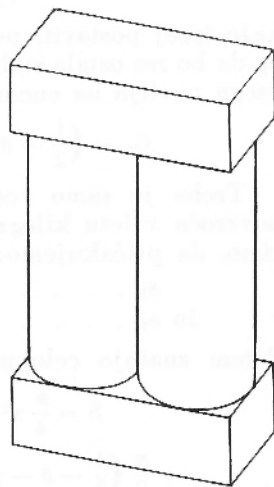
izgine baker, in vsi transformacijski stroški prihajajo iz železa. Skrajna višina teh delnih stroškov je torej:

$$S_{z0} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1}{2} - \delta \right)^2 (h + l) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z \text{ denarnih enot} \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

V prvem skrajnem primeru postane transformator bakren valj z zunanjim premerom  $l - 2\delta$  in višino  $h - \mathcal{A}$ , v drugem pa železen valj s premerom  $\frac{1}{2} - \delta$  in višino  $h$ , na katerem sedita zgoraj in spodaj dva paralelepipedična nastavka (sliki 13 in 14). V obeh primerih je transformator, bolje rečeno del transformatorja, ki ustreza enemu stebri, mrtev, brez močnosti.



Slika 13.



Slika 14.

Čprav nimajo skrajne možnosti postopka, ki smo si ga izbrali za raziskovanje transformacijskih stroškov, nobene praktične vrednosti, je vendarle važno vedeti, da je bakrena skrajnost mnogo dražja od železa. V izrazu:

$$\frac{S_{b0}}{S_{z0}} = 2 \cdot \frac{(h - d) \cdot l}{(h + 1) \left(\frac{1}{2} - \delta\right)} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} \dots \dots \dots 14)$$

je:

$$\frac{(h - d) \cdot l}{(h + 1) \left(\frac{1}{2} - \delta\right)} \sim 1,$$

ker moramo, kakor bomo še videli, predpostavljati:

$$h \cong 1.$$

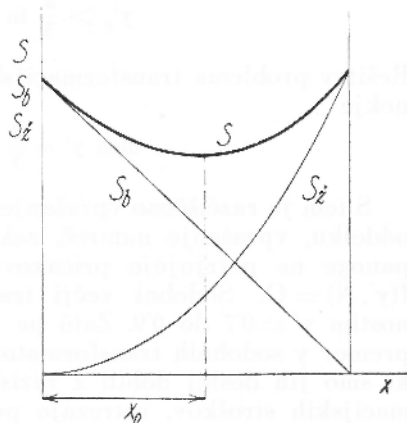
Odločilno je torej razmerje:

$$\frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z},$$

ki pomeni razmerje letnih transformacijskih stroškov za prostorninski enoti bakrenega navitja in železnega jedra.

Tako kot smo dokončno definirali polnilni faktor  $c_b$ , ne bo v splošnem velike razlike med  $c_b \cdot \gamma_b$  in  $c_z \cdot \gamma_z$ . Ker pa je kilogram bakra mnogo dražji od kilograma železa — tudi, če mislimo na energijske izgube — bo vsekakor  $S_{b0}$  večkrat večji od  $S_{z0}$ .

V primeru, da bi med  $S_{b0}$  in  $S_{z0}$  ne bilo razlike, bi veljala slika 15), ki naj prikazuje, kako se spreminjajo delni transformacijski stroški bakra in železa, če se spreminja premer stebra  $x$  ob stalnih  $h$  in  $l$ . Stroški bakra padajo linearno s svojega skrajnega viška, stroški železa pa rastejo parabolčno, ko se dviga premer stebra.



Slika 15.

Za celokupne transformacijske stroške dobimo seveda v isti sliki parabolo, ki ji je premica stroškov bakra tangenta. Najnižja točka te parabole določa najmanjše trans-

formacijske stroške in ustreza, kakor je razvidno iz enačbe 11), premeru stebra:

$$x_0 = \frac{(h - \mathcal{A}) \cdot 1}{h + 1} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_{b0}}{S_{z0}} \cdot \left( \frac{1}{2} - \delta \right) \quad (15)$$

Dokler je:

$$S_{b0} > 2 S_{z0}$$

v praktičnih primerih torej vselej, ostane:

$$x_0 > \frac{1}{2} - \delta,$$

to se pravi neizvršljiv. Transformacijski stroški zahtevajo očitvidno kar se dá velik premer stebra.

Problem transformacijskih stroškov pa seveda ne išče preprosto najmanjših stroškov, temveč najmanjše neki močnosti ustrezajoče stroške. Videli smo, da doseže

$$y' = \frac{x}{\frac{1}{2} - \delta} = \frac{2}{3}$$

najvišjo močnost. Ugotovili smo, da obeta:

$$y'_0 = \frac{x_0}{\frac{1}{2} - \delta} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_{b0}}{S_{z0}} \quad (16)$$

najnižje stroške, da pa je:

$$y'_0 > \frac{2}{3} \text{ in celo } > 1.$$

Rešitev problema transformacijskih stroškov leži po vsem tem nekje

$$\text{med } y' = \frac{2}{3} \text{ in } y' = 1.$$

S tem je razčiščeno vprašanje, ki nas je mučilo v prejšnjem oddelku, vprašanje namreč, zakaj izkušnje transformatorske panoge ne potrjujejo pričakovanj, katera vzbujata krivulja  $f(y', N) = 0$ . Sodobni večji transformatorji ustrezajo vrednostim  $y' = 0,7$  do  $0,9$ . Zató pa tudi surovo merjeni relativni premer  $y$  sodobnih transformatorjev ne pade pod  $\frac{2}{3}$ . Izsledki, ki smo jih doslej dobili z raziskavanjem problema transformacijskih stroškov, ustrezajo potemtakem popolnoma izsledkom praktikov, ki poskušajo, namesto da bi računali, ki verjamejo samó otipljivim dokazom, ker se boje sumljivih računskih konstant, kakršni so — vsaj v nespretnih rokah — na pr. polnilni faktorji.

Toda, ker so računi, kakor vidimo, popolnoma skladni z dejstvi žive tehnike, smemo zaupati pravilno nastavljenemu računu našega problema. Zató smemo zahtevati od njega še več: jasno rešitev naj nam da, najpriporočljivejši premer stebra naj nam ostro določi, namesto da ga samó utesnjuje med neke skrajne mere.

17. Okrogel steber s premerom  $x$  (cm) ima:

$$\frac{x^2 \pi}{4} \cdot c_z \text{ kvadratnih centimetrov}$$

železnega prereza in njegov magnetni fluks doseže:

$$\Phi = \frac{x^2 \pi}{4} c_z \cdot B \text{ smernic.}$$

če je  $B$  (G) najvišja obratna gostota.

Ovoj, ki oklepa tak steber, dobi inducirano napetost:

$$e = \frac{2 \pi}{\sqrt{2}} \Phi \cdot f \cdot 10^{-8} = \frac{\pi^2}{2 \sqrt{2}} \cdot c_z \cdot f \cdot x^2 \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ efektivnih voltov. . 17)}$$

če pomeni  $f$  (Hz) obratno frekvenco. Čist, enobarven sinusen obrat je kajpak pogoj.

Navitje stebra polni pravokotni četrkotnik, ki je nekoliko krajši od stebra ( $h - A$ ) in nekoliko ožji od polovične odprtine v železnem jedru ( $\frac{1}{\sqrt{2}} - \delta - x$ ). Bakreni prerez navitja doseže:

$$(h - A) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \delta - x\right) \cdot c_b \cdot 10^2 \text{ kvadratnih milimetrov.}$$

Če predpostavljamo gostoto  $g$  efektivnih amperjev na  $\text{mm}^2$ , smemo pričakovati:

$$p = \frac{1}{9} (h - A) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \delta - x\right) \cdot c_b \cdot 10^2 \cdot g \text{ efektivnih amperjev. . . 18)}$$

kot pretok primarnega ali pa sekundarnega navitja — oba se poslužujeta v enaki meri skupnega razpoložljivega bakrenega prereza.

Vnovič lahko posežemo po dopustni predstavi, da je primarno ali pa sekundarno navitje en sam ovoj. Zato imamo kratko pot do navidezne močnosti na enem stebri:

$$N = e \cdot p \text{ voltamperjev, . . . . . 19)}$$

oziroma:

$$N = \frac{\pi^2 \cdot c_z \cdot c_b}{4 \sqrt{2}} \cdot f \cdot 10^{-16} \cdot B \cdot g \cdot (h - A) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \delta - x\right) \cdot x^2 \cdot . . . . . 20)}$$

V 3. oddelku smo dognali, da ima vsaka oblika transformatorskega jedra ob določenih elektromagnetnih gostotah B in g svojo konstruktivno invarianto, ki meri gospodarsko vrednost transformatorja. Ta invarianta združuje transformacijske stroške S in učinek N:

$$I = \frac{S}{N^{\frac{3}{4}}} \dots \dots \dots 21)$$

Čim manjša naj bo.

Če tedaj zahtevamo, da naj raziskavanje problema transformacijskih stroškov doseže najpriporočljivejši premer stebra, merimo na oni x, ki ustreza najmanjši vrednosti konstruktivne invariante I. S pomočjo enačb 11) in 20) pa dobimo:

$$I = \frac{\frac{\pi}{4} x^2 (h+1) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) (h - \Delta) l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{\left[ \frac{\pi^2}{4 \sqrt{2}} \cdot c_z \cdot c_b \cdot f \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot g \cdot (h - \Delta) \cdot \left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) \cdot x^2 \right]^{\frac{3}{4}}} \dots \dots \dots 22)$$

in s tem nastavkom odprto pot do zaželenega izsledka.

Tako preprost pa problem transformacijskih stroškov vendarle ni kot se zdi. Enačba 22) namreč še ni nastavek neposredno izvršljivega zaključnega računa, pač pa je izhodišče za raznovrstna podrobnejša raziskavanja, ki vodijo tudi v globine problema velikega transformatorja. Saj se moramo predvsem šele odločiti za dokončno osnovo raziskavanja: hočemo li h:l poljubno postaviti? Ali naj B in g preprosto prilagodimo praktičnim izkušnjam?

Nedvomno je razmerje h:l tudi problem, ki je povezan s širšim problemom transformacijskih stroškov. Če je res, da zadostujejo tri mere, h, l in x, opisovalcu železnega jedra, in če je res, da je problemu transformacijskih stroškov važna samo oblika železnega jedra, ne pa njegova absolutna velikost, moramo misliti na vpliv vseh možnih medsebojnih odnosov med odločilnimi merami jedra. Tri mere pa določajo dva razmerja, ki sta drugo od drugega neodvisna. Prvemu smo prikrojili dosedANJI postopek raziskavanja. Torej je potreben še drugi raziskovalni postopek, ta pa naj seveda meri na razmerje h:l.

To ugotovitev je treba poglobiti. Važno bo vsekakor razmerje dolžin povitega in nepovitega dela železnega jedra. Ali nismo izločili del dolžine stebra (Δ) za potrebne izolacijske presledke na obeh koncih stebra? Poviti del jedra ima prav za prav dolžino h - Δ, nepoviti pa dolžino l + Δ. Ali ni torej

priporočljiveje usmeriti dodatno raziskavanje na razmerje  $(h - \mathcal{A}) : (l + \mathcal{A})$ ?

Če damo enačbi 22) obliko:

$$I = \left\{ \frac{\pi}{4} x^2 \left[ (h - \mathcal{A}) + (l + \mathcal{A}) \right] \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \right. \\ \left. + \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) (h - \mathcal{A}) \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b \right\} : \\ : \left[ \frac{\pi^2}{4 \cdot \sqrt{2}} \cdot c_z \cdot c_b \cdot f \cdot 10^{-6} \cdot B \cdot g \cdot (h - \mathcal{A}) \cdot \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) \cdot x^2 \right]^{\frac{3}{4}} \quad 23)$$

prevzame  $h - \mathcal{A}$  na celi črti vlogo navidezne dolžine stebra  $h$ . Prav lahko je potem poiskati ono resnično dolžino povitega dela stebra, ki obeta ob določenih  $l$  in  $x$ , oziroma  $l + \mathcal{A}$  in  $x$ , najmanjše transformacijske stroške.

Kritični raziskovalec seveda vè, da je nevarno samó zató vsiljevati problemu smer, ki mu morda ni prikladna, ker obeta lažje račune. Zató rad prepušča odločitev odgovoru, ki naj ga dá račun. Rešitev naznačenega drugega dela problema transformacijskih stroškov mora sama povedati, ali je res priporočljiveje natanko določiti dolžini povitega in nepovitega dela železnega jedra.

To pomeni vprašanje, kaj je problemu transformatorskih stroškov važnejše: geometrični odnosi v obliki jedra ali pa povezanost navitja z delom železnega jedra. Zanima nas, z drugimi besedami povedano, pravilna, to je najpriporočljivejša definicija  $j$  a r m a transformatorskega jedra.

18. Če smatramo, da so v enačbi 23) vse veličine razen  $h - \mathcal{A}$  določene in iščemo tisto posebno dolžino povitega dela železnega jedra, ki obeta najmanjšo konstruktivno invarianto, torej najmanjše transformacijske stroške, ustrežajoče določeni močnósti, dobimo s preprostim računom pogoj:

$$3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot (l + \mathcal{A}) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z = \frac{\pi}{4} x^2 (h - \mathcal{A}) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \\ + \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) (h - \mathcal{A}) l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b \quad 24)$$

ki prevzame lahko tudi obliko:

$$\frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot (l + \mathcal{A}) \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z = \frac{1}{4} \cdot \left\{ \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \left[ (h - \mathcal{A}) + (l + \mathcal{A}) \right] \times \right. \\ \left. \times 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) (h - \mathcal{A}) l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b \right\}$$

in izraža potem zeló prozorno konstruktivno zahtevo:

Transformacijski stroški nepovitega dela železnega jedra naj znašajo četrtno celokupnih transformacijskih stroškov vsega transformatorja.

To je tako imenovani zakon o jarmih transformatorske teorije, ki ga je avtor prvi postavil že 1918. l. v svoji knjigi „Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine“ (J. Springer, Berlin). Z njim je jasno in eksaktno odpravljen važen del problema transformacijskih stroškov. Zakon pa odgovarja tudi zelo jasno na vprašanje, kako naj definiramo jarem transformatorskega jedra: j a r e m j e n e p o v i t i d e l j e d r a.

Pred desetletji so graditelji transformatorjev prisegali na drug čudovit konstrukcijski zakon, ki je zahteval enake transformacijske stroške za železni in za bakreni del transformatorja. Trdili so, da jim izkušnje narekujejo gospodarsko enakopravnost jedra in navitja.

V zvezi s tem dozdevnim zakonom obeta zakon o jarmih problemu transformacijskih stroškov izredno prikupno rešitev. Saj odbija četrtno vseh stroškov, ki naj imajo itak dve jasno ločeni polovici. Torej naj odpade druga četrtna na železo povitega dela jedra, ostali dve četrtni pa naj ostaneta navitju. Transformator ima dva ločena navitja: primarno in sekundarno. Enakopravna kakor sta, tvorita ta dva navitja polovici vsega bakrenega dela transformatorja. Zato gre po vsem videzu vsakemu izmed njiju četrtna vseh transformacijskih stroškov.

Kdo ne bi občudoval takó uravnovešene razdelitve transformacijskih stroškov? Vsestranska pravičnost, ki sije iz nje, je nedvomno močna opora trditvi, da je transformatorska panoga s takšno razdelitvijo transformacijskih stroškov našla pot do najugodnejše rešitve svojega osnovnega konstruktivnega problema.

Teorija se je že pred petdesetimi leti zanimala za vprašanje, v kakšnem razmerju naj si jedro in navitje razdelita transformacijske stroške. Našla je res že takrat nekakšen dokaz za trditve, da naj prevzameta železni in bakreni del transformatorja vsak svojo polovico gospodarskih bremen transformacije.

Res je tudi, da so graditelji transformatorjev pred desetletji doživljali gospodarsko enakopravnost jedra in bakra kot rešitev problema transformacijskih stroškov. Toda mislili so prav za prav samó na gradbene stroške, stroški energijskih izgub jim v tistih časih niso bili važni.

Danes vemo, da prelepi zakon o gospodarski enakopravnosti jedra in navitja ni zakon, vsaj ne v strogem pomenu besede, torej ne tako kot je n. pr. zakon o jarmih resničen zakon. Danes vemo tudi, da so gradbeni stroški transformatorja skoraj nevažni poleg transformacijskih stroškov. Zato ne doživljamo več starega pravičnega razdeljevanja gradbenih stroškov na železo in baker. Mnogi transformatorji, pred vsem veliki, prepuščajo železu večji del gradbenih stroškov.

Vera v „pravično“ razdelitev stroškov na štiri enake dele je nujno vodila do spoznanja, da mora biti steber ravno tako dolg kot jarem. To je kajpak veljalo samo v primeru istega železnega prereza v vseh delih jedra. Starejši graditelji transformatorjev so torej lahko takoj videli ali je jedro pravilno zgrajeno.

Konstruktivno pravilo:

$$h = l,$$

ki naj omogoča takojšnjo presojo vsakega osnutka, pa je, kakor smo ugotovili, varljivo. Kdor še veruje v enakopravnost jedra in navitja, mora zahtevati pravilo:

$$h - A = l + A.$$

In kaj zahtevajo naša raziskovanja? Iz enačbe 24) dobimo:

$$h - A = \frac{3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1 + A) \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z \cdot 10^{-3} \cdot x^2}{\frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{1}{2} - \delta - x\right) \cdot l \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b} \quad \dots \dots \dots 25)$$

ali krajše:

$$\frac{h - A}{1 + A} = \frac{3 \left(\frac{x}{\frac{1}{2} - \delta}\right)^2}{\left(\frac{x}{\frac{1}{2} - \delta}\right)^2 + 2 \frac{l}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \left(1 - \frac{x}{\frac{1}{2} - \delta}\right) \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z}} = \frac{3 y'^2}{y'^2 + \frac{2l}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} \cdot (1 - y')} \quad \dots \dots 27)$$

Odgovor ni prozoren. Povezan je s problemom, ki smo ga v tem poglavju najprej načeli, tudi že z dveh strani osvetlili, vendar pa še ne dokončno rešili. Če torej hočemo dognati, v kakšnem razmerju naj bodeta dolžini povitega in nepo-

vitega dela železnega jedra, moramo nadaljevati raziskovanje, ki smo ga prekinili v 17. oddelku.

Enačba 26) pa nam vendarle dovoljuje zelo važno ugotovitev, če jo vprašamo, v katerem primeru bi bila voljna potrditi pravilo:

$$h - A = 1 + A.$$

Iz nastavka:

$$3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (h - A) \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z \cdot 10^{-3} \cdot x^2 = \frac{\pi}{4} \cdot x^2 \cdot (h - A) \times \\ \times 10^{-3} \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z + \frac{\pi}{2} \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) (h - A) \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b$$

sledi namreč:

$$\frac{\pi}{2} \cdot \left( \frac{1}{2} - \delta - x \right) (h - A) \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b = \\ = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (h - A) \cdot 10^{-3} \cdot x^2 \cdot c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z$$

kar pomeni, da mora postati celokupno navitje dvakrat dražje od železnega stebra.

Ta zahteva pa vodi do enakih delnih transformacijskih stroškov jedra in navitja, ker tiči v pravilu:

$$h - A = 1 + A$$

predpostavka enake teže povitega in nepovitega dela jedra.

Le tedaj torej, če naj prevzame navitje eno polovico transformacijskih stroškov, jedro pa drugo, naj bodeta poviti in nepoviti del jedra enako dolga. Starejši graditelji so imeli očitvidno po svoje prav, da so presojali osnutke s primerjanim dolžin stebrov in jarmov. Saj so čvrsto verovali v enakopravnost železa in bakra.

Nadaljevanje raziskavanja, ki smo ga prekinili v 17. oddelku, obeta po vsem tem važne in zanimive izsledke. Rešiti mora seveda pred vsem vprašanje najpriporočljivejšega relativnega premera stebra ( $y'$ ), razčistiti mora pa tudi stari problem transformatorske panoge o dozdevni gospodarski enakopravnosti jedra in navitja.

19. Raziskovalni postopek, ki je omogočil prve račune tega poglavja in odprl prve vpoglede v problem transformatorskih stroškov, postane potreben izpopolnitve, kakor hitro raziskovalec ugotovi, da morajo stroški nepovitega dela jedra prevzeti natanko določen del vseh transformacijskih stroškov. Raziskovanje izgubi nedvomno svojo pravo pot, če zanemarja zakon o jarmih. Zató smo tudi v 17. oddelku prekinili račune, ki še niso bili dovolj podprti.

Izhodišče poglobljenega raziskavanja naj bo določena dolžina jarma  $l$ . Prej ko slej moramo odbiti od  $\frac{1}{2}$  vsoto vseh izolacijskih presledkov v navitju ( $\delta$ ), če hočemo zagotoviti polnilnemu faktorju  $c_b$  zaželeno stalnost. Če potem spreminjamo premer stebra  $x$ , spreminjamo prerezu celokupnega navitja kot doslej širino  $\frac{1}{2} - \delta - x$ .

Poljubno izbranemu premeru stebra  $x$  pa moramo prilagoditi dolžino stebra ( $h$ ), ali bolje, povito dolžino  $h - \mathcal{A}$  stebra. Zato se spreminja tudi  $h - \mathcal{A}$ , ko se spreminja  $x$ . Zato pa tudi ostane dolžina  $l$  jarma raziskovanju zadnja trdna opora.

Poiskati moramo  $x$ , ki obeta najmanjšo konstruktivno invarianto. Če tedaj posežemo po enačbi 25), moramo najprej izločiti  $h - \mathcal{A}$  iz nje, kar omogoča enačba 26). Hkratu bomo nadomestili:

$$x \text{ z } y = \frac{x}{\frac{1}{2} - \delta}$$

Seveda smemo zatreti v enačbi 25) vse konstante, če mislimo iskati samó najmanjšo vrednost konstruktivne invariante  $I$ . Razen tega lahko združimo vse neizločljive konstante v eno samo:

$$\sigma = \frac{21}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} \dots \dots \dots 28)$$

nakar nam ostane samó še:

$$f(y') = \frac{1}{y'} \cdot \left[ \frac{y'^2 + \sigma(1 - y')}{1 - y'} \right]^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots 29)$$

kot ona funkcija, katere najmanjša vrednost nas zanima in ki je proporcionalna konstruktivni invarianti  $I$ .

Rešitev tako postavljene preproste naloge bi morala prav za prav povedati, kateri  $y'_0$  je najpriporočljivejši, če moramo računati z določeno stroškovno konstanto  $\sigma$ . Račun pa nam prinaša obrnjen odgovor, namreč:

$$\sigma = \left( \frac{y'_0}{1 - y'_0} \right)^2 \cdot \frac{y'_0 + 2}{4} \dots \dots \dots 30)$$

ki pa je vendarle dovolj prozoren.

Predno poskušamo praktično izkoristiti, kar smo našli, moramo misliti na vsa vprašanja, ki so nas mučila v zadnjem oddelku. V kakšnem razmerju naj bodeta dolžini povitega in nepovitega dela železnega jedra? In v kakšnem razmerju si naj navitje in jedro delita transformacijske stroške?

Iz enačbe 27), ki ji lahko damo preprostejšo obliko:

$$\frac{h - A}{1 + A} = \frac{5 y'^2}{y'^2 + \sigma (1 - y')} \quad \dots \dots \dots 31)$$

dobimo, če vprežemo enačbo 30):

$$\frac{h - A}{1 + A} = 4 \cdot \frac{1 - y'_0}{2 - y'_0} \quad \dots \dots \dots 32)$$

Iz enačb 9) in 10), ki jih moramo pomnožiti z  $s_z$ , oziroma  $s_b$ , pa dobimo:

$$\begin{aligned} \frac{S_b}{S_z} = \frac{G_b \cdot s_b}{G_z \cdot s_z} &= \sigma \frac{(h - A) \cdot l}{\left(\frac{l}{G_z} - \delta\right) (h + l)} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} \cdot \frac{1 - y'}{y'^2} - \\ &- \frac{1 - y'}{y'^2} \cdot \frac{h - A}{h - A + 1 - A} \cdot \sigma. \end{aligned}$$

V najugodnejšem primeru transformacijskih stroškov postane:

$$y' = y'_0,$$

to, kar zahteva enačba 30),

$$\frac{h - A}{h - A + 1 + A} = \frac{\frac{h - A}{1 + A}}{1 + \frac{h - A}{1 + A}},$$

pa se mora ukloniti zahtevi enačbe 32). Tako dobimo:

$$\left(\frac{S_b}{S_z}\right)_0 = \frac{y'_0 + 2}{6 - 5y'_0} \quad \dots \dots \dots 33)$$

Zdaj je mogoče hkratu odgovoriti na vsa vprašanja, ki se vsiljujejo, s konkretnimi odgovori. Sestavljeni so v naslednji razpredelnici:

$y'_0$	$\sigma$	$\frac{h - A}{1 + A}$	$\left(\frac{S_b}{S_z}\right)_0$
0'1	0'00648	1'895	0'382
0'2	0'0344	1'777	0'44
0'3	0'1055	1'65	0'511
0'4	0'267	1'5	0'6
0'5	0'265	1'355	0'715
0'6	1'46	1'142	0'868
$\frac{2}{3}$	2'666 (= $\frac{8}{3}$ )	1'000	1'000
0'7	3'68	0'925	1'08
0'75	6'18	0'8	1'22

0'8	11'2	0'666 (= $\frac{2}{3}$ )	1'4
0'85	22'9	0'522	1'63
0'9	58'7	0'564	1'955
0'95	266'0	0'1905	2'36
1'00	$\infty$	0'000	3'00

Isto kot razpredelnica pripoveduje v drugi obliki, morda pregledneje, slika 16). Tako v razpredelnici kot v sliki nas ustavi primer:

$$y'_0 = \frac{2}{3},$$

$$\frac{h - A}{1 + A} = 1,$$

$$\left(\frac{S_b}{S_z}\right)_n = 1.$$

Vse, kar je bilo nekoč graditelju transformatorjev sveto, je združeno v njem. Pa tudi naše začetno raziskavanje v 14. in 15. oddelku se oglašča iz njega. Saj smo tam našli, da obeta  $y' = \frac{2}{3}$  najvišjo dosegljivo močnost izbranega raziskovalnega postopka.

20. Vsakemu osnutku v transformatorski panogi je seveda izraz:

$$\sigma = \frac{2 \cdot l}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z},$$

ki ustreza enačbi 28), osnovna opora; zato bi bilo prav za prav pravilno, zamenjati v razpredelnici prejšnjega oddelka prvi in drugi stolpič.  $y'_0$  sloni na  $\sigma$ , ne pa narobe.

Nedvomno pa faktor:

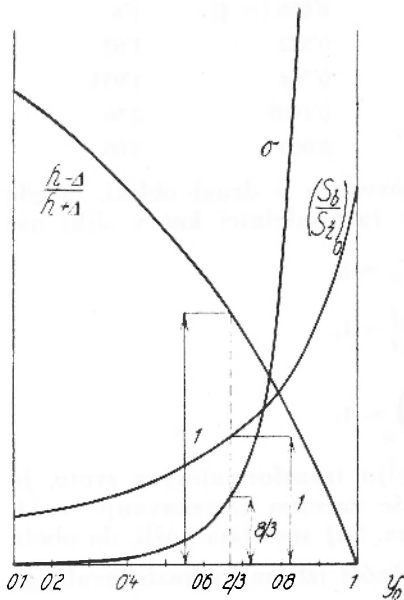
$$\frac{2 \cdot l}{\frac{1}{2} - \delta}$$

ne more povzročiti zapletljajev, saj je očitno dokaj stalen. Če ga preprosto nadomestimo s 5, ne bomo kvarili računov:

$$\sigma \doteq 5 \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z} \dots \dots \dots 28a)$$

Jedro osnutka je po vsem tem razmerje stroškov, ki jih povzročata prostorninska enota (na pr. 1 dm<sup>3</sup>) navitja z ene in ista prostorninska enota železnega jedra z druge strani.

Graditelji transformatorjev so pred tridesetimi leti mislili samo na gradbene stroške, ko so tehtali svoje osnutke. Še danes



Slika 16.

(= 0.8). Dokaj nestalen pa je  $c_b$ , polnilni faktor navitja.

Iz praktično dovolj natančnega nastavka:

$$\sigma \doteq 5 \times \frac{8.9 \times 4}{0.8 \times 7.4 \times 1.5} \cdot c_b \doteq 20 c_b,$$

ki pa velja kajpak samó za problem najcenejšega transformatorja, ne pa za problem najmanjših transformacijskih stroškov, razbere kritični raziskovalec marsikaj.  $c_b$  je večinoma majhen, včasih komaj 0.15. Majhni transformatorji uporabljajo okroglo, razmeroma tanko žico. Izolacijska plast je 0.2 mm debela, brez ozira na premer gole žice. Izkušnje so nas naučile, da moramo tako izolirati. Zató potrebuje na pr. žica, ki ima gola 1 mm, izolirana pa 1.4 mm v premeru:

$$\frac{1.4^2}{\frac{\pi}{4} \times 1^2} \doteq 2.5 \text{ krat}$$

več konstruktivnega prereza kot ga v resnici nudi električnemu toku. Med tuljavicami so potrebni številni hladilni kanali. Tuljavice same nosijo svoje izoalcijske plašče. Vse te okoliščine pritiskajo na  $c_b$ , ki se tudi v veletransformatorju težko dvigne nad 0.5.

misli povprečni graditelj transformatorjev pred vsem na prodajno ceno svojega izdelka, čeprav že ve, da so izdatki za transformacijo neprimerno važnejši od izdatkov za transformator. Pred desetletji torej  $\sigma$  ni mogel bogve kako živo posegati v račune. Kilogram navitja je bil in je še danes nekako 4:1.5-krat dražji od kilograma železnega jedra. To velja za kilogram dograjenega in z vso potrebno izolacijsko snovjo opremljenega navitja ter za kilogram dograjenega jedra iz najboljše pločevine. Specifični teži železa in bakra sta stalni. Zeló stanovitven je tudi polnilni faktor železa  $c_z$

Lahko razumljivo je tedaj, da so starejši graditelji transformatorjev, vsi zaverovani v gole gradbene stroške, razbirali iz svojih osnutkov, ki so jih sestavljali empirično, da morata navitje in jedro prevzeti vsak svojo polovico stroškov. Dokler  $\sigma$  pleše nekako med 2'5 in 5'0,  $c_b$  torej med 0'125 in 0'25 obeta najboljši osnutek, kakor pripoveduje razpredelnica zadnjega oddelka, res približno enake transformacijske stroške jedru in navitju.

Prav trdna pa ta vera v gospodarsko enakopravnost železnega in bakrenega dela transformatorja ni bila nikoli. Zató tudi teoretska razmotrivanja o gradbenih stroških, ki so dokazovala tisto dozdevno enakopravnost, niso nikoli našla pravega odziva iz vrst praktičnih graditeljev. Ko pa so se pojavili velikani v transformatorskih vrstah, je stara enakost delnih gradbenih stroškov tiho izginila. Veliko jedro je vleklo bolj in bolj gradbene stroške nase.

Zakaj pa obeta razpredelnica prejšnjega oddelka v območju relativno močnih premerov stebra ( $y'_0$ ), kakršne uporabljajo veliki transformatorji, navitju premoč v stroških? Ker velja transformacijskim in ne gradbenim stroškom. Ker se skriva na pr. za  $\sigma = 58'5$  drug  $\sigma$ , veljaven za gradbene stroške, ki je morda 10-krat manjši, ker so torej gradbeni stroški navitja lahko 5-krat manjši od gradbenih stroškov jedra, čeprav so hkratu transformacijski stroški navitja 2-krat večji.

Vse te ugotovitve vodijo do razmišljanj, ki so problemu velikega transformatorja zelo važna. Cela vrsta vprašanj se dviga iz njih. Je li polnilni faktor navitja  $c_b$  neodvisen od velikosti transformatorja? Ali smemo predpostavljati, da ostane  $\sigma$ , pravi, transformacijskim stroškom ustrezajoči  $\sigma$ , stanovit, med tem ko dvigamo močnost? In če se spreminja z močnostjo, ali moremo in smemo še zagovarjati idejo velikega transformatorja, ki preprosto varuje obliko železnega jedra in stalnost elektromagnetnih gostot?

Morda pa ravno ta ideja skrivoma ruši, med tem ko navidezno gradi. Morda krivi med naraščanjem močnosti najpriporočljivejšo obliko železnega jedra, ker predpostavlja, da mora ostati takšna, kakršna je bila v območju majhnih močnosti.

Ti pomisleki narekujejo nadaljna raziskavanja. Smoter teh raziskavanj je jasen: razčistiti je treba odnos odločilnega cinitelja v osnutku,  $\sigma$ , do močnosti. Torej bo treba pred vsem ugotoviti, kakšne elektromagnetne gostote obetajo najugodnejše transformacijske stroške. Saj udara dinamični del transformacijskih stroškov z njihovo pomočjo v  $\sigma$ .

#### IV. VPLIV ELEKTROMAGNETNIH GOSTOT NA TRANSFORMACIJSKE STROŠKE

21. Vsakemu osnutku transformatorske panoge je smoter najmanjša možna konstruktivna invarianta kot razmerje transformacijskih stroškov in tričetrtinske potence ustrezajoče močnosti. Ta izredno važna veličina transformatorske teorije je prav za prav samó za neko obliko železnega jedra in za nek določen par elektromagnetnih gostot resnično stanovitna, to se pravi, resnična invarianta. Ideja velikega transformatorja pa ji vsiljuje širši pomen: pripisuje ji stalnost v širokem, prav za prav neomejenem, območju močnosti. Saj trdi, da je mogoče večati močnosti ob nespremenjeni obliki železnega jedra in stalnih gostotah, torej s preprostim spreminjanjem merila v nekem enkrat za vselej sestavljenem osnutku.

Vestna kritika ideje velikega transformatorja se očitno ne more izogniti teoriji transformacijskih stroškov. Pogledati mora, je li konstruktivna invarianta res tudi invarianta večjega in vse večjega transformatorja. Dognati mora, ali se ne skrivajo za okamenelo obliko železnega jedra, ki jo priporoča ideja velikega transformatorja, nevarnosti, ki ogrožajo toliko obetajoče posebnosti velikih močnosti.

V prejšnjem poglavju smo določili konstruktivno invarianto z enačbo 22). Zakon o jarmih, ki nesporno vzdrži vsako kritiko, nam je omogočil s svojo enačbo 27) preprostejši izraz za invarianto. Toda izognili smo se mu, ker smo potrebovali samo spremenljivi del  $f(y')$  po enačbi 29). Tu je treba pred vsem nadoknaditi, kar smo zamudili. Tudi nespremenljivi, oziroma na videz nespremenljivi del invariante I je važen.

Iz pravkar navedenih enačb dobimo, če vnovič uporabljamo izraz:

$$\sigma = \frac{2 \cdot l}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot s_b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot s_z}$$

najprej:

$$I = \frac{\pi \cdot \gamma_z \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{3}{4} \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot 10^{-2}\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \left(\frac{1 + A}{\frac{1}{2} - \delta}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{c_z^{\frac{1}{4}} \cdot s_z}{\left(c_b \cdot \frac{B}{10^4} \cdot g\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{y'} \times \\ \times \left[\frac{y'^2 + \sigma(1 - y')}{1 - y'}\right]^{\frac{3}{4}} \dots \dots \dots 34)$$

potem pa lahko vstavimo:

$$\gamma_z = 7.4 \text{ kg/dm}^3$$

$$\text{in } f = 50 \text{ Hz,}$$

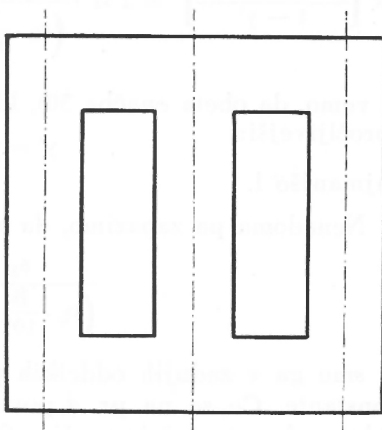
ker je frekvenca električnih naprav pač že dokončno normalizirana. V izjemnih primerih, na pr. kadar imamo opraviti s transformatorji za železnice, moramo kajpak poseči po prvotni enačbi 34).

Torej je:

$$I \doteq 1.13 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{1 + \mathcal{A}}{2 - \delta}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \frac{c_z^{\frac{1}{4}} \cdot s_z}{\left(c_s \cdot \frac{B}{10^4 \cdot g}\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{y'} \cdot \left[\frac{x'^2 + \sigma(1 - y')}{1 - y'}\right]^{\frac{3}{4}} \dots \dots \dots 35)$$

konstruktivna invarianta za en steber transformatorja, to se pravi, za polovico enofaznega transformatorja, ki ima jedro po sliki 6), ali pa za eno fazo trofaznega transformatorja običajnega evropskega ustroja.

Omeniti je treba pač, da pravkar nakazani prehod iz enofazne v trofazno evropsko transformacijo ni popolnoma neoporečen. Iz slike 17), ki prikazuje obliko trofaznega transformatorja, je takoj razvidno, da dobi srednji steber nekoliko večji del jarma kot oba zunanja stebra, če razkosamo jedro na faze. Za praktične račune ne pomeni ta neenakopravnost faz skoraj nič. Zato bi bilo odveč, spuščati se v podrobnosti, ki se skrivajo za njo. Za praktične svrhe pa smemo enačbo 35) še bolj poenostaviti. Razmerje  $(1 + \mathcal{A}) : \left(\frac{1}{2} - \delta\right)$  gotovo ni stalno. Toda četrti koren iz tega razmerja je praktično dovolj stalen. Zato lahko računamo z:



Slika 17.

$$\sqrt[4]{\frac{1 + \mathcal{A}}{\frac{1}{2} - \delta}} \sim \sqrt[4]{3} = 1.315.$$

Praktično zelo stanoviten je tudi polnilni faktor  $c_z$ . Ker itak mislimo na velike transformatorje, smo dovolj previdni, če vzamemo:

$$c_z = 0,8.$$

Nazadnje moramo upoštevati še eno praktično željo. Praktik govori o kilovoltamperjih, naše enačbe pa izražajo močnosti v voltamperjih. Ker pa vsebuje konstruktivna invarianta tričetrtnsko potenco močnosti, jo moramo povečati:

$$1000^{\frac{3}{4}} \doteq 178\text{—krat},$$

če hočemo, da bo ustrezala praktični meri močnosti.

Po vsem tem dobimo:

$$I = \frac{S}{N_{kVA}^{\frac{3}{4}}} = 1,15 \times 10^{-2} \times 1,315 \times 0,8^{\frac{3}{4}} \times 178 \cdot \frac{s_z}{\left(c_b \cdot \frac{B}{10^4} \cdot g\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{y'} \times \\ \times \left[ \frac{y'^2 + \sigma(1-y')}{1-y'} \right]^{\frac{3}{4}} \doteq 2,54 \cdot \frac{s_z}{\left(c_b \cdot \frac{B}{10^4} \cdot g\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{y'} \left[ \frac{y'^2 + \sigma(1-y')}{1-y'} \right]^{\frac{3}{4}} \quad 56)$$

in vemo, da obeta enačba 50), ki odreja določenemu  $\sigma$  najpriporočljivejši:

$$y' = y'_0,$$

najmanjšo l.

Nenadoma pa zapazimo, da  $\sigma$  lahko posega tudi v izraz

$$\frac{s_z}{\left(c_b \cdot \frac{B}{10^4} \cdot g\right)^{\frac{3}{4}}}$$

ki smo ga v zadnjih oddelkih prejšnjega poglavja šteli med konstante. Če se na pr.  $\sigma$  poveča, ker raste  $c_b$ , postane navidezno konstantni izraz živ. Če nadalje mislimo na stroške energijskih izgub, moramo vpoštevati odvisnost enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$  od elektromagnetnih gostot  $g$  in  $B$ . Vsaka sprememba teh gostot vpliva na  $\sigma$ , pa tudi na izraz, ki se nam je zdel doslej nevažen.

Vse to narekuje globlja raziskavanja. Ideja velikega transformatorja predpostavlja sicer stalne elektromagnetne gostote in se izogiba na videz vsem nevarnostim, ki smo jih pravkar omenili. Toda enotne cene  $s_b$  in  $s_z$  so nevarne veličine. Preiskali jih bomo vestno in pazljivo upoštevali popolni izraz za konstruktivno invarianto, ki smo ga zgoraj ugotovili.

22. Kilogram navitja prav za prav ni kilogram bakra. Bakreni ovoji so vsi izolirani in tudi tuljavice, ki so skupine ovojev, so oblečene v plašče iz izolacijske snovi. Praktik pa upošteva vendarle samo težo bakra in zato je njegov kilogram navitja v resnici nekoliko težji, kot je v računih graditelja transformatorjev.

Če pa upoštevamo v osnutku čisto težo bakra, moramo ceno kilograma bakra toliko zvišati, da nosi tudi stroške ustrezajoče izolacijske snovi, pa tudi delo in ostale fabrikacijske stroške, ki se obesijo na kilogram bakra na poti, ki ga vodi do dozdevnega kilograma navitja.

Starejša transformatorska panoga je takó ugotovila enotno ceno  $s_b$ , ker je mislila samó na gradbene stroške in podobno je ugotovila enotno ceno  $s_z$  za kilogram železnega jedra. Nizka prodajna cena ji je bila pač vse, ker ji je bil transformator blago in zato samó objekt hlastanja po trgovskih dobičkih.

Toda vestnemu sodobnemu graditelju transformatorjev statični del enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$  ne tehta več osnutkov. Kilogram transformatorskega železa mu je ves živ, ves poln nihajočega magnetnega fluksa, ki preobrača najmanjše železne delce sem in tja. Ravno tako živ mu je kilogram bakra. Elektroni obratnega električnega toka se podé v bakru sem in tja, se zadevajo ob bakrene atome in jih poživljajo. Vsak kilogram železa in vsak kilogram bakra pomeni sodobnemu graditelju transformatorjev neko množino v letu neplodno, v notranjosti snovi, opravljene delo in ustrezajoče kilovatne ure nezaželen strošek. Dinamični del enotnih cen transformatorskega železa in bakra je dandanes važnejši od statičnega.

Gostoti  $g$  efektivnih amperjev na kvadratni milimeter ustrezajo nekako:

$$2,5 \cdot g^2 \text{ vatov} = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot g^2 \text{ kilovatov}$$

Jouleove toplote v kilogramu bakra, gostoti  $B$  maksimalnih gausov pa nekako:

$$1,25 \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \text{ vatov} = 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \text{ kilovatov}$$

energijskih izgub v kilogramu prvovrstnega sodobnega transformatorskega železa. Od števila letnih obratnih ur  $h_z$ , oziroma  $h_b$ , in vrednosti potrošene kilovatne ure  $p_z$ , oziroma  $p_b$ , pa je še odvisen dinamični del enotne cene transformatorskega železa, oziroma bakra:

$$1,25 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot h_z \cdot p_z \dots \dots \dots \text{ za železo}$$

in  $2,5 \cdot 10^{-3} \cdot g^2 \cdot h_b \cdot p_b \dots \dots \dots \text{ za baker.}$

Če tedaj ocenimo vrednost kilograma jedra z ž denarnimi enotami, vrednost kilograma navitja pa z b denarnimi enotami in letno obrestovalno ter odpisovalno kvoto s p (na pr.  $p = 0,1$ , ustrežno 10-odstotni kvoti), dobimo za celokupne enotne cene, sestavljene iz statičnega in dinamičnega dela, kot jo mora upoštevati problem transformacijskih stroškov:

$$s_z = \dot{z} \cdot p + 1,25 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot h_z \cdot p_z \text{ denarnih enot/kg in leto . . . 57)}$$

in

$$s_b = b \cdot p + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot g^2 \cdot h_b \cdot p_b \text{ denarnih enot/kg in leto . . . 58)}$$

Marsikaj je omembe vredno, kar bi utegnil površni opazovalec enačb 57) in 58) prezreti. Pred vsem to, da je starejša transformatorska panoga, ki je imela samo gradbene stroške pred očmi, smela računati z resničnimi izdatki graditelja za kilogram železa (ž) in bakra (b), da pa pomenita v enačbah 57) in 58) ž in b enotni ceni, ki jih mora plačati, kdor kupi in uporablja transformator. V transformacijskih stroških se skrivajo torej tudi obresti in odpisi zaslužka, ki ga je spravil graditelj.

Posestnik transformatorja obrestuje oziroma odpisuje železni in bakreni del stroja z isto kvoto p. Ne sme pa predpostavljati, da bo plačeval za v železu potrošeno kilovatno uro isto ceno kot za kilovatno uro, ki jo potrosi baker. Zato je treba upoštevati dve različni enotni ceni  $p_z$  in  $p_b$ .

Železno jedro transformatorja je omrežju konzument, ki ima zelo stalne potrebe. Saj se napetost omrežja ne spreminja, zato pa tudi ne gostota B. Pretežna večina transformatorjev ostane noč in dan pod napetostjo. Železno jedro nabere na ta način kaj lahko 8760 obratnih ur v letu. Več jih leto nima.

Tako idealnemu konzumentu je lahko predpisati razmeroma nizko ceno  $p_z$  za kilovatno uro. Teže je biti pravičen navitju, ki je s svojo Jouleovo toploto tudi samostojen konzument omrežja. Obtežitev transformatorja se v teku dneva, pa tudi v teku meseca in vsega leta neprestano spreminja, z njo pa obremenilni toki navitja. V kvadratnem razmerju se seveda spreminja Jouleova toplota v bakru navitja.

Vsa letna Jouleova toplota navitja bi se pa nabrala mnogo hitreje kot se v resnici nabere, namreč v  $h_b$  namesto v 8760 urah, če bi nastajala ob polni obremenitvi transformatorja. Torej je  $h_b$ , število obratnih ur bakra, le pomožen pojem, ki pa zelo dobro služi.

Iz vseh teh kratkih opazk je že razvidno, da so enotne cene  $s_b$  in  $s_z$  pravilno postavljenega problema transformacij-

skih stroškov zelo zamotano sestavljene veličine. To dejstvo je važno tudi problemu velikega transformatorja. Upoštevali ga bomo, ko bomo imeli vso rešitev problema transformacijskih stroškov pred seboj.

Da pa se lahko povzpne do te razgledne točke, moramo uvesti  $s_z$  in  $s_b$  po enačbah 37) in 38) brez podrobnejše kritike v še neraziskani drugi del problema transformacijskih stroškov, ki naj odredi elektromagnetnim gostotam pravilne vloge v osnutku transformatorja.

25. Prav za prav bi morali preprosto nadomestiti v enačbi 36) za konstruktivno invarianto I enotni ceni  $s_z$  in  $s_b$  z izrazoma po enačbah 37) in 38) ter poiskati oni dve posebni vrednosti za  $g$  in  $B$ , ki obetata najmanjši I. Toda ubrali bomo drugo pot.

Priporočljiveje je, načeti problem transformacijskih stroškov tako rekoč tudi še z drugega konca. Oblika železnega jedra je del osnutka, višina elektromagnetnih gostot drugi del. Če vodimo raziskovanje tega drugega dela po samostojni poti, smemo upati na srečanje z raziskovanjem prvega dela, ki smo ga opravili v prejšnjem poglavju. Takšno srečanje mora postati zelo koristno in poučno. Gotovo nam bo omogočilo globlji vpogled v problem transformacijskih stroškov in hkratu v problem velikega transformatorja kot pa preprosto nadaljevanje raziskovanja, ki je bilo doslej nedvomno uspešno.

Vzemimo tedaj poljubno zgrajen transformator, ki naj ima  $G_z$  kilogramov železa in  $G_b$  kilogramov bakra, predpostavljajmo, da graditelj ni upošteval izsledkov prejšnjega poglavja, ki določajo najugodnejšo obliko in s tem tudi najpriporočljivejše razmerje  $G_b : G_z$  in načnimo vprašanje, kakšni elektromagnetni gostoti  $g$  in  $B$  bi morali naprtiti transformatorju, da bi povzročal kar se da majhne transformacijske stroške.

Tako postavljeno vprašanje seveda ne meri na nobeno določeno močnost. Vsakemu zmnožku  $g \cdot B$  ustreza pač posebna močnost. Z neko konstanto  $C$ , katere velikost nas pa prav nič ne zanima, smemo vsakokratni učinek izraziti z:

$$N = C \cdot g \cdot B. \quad \dots \dots \dots 39)$$

Vprašanje predpostavlja kajpak tudi poznanje vseh onih gospodarskih podatkov, ki vplivajo na obe enačbi 37) in 38). Ker pa je njegov smoter nedvomno najmanjša konstruktivna invarianta, nas zanima le funkcija:

$$f \left( g \cdot \frac{B}{10^4} \right) = \frac{G_z \cdot s_z + G_b \cdot s_b}{\left( g \cdot \frac{B}{10^4} \right)^{\frac{2}{3}}}$$

to se pravi, če takoj posežemo po enačbah 37) in 38), funkcija:

$$f\left(g \cdot \frac{B}{10^4}\right) = \left\{ G_z \left[ \dot{z} \cdot p + 1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot h_z \cdot p_z \right] + G_b \left[ b \cdot p + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} g^2 \cdot h_b \cdot p_b \right] \right\} : \left(g \cdot \frac{B}{10^4}\right)^{\frac{3}{2}}$$

Priporočljivo pa je, zagotoviti izsledkom, ki naj jih prinese račun, splošnejšo veljavo s tem, da nadomestimo določene specifične energijske izgube v bakru in železu z nedoločenimi, da torej uvedemo izraza:

$$k_b = 2 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ kW/kg, A/mm}^2 \quad \dots \quad 40)$$

$$k_z = 1 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \text{ kW/kg, } 10^{-4} \text{ G, } \dots \quad 41)$$

kar vodi k dokončnemu nastavku:

$$f\left(g, \frac{B}{10^4}\right) = \left\{ G_z \left[ \dot{z} \cdot p + k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot h_z \cdot p_z \right] + G_b \left[ b \cdot p + h_b \cdot g^2 \cdot h_b \cdot p_b \right] \right\} : \left(g \cdot \frac{B}{10^4}\right)^{\frac{3}{2}} \quad \dots \quad 42)$$

Najugodnejši gostoti  $g$  in  $B$  dobimo iz:

$$\frac{\delta f\left(g, \frac{B}{10^4}\right)}{\delta g} = 0, \text{ oziroma } 5 \cdot k_b \cdot g^2 \cdot G_b \cdot h_b \cdot p_b - 3 \cdot k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot G_z \cdot h_z \cdot p_z = 3 \left[ G_z \cdot \dot{z} \cdot p + G_b \cdot b \cdot p \right] \quad \dots \quad 43)$$

in

$$\frac{\delta f\left(g, \frac{B}{10^4}\right)}{\delta \left(\frac{B}{10^4}\right)} = 0, \text{ oziroma } 5 \cdot k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot G_z \cdot h_z \cdot p_z - 3 \cdot k_b \cdot g^2 \cdot G_b \cdot h_b \cdot p_b = 3 \left[ G_z \cdot \dot{z} \cdot p + G_b \cdot b \cdot p \right] \quad \dots \quad 44)$$

Toda kar spotoma lahko poberemo dva izredno važna izsledka, ki ne veljata neposredno najugodnejšim gostotam. Razlika obeh enačb 43) in 44) je namreč:

$$k_b \cdot g^2 \cdot G_b \cdot h_b \cdot p_b = k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot G_z \cdot h_z \cdot p_z, \quad \dots \quad 45)$$

vsota pa:

$$k_b \cdot g^2 \cdot G_b \cdot h_b \cdot p_b + k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot G_z \cdot h_z \cdot p_z = 3 \left[ G_z \cdot \dot{z} \cdot p + G_b \cdot b \cdot p \right] \quad \dots \quad 46)$$

Torej veljata dva osnovna konstruktivna zakona:

1. Letne energijske izgube v navitju naj stanejo ravno toliko kot letne energijske izgube v železnem jedru,

2. Stroški letnih energijskih izgub vsega transformatorja naj prekašajo trikrat letne obresti in odpise, ki jih zahteva v transformatorju naloženi kapital.

Prvi izmed teh dveh zakonov je prav za prav že dolgo doma v teoriji transformatorskih osnutkov, čeprav v nepovoljni obliki. Teoretiki so namreč pred desetletji raziskovali vprašanje, kateri gostoti  $g$  in  $B$  obetata najmanjše energijske izgube v polno obremenjenem transformatorju, ki ima  $G_b$  kilogramov bakra in  $G_z$  kilogramov železa in določeno močnost, pa so našli, da pomeni:

$$q \left( g, \frac{B}{10^4} \right) = k_b \cdot g^2 \cdot G_b + k_z \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot G_z$$

celokupne energijske izgube (v kW),

$$g \cdot \frac{B}{10^4} = \text{konst.}$$

pa stanovitno močnost ob spremenljivih gostotah. Odgovor na postavljeno vprašanje je bil:

$$k_b \cdot g^2 \cdot G_b = k_z \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot G_z \quad \dots \dots \dots 47)$$

Ta odgovor je zelo soroden izsledku enačbe 45), toda le po obliki. Starejši teoriji je bilo važno, da transformator oddaja močnost, ki mu je bila zaupana, kar najmanj okrnjeno. Tako imenovani **g o s p o d a r s k i f a k t o r** kot razmerje transformirane močnosti do transformaciji izročene je bil pač pred desetletji važno merilo konstruktivnih uspehov. Določevali so ga kajpak pred vsem za primer polne obremenitve transformatorja in se ponašali s tem, da dosega 96, 97, včasih celo 98 odstotkov.

Danes vemo, da paradne številke ne smejo usmerjati važnih tehničnih problemov in da ni važno, kako gospodarji transformator v sekundi ob najvišji, ravno še dopustni navidezni močnosti, da pa je važen letni obračun transformacije. V tem obračunu nastopajo najrazličnejše močnosti, kakor jih pač zahtevajo potrebe živega obrata, razen tega se v njem uveljavljajo razlike enotnih cen, ki ocenjujejo v navitju izgubljene kilovatne ure.

Med enačbama 45) in 47) je po vsem tem večja vrzel kot med gospodarskim faktorjem polne močnosti in tako imenovanim letnim gospodarskim faktorjem, ki naj prenese razmerje oddane do prejete močnosti iz bežne sekunde na dolgo obratno leto. Zato pa je prvi izmed zgoraj ugotovljenih konstruktivnih zakonov le še v zelo rahli zvezi s starim zakonom, ki zahteva enake energijske izgube v železu in bakru ob polni močnosti, zakonom, ki ga je transformatorska panoga zgodaj pozabila in zavrгла.

Drugi izmed zgoraj ugotovljenih dveh konstruktivnih zakonov je star komaj deset let. Na mednarodnem elektrotehničnem kongresu v Parizu ga je 1932. leta avtor v svojem referatu „Le problème économique dans la construction des transformateurs“ (Congrès international d'Electricité, Paris 1932, Comptes rendus des travaux de la troisième section, tome II, rapport n° 17) prvič utemeljil.

Laik ne pričakuje tako izdatnih stroškov zaradi v transformaciji izgubljene energije, posebno če ve, da se graditelji transformatorjev dolga desetletja sploh niso zanimali zanje. Saj je res težko umljivo, da so merili vsi starejši transformatorski osnutki na najnižje gradbene stroške, torej posredno na najnižje obresti in odpise za te stroške, ne pa na očitvidno mnogo važnejše energijske stroške transformacije.

Res je seveda, da so energijski stroški le postopoma dosegli svoj pomen. Saj so rastle, med tem ko so gradbeni stroški padali. Priznati je treba torej, da se je transformatorska panoga vendarle pravilno razvijala, očitati bi ji smeli le, da jo je zalet vrgel čez pravilno postavljeni smoter. Ta smoter postavlja drugi izmed zgoraj ugotovljenih dveh konstruktivnih zakonov, ki hkratu zaključuje dolg, naporen in mestoma buren razvoj gospodarskega problema transformacije.

24. Iz enačb 45) in 44) je lahko določiti najugodnejši gostoti:

$$g^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{G_z \cdot \check{z} \cdot p + G_b \cdot b \cdot p}{G_b \cdot k_b \cdot h_b \cdot p_b} \quad \dots \dots \dots 45)$$

in

$$\left(\frac{B}{10^4}\right)^2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{G_z \cdot \check{z} \cdot p + G_b \cdot b \cdot p}{G_z \cdot k_z \cdot h_z \cdot p_z} \quad \dots \dots \dots 49)$$

Toda preden poskušamo raziskavati pomen teh dveh določilnih enačb, hočemo še ugotoviti, da je:

$$s_b = b \cdot p + k_b \cdot h_b \cdot p_b \cdot g^2 = \frac{5}{2} \cdot b \cdot p + \frac{3}{2} \cdot \check{z} \cdot p \cdot \frac{G_z}{G_b} \quad \dots \dots \dots 50)$$

in

$$s_z = z \cdot p + k_z \cdot h_z \cdot p_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 = \frac{5}{2} \cdot \check{z} \cdot p + \frac{3}{2} \cdot b \cdot p \cdot \frac{G_b}{G_z} \quad 51)$$

oziroma:

$$\frac{S_b}{S_z} = \frac{G_b s_b}{G_z s_z} = \frac{3 + 5 \cdot \frac{G_b \cdot b}{G_z \cdot \check{z}}}{5 + 3 \cdot \frac{G_b \cdot b}{G_z \cdot \check{z}}} \quad 52)$$

če obratuje transformator, ki ima  $G_b$  kilogramov bakra in  $G_z$  kilogramov železa, z najpriporočljivejšima gostotoma.

Zadnjo enačbo bomo potrebovali tudi obrnjeno:

$$\frac{G_b \cdot b}{G_z \cdot \check{z}} = \frac{\kappa \cdot \frac{S_b}{S_z} - 3}{5 - 3 \cdot \frac{S_b}{S_z}} \quad 53)$$

zelo važna pa nam bo povezanost obeh najugodnejših gostot, ki jo s pomočjo enačb 48) in 49) lahko izrazimo v obliki:

$$\frac{B}{10^4} = \sigma \sqrt{\frac{k_b \cdot h_b \cdot p_b}{h_z \cdot h_z \cdot p_z} \cdot \frac{G_b}{G_z}} \quad 54)$$

Začnimo razpravo o najpriporočljivejših gostotah s pravkar ugotovljeno odvisnostjo gostote  $B$  od gostote  $g$ ! Spominjamo se uvodoma starejše teoretske oblike te odvisnosti, ki je izražena v enačbi 47), ki jo torej lahko preoblikujemo v:

$$\frac{B}{10^4} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{k_b}{k_z} \cdot \frac{G_b}{G_z}} \quad 55)$$

in vprašajmo, zakaj je transformatorska panoga to odvisnost, zgrajeno na iskanju odličnih gospodarskih faktorjev, prav za prav zavrgla.

Če mislimo na sodobne specifične energijske izgube, moramo po enačbah 40) in 41) računati z:

$$\frac{k_b}{k_z} \doteq 2.$$

Če vrhu tega upoštevamo vero starejše generacije graditeljev v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra, dobimo k razmerju:

$$b : \check{z} = 4 : 1,5,$$

ki nekako ustreza porabi prvovrstne močno legirane pločevine:

$$\frac{G_b}{G_z} = \frac{1.5}{4}$$

Enačba 55) nam torej dovoljuje:

$$\frac{B}{10^4} = g \cdot \sqrt{2 \times \frac{1.5}{4}} = 0.866 g.$$

Ker pa oziri na vzbujalni tok v območju zmernih močnosti ne dopuščajo, kakor uče dolgoletne izkušnje, višjih gostot od

$$B = 14.000 \text{ G,}$$

bi morala gostota  $g$  ostati obupno skromna. Po vsem videzu kvečjemu dovoljenih:

$$g = 1.75 \text{ A/mm}^2$$

je namreč že mlada transformatorska panoga energično prekoračila. Saj se je že pred desetletji povzpela na  $3.5 \text{ A/mm}^2$ .

V nevzdržnem položaju, ki ga je ustvarila enačba 55), se je transformatorska panoga preprosto odrekla mamljivemu visokemu gospodarskemu faktorju, priznala je, da je teorija sledila varljivemu smotru, da je služila piškavi paradni številki — in drvela je čez takó podrté zapreke naprej, slepo udana nižanju gradbenih stroškov.

Toda nova enačba 54) ni več plod paradnih števil in varljivih smotrov. Njena prava vsebina je dokaj različna od vsebine stare enačbe 55), toda graditelj jo mora upoštevati. Res je, da ga ne vežejo več predsodki, da se je izmotal iz vere v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra. Toda oziri na vzbujalni tok so še vsi živi in zató se gostota  $B$  tudi danes ne sme dvigniti čez  $14.000 \text{ G}$ .

Vzemimo skrajni primer: transformator naj obratuje noč in dan, dan za dnem, vseh  $8760$  letnih ur torej, s polno navidezno močnostjo. V tem primeru bi bilo seveda:

$$h_b = h_z$$

in prav nobenega razloga bi ne našli za kakršno koli razliko med  $p_b$  in  $p_z$ . Enačba 54) bi potem zahtevala isto, kar je zahtevala stara enačba 55).

V tem skrajnem primeru, ki pa nikakor ni dosegljiv, se kopičijo pred graditeljem transformatorja na videz vse tiste stare zapreke, ki jih je morala prodirajoča transformatorska panoga brezobzirno porušiti. Toda videz vara: danes ne verujemo več v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra. Danes bomo pač prilagodili razmerje  $G_b : G_z$  razmerju  $g : B$ , ki ga hočemo imeti — če smo prepričani, da uve-

ljavljamo res priporočljivi gostoti  $g$  in  $B$ . Zatrjevanje, da hlajenje navitju ne dela neprilik, če se povzpne mo do  $g = 5.5 \text{ A/mm}^2$ , da pa vzbujalni tok omejuje gostoto fluksa na  $14.000 \text{ G}$  ni noben dokaz, da je

$$g : \frac{B}{10^4} = 3.5 : 1.4$$

razmerje najpriporočljivejših gostot.

Transformatorji, ki obratujejo vse leto s polnim dopustnim bremenom, so redke pojave. Pač pa ostaja večina transformatorjev vse ali skoraj vse leto pod napetostjo, kar pomeni:

$$h_z = 8760 \text{ ur.}$$

Baker povprečnega transformatorja doseže mnogo manj „obratnih ur“, včasih komaj 1000.

Toda zmotno bi bilo pričakovati od razmerja  $h_b : h_z$ , ki se teoretsko premika med  $0 : 1$  in  $1 : 1$ , izdatno pomoč v borbi zoper neprilike vzbujalnega toka. Razmerje:

$$h_b \cdot p_b : h_z : p_z$$

je namreč mnogo stanovitnejše od razmerja  $h_b : h_z$ . Kilovatna ura Jouleove toplote je iz razumljivih vzrokov tem dražja. Čim manj je v letu teh kilovatnih ur, čim manjši je torej  $h_b$ .

Res je vsekakor, da ostane:

$$h_b \cdot p_b < h_z \cdot p_z$$

dokler je  $h_b < h_z$ . Res pa je tudi, da obleži pretežni del vseh težav, ki izvirajo iz zavrte gostote  $B = 14.000 \text{ G}$ , na razmerju  $G_b : G_z$ .

25. Raziskovanje vpliva elektromagnetnih gostot na transformacijske stroške, ki smo ga začeli popolnoma samostojno, to se pravi, ne da bi upoštevali vpliv oblike železnega jedra na iste transformacijske stroške, nas je privedlo do kritične točke v gospodarski teoriji transformatorja. Oglejmo si položaj, v katerega smo zašli!

Dinamični del enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$  je močno odvisen od elektromagnetnih gostot  $g$  in  $B$ . Če tedaj mislimo na določen transformator z  $G_b$  kilogrami bakra in  $G_z$  kilogrami železa, vidimo takoj, da smemo le tako dolgo dvigati enotni ceni  $s_b$  in  $s_z$ , dokler prinaša z gostotama rastoča močnost več kot jemljejo večajoči se transformacijski stroški.

Tako smo prišli do kritičnih gostot  $g$  in  $B$ , ki sta opisani v enačbi 48) in enačbi 49). Vse bi bilo v najlepšem redu, če bi na tem mestu smeli preprosto pritegniti izsledke iz prvega dela

raziskovanja transformacijskih stroškov in nadomestiti poljubni  $G_b : G_z$  s tistim, ki ustreza najpriporočljivejši obliki železnega jedra. Toda tu, kjer se srečavata oba delna problema transformacijskih stroškov, stoji zapreka: vzbujalni tok transformatorja pritiska kakor môra na gostoto B.

Živa transformatorska panoga se je že zdavnaj udala temu pritisku in zato ji je B otrpnila nekako pri 14.000 G. To pa pomeni, kakor priča enačba 54), da mora misliti na prikladno razmerje  $G_b : G_z$ . Kako pa naj se potem uveljavi oni del problema transformacijskih stroškov, ki prerešeta možne oblike železnega jedra, to se pravi, možna razmerja  $G_b : G_z$ ?

Ta slika pojasnjuje pritajena, toda neumorna prizadevanja graditeljev transformatorjev, izmotati se iz jarma, ki ga je naprtil vzbujalni tok transformatorski teoriji. Pripoveduje nam, da uživa gostota 14.000 G priznanje, kakšnega rodi samó nasilje. V njenem ozadju slutimo silno željo, povzpeti se na 16.000, 17.000 G.

Morda pa je ta želja vendarle samo ostanek iz tistih časov, ko so bili gradbeni stroški vse, transformacijski stroški pa nevažni, ko nobena gostota ni bila dovolj visoka. Ali pa je transformatorska panoga morda le imela to srečo, da ji je vzbujalni tok pribil gostoto fluksa prav tja, kjer jo hoče imeti problem transformacijskih stroškov?

To je prav za prav obupno, zadnje, upanje raziskovalca tega zamotanega problema. In vendar bi takšno upanje ne bilo popolnoma neutemeljeno. Gospodarska plat vseh tehničnih problemov je megljena. Vsi gospodarski podatki, ki posegajo v problem transformacijskih stroškov, so precej negotove veličine. Morda pa leži ravno v negotovosti gospodarskih vplivov dovolj mehkode za omiljenje trdot, ki jih prinaša kot zelo nezaželen gost vzbujalni tok transformatorja.

Po vsem tem stojimo pred nalogo, da združimo izsledke obeh delov raziskovanja transformacijskih stroškov, in sicer najprej brez ozira na zahteve, ki jih prinaša vzbujalni tok. Ta naloga ne more naleteti na nobeno težavo. Šele, ko zaokrožena teorija transformacijskih stroškov ugotovi, kakšno bi moralo biti železno jedro in kakšni elektromagnetni gostoti, se sme vzbujalni tok javiti k besedi. Kar koli pa potem pové, je kajpak odveč. Vkljub temu mora graditelj transformatorjev pazljivo poslušati zaključno besedo tega neprijetnega nadzornika osnutkov.

Preden se lotimo pravkar opisane naloge, smemo opozoriti na neko posebnost izsledkov, ki jih je našlo naše raziskavanje o vplivu elektromagnetnih gostot na transformacijske stroške.

Ta posebnost je povezana z nekdanjo vero v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra:

$$G_b \cdot b = G_z \cdot z$$

Kakšno razmerje delnih transformacijskih stroškov bi neki imeli v tem primeru?

Enačba 52) nam odgovori takoj:

$$S_b = S_z$$

Iz enačb 50) in 51) pa dobimo:

$$s_b = 4 b \cdot p,$$

$$s_z = 4 z \cdot p,$$

kar pomeni, da je dinamični del enotnih cen trikrat večji od statičnega.

V 23. oddelku smo ugotovili dva osnovna konstruktivna zakona, ki se sučeta okoli stroškov energijskih izgub v železu in bakru. Ta dva zakona priporočata po vsem videzu kot naj-priprostejšo rešitev ono ureditev, ki smo jo pravkar opisali.

Toda ta ureditev je vendarle samó ena izmed neštetihi možnih in zato smo izkopali z njo le neko posebnost izsledkov drugega dela naše teorije transformacijskih stroškov. Z njo bi bilo žal nemogoče premostiti težave, ki jih kopiči vzbujalni tok. To smo že ugotovili v zadnjem oddelku.

Težko je odreči tej posebni ureditvi transformatorja priznanje, da obeta osnutku nenavadno harmonijo. Zató je tudi težko, zavreči jo za vselej. Iz nje se oglašá stara vera, ki poskuša vstati vsa nova in celó močnejša ( $S_b = S_z$ ) kot je kedaj bila.

Če bi res vstala, bi transformacijski stroški razpadli na štiri enake dele. Prvega bi prevzel jarem, drugega steber, tretjega primarno, četrtega sekundarno navitje. Vsak izmed teh štirih delov pa bi sam razpadel na štiri enake dele, na en statični in tri dinamične.

Estetski razlogi so seveda brez moči, če poskušajo posegati v tehnične probleme, ki so vsi globoko zasidrani v gospodarstvu. Teoretiku pa, ki raziskuje zamotan tehnični problem, pomeni lepa, to se pravi, prozorna in preprosta rešitev problema mnogo. V lepoti izsledka slutí marsikateri teoretik izdatno potrdilo, da je resnici na sledu.

Takšno gledanje na znanstveno delo je močno razširjeno v področju fizike, pred vsem pa v tehničnem svetu. Teoretska fizika se ga je že domala otresla, ker je spoznala, da se ne sme udajati meglenim razlogom. Teoretska tehnika je pa tudi

še danes nekoliko nekritična. Zato je še precej udana estetskim motnjam.

Udajmo se jim še bežen trenutek v zgoraj opisanem primeru, ki je sprožil načelne pripombe. Če bi moral dinamični del enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$  res trikrat prekašati statičnega, bi očitvidno  $s_b : s_z$  soupadlo z  $b : \dot{z}$ . Iz tega bi pa takoj sledilo, da bi postal smoter najmanjših gradbenih stroškov identičen s smotrom najmanjših letnih transformacijskih stroškov!

Naknadno bi starejši graditelji transformatorjev na ta način dobili priznanje, da so vestno gradili, da jih ni gnalo lakomno tekmovanje prodajalcev transformatorjev, da jim transformator ni bil preprosto blago, ki naj prinaša fabrikantu trgovske dobičke, temveč pospeševatelj prenašanja in razdeljevanja električne energije, da so mislili na vse, ko so izdelovali svoje osnutke, pred vsem tudi na energijske izgube transformacije. Če se sklicujejo na svojo trdno vero v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra, jim to naknadno priznanje v resnici gre, čeprav ga seveda niso zaslužili. Ta vera je očitvidno močan, toda varljiv činitelj transformatorske teorije.

26. Če pustimo vse ozire na vzbujačni tok v nemar in poskušamo preprosto združiti izsledke obeh delnih problemov transformacijskih stroškov, ker hočemo ugotoviti najcenejšo obliko in najpriporočljivejši elektromagnetni gostoti v skupni sliki, posežemo najboljše po enačbi 55), da jo povežemo z enačbo 52).

$$\text{Iz:} \quad \frac{G_b \cdot b}{G_z \cdot \dot{z}} = \frac{5 \cdot \frac{y'_0 + 2}{6 - 5 y'_0} - 3}{5 - 3 \cdot \frac{y'_0 + 2}{6 - 5 y'_0}}$$

sledi takoj:

$$\frac{G_b \cdot b}{G_z \cdot \dot{z}} = \frac{5 y'_0 - 2}{6 - 5 y'_0} \dots \dots \dots 56)$$

Ta izsledek se dá uporabiti v obeh enačbah 48) in 49). ki določata najpriporočljivejši gostoti: Tako dobimo:

$$g = \sqrt{\frac{3 b p}{k_b \cdot h_b \cdot p_b} \cdot \frac{2 - y'_0}{5 y'_0 - 2}} \dots \dots \dots 57)$$

in

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \dot{z} p}{k_z \cdot h_z \cdot p_z} \cdot \frac{2 - y'_0}{6 - 7 y'_0}} \dots \dots \dots 58)$$

Enačba 56) omogoča ugotovitev najprikladnejših enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$ , ki jih je drugi del naših raziskovanj pribil z enačbama 50) in 51). Rešitev te naloge se glasi:

$$s_b = 2 b p \cdot \frac{y'_0 + 2}{5 y'_0 - 2} \dots \dots \dots 59)$$

in

$$s_z = 2 z p \cdot \frac{6 - 5 y'_0}{6 - 7 y'_0} \dots \dots \dots 60)$$

S pomočjo zadnjih dveh izsledkov se sedaj lahko lotimo enačbe 28) in dobimo:

$$\sigma = \frac{2 \cdot l}{1 - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b}{c_z \cdot \gamma_z} \cdot \frac{b}{z} \cdot \frac{y'_0 + 2}{5 y'_0 - 2} \cdot \frac{6 - 7 y'_0}{6 - 5 y'_0}$$

Ker pa je raziskovanje prvega delnega problema transformacijskih stroškov v prejšnjem poglavju doseglo svoj višek z enačbo 50), smemo zaključiti združevanje obeh delnih problemov z nastavkom:

$$\psi = \frac{8 \cdot l}{1 - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot z} = \left( \frac{y'_0}{1 - y'_0} \right)^2 \cdot \frac{(5 y'_0 - 2)(6 - 5 y'_0)}{6 - 7 y'_0} \dots \dots \dots 61)$$

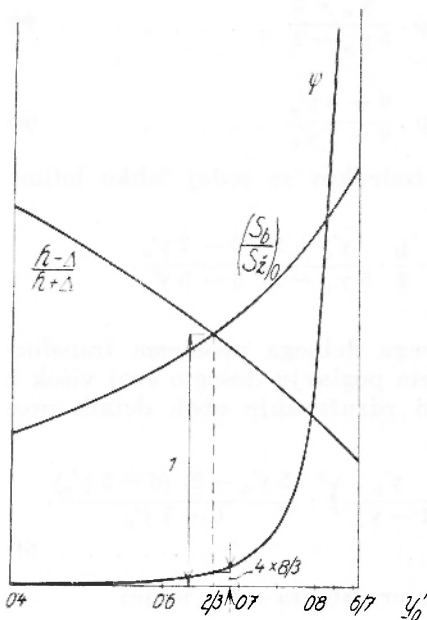
ki postavlja relativnemu premeru stebra ostre meje:

$$0.4 < y'_0 < \frac{6}{7} \doteq 0.857 \dots \dots \dots 62)$$

Te meje upošteva naslednja razpredelnica:

$y'_0$	$\psi$	$\frac{h - A}{1 + A}$	$\left( \frac{S_b}{S_z} \right)$
0.4	0	1.5	0.6
0.5	0.7	1.333	0.715
0.6	3.75	1.142	0.868
$\frac{2}{3}$	10.67 ( $= 4 \times \frac{8}{3}$ )	1.000	1.000
0.7	18.56	0.923	1.08
0.75	47.23	0.8	1.22
0.8	160.00	0.666 ( $= \frac{2}{3}$ )	1.4
0.825	394.00	0.595	1.505
0.85	2526.00	0.522	1.65
$\frac{6}{7}$	$\infty$	0.500	1.667

Njeno vsebino opisuje v preglednejši obliki slika 18). Zadnja dva stolpiča razpredelnice smo seveda prevzeli iz razpredelnice 19. oddelka in ju izpopolnili.



Slika 18.

Če primerjamo pravkar sestavljeno razpredelnico z ono iz 19. oddelka, zapazimo razlike, ki zaslužijo nekaj pripomb. Dokler mislimo na poljubne, toda brez ozira na transformacijske stroške predpisane elektromagnetne gostote — moramo opirati osnutek na enotni ceni  $s_b$  in  $s_z$ , ki sta odvisni od fabrikacijskih enotnih cen  $b$ ,  $z$  in od energijskih izgub, ki jih vsiljujejo predpisane gostote kilogramu bakra in železa. Kakor hitro pa uvidimo, da je treba elektromagnetne gostote sproti prilagodevati ozirom na transformacijske stroške, ostane neodvisen samó še vpliv enotnih fabrikacijskih cen  $b$  in  $z$ . Zató se opira razpredelnica 19. oddelka na pomožno veli-

čino  $\sigma$ , ki je funkcija enotnih cen  $s_b$  in  $s_z$ , pravkar sestavljena razpredelnica pa na  $\psi$ , ki je funkcija fabrikacijskih enotnih cen  $b$  in  $z$ .

Prav za prav posegata v obeh opisanih primerih samo razmerja enotnih cen, to se pravi, tam  $s_b : s_z$ , tu pa:  $b : z$  v osnutek. Le, če je:

$$s_b : s_z = b : z$$

morata obe razpredelnici soglašati.

V 25. oddelku smo ugotovili, da obeta posebni primer:

$$S_b = S_z$$

enakost razmerij obeh vrst enotnih cen. V tem primeru mora biti:

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

V tem primeru pa zahtevata enačbi 28) in 61):

$$\psi = 4 \sigma,$$

kar je res izpolnjeno v naših dveh razpredelnicah.

S tem smo našli nekakšno presečišče dveh problemov. Problem transformacijskim stroškom prilagodenih elektromagnetnih gostot, ki ga obravnavamo v tem poglavju, pa ima sam nekakšno presečišče, ki zasluži, da ga omenimo. Iz enačbe 33) je razvidno, da je mogoče prikazati odvisnost razmerja delnih transformacijskih stroškov  $(S_b : S_z)_0$  od vsakokratnega najpriporočljivejšega relativnega premera stebra ( $y'_0$ ) v obliki hiperbole (slika 19). Ravno tako je podoba odvisnosti razmerja delnih gradbenih stroškov  $G_b b : G_z z$ , kakor pripoveduje enačba 56), hiperbola. Ti dve hiperboli se sečeta v točki z absciso  $y'_0 = \frac{2}{3}$  (slika 19).

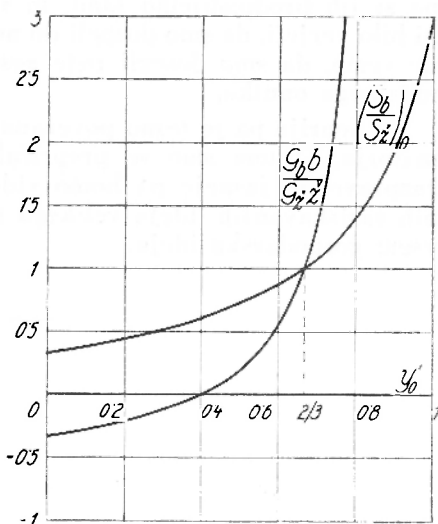
Važnejša od presečišča samega pa je ugotovitev, da ostane prvo razmerje manjše od drugega, dokler je:

$$y'_0 > \frac{2}{3}.$$

Iz nje sledi takoj, da zahteva prilagodevanje elektromagnetnih gostot oziroma na transformacijske stroške padanje gostote  $g$  ob naraščanju gostote  $B$ , če se vzpenja osnutek do višjih in višjih relativnih premerov stebra, razen v primeru, da raste  $b : z$ .

Ta ugotovitev meče temne sence na teorijo osnutka. Vzbujaalni tok transformatorja pritiska, kakor smo videli, na gostoto  $B$ . Enačba 54) priporoča manjšanje razmerja  $G_b : G_z$  v rastoči stiski te gostote. To pomeni kajpada večanje relativnega premera stebra ( $y'_0$ ). Toda v to smer je pot težka: gospodarski oziri nam jo zapirajo.

Vzbujaalni tok ni edini možni motilec neoporečnih transformatorskih osnutkov. Lahko je si predstavljati elektromagnetne gostote, prilagodejene transformacijskim stroškom, ki povzročajo



Slika 19.

hlajenju polno obremenjenega transformatorja neznosne neprilike. Zgodovina transformatorske panoge je polna težkih borb med gostoto g in hlajenjem navitja.

Je li po vsem tem teorija idealnega osnutka, ki smo jo zgradili v tem poglavju, igranje z možnostmi, ki jih živa tehnika ne pozna? Ali ni preprosteje, zadovoljiti se z osnutki, oprtimi na gostote, ki jih narekujejo neizprosne okoliščine?

Kritično raziskavanje problemov ne sme priznavati zaprek, ki so morda le začasne, včasih morda celo le navidezne. Vesten raziskovalec problema transformacijskih stroškov mora ugotoviti smer, v katero naj pritiska osnutek. Vzbujalni tok je silna zapreka, toda pred nobeno zapreko ne sme tehnika položiti orožja. Hlajenje navitij in železnih jeder je bilo desetletja obupno težak problem. Premagali smo ga.

Elektromagnetne gostote so nam še predpisane, mnogokrat pa si jih predpisujemo sami, in sicer brez potrebe. Nevarno bi bilo verjeti, da smo dospeli do nepremakljivih gostot, dokler ne vemo, da smo dosegli tiste gostote, ki jih zahteva teorija idealnega onutka.

Ta teorija pa je tesno povezana s teorijo velikega transformatorja. O tem smo se prepričali že v prvih poglavjih te razprave, še jasneje pa bomo videli to povezanost v nadaljnjih raziskavanjih. Ideja velikega transformatorja je pač pred vsem gospodarska ideja.

## V. POT TRANSFORMATORSKE PANOGE SKOZI DESETLETJA

27. Leta 1913. je zgradil avtor v Ljubljani deset trofaznih transformatorjev za elektrarno na Završnici. To so bili prvi na slovenskih tleh zgrajeni transformatorji. Vsi so bili enaki. Vsak izmed njih je zmogel 10 kVA.

Ti mali transformatorji, določeni za 50 Hz in 10.000 V so imeli naravno zračno hlajenje, bili so torej, kakor pravimo „suhi“. Vkljub temu so zdržali svojo, razmeroma visoko, napetost skozi dolgo vrsto let. Toda pomembni so prav za prav le za teorijo idealnega osnutka. Zato jih je avtor opisal že v svoji knjigi „Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine“ (J. Springer, Berlin, 1918), kasneje pa tudi v knjigi „Die Transformatoren“ (J. Springer, Berlin, 2. izdaja, str. 424), kjer je osnutek nekoliko spremenil. Spremenjeni osnutek zasluzi, da ga vnovič pregledamo.

Naslednje so bile pogloblitve mere tega transformatorskega pritlikavca:

$$\text{premer stebra} = x = 98 \text{ mm,}$$

$$\text{dolžina stebra} = h = 370 \text{ mm,}$$

$$\text{dolžina jarma} = \frac{l}{2} = 169 \text{ mm,}$$

Med dvema povitima sosednima stebroma je bilo 20 mm, med primarnim in sekundarnim navitjem 5 mm, med sekundarnim navitjem in stebrom 2 mm presledka, kar ustreza:

$$\delta = \frac{20}{2} + 5 + 2 = 17 \text{ mm,}$$

na obeh koncih stebra pa je navitje odstopalo od jarmov za 10 mm, kar pomeni:

$$A = 2 \times 10 = 20 \text{ mm.}$$

Polnilni faktor navitja je znašal nekako:

$$c_b = 0,118,$$

toda seveda v smislu definicije, ki smo jo postavili v tej razpravi. Zgoraj navedeni avtorjev opis ne upošteva izolacijskih

presledkov  $\delta$  in  $A$  v obračunu polnilnega faktorja in govori zato o

$$c_b = 0.085. \text{ Je pa } 0.118 = 0.085 \times \frac{370}{350} \times \frac{169 - 98}{169 - 98 - 17}.$$

V tistih časih je imela tako imenovana močno legirana pločevina še:

$$k_z = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ kW.kg}$$

specifičnih energijskih izgub. Povzročala je sicer v količkanj večjih konstrukcijah razmerje:

$$b : z = 4 : 1.5$$

enotnih fabrikacijskih cen, toda mali transformator je imel razmeroma drago navitje. Napetost 10.000 voltov mu ga je dražila. Zato je bilo treba opirati osnutek na:

$$b : z = 4.5 : 1.5.$$

Poglejmo, kaj bi v tem primeru zahtevala naša teorija od idealnega osnutka!

Ce vstavimo z ozirom na mali prerez stebra:

$$c_z = 0.78,$$

razen tega pa

$$\gamma_b = 8.9 \text{ kg/dm}^3$$

in

$$\gamma_z = 7.5 \text{ kg/dm}^3$$

v enačbo 61), dobimo:

$$v = 8 \times \frac{2 \times 169}{169 - 17} \times \frac{0.118 \times 8.9 \times 4.5}{0.78 \times 7.5 \times 1.5} \doteq 9.6.$$

Po razpredelnici v 26. oddelku bi morali pričakovati nekoliko manj kot:

$$y'_0 = \frac{2}{3},$$

to se pravi manj kot

$$x = \frac{2}{3} \times (169 - 17) \doteq 101 \text{ mm.}$$

Razpredelnica pa priporoča hkratu:

$$\frac{h - A}{1 + A} = 1.$$

Oboje se lepo ujema z resničnimi merami transformatorja. Uresničeni premer stebra je bil le za 5 mm manjši od idealnega in resnični:

$$\frac{h - \Delta}{1 + \Delta} = \frac{370 - 20}{2 \times 166 + 20} \doteq 0.98$$

je zastajal samo za dva odstotka za idealnim.

Kako je prav za prav mogoče, da ustreza osnutek iz 1915. leta tako presenetljivo teoriji, ki je nastala trideset let kasneje? Srečno naključje? Težko je misliti nanj. Naknadna prirojitev gospodarskih faktorjev, ki posegajo v problem, meram starega osnutka?

Doslej je poseglo v obračun tega osnutka samo razmerje  $b : \dot{z} = 45 : 15$ . Toda to razmerje fabrikacijskih enotnih cen najdemo že v zgoraj omenjenih opisih transformatorja. Stari osnutek in nova teorija sta samo zato složna, ker sta se srečala na križišču starih in novih idej. V 25. oddelku smo omenili posebnost teorije transformacijskih stroškov, ki je tu odgovorna za presenetljivo naknadno odobritev.

Pred tridesetimi leti je bila vera v enakost gradbenih stroškov navitja in jedra živa. Takrat je tudi že lebdelo spoznanje, da morajo gradbeni stroški jarmov nekako soglašati z gradbenimi stroški železnih stebrov. Teorija idealnega osnutka priznava stara konstrukcijska pravila le v posebnem, edinstvenem primeru. Ta edinstveni primer je pač primer opisanega pritlikavca v kraljestvu transformatorjev.

Torej so idealni osnutki vendarle uresničljivi? Gotovo. V posebnih primerih seveda. Kaj pa je značilno za naš posebni primer? Očividno izredno majhni polnilni faktor navitja  $c_b$ . Nastal je, ker je bil transformator majhen, napetost (10.000 V) pa zanj razmeroma visoka.

Stari transformatorček je po vsem tem kot edinstvena pojava res zelo važen. Saj nam je živ dokaz, da idealni osnutki niso prazne sanje. Hkratu nam pripoveduje, da je bilo nekoč, ko so bile močnosti še majhne, v transformatorski panogi vse v najlepšem redu, da vera v enakost delnih gradbenih stroškov takrat ni bila čisto prazna. Pa saj nam pripoveduje, če ga hočemo poslušati, še več.

28. Kritični opazovalec zgornjega obračuna zapazi takoj ranljivo točko: polnilni faktor  $c_b$  ( $= 0.118$ ) je važna, toda gotovo zelo varljiva veličina osnutka. Če ga prikrojiš pomožni veličini  $\psi$ , dobiš lahko  $\gamma'_0$ , ki si ga želiš. Navitje pa ima svoje potrebe. Resnični, to se pravi potrebni  $c_b$  se pojavi šele v

dovršenem osnutku. Zató je prav lahko mogoče, da se snivanje transformatorja spremeni v nekakšen lov na s početka neznan  $c_b$ .

To spoznanje nam narekuje temeljit obračun. Najbolje je začeti s prerezom stebra, ki je bil enak prerezu jarma. Zgoraj navedenemu premeru  $x = 9.8$  (cm), in polnilnemu faktorju  $c_z = 0.78$  ustreza železni prerez:

$$\frac{9.8^2 \times \pi}{4} \times 0.78 = 58.5 \text{ cm}^2.$$

Transformator je imel predpisani elektromagnetni gostoti. Oziri na vzbujalni tok in na hlajenje navitij so mu jih narekovali:

$$B = 13.000 \text{ G},$$

$$g = 1.75 \text{ A/mm}^2.$$

Prvo je mogoče zagovarjati le zató, ker je imel transformator prvenstveno služiti razsvetljavi, ki se, kakor znano, ne boji jalovih tokov. Druga je ustrezala izkušnjam, ki so jih v teku let nabrali suhi transformatorji s svojimi hladilnimi napravami. Ozirov na energijske izgube v železu in bakru pa osnutki pred prvo svetovno vojno še niso poznali.

Takoj dobimo po vsem tem ovojno napetost:

$$e = \frac{2 \times \pi}{\sqrt{2}} \times 13000 \times 58.5 \times 50 \times 10^{-8} \doteq 1.69 \text{ V},$$

z njo pa skupni pretok primarnega in sekundarnega navitja ene faze, ki ustreza dvojni navidezni močnósti te faze:

$$\frac{2 \times 10000}{3 \times 1.69} \doteq 3950 \text{ A}.$$

Bakreni prerez vsega navitja enega stebra zahteva ob predpisani gostoti  $g$ :

$$\frac{3950}{1.75} = 2250 \text{ mm}^2,$$

razpoložljivi prerez pa je:

$$(370 - 2 \times 10) \cdot (169 - 98 - 17) = 18900 \text{ mm}^2.$$

Torej je bil resnični:

$$c_b = \frac{2250}{18900} \doteq 0.118$$

v skladu s predpostavljenim.

Sedaj, ko smo postavili stari osnutek na trdna tla, lahko pogledamo, kakšen smoter je imel. V ta namen moramo določiti teži porabljenega železa in bakra. Za račun imamo že vse potrebne podatke pripravljene. Začnimo z bakrom.

Vse navitje enega stebra je imelo  $22,5 \text{ cm}^2$  v bakrenem pre-rezu, ovoj pa povprečno dolžino  $16,9 \times \pi \text{ cm}$ . Vsi trije stebri so torej nosili:

$$3 \times 22,5 \times 16,9 \times \pi \times 8,9 \times 10^{-3} = 32 \text{ kg}$$

bakra.

Železo trofaznega jedra ne razpade, kakor že vemo, na tri enake dele, ker je nesimetrično. Če mu vendarle pripisujemo trojno težo onega dela, ki služi fazi zunanjega stebra, dobimo:

$$(3 \times 37,0 + 2 \times 16,9) \times 58,8 \times 10^{-3} \times 7,5 = 93 \text{ kg.}$$

Že v 21. oddelku smo omenili, da je resnična teža vsega železa nekoliko večja. Denimo torej, da znaša 96 kg.

Po vsem tem vidimo, da je bilo razmerje porabljenega železa in bakra:

$$96 : 32 = 3 : 1,$$

osnutek pa je predpostavljaj razmerje enotnih fabrikacijskih cen

$$1,5 : 4,5 = 1 : 3.$$

Smoter osnutka je bila očitvidno enakost delnih gradbenih stroškov!

Mimogrede pa opazimo še nekaj. Dolžina povitega stebra je bila:

$$370 - (2 \times 10) = 350 \text{ mm.}$$

dolžina s stebrom povezanega dela obeh jarmov pa:

$$2 \times 169 + 2 \times 10 = 358 \text{ mm,}$$

torej sta jarma porabila skoraj natanko toliko železa kot vsi trije stebri.

Stari transformatorček razkosava vidno svoje gradbene stroške na štiri enake dele. Prvega daje jarmoma, drugega stebrom, ostala dva navitju, torej, če hočemo, tretjega primarnemu, četrtega sekundarnemu navitju. To sliko smo kot možno že opisali v 25. oddelku. Tu jo vidimo uresničeno. Nedvomno je vodila stari osnutek iz 1913. leta.

Toda v tem uresničenem osnutku tiči še neka druga posebnost. Najdemo jo, če določimo še energijske izgube v jedru in navitju. V železu pričakujemo:

$$1.5 \times \left( \frac{12000}{10} \right)^2 \times 96 = 244 \text{ W,}$$

v bakru pa:

$$2.5 \times 1.75^2 \times 52 = 245 \text{ W.}$$

delne izgube so bile torej enake.

Tudi celotne energijske izgube vidimo razkosane na štiri enake dele. Prvega vzmeta jarma, drugega stebri, tretjega primarno, četrtega sekundarno navitje. To je druga plat slike, ki je nedvomno vodila stari osnutek. Zasidrana pa je v želji, doseči kar se dá visok gospodarski faktor ob polni obtežbi, kar smo že obrazložili v 24. oddelku.

Čudovita harmonija, ki zveni iz vse konstrukcije, opravičuje nedvomno že sama pregled starega in danes pač že zastarelega osnutka. Za razpravo o problemih velikega transformatorja pa je dokaz, da so idealni osnutki v posebnih primerih uresničljivi, izredno važen. Saj nam narekuje vprašanje, zakaj smo se odrekli oni prikupni harmoniji in zakaj smo se ji odtujili predvsem v območju velikih močností.

29. Če bi danes imeli nalogo zgraditi transformator za 10 kVA, 10.000 V in 50 Hz bi najbrže sploh ne mislili na „suho“ konstrukcije. Toda denimo, da bi se iz kakršnih koli razlogov odrekli olju. Kako bi se lotili osnutka?

Začeli bi z ugibanjem, kakšen naj bi bil polnilni faktor  $c_b$ . Posegli bi po podatkih, ki so jih zbrale izkušnje, in najbrže bi se zaupali vnovič vrednosti  $c_b = 0.118$ . Določili bi nato po enačbi 6f)  $w$  in stopili z izsledkom:

$$y'_0 = \frac{2}{3}$$

na trdna tla.

Trofazno jedro bi bilo tudi danes takšno, kakršno je bilo 1915. leta in enakost delnih gradbenih stroškov bi bila tudi danes v tem posebnem primeru skladna z zahtevami problema transformacijskih stroškov. Novi, današnji, osnutek bi krenil v novo smer šele v trenutku, ko bi moral določiti elektromagnetni gostoti.

Enačbi 57) in 58) zahtevata v primeru:

$$y'_0 = \frac{2}{3}$$

naslednji gostoti:

$$g = \sqrt{\frac{3 \cdot b \cdot p}{k_b \cdot h_b \cdot p_b}}$$

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \cdot \dot{z} \cdot p}{k_z \cdot h_z \cdot p_z}}$$

Z njima se vsuje cel roj gospodarskih podatkov v osnutek. z njimi pa ona megljena negotovost, ki je značilna za vpliv teh podatkov na tehnične probleme.

Morda je zaradi te negotovosti najbolje, če vprašanje obrnemo in poskušamo prilagoditi gospodarske podatke svoj čas izbranim gostotama, pred vsem gostoti:

$$B = 13.000 \text{ G.}$$

Saj bomo takoj videli, ali potrebujemo zverženo gospodarsko sliko, ki bi seveda obsojala izbrano gostoto.

Pred tridesetimi leti je bilo 5 zlatih kron primerna cena za kilogram transformatorskega navitja, obrestovalna in odpisna kvota 10 odstotkov pa dovoljna. Letni kilovat elektrarne na Završnici, ki je bila prav za prav zgrajena kot pomožna elektrarna za kasnejše večje elektrarne ob Savi, je bil in je še razmeroma drag. Če bi ga 1915. leta ocenili z 200 zlatimi kronami, bi bili zadeli precej v črno. S podatki:

$$b = 5 \text{ zl. kron,}$$

$$\dot{z} = \frac{5}{3} \text{ zl. kron,}$$

$$p = 0.1,$$

$$h_z \cdot p_z = 200 \text{ zl. kron}$$

pa dobimo:

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \times 5 \times 0.1}{5 \times 1.5 \times 10^{-3} \times 200}} = 1.29,$$

kar se zelo lepo ujema z:

$$B = 13.000 \text{ G}$$

v starem osnutku.

Vodne centrale poznajo prav za prav samo stalne obratne stroške, v prvi vrsti obrestovanje in odpisovanje investirane glavnice. Zató smejo ocenjevati vse zasežene kilovate ne glede na število letnih obratnih ur z isto ceno. Prav gotovo pa smejo zavreči vse drugačne ozire tarifne politike, če zaračunavajo letne kilovate svojim lastnim transformatorjem. Torej bi veljalo v primeru našega transformatorja:

$$h_b \cdot p_b = 200 \text{ zl. kron.}$$

s tem pa:

$$g = \sqrt{\frac{3 \times 5 \times 0.1}{2.5 \times 10^{-3} \times 200}} = 1.73 \text{ A/mm}^2,$$

kar bi se zopet zelo lepo ujemalo s predpostavko v osnutku iz 1915. leta.

Gospodarski obračun dokazuje, da je mogoče utemeljiti svoj čas izbrani elektromagnetni gostoti tudi s stališča sodobnega problema transformacijskih stroškov. Ta obračun pa opozarja hkratu na nevarne možnosti, ki se skrivajo za varljivo skladnostjo starih in novih računov.

Kakšen bi bil na pr. osnutek za istih 10 kVA, 10.000 V in 50 Hz, če bi transformatorju dajala energijo za njegove notranje potrebe velika vodna centrala, ki bi bila zadovoljna s 50 zl. kronami za letni kilovat? In kam bi zašla gostota g, če bi transformator obratoval v kalorični centrali, ki mora šteti letne obratne ure, ker troši tem več premoga, čim več jih je.

Nehoté pogleda raziskovalec tudi navzgor, od 10 kVA proti 100.000 kVA. Je li res mogoče preprosto večati mere s četrtem korenem iz močnosti? Ali ne bo na dolgi poti polnilni faktor  $c_b$  zrasel od pohlevnih 0'118 na 0'4, morda celo na 0'5?

In vpliv kakovosti transformatorske pločevine? Ali ni navadna legirana pločevina v razmerju 1 : 1'5 slabša, to se pravi v tem razmerju potratnejša zaradi svojih večjih specifičnih energijskih izgub? Ali ni hkratu nekako v istem razmerju cenejša?

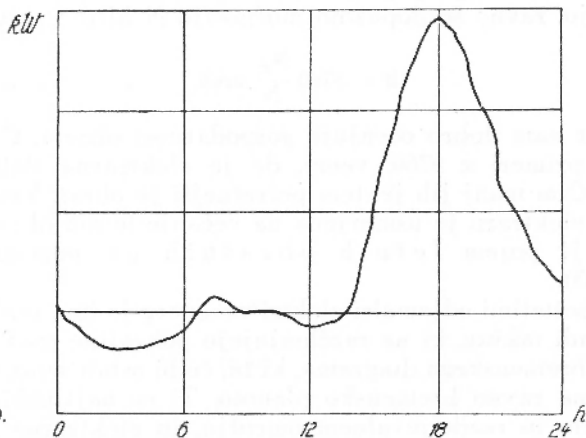
V ozadju vsega tega pa stojе še nestalne obresti narodnega gospodarstva. V kvoti p skrite nam posegajo v osnutek. Skrivajo se pa tudi za enotnima cenama  $p_b$  in  $p_z$ . Še dobro je, da vplivajo vsaj na podoben, če ne isti, način na vse tri imenovane gospodarske podatke.

Pot od male do velike močnosti očitno ni in ni bila nikoli tako preprosta kakor jo slika ideja velikega transformatorja. Transformatorska panoga je potrebovala zanjo desetletja. Težka je bila. Problem velikega transformatorja nedvomno ni razčiščen, dokler ni opisana in odobrena vsa dolga pot transformatorske panoge skozi zadnja desetletja.

Ta ugotovitev opravičuje opis, s katerim smo začeli to poglavje. Gotovo je bilo pravilno, postaviti na čelo razgledovanja po zgodovini transformatorske panoge sliko majhnega, toda čudovito lepo zgrajenega transformatorja. Saj moramo nazadnje tudi vedeti, zakaj estetski argumenti ne vzdrže stvarnih pritiskov.

30. Elektrarna, ki zmore N kilovatov, ne nosi trajno tega bremena. Nasprotno. Dokler je še mlada, ga sploh ne doseže. Kasneje se ga o priliki dotakne, tako rekoč mimogredé. Nazadnje se nekako ustavi ob tej svoji ravno še dopustni močnosti, ker se zavedno, preudarno zadene ob njo. Pa tudi potem jo vpreže samo v redkih trenutkih, morda celo samo enkrat v letu.

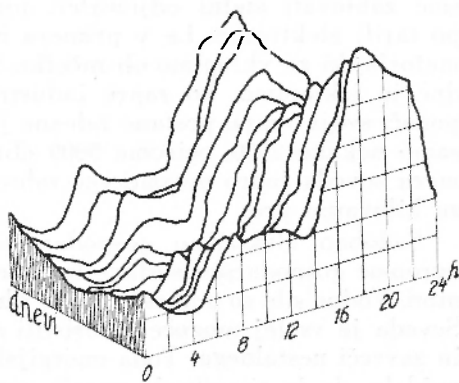
Vsaka elektrarna ima pač svoj najtežji dan v letu. Bremenski diagram tega dneva, ki prikazuje spreminjanje bremen v teku 24 ur, ji je izredno važen. Saj opozarja s poudarkom na obratne nedostatke, meri neprizanesljivo gospodarnost naprave in narekuje nujne spremembe v tarifni politiki.



Slika 20.

Bremenski diagrami vrstečih se letnih dni so sicer navadno dokaj podobni drug drugemu, če ima elektrarna ustaljen obrat, toda vpliv razlik med letnimi časi jih vendarle pači in premika. Bremenski diagram enega dne (slika 20), je dvodimenzionalen lik, bremenski diagram vsega leta, sestavljen iz samih dnevnih diagramov, pa predstavlja nekakšno bremensko gorovje (slika 21) in potrebuje zato tri dimenzije, če hoče omogočiti trenuten pregled. Seveda bi mu tudi lahko dali obliko filma. V tem primeru bi postala njegova tretja razsežnost časovna. V bremenskem gorovju meri kajpada najvišje breme najtežjega dne v letu višino najvišje gore.

Če si predstavljamo vso pokrajino bremenskega gorovja izravnano, tako da izginejo vsi vrhovi v dolinah in kotlinah in da nastane popolnoma



Slika 21.

ravna površina, moramo pričakovati, da bo višino tako nastale planote merila močnost  $N_m$ , ki bo znatno nižja od prejšnje najvišje, ravno še dopustne  $N$ . Z izravnano močnostjo  $N_m$  bi morala elektrarna obratovati vseh 8760 letnih ur, če bi hotela opraviti isto letno delo, ki ga v resnici opravi v pestrem obratu bremenskega pogorja. Toda isto letno delo bi opravila z najvišjo, ravno še dopustno močnostjo  $N$  hitreje, namreč v:

$$h = 8760 \frac{N_m}{N} \text{ urah.} \quad \dots \quad 63)$$

Teh  $h$  ur nam dobro ocenjuje gospodarnost obrata. Če jih je malo v primeri z 8760, vemo, da je elektrarna slabo izkoriščena. Čim manj jih je, tem potratnejši je obrat. Vsa tarifna politika elektrarn je usmerjena na večanje letnih obratnih ur. Seveda ji pojem letnih obratnih ur pomeni  $h$  po enačbi 63).

Med neštetimi odjemalci električne energije ima vsaka elektrarna tudi takšne, ki ne razčlenjujejo pokrajine trodimenzionalnega bremenskega diagrama, ki bi, če bi ostali sami, zgradili popolnoma ravno bremensko planoto. Ti so najljubši gosti v prenosnem in razdeljevalnem omrežju, in elektrarne jih privlačujejo z izjemno ugodnimi enotnimi cenami. Malo je odjemalcev z 8760 obratnimi urami in vendar jih je več kot jih vidi nevešči ali pa površni opazovalec. Med nje sodijo vsakakor železna jedra večine transformatorjev, ki delujejo v omrežju. Transformator, ki je noč in dan, dan za dnevno, mesec za mesecem pod napetostjo, trosi stalno ono energijsko množino, ki jo poznamo pod imenom energijskih izgub v železu.

Zató pomeni  $h_z$ , skoraj brez izjeme, v enačbah teorije transformacijskih stroškov 8760 ur,  $p_z$  pa cena kilovatne ure, ki jo sme zahtevati stalni odjemalec, torej najnižjo enotno ceno po tarifi elektrarne. Le v primeru industrijskega transformatorja, ki ga vklopimo ob začetku 8- ali 16-urnega delovnega dne in izklopimo, ko zapre industrijsko podjetje zvečer ali ponoči svoja vrata, postane železno jedro odjemalec, ki nabere samó nekako 2900, oziroma 5800 obratnih ur. V takšnem primeru seveda jedro ne sme več zahtevati najnižje enotne cene za kilovatno uro.

Sodobno električno gospodarstvo združuje elektrarne v ogromne gospodarske sestave in veže vodne centrale s kaloričnimi. Vodne sile so muhaste. Malo jih je, ki so količkanj stalne. Seveda je vselej mogoče izkoristiti samo stalni del vodne sile in zavreči nestalnega. Toda energijsko gospodarstvo je zgodaj uvidelo, da je pravilneje vpreči vso vodo in polniti doline v nihanju vodne sile s kaloričnimi dodatki.

Vsaka vodna sila ima svojo stalno osnovo, svoj del, ki nikoli ne usahne. Zato razpade vodna centrala pod ostrim pogledom pravega gospodarja na dva dela: na osnovo in na oni dodatek, ki potrebuje sodelovanje kalorične rezerve. Zato pa ima tudi vsaka vodna centrala izredno nizko ceno kilovatne ure za res stalne odjemalce in višjo za tako imenovano mešano energijo.

Nedvomno sodijo vse energijske izgube transformatorskih jeder v osnovo vodnih sil. Ker pa se razvija električno gospodarstvo bolj in bolj v smer izkoriščanja vodnih sil, pa tudi v smer združevanja vodnih in kaloričnih central, mora teorija transformacijskih stroškov zavzeti jasno stališče:  $h_z \cdot p_z$  je cena letnega kilovata v osnovi vodne centrale.

Graditelj transformatorjev ne upošteva in tudi ne more upoštevati posebnih želj vsakega kupca, ki potrebuje transformator. Graditi mora za povprečne obratne razmere. Zato ne more misliti na majhne vodne sile, ko išče primerno magnetno gostoto B. Električno gospodarstvo itak odriva male centrale, ki so nastale v zgodnjih dneh elektrotehnike.

Transformatorček iz 1913. leta, ki smo ga opisali v prejšnjih oddelkih, predpostavlja izredno drag letni kilovat. Vkljub temu se je povzpел do razmeroma visoke gostote  $B = 13.000$  G. Letni kilovat iz osnove velike vodne centrale bo dosegel morda samo 50 zl. kron.

Toda pozabiti ne smemo, da je železno jedro malega transformatorja vendarle drugačen odjemalec energije kot železno jedro transformatorja-velikana. Veliki transformatorji stoje na koncih prenosne proge. Velikan, ki podpira začetek proge, prejema energijo skoraj neposredno iz elektrarne. Ko plačuje svoje energijske izgube v železnem jedru, nima ta velikan opravka s prenosnimi stroški, pa tudi ne z razdeljevalnimi.

Transformator na koncu daljnovoda trosi v svojem jedru že preneseno energijo, Zato se mu energijske izgube v železu podraže. Toda zadaj, v razdeljevalnem omrežju, so te energijske izgube še dražje. Čim manjši je transformator, tem daljšo pot ima na splošno energijski tok do njega, tem dražji je letni kilovat, ki ga potrosi njegovo jedro.

Transformator za 10 kVA, ki ga je avtor zgradil 1913. leta, je ostal v neposredni okolici elektrane na Završnici. Majhne elektrarne imajo pač majhne obratne okoliše. Vkljub temu je dobil drag letni kilovat za svoje železno jedro.

Za problem velikega transformatorja je ugotovitev, da cena letnega kilovata, namenjenega železnemu jedru, na splošno z rastočo močnostjo transformatorja pada. zelo važna. Za njo

se skriva rahlo dviganje gostote B z rastočo močnóstjo po zahtevi teorije transformacijskih stroškov. To dviganje, v kolikor je z ozirom na vzbujaľni tok možno, seveda ni v skladu s prvotno idejo velikega transformatorja. Na tem mestu pa je dovolj, da ga ugotovimo.

51. Navitje transformatorja je s svojo Jouleovo toploto odjemalec energije, ki ga je težko uvrstiti med ostale, tudi laiku vidne odjemalce. Kakor je železno jedro miren, stalen, skromen konzument, tako je navitje nemirno, nestalno in nekako nadležno s svojimi energijskimi potrebami. Saj sledi vsem spremembam ustreznega bremenskega gorovja in jih celo ostri: Jouleova toplota sledi kvadratu tokove jakosti, ki doľoča ob stalni obratni napetosti vsakokratno breme.

Toda navitje transformatorja je v resnici še bolj muhasto, kot se zdi. Njegova Jouleova toplota sledi navidezni, ne pa resnični močnósti omrežja, ki visi na transformatorju, zato se v nji odražajo tudi vse spremembe žlahtnostnega faktorja ( $\cos \varphi$ ) v živem obratu. Kdor poskuša dognati, kako trosi navitje transformatorja energijo, mora zgraditi posebno, sicer manj važno, bremensko gorovje ustreznega dela omrežja, namreč gorovje navideznih bremen.

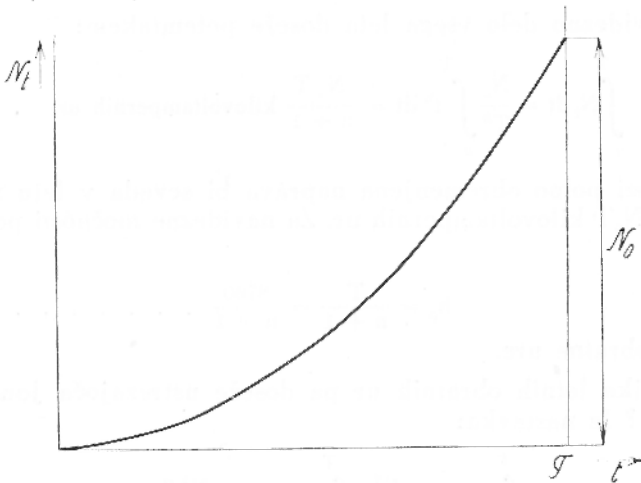
V površnem raziskavanju tega zanimivega vprašanja je morda dovoljeno predpostaviti, da je žlahtnostni faktor stalen. Toda, če se zamislimo v potankosti živega obrata, vidimo takoj, da je električna razsvetljava tisti činitelj, ki gradi vršiče v bremenskem gorovju. Razsvetljava ima, kakor znano, odličen žlahtnostni faktor, namreč  $\cos \varphi = 1$ . Zató moramo pričakovati, da bo gorovje navidezne močnósti manj razčlenjeno kot gorovje resnične močnósti: nesporno nestalni žlahtnostni faktor vpliva torej blažilno.

Iz vsega tega sledi, da vidi transformator nekoliko večje število letnih obratnih ur v svojem omrežju kot jih štejejo števeci kilovatnih ur. To dejstvo zasluži, da si ga zapomnimo. Res je sicer, da nihče ne more predvidevati resničnega bremenskega gorovja in da mora graditelj transformatorjev predpostavljati neko povprečno bremensko sliko, ki mu jo nudi statistika, toda to povprečno sliko je treba pač upoštevati z rezervo, ki jo narekuje pravkar navedeno dejstvo.

Poglejmo, kaj je sploh mogoče posneti iz statističnih ugotovitev živih obratov za problem Jouleove toplote v transformatorskih navitjih. Ali res neko povprečno bremensko gorovje, ki ga je treba naknadno spremeniti v gorovje navideznih bremen? Prav za prav ne. Statistika govori preprosto o letnih obratnih urah.

Če pa govorimo samó o letnih obratnih urah, nam postanejo vse možne oblike bremenskega gorovja, ki ustrezajo istemu številu letnih obratnih ur, dokaj nevažne. Zato smemo pred vsem spremeniti trodimenzionalni bremenski diagram v dvodimenzionalni: namesto dnevnih diagramov, ki se vrste v nekakšnem filmu, si zgradimo kar en sam letni diagram.

To pa še ni vse. Če bi bila oblika bremenskega gorovja ob določenem številu letnih obratnih ur res nevažna, bi smeli v dvodimenzionalnem letnem bremenskem diagramu poljubno spremeniti vrstni red trenutnih bremen. S tem bi spremenili muhasto bremensko krivuljo v preprosto. računu lahko dostopno. važno je le, da obdržimo ustrezno število letnih obratnih ur (slika 22).



Slika 22.

S takšnim postopkom se dokopljemo do dokaj uporabljivih vpogledov v problem Jouleove toplote transformatorskih navitij. Potrebni računi pa postanejo izredno preprosti, če damo idealiziranemu dvodimenzionalnemu bremenskemu diagramu obliko splošne parabole:

$$N_t = k \cdot t^n. \quad \dots \dots \dots 64)$$

V tej enačbi naj pomeni:

- $N_t$  . . . . . navidezno močnosť v trenutku  $t$ ,
- $t$  . . . . . čas, ki je potekel od začetka obratnega leta do trenutka z močnosťjo  $N_t$ ,

k . . . . . neko konstanto,  
 n . . . . . eksponent, ki naj se prilagodi letnemu številu obratnih ur.

Pomožna oblika letne bremenske krivulje, ki naj omogoči vsaj približen vpogled v skrivnosti energijskih izgub transformatorskih navitij, postavlja breme nič na začetek, najvišjo navidezno močnost  $N_0$  pa na konec leta ( $t = T$ ). Torej je po enačbi 64):

$$N_t = k T^n$$

in zató:

$$N_t = \frac{N_0}{T^n} \cdot t^n. \quad \dots \quad 64a)$$

Navidezno delo vsega leta doseže potemtakem:

$$\int_0^T N_t dt = \frac{N_0}{T^n} \int_0^T t^n dt = \frac{N_0 T}{n + 1} \text{ kilovoltampernih ur.} \quad \dots \quad 65)$$

Vseskozi polno obremenjena naprava bi seveda v letu nako-  
 pičila  $N_0 T$  kilovoltampernih ur. Za navidezne močnosti pomeni  
 tedaj

$$h_n = \frac{T}{n + 1} = \frac{8760}{n + 1} \quad \dots \quad 66)$$

letne obratne ure.

Koliko letnih obratnih ur pa doseže ustrezajoča Jouleova  
 toplota? Iz nastavka:

$$\int_0^T N_t^2 dt = \frac{N_0^2}{T^{2n}} \int_0^T t^{2n} dt = \frac{N_0^2 T}{2n + 1}$$

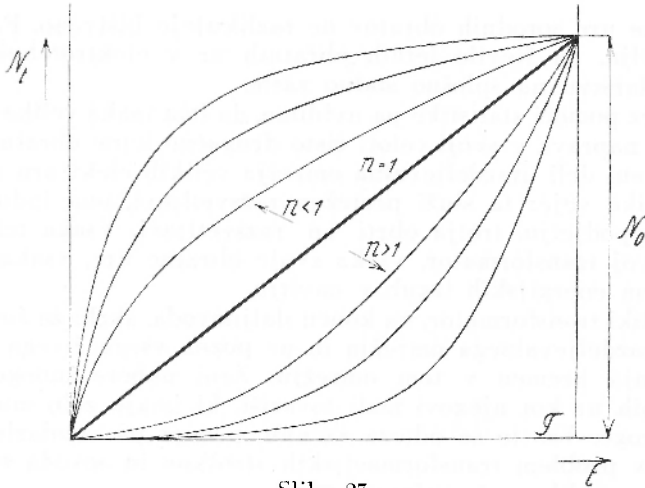
sledi takoj, da nabere Jouleova toplota:

$$h = h_0 \cdot \frac{n + 1}{2n + 1} \text{ letnih obratnih ur,} \quad \dots \quad 67)$$

če jih naniza ustrezajoča navidezna močnost  $h_n$ .

Denimo za primer, da doseže navidezna močnost transfor-  
 matorja 4380 letnih obratnih ur. Nadomestna diagramska pa-  
 rabola bi se v tem primeru spremenila v premico (slika 25).  
 Po enačbi 66) bi namreč dobili:

$$n = 1.$$



Slika 25.

Jouleova toplota v navitju bi dosegla po enačbi (67) samó:

$$h = 4380 \times \frac{2}{3} = 2920 \text{ letnih obratnih ur.}$$

V skrajnem primeru ( $n = 0$ ) bi pač tudi navitje nabralo vseh 8760 ur. V nasprotnem skrajnem primeru ( $n = \infty$ ) bi pa letne obratne ure navitja padle na polovico onih, ki jih zbere močnosť. Toda ta skrajni primer je in ostane nedosegljiv.

Lahko pa je uvideti, da enačba (64), ki naj nadomešča resnični diagram navidezni močností, ne zmore vsega, kar tiči v živem diagramu. Zató so izsledki pravkar opravljenega računa problemu energijskih izgub v transformatorskih navitjih kvečjemu opore. Nastavek:

$$N_t = k_1 t + k_2 t^2 + k_3 t^3 + \dots + k_n t^n = \sum_{n=1, 2, 3 \dots} k_n t^n \quad \dots \quad 68)$$

bi lahko globlje posegel v problem.

Bi li prinesel bistveno drugačne izsledke? Gotovo ne. Našel bi vnovič, da leže letne obratne ure energijskih izgub v navitju med 50 in 100 odstotki letnih obratnih ur ustrežajoče navidezne močností. Našel bi, da je razlika med obratnimi urami obeh vrst tem večja, čim manj obratnih ur doseže v letu navidezna močnosť.

Nemogoče je vedeti, v kakšen obrat bo zašel transformator, ki ga gradimo. Statistika pa nam pripoveduje, da se letne

obratne ure sorodnih obratov ne razlikujejo bistveno. Pač pa ugotavlja, da število letnih obratnih ur v elektrotehničnem gospodarstvu na splošno stalno raste.

Brez pomoči statistike pa uvidimo, da ima vsaka velika električna naprava v svoji celoti čisto drugačne letne obratne ure kot njeni deli. Razdeljevalna omrežja velikih elektrarn imajo raznolike veje: ta služi pretežno razsvetljavi, ona industrijskemu podjetju, tretja obrti in razsvetljavi. Vsaka teh vej ima svoj transformator, vsaka svoje obratne ure, vsaka svoj problem energijskih izgub v navitju.

Veliki transformator, na koncu daljnovoda, skrbi za številne veje razdeljevalnega omrežja in ne pozna vsega živega spreminjanja bremen v tem omrežju. Zato nabere mnogo več obratnih ur kot njegovi mali tovariši, ki imajo zelo muhaste delokroge. Vse to se odteza računu, posega pa vendarle globoko v problem transformacijskih stroškov in seveda tudi v problem velikega transformatorja.

32. Razmišljanja zadnjih dveh oddelkov zavajajo nepoučnega opazovalca v domnevo, da so gospodarske opore problema transformacijskih stroškov tako šibke, da jih lahko vsak graditelj transformatorjev krivi po svoje in da zato ne nasprotujejo prav za prav ne visokim ne nizkim elektromagnetnim gostotam.

Pred desetletji bi bila taka domneva precej upravičena. Pred prvo svetovno vojno je bilo električno gospodarstvo nedvomno kaotično, ker docela individualistično. Neštete majhne elektrarne so takrat obratovale druga poleg druge in vsaka izmed njih je ostro branila meje svojega okoliša pred vsakim vdorom sosed. V tistih časih bi bila transformatorska panoga morala graditi za raznolike potrebe in njene elektromagnetne gostote bi bile smele in morale nihati na vse strani.

Graditelji transformatorjev so imeli torej prav, ko so pred desetletji mislili pred vsem na svoje težave, ko so prilagodevali magnetne gostote vzbujalnemu tokom, električne gostote pa hlajenju navitij. Saj drugih resničnih opor takrat problem elektromagnetnih gostot res ni imel.

Danes pa je električno gospodarstvo že zrelo za najvišje načrte in njegova nekdanja individualnost se je že povsod umaknila vplivom in zahtevam skupnosti. Električna energija ni več predmet trgovskih špekulacij, temveč je vsakdanji kruh narodnega gospodarstva.

Elektrifikacija razsežnih dežel, pa tudi velikih držav, zaposljuje že nekako dva desetletja bohotno razvijajočo se elektrotehniko. Državna električna gospodarstva združujejo vse

elektrarne svojega ozemlja v skupnem prenosnem omrežju, ki napaja nesteta, povsod vdirajoča razdeljevalna omrežja. Vodne sile in kalorične naprave jim obratujejo v skupnem produkcijskem orkestru. Zató je danes že mogoče govoriti o dokaj zanesljivih enotnih cenah letnih kilovatov in kilovatnih ur, torej o podatkih, kakršne potrebujeta problem transformacijskih stroškov in z njim problem velikega transformatorja.

Znani nemški elektrifikator Oskar v. Miller je priobčil 1930. l. v založbi Zveze nemških inženjerjev (VDI-Verlag, Berlin) svoj načrt za elektrifikacijo Nemčije. Njegova knjuga „Reichselektrizitätsversorgung, Gutachten“ je polna dragocenih gospodarskih podatkov, ki nedvomno veljajo tudi v drugih predelih Evrope, prav gotovo pa v naših krajih. Poglejmo, kaj ugotavlja O. v. Miller!

V velikem državnem električnem gospodarstvu nihajo enotne cene energijske produkcije okoli neke povprečne mere, ki usmerja vse gospodarske obračune. Čim obširnejše je državno električno gospodarstvo, tem zanesljivejše in stalnejše so seveda te povprečne enotne cene. Kot povsod v razčlenjenih tvorbah raste tudi v električnem gospodarstvu dozdevna uzakonjenost dogajanj s številom sodelujočih delcev.

O. v. Miller ceni gradbene stroške elektrarn:

za vsak vodni kW na . . . . . 800 Mk.

za vsak kalorični kW na . . . . . 300—325 Mk.

ker razlikuje centrale za rjavi premog (325 Mk) od central za boljši črni (300 Mk).

Nadalje ugotavlja O. v. Miller, da troši veliko državno gospodarstvo za vsako kalorično kilovatno uro 0'8 pfenigov premoga — rjavega ali črnega —. Elektrarne pa odpisuje Miller različno: vodne, v katerih prevladujejo trdožive gradnje, z 2. kalorične, ki jih sestavljajo prvenstveno občutljivejši stroji, kotli in ostale mehanske naprave, s 6 odstotki.

Če hočemo poslušati O. v. Millerja — in zakaj bi ga ne — dobimo pred vsem enotno ceno:

80 zl. kron . . . . . za čisti vodni letni kilovat, toda za letni kilovat, ki še ne nosi prenosnih ali pa celó razdeljevalnih bremen, torej za letni kilovat, kakršnega troši železno jedro velikega transformatorja ob začetku prenosnega daljnovoda.

To enotno oceno smo dokaj varno postavili. Marka iz 1930. l. namreč ne pomeni več 1'2 zl. kron. Če bi ji priznali nekdanjo vrednost in zahtevali za vodne naprave odpisno ter obresto-

valno kvoto 10 odstotkov, bi dobili za čisti vodni letni kilovat z O. v. Millerjevim podatkom:

$$800 \times 1'2 \times 0'1 = 96 \text{ zl. kron.}$$

Zgornja cenitev je torej pravilna. Nespametno bi vendar bilo, iskati v železnih jedrih transformatorjev, ki so osnovni sodelavci električnega gospodarstva in nesporno najboljši odjemalci električne energije, poslovne dobičke.

Manjši transformatorji, ki obratujejo v vmesnih daljnovodih ali pa v razdeljevalnih omrežjih, ne morejo zahtevati iste enotne cene za letni kilovat, ki ga potrebujejo njihova jedra, kot transformator-velikan na začetku ali pa — tudi tega smemo vzeti v prvi razred, da ne dobimo nepotrebnih razlik med velikimi transformatorji — na koncu daljnovoda. Pred vsem niso tako zanesljivo stalni odjemalci energije za svoje železo. Razen tega nosijo že prenosne, včasih tudi vmesne prenosno — razdeljevalne stroške. Zato jim lahko predpišemo:

100 zl. kron za čisti vodni letni kilovat.

Kalorični letni kilovat dobi v velikem električnem gospodarstvu seveda razčlenjeno ceno. Njen stalni, od letnih obratnih ur odjemalca neodvisni, del ustreza odpisni in obrestni kvoti, ki jo potrebujejo gradbeni stroški elektrarn. Iz O. v. Millerjevih podatkov bi dobili, če merimo na Jouleovo toploto transformatorskih navitij, z upoštevanjem istih okoliščin kot zgoraj, nekako:

40 zl. kron . . . . za osnovo čistega kaloričnega letnega kilovata.

Če potem pribijemo še 1 zl. vinar za premog, ki ga potrebuje vsaka kilovatna ura, upoštevajoč s tem nadležnost energijskih izgub v navitjih, ki zaluži strogo obračunavanje, dobimo za letni kalorični kilovat:

$$h_b \cdot p_b = 40 + p_b \times 0'01 \text{ zl. kron.} \quad . . . . . 69)$$

zopet seveda brez prenosnih in razdeljevalnih stroškov. Manjšim transformatorjem bomo zato podražili energijske izgube v navitjih, morda za 25 odstotkov, skladno s prebitkom, ki smo ga upoštevali v obračunavanju energijskih izgub v železnih jedrih.

Velika električna gospodarstva imajo kajpada tudi letne kilovate, ki so deloma vodni, deloma kalorični. Cene takšnih mešanih letnih kilovatov leže nekje med cenama obeh čistih vrst. Zato so sestavljene iz stalnih delov, ki so višji od stalnih

v osnovah vodnih naprav, in spremenljivih, ki so nižji od ustreznih onim centralam, ki obratujejo izključno s premogom.

Mešani letni kilovatni so torej navadno cenejši od čistih kaloričnih. Toda Jouleova toplota navitij ne zasluži nikake prizanesljivosti. Saj se sili povsod v ospredje in takrat, ko je obrat najtežji, je najbolj zahtevna. Zato jo mora problem transformacijskih stroškov obračunavati po enotni ceni čiste kalorične kilovatne ure.

Po vsem tem ima sodobni problem transformacijskih stroškov vendarle že zelo zanesljivo oporo v gospodarstvu. Danes ni več dovoljeno sklicevati se na vzbujalni tok in na hlajenje navitij, če velja določiti elektromagnetne gostote. Danes je vzbujalni tok sicer še nadležen nadzornik transformatorskih osnutkov, hladilni aparat pa se mora preprosto prilagoditi gostoti g, ki jo navitju narekujejo gospodarski oziri.

53. V zadnjih letih pred izbruhom prve svetovne vojne je transformator v široki fronti prestopal iz zraka v olje, dnevi „suhega“ transformatorja so bili 1915. leta, ko je avtor gradil svojo v 27. oddelku omenjeno konstrukcijo, že šteti. Prehod kajpada ni bil lahek.

Zakaj se je transformator umaknil svežemu zraku in se skrivil v olje? Prav za prav samo zato, ker so ga električni izolacijski problemi preveč mučili. Obratne napetosti nad 10 kV so se izkazale preostre za suhe konstrukcije. Burno razvijajoči se elektrotehniki pa so bile tik pred svetovno vojno, okoli 1910. l., mnogo višje obratne napetosti že zelo potrebne.

Olje, čisto, suho olje seveda, prenese v električnem polju mnogo več kot zrak. V tesno zaprtem kotlu je olje, z njim pa tudi v njem se skrivajoče navitje transformatorja, varno pred vlago, ki napada iz zraka vse občutljivejše električne naprave. Toda olje hladi vrh vsega izdatneje kot zrak.

Če postavim transformator v olje, ga izboljšam. Trpežnejši, odpornejši, v obratu zanesljivejši mi postane. Napredek, ki se mi obeta, pa zahteva dodatne izdatke: olje je treba plačati. Ne samo olje. Potreben je seveda še kotel za olje in celo svojevrsten kotel.

Navitje in železno jedro oddajata obratno toploto izbornu hladečemu olju, toda olje je ne more in ne sme kopičiti in držati. Tudi olje je treba hladiti. Zato mora kotel dobiti izdatno hladilno površino. Gladka, preprosta površina je že za razmeroma majhne transformatorske kotle nezadostna. Treba jo je zvaloviti. Čim večji transformator, tem večji postanejo valovi na hladilni površini kotla, saj rastejo energijske izgube

ob stalnih elektromagnetnih gostotah s tretjo, površine konstrukcijskih delov pa samo z drugo potenco linearnih mer.

Suhi transformator pozna praktično samo gradbene stroške navitja in železnega jedra. Transformator v olju se pa bori še z gradbenimi stroški svoje opreme, ki jih nikakor ni mogoče prezreti. Preizdatni so. Zato so tudi pahnili transformatorsko panogo v težko krizo, ko so se pojavili.

Takratni graditelji transformatorjev so mislili samo na gradbene stroške, stroški transformacijskih energijskih izgub so jim bili nevažni. Vedeli so, da tehtajo tudi kupci transformatorjev samo nabavne cene. Naravno je tedaj bilo, da je nastal problem, kako ohraniti gradbene stroške suhega transformatorja za določeno močnost „mokremu“, vkljub olju in kotlu. Le ob enakih nabavnih cenah je bilo mogoče pridobiti kupca za transformator v olju z zatrjevanjem, da je trpežnejši in v obratu zanesljivejši.

V svoji stiski je transformatorska panoga posegla po dokaj robati rešitvi: izkoristila je hladilne sposobnosti olja, krepko je dvignila gostote pretokov v navitjih — magnetno gostoto ji je branil vzbujalni tok pred nasilnimi dvigi — in zmanjšala je s tem gradbene stroške. Olje in kotel je preprosto plačala s prihranjenim bakrom in železom.

Lahko je uvideti, da je treba res izdatno zgotoviti električni tok v vodnikih navitja, če naj aktivni del suhega transformatorja plača opremo mokrega. Suhi transformatorji so zmogli nekako  $17 \text{ A/mm}^2$  v svojih navitjih. V olju je gostota zgodaj skočila na  $25$  in na  $5 \text{ A/mm}^2$ . Transformatorska panoga je torej res nekako rešila svoj veliki življenjski problem.

Kritična presoja te rešitve pa odkriva nevarnosti, ki jih menda nihče ni opazil, ko so bile še vse žive. Lahko ji je dokazati, da z dviganjem gostot ni mogoče iztisniti iz transformatorja prihrankov, ki naj krijejo stroške olja in kotla. V svetlobi razčiščenega problema transformacijskih stroškov vidimo prehod transformatorja iz zraka v olje bistveno drugače kot so ga videli graditelji, ki so ga izvršili.

Vzemimo za primer transformator, ki smo ga opisali v prvih oddelkih tega poglavja. Predpostavka, da je bil zgrajen za razmeroma drago vodno centralo, mu daje spričevalo, da je dosegel najnižje transformacijske stroške. Do svojega uspeha se je nedvomno dokopal, ker je pravilno razdelil gradbene stroške na jedro in navitje, razen tega pa z edinstveno prikladnimi elektromagnetnimi gostotami vzporedil dinamične transformacijske stroške s statičnimi. Kako naj mu torej dvig gostote električnega toka iztisne sredstva za nabavo olja in kotla?

Če je bil suhi transformator iz 1913. leta za 10 kVA res v redu, če je moral res svoje v železu in bakru potrošene letne kilovate plačevati z 200 zl. kronami, mu nedvomno ni bilo mogoče zlesti v olje brez dodatnih gradbenih in s tem transformacijskih stroškov. Če pa je obtičal pri gostoti 175 A/mm<sup>2</sup> zató, ker mu hladilna površina navitja ni dovoljevala višje in če je smel računati s cenejšimi letnimi kilovati za svoje notranje obratne potrebe, mu je bila pač pot do pravilne rešitve problema transformacijskih stroškov zaprta, dokler je ostal v zraku. V tem primeru bi mu olje prineslo odrešenje, ki bi ga transformator mogel le deloma plačati. V obeh primerih so tedaj dodatni izdatki za olje in kotel neizbežno breme.

Seveda je to breme znosnejše, če odpira pot do sicer nedosegljivih ugodnih osnutkov. Transformatorska panoga pa bi ga morala sprejeti odkritosrčno, to se pravi kot dodatek, ki ga prvenstveno zahteva napetostni problem in z njim problem obratne varnosti.

Zató tudi ni pravilno, prištevati obrestne in odpisne stroške olja in kotla stroškom energijskih izgub transformacije, češ da tvorita olje in kotel hladilno napravo, ki je tem dražja, čim večje so energijske izgube v navitju in jedru. V svoji knjigi „Der kupferarme Transformator“ (J. Springer, Berlin 1955) je avtor še zagovarjal to nevzdržno stališče. Res je sicer, da bi površina kotla lahko ostala gladka, če bi olje služilo samo napetostnemu problemu. Res pa je tudi, da se gradbeni stroški kotla in njegove tekoče vsebine ne spreminjajo tako kot energijske izgube v transformatorju.

Problem transformacijskih stroškov ostane dovolj natančen, če predpostavlja, da so izdatki za kotel in olje praktično neodvisni od oblike železnega jedra, pa tudi od elektromagnetnih gostot. Zató jih lahko zanemarja v svojih računih. Teorija zadnjih dveh poglavij je tedaj veljavna za suhe in mokre transformatorje. Na kraju krajev imajo tudi suhi transformatorji svojo opremo, ki je teorija transformacijskih stroškov zato ne upošteva, ker povzroča le praktično stalne dodatne gradbene stroške.

34. S prestopom iz zraka v olje si je transformator odprl pot do mnogo večjih gostot v navitjih kot jih je dotlej mogel doseči. Graditelji suhih transformatorjev so dolgo napenjali vse sile, da bi olajšali hlajenje navitij. Razkosavali so navitja na številne tuljavice, urejali med tuljavicami izdatne hladilne kanale, odmikali navitje od železnega jedra in pospeševali

tudi hlajenje železa, da bi ne grelo bakra. Vsi ti napori niso spravili gostote v bakru čez  $1'7 \text{ A/mm}^2$ .

V 1912. l. je avtor predlagal uporabo aluminija v navitjih. Aluminij ima dokaj slabšo električno prevodnost od bakra in zahteva zato ustrezno večje prereze navitij. Specifično mnogo lažji od bakra, obeta aluminij vkljub svoji manjši prevodnosti lažja navitja kot baker. V tistih časih je bila cena kilograma aluminija skoraj enaka ceni kilograma bakra. Avtor je torej dosegel z istimi gradbenimi stroški znatno večjo hladilno površino.

Značilno za stremljenja graditeljev tistih časov je povečevanje hladilne površine z vsemi sredstvi, ne gledé na energijske stroške transformacije. Morda je zato transformator iz aluminija najboljši predstavnik tiste dobe. Suhi transformator iz aluminija je res znižal gradbene stroške za nekako 20 odstotkov. Imel pa je mnogo nevšečnih opravek z varjenjem koncev aluminijskih žic in mnogo večje energijske izgube.

Pređen je transformator zlezal v olje, je imel popolnoma zvezane roke. Vzbujaalni tok je pritiskal na njegovo magnetno gostoto, šibka hladilna površina navitja pa na njegovo električno gostoto. V tistih časih so bili vsaj letni kilovati, ki so jih potrebovale energijske izgube v jedru in navitju, še razmeroma dragi. Zato je bil dvojni pritisk na gostote takrat le subjektivno neznošen.

V senci velike krize, ki jo je transformatorski panogi prinesel prehod iz zraka v olje, pa se je vršil še drug izredno važen preobrat, ki je s svoje strani globoko posegel v razvoj transformatorja. Še danes ga nismo popolnoma prebavili.

V prvih letih tekočega stoletja smo gradili transformatorska jedra s tako imenovano legirano pločevino. Njene specifične energijske izgube so se sukale okoli  $2'5 \text{ W/kg}$ . Njena nabavna cena je narekovala nekako razmerje  $4 : 1$  med enotnimi gradbenimi stroški navitij in jedra. Še v prvem desetletju tega stoletja pa se je pojavila tako imenovana močno legirana pločevina, ki je imela nekako  $1'5$ -krat manjše specifične energijske izgube, zato pa  $1'5$ -kratno nabavno ceno.

V začetku tega poglavja opisani suhi transformatorček je imel boljšo pločevino. Zakaj? Zakaj smo še dolgo po izvršenem prehodu iz zraka v olje uporabljali slabšo toda cenejšo pločevino? Zakaj so posegli tudi prvi transformatorji-velikani po navadni, ceneni legirani pločevini?

Manjšanje specifičnih energijskih izgub ( $k_z$ ) ob hkratnem večanju enotnih cen železa ( $\check{z}$ ) je dvomljiv napredek. Če postavimo:

$$k_z \cdot \check{z} = \text{konst.} \quad \dots \quad 70)$$

in uveljavimo pridobljeno enačbo v nastavku problema transformacijskih stroškov, zaidemo v zamotan problem. Vsekakor je skok z legirane pločevine v močno legirano pomenil silen sunek. Kako ga je transformatorska panoga prenesla?

Zelo nekritično. Kakor je dolgo zanemarjala energijske izgube transformacije v vseh svojih osnutkih, tako je kasneje pohlevno požirala očitke polovično poučenih obratnih inženjerjev, ki so zapazili, da trosi železo neumorno, noč in dan, pozimi in poleti, energijo in prestrašeni začeli zahtevati manjše in manjše energijske izgube v železu.

Problem transformacijskih stroškov določa pravilne, to se pravi, gospodarsko neoporečne energijske izgube transformatorskega jedra. Tega problema pa niso poznali obratni inženjerji, ki so sunili transformatorsko panogo v novo smer. Pohlevno stališče individualističnega gospodarstva, da ima kupec vedno prav, je žal dejansko rešilo vprašanje transformatorske pločevine.

Skozi desetletja uvaja transformatorska panoga boljšo in boljšo, hkratu seveda tudi dražjo in dražjo pločevino. Od 17 W/kg je pločevina že med prvo svetovno vojno zlezla na 13 W/kg. Američani so pred leti dosegli 10 W/kg in celo manj. Gonja proti stalnim transformacijskim energijskim izgubam je dosegla velike uspehe.

Resnične, objektivne uspehe? Vprašanje je izredno važno, pred vsem, kakor bomo videli, za problem velikega transformatorja. Transformatorska panoga ga je nekritično, ker uslužno, rešila. Toda kakšen odgovor daje teorija transformacijskih stroškov?

Če gledamo brez predsodkov na problem transformatorske pločevine, vidimo, da nižanje specifičnih energijskih izgub ni odrinilo neznosnega pritiska na magnetno gostoto, ki ga izvaja vzbujalni tok. Nasprotno. Izkušnje nas uče, da je boljša pločevina prinesla neprijetnejšo magnetno propustnost in s tem poostrila vpliv vzbujalnega toka.

Transformator potrebuje pred vsem boljšo permeabiliteto v območju gostot, ki so mu važne, torej med 10.000 in 20.000 G ne pa manjše specifične energijske izgube v železu, ker stremi za neoporečnimi osnutki. S prehodom iz zraka v olje si je razvezal eno roko. Druga pa mu tiči še vsa zvezana v ozirih na vzbujalni tok. Kedaj si bo še njo osvobodil?

55. Trideset let postavlja transformatorska panoga skoraj vse svoje transformatorje v olje. Hlajenje ji že dolgo ne dela nobenih preglavic več. Za svoje velike transformatorje ima umetno hlajenje, ki je kos vsaki nalogi. Električna gostota

se ji je dvignila na 55 A/mm<sup>2</sup>, včasih celo na 575 A/mm<sup>2</sup>, v transformatorjih-velikanih tu pa tam na 4 in tudi na 5 A/mm<sup>2</sup>, magnetna gostota pa ji je obtičala na nekako 14.000 G. Le zelo velika jedra se dvignejo na 15.000 G.

V teh zadnjih treh desetletjih pa se je električno gospodarstvo strnilo v močno reko, ki združuje vse prej tako raznolike razvojne smeri, ki zbira vse potočke in potoke v svoji stalno razširjajoči se strugi. Ta gospodarska reka ima svojo dokaj stalno smer in svojo dokaj stalno pretočno hitrost. Njene zahteve postajajo od dne do dne zanesljivejše, pa tudi vplivnejše.

Kam je zašel idealni osnutek transformatorja v tem času? Se li je uveljavil v vsestransko preizkušenih konstrukcijah? Ali se je oblika železnega jedra res ustalila in z njo elektromagnetne gostote, takó seveda kakor zahtevajo oziri na transformacijske stroške?

Če posežemo po enačbah 57) in 58), ki sta del idealnega osnutka, in upoštevamo ugotovitve 30., 31. in 32. oddelka, dobimo za manjše, tako imenovane sekundarne, transformatorje dokaj točen odgovor na stavljenó vprašanje. Saj lahko računamo z nekako 5000 letnimi obratnimi urami v omrežju sekundarnega transformatorja in zató po podatkih 31. oddelka nekako z

$$h_b = 1800 \text{ ur.}$$

Nadaljni gospodarski podatki so:

$$b = 5 \text{ zl. kron,}$$

$$p = 0.1,$$

$$k_b = 2.5 \times 10^{-3} \text{ kW/kg}$$

in

$$h_b \cdot p_b = 50 + 1800 \times 0.01 = 68 \text{ zl. kron.}$$

Z njimi dobimo:

$$\frac{3 \cdot b \cdot p}{k_b \cdot h_b \cdot p_b} = \frac{3 \times 5 \times 0.1}{2.5 \times 10^{-3} \times 68} = 8.85$$

in skoraj natanko:

$$g = 3 \text{ A/mm}^2,$$

če pričakujemo:

$$y'_0 = \frac{2}{3}.$$

Opis transformatorčka za 10 kVA v začetku tega zadnjega poglavja nam je res prinesel ta izjemni relativni premer stebra kot najpriporočljivejši. Toda polnilni faktor navitja tega pri-tlikavca je bil izredno majhen. Zató moramo biti pripravljeni na večje relativne premere stebra; na tem večje, na čim večjo močnosť merimo.

V enačbi 57) pa stoji pod korenom faktor:

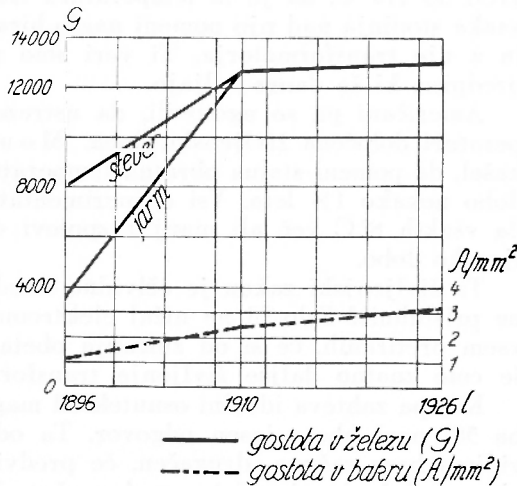
$$\frac{2 - y'_0}{5 y'_0 - 2}$$

ki postane manjši od 1, če se  $y'_0$  dvigne nad  $\frac{2}{3}$ . To pomeni, da je idealna električna gostota v razmerah dozorevajočega električnega gospodarstva manjša od  $3 \text{ A/mm}^2$  in sicer tem manjša, čim večji je transformator.

Primarni transformatorji trosijo nekoliko cenejšo kalorično energijo v svojih navitjih in bi smeli zató malenkostno povečati pravkar ugotovljeno idealno gostoto. Transformatorji-velikani pa trosijo za svoje hladilne naprave pogonsko energijo. Ta dodatni, čeprav malo pomembni, energijski izdatek je tesno povezan z Jouleovo toploto navitja. Torej ni prave razlike med idealnimi električnimi gostotami velikih in malih, primarnih in sekundarnih, transformatorjev.

Dandanes je problemu transformacijskih stroškov težko kriviti gospodarske opore, pretrde so nam postale v teku zadnjih desetletij. Zató je težko prezreti očitak, ki se dviga iz ugotovitev tega problema. Transformatorska panoga se je nesporno ustavila pri električnih gostotah, ki so znatno večje od onih, ki jih zahteva idealni osnutek.

Slika 24), ki jo je avtor prejel od tvrdke Siemens-Schuckert-Werke, Wien, opisuje zelo nazorno porast elektromagnetnih gostot v teku desetletij, in sicer v posebnem primeru oljnega transformatorja za 100 kVA, 50 Hz, 6000 V. Električna gostota je tedaj že kmalu po končani prvi svetovni vojni dosegla  $3 \text{ A/mm}^2$  in potem nadaljevala svoje vzpenjanje. Transformator za 100 kVA pa zahteva nedvomno večji relativni premer stebra kot  $y'_0 = \frac{2}{3}$ , njegov idealni osnutek torej dokaj manj kot  $3/\text{Amm}^2$ .



Slika 24.

Razlike so v območju velikih močnosti včasih presenetljivo velike. Kako naj jih zagovarjamo? Z nekdanjimi napori graditeljev, ki so se borili s hlajenjem suhih transformatorjev, ki so z oljem premagali neznosno zapreko na poti do idealnega osnutka, potem pa v zmagovitem zaletu drveli čez smoter?

S kratkovidnim zatrjevanjem, da morata baker in železo plačati olje in kotel, ravno tako pa še vso dodatno opremo, ki jo potrebuje umetno hlajenje velikih transformatorjev? Saj so vsa takšna zatrjevanja piškava in nevzdržna.

Psihološki faktorji nedvomno ne smejo gospodariti v transformatorski panogi. Odriniti jih moramo neusmiljeno, kakor moramo iztrebiti morebitne estetske faktorje iz svojih osnutkov. Da je sploh treba govoriti o teh in o onih, je prav za prav presenetljivo.

Če transformacijska panoga res še vlačí zablode svoje mladosti s seboj, jih mora popraviti. Pa saj jo svariyo tudi neke druge ugotovitve iz zadnjih let, ki ne prihajajo iz teorije transformacijskih stroškov, temveč iz laboratorijev in preskuševališč.

Ameriški strokovnjaki so se pred dobrim desetletjem začeli zanimati za življensko dobo električnih strojev, pred vsem transformatorjev. Vedeli so, da sta baker in železo zelo trdoživa, vedeli pa tudi, da so izolacijske snovi, ki jih potrebuje transformator, mnogo občutljivejše. Kmalu so dohnali, da zavisi življenska doba teh snovi samo od temperature, v kateri žive.

Svoj čas smo bili prepričani, da se sme transformator segreti do  $110^{\circ}\text{C}$ , da je ta temperatura trajno dopustna, da pa vsaka stopinja nad njo pomeni naglo hiranje izolacijske snovi in z njo transformatorja. Ti veri smo prilagodili varnostne predpise, ki še danes veljajo.

Američani pa so ugotovili, da ustreza vsaki obratni temperaturi določena življenska doba. *Montsinger* na pr. je našel, da pomeni stalna obratna temperatura  $110^{\circ}\text{C}$  življensko dobo nekako  $1\frac{1}{2}$  leta. Vsi eksperimentatorji so složni v tem, da vsakih  $8^{\circ}\text{C}$  več ali manj razpolovi oziroma podvoji življensko dobo.

Ta življenjski zakon je očividno izredno oster. Kdo bi mu ne prisluhnil? Kdo bi ne nižal elektromagnetnih gostot, pred vsem pretiranih, če si od znižanja obeta daljše življenje, pa še celó znatno daljše življenje transformatorja?

Kaj pa zahteva idealni osnutek od magnetnih gostot? Enačba 58) nam obeta jasen odgovor. Ta odgovor pa bo, kakor vidimo brez računa, drugačen, če predvidevamo navadno legirano pločevino in bistveno drugačen, če hočemo uveljaviti močno legirano.

Začnimo z boljšo pločevino. Nji ustreza razmerje enotnih gradbenih stroškov navitja in jedra 4:15. Specifične izgube te pločevine moramo previdno ceniti, če pričakujemo višje magnetne gostote. Saj je znano, da rastejo nekoliko hitreje kot s kvadratom te gostote.

Torej:

$$\dot{z} = 5 \times \frac{1.5}{4} \text{ zl. kron,}$$

$$p = 0.1,$$

$$k_z = 1.5 \times 10^{-3} \text{ kW/kg,}$$

$$h_z \cdot p_z = 100 \text{ zl. kron}$$

in s tem:

$$\frac{3 \dot{z} p}{k_z \cdot h_z \cdot p_z} = \frac{3 \times 5 \times 1.5 \times 0.1}{4 \times 1.5 \times 10^{-3} \times 100} = 3.75.$$

To pomeni:

$$B = 19350 \text{ G,}$$

če smemo pričakovati, da bo:

$$y'_0 = \frac{2}{3}.$$

Ker pa zahtevajo količkanj večje močnosti relativno debelejšše stebre, bo faktor:

$$\frac{6 - 7 y_0}{2 - y'_0}$$

gotovo večji od 1 in idealna magnetna gostota bo postala še večja.

Vse to velja za sekundarne transformatorje. Primarni, veliki, transformatorji smejo zahtevati cenejšo energijo za svoja jedra. Torej bodo stremeli k magnetnim gostotam znatno nad 20.000 G. Idealni osnutek izginja očitvidno primarnim in sekundarnim transformatorjem v nedosegljive višine.

Slika se nam pa bistveno spremeni, če se skesano vrnemo k slabši pločevini. Po prav za prav le simbolični enačbi 70) nam zniža slabša, starejša, pločevina vse idealne magnetne gostote nekako v razmerju 15:1. Torej bi dobili v primeru:

$$y'_0 = \frac{2}{3},$$

samo še:

$$B = \frac{19350}{1.5} = 12900 \text{ G,}$$

v primeru  $y'_0 = 0.7$  pa

$$B = 14000 \text{ G.}$$

Tudi veliki transformatorji bi se brez naporov prilagodili okviru idealnega osnutka, čeprav bi zahtevali že v primeru  $\gamma_0 = \frac{2}{3}$  gostoto  $B = 14500$ . Saj prenesó znatno višje gostote kot manjši, ker se jim procentualni vzbujaalni tok itak krči. Pritisk relativnega premera stebra pa je vsekakor močan.

Če ima sodobna transformatorska panoga po vsem tem prav, da uporablja boljšo in najboljšo pločevino, ji moramo očitati, da obratuje z znatno višjimi električnimi, hkratu pa z občutno nižjimi magnetnimi gostotami kot jih zahteva idealni osnutek.

V tem položaju se vendarle ne smemo izogniti vprašanju ali ni živa transformatorska panoga vendarle na pravi poti. Saj je težko verjeti, da se udaja starim zablodam. Tehnika je orodje gospodarstva, gospodarstvo pa gotovo ni sentimentalno. Psihološki in estetski predsodki so mu nedvomno nevažni.

Možno je, da transformatorski panogi še nihče ni vestno pregledal gospodarskih obračunov. Možno je tudi, da vsiljujejo gospodarski predsodki najboljšo pločevino, ki nas oddaljujejo od idealnih osnutkov. Toda pozabiti ne smemo, da vzbujaalnega toka še nismo odrinili od osnutkov. Zató ga moramo tudi v teoriji transformatorskih stroškov pripustiti k besedi, vsaj dotlej, dokler ga res ne odrinemo.

## VI. OSNUTEK Z ZADRŽANO MAGNETNO GOSTOTO

56. Veletransformator za 16.000 kVA, 50 Hz in 4000/56000 V, ki smo ga omenili že v 1. oddelku, je 1912. l. presenetil strokovni svet pred vsem s svojo nesluteno močnostjo, pa tudi z nekaterimi posebnostmi, ki jih dotlej transformatorska panoga ni poznala iz svojih problemov. Kot najvažnejšo novost je prinesel nenavadno učinkovito hladilno napravo.

V prostranem preskuševališču tvrdke Ganz-villamosági r. t., na periferiji Budimpešte, je obiskovalec moral opaziti obsežne poskuse z umetnim hlajenjem navitij, ležečih v olju, kateremu je mrzla voda, pretakajoča se po spretno zgrajenih ceveh izdatno pomagala, če je zašel vanj v zgodnjih mesecih 1912. l. Ti poskusi so dognali, da prenesejo navitja znatno, da presenetljivo, višje električne gostote kot jih je transformatorska panoga dotlej v svojih najdrznejših sanjah pričakovala. Preizkuševalci so vsi navdušeni govorili o 5, 6, nazadnje o 10 A/mm<sup>2</sup>. Iz tega burnega strokovnega ozračja se je rodil zgoraj omenjeni transformator-velikan.

Prav za prav mu je bila namenjena za 30 odstotkov višja močnost, torej 20.800 kVA. Res je preizkušnja dograjenega transformatorja ugotovila, da zmore hladilna naprava tudi to večjo močnost v trajnem obratu. Toda graditelj, O. T. Bláthy, je bil previden. Izkoristil je v prvem zaletu samo del dosegljivega hladilnega uspeha. Saj je slutil, da hlajenje ne izčrpava transformatorskih problemov.

Ogromno konstrukcijo je avtor obširno opisal v svoji knjigi „Die Transformatoren“ (J. Springer, Berlin, 2. izdaja, 1925, str. 596). Iz tega opisa lahko posnamemo naslednje podatke:

močnost:	16.000 kVA	20.800 kVA
energijske izgube:		
v železu	82.000 W	82.000 W
v bakru	154.000 W	227.000 W
nadalje:		
teža železa . . . . .		13.540 kg
teža bakra . . . . .		2.515 kg.

Iz teh podatkov je marsikaj razvidno. Pred vsem, da naj baker nosi znatno višje energijske izgube kot železo, čeprav

je bil transformator določen za delo v čistih vodnih centralah. Razmerje doseže ob najvišji zmogljivosti skoraj višino 3:1.

Bláthy se je očitvidno udajal svojim novim hladilnim idejam, ko je gradil največji transformator tistih dni. Res se je pognal do električnih gostot, ki jih nihče ni pričakoval:

4'25 A/mm <sup>2</sup>	. . . . .	za 16.000 kVA,
5'5 A/mm <sup>2</sup>	. . . . .	za 20.800 kVA.

Hotel je pač dokazati, da je kos problemom, ki so skozi desetletja zavirali dviganje električnih gostot. Nprekosljiv mojster, ki je bil, pa je postavil svojih 5'5 A/mm<sup>2</sup> v rezervo. Njegov transformator naj bi se zadovoljil s 16.000 kVA, bil pa vsak čas pripravljen si naprtiti za 50 odstotkov težje breme.

Toda oglejmo si normalno gostoto 4'25 A/mm<sup>2</sup> natančneje! Veliki transformatorji so navadno prisiljeni dati navitju za malo napetost večjo gostoto kot navitju za veliko napetost. Tudi transformator, ki ga opisujemo, ni bil izjema. V navitju za 4000 V je imel 5'5 A/mm<sup>2</sup>, v onem za 56.000 V pa samó 5'44 A/mm<sup>2</sup>, če je transformiral 16.000 kVA. V resnici se je tedaj največja trajno dopustna električna gostota velikana povzpela na ljajno višino  $5'5 \times 1'3 = 7'15$  A/mm<sup>2</sup>.

Povprečni gostoti 4'25 A/mm<sup>2</sup> bi ustrezalo po računu, karšnega smo vajeni, prav za prav:

$$2'5 \times 4'25^2 \times 2515 = 112.000 \text{ W}$$

energijskih izgub v bakru. Resnične izgube so bile za 20 odstotkov večje. Zakaj?

V velikem transformatorju je vse veliko, tudi prerezi ovojev, posebno pa še prerezi ovojev v navitju za malo napetost. Zató se bore vsi transformatorski velikani s tako imenovanim kožnim pojavom: tok se neenakomerno razdeli čez veliki prerez in poskuša tvoriti nekakšno električno kožo okoli jedra bakrenega vodnika. Posledice so neizbežne: Jouleova toplota postane izdatnejša kot bi bila, če bi tok enakomerno polnil vodnik.

Navitja za manjšo napetost si rada naprtavajo nadpovprečno električno gostoto vsega transformatorja, da si pribore manjše ovojne prereze in s tem slabotnejši kožni pojav. Vkljub temu pripomočku se veliki transformator ne otrese pomembne dodatne Jouleove toplote. Njegov baker ima tako rekoč neobičajne specifične energijske izgube, v našem primeru:

$$k_b = 3'0 \text{ W/kg.}$$

Ta posebnost velikega transformatorja se seveda uveljavlja v osnutku in v vsem problemu transformacijskih stroškov.

Svoj čas je močno zavirala graditelje veletransformatorjev, pa tudi graditelje ostalih velikih električnih strojev.

Za jedro svojega transformatorja je Bláthy izbral navadno legirano pločevino, ki je takrat izkazovala specifične energijske izgube 2,3 W/kg. Bláthy je vedel, da veliki transformatorji laže prenašajo velike magnetne gostote kot majhni in je zato pogumno posegel po 15.000 G. Naknadno je pregled jedra ugotovil, da je bila dejanska magnetna gostota:

$$B = 14.800 \text{ G.}$$

Nji in zgoraj navedeni teži železnega jedra bi ustrezalo prav za prav:

$$2,3 \times 1,48 \times 15540 \doteq 67.500 \text{ W}$$

energijskih izgub. V resnici pa jih je bilo okroglo 82.000 W, torej 22 odstotkov več. Zakaj?

Vsako jedro ima svoje dodatne energijske izgube. Dolgo smo jih izključno pripisovali vplivu mehanskega obdelovanja pločevine, ki je neizbežno, če razkosavamo velike pločevinske table na potrebne odrezke. Tudi vijaki in zakovice, ki predirajo telo železnega jedra, da ga stiskajo in mehansko jačijo, so nam bili od nekdaj dokaj sumljivi dodatki.

Lahko je tedaj se izmotati iz protislovij, ki nastajajo med računi osnutkov in izsledki merjenj s povišanjem specifičnih energijskih izgub, v našem primeru s:

$$k_z \doteq 2,8 \text{ W/kg.}$$

Novejše izkušnje transformatorske panoge merijo v drugo smer. Danes je namreč pač že znano, da energijske izgube v železu ne slede kvadratu magnetne gostote, temveč višji potenci.

Tej nepriliki se že dolgo izogibamo s tem, da izražamo specifične energijske izgube v onih W/kg, ki jih ugotavljamo nekako ob 15000 G in ne več ustrezno 10000 G kakor nekoč. Saj vemo, da bomo nekje v bližini 15000 G obstali.

Veliki transformator načinja to vprašanje dodatnih energijskih izgub seveda z večjo pravico kot mali, ker posega po višjih magnetnih gostotah. Poskusi dokazujejo, da je v okolici 10.000 G porast histeretskih izgub s kvadratom gostot res nekako v redu, niže, v območju manjših gostot je pred desetletji Steinmetz ugotovil 1,6-sko potenco, visoko gori pa morda niti eksponent 3 ni izključen. V tem smislu res lahko govorimo o neki posebnosti velikega transformatorja, če razpravljamo o dodatnih energijskih izgubah v njegovem jedru.

57. Za osnutke, ki predpostavljajo neko določeno magnetno gostoto, je problem odvisnosti specifičnih energijskih izgub od nasičenosti železa nevažen. Saj je dovolj, da poznajo določeni gostoti ustrezajočo specifično izgubo; kaj je tostran in onstran te gostote je potem vprašanje, ki sodi v tuja poglavja transformatorske teorije.

Osnutek v prejšnjem oddelku obravnavanega velikana je nedvomno predpostavljal določeno magnetno gostoto. Že pred prvo svetovno vojno je namreč transformatorska panoga smatrala, da je 14.000 G nekakšna skrajna gostota. Številne izkušnje z nadležnim vzbujalnim tokom so jo v teku let pripeljale do tega mnenja.

Veliki transformatorji so se pojavili tako rekoč nepričakovano, največja močnost je v transformatorski panogi nekako čez noč skočila na večkratno višino. Prinesla je prav za prav nov problem vzbujalnega toka. Naravno je, da se prvi veletransformatorski osnutki niso odtrgali od preizkušenih podatkov iz območja manjših močností. Predpostavka, da prenesó 15.000 G — Bláthy jo je tvegál — se je zdela v zadnjih letih pred izbruhom prve svetovne vojne dovolj drzna.

V resnici pa je 15.000 G za veletransformator, ki zmore 20.800 kVA, manj kot 14.000 G v transformatorju za 100 kVA. V 9. oddelku smo ugotovili, da pada procentualni vzbujalni tok s četrtrim korenem iz močností, če se oblika jedra in elektromagnetne gostote ne spreminjajo. Zató pade od, denimo, 8 odstotkov na 1/2 odstotka, če se dvignemo od 100 na 20.000 kVA.

Zakaj bi veletransformator ne smel obratovati z 8-odstotnim vzbujalnim tokom, če ima mali transformator to pravico? Zakaj bi mu torej ne smeli dovoliti 17.000, morda celo 18.000 G, če dovoljujemo malemu 14.000 G?

Manjši transformatorji imajo železna jedra, v katerih se pločevinski odrezki stebrov in jarmov tako prepletajo, da fluksu prav za prav ni treba prestopati skozi zračne rege, ki bi sicer ločile jarme od stebrov. Zató tudi ne potrebujejo pomembnih dodatnih vzbujalnih tokov za takšne zračne zapreke. Prvi veletransformatorji pa so iz tehnoloških ozirov strogo ločevali jarme od stebrov. Kmalu pa so ugotovili, da so jim celo izdatne zračne rege potrebne. Na ta način so si nakopali pomembne dodatne vzbujalne toke. Kar so si s svojo velikostjo pridobili v železu, so zapravili, vsaj deloma, v zraku.

V teku let in desetletij je veletransformatorska panoga izpopolnila svoje tehnološke potankosti. Danes se tudi v veletransformatorskih jedrih pločevinski odrezki jarmov in stebrov prepletajo. Veletransformator se je torej praktično znebil

nadležnih dodatnih vzbujaških tokov. Zato pa bi sedaj smel posegati po magnetnih gostotah, ki so se ves čas zdele nedosegljive.

Ali sme res vzbujaški tok velikega transformatorja doseči isto relativno višino kakor vzbujaški tok manjših konstrukcij? Zakaj bi prav za prav ne smel? Jalovi toki so vsi enako nadležni, vsi obremenjujejo, tako rekoč po nepotrebem, prenosne proge. V daljnovodih ne ločiš vzbujaškega toka veletransformatorja od jalovega toka, ki prihaja od nekod iz majhnih transformatorjev v razdeljevalnih omrežjih. Teh pa je toliko, da so s svojimi združenimi vzbujaškimi tokki najmanj tako nadležni kot pred njimi stoječi primarni močnejše nasičeni velikan.

Toda veletransformator ima vendarle svoje vzbujaške posebnosti. Velik je pred vsem. Zato ga ne najdemo v majhnih napravah. Velik transformator podpira veliko, to se pravi tudi dolgo prenosno progo. Veletransformatorji so zašli samo zato, ker so veliki, v svojstvene probleme, ki so postali šele v zelo dolgih prenosnih progah važni.

Sodobna prenosna tehnika se bori pred vsem s problemom obratne stabilnosti. Zelo dolge prenosne proge prinašajo čudovite zapletljajve, ki jih povzročajo vzdolž prenosnih vodnikov razdeljene induktivitete in kapacitete. Zelo dolge proge se upirajo gonilni napetosti generatorja s silno muhastimi navidezni upori. Nenadzorovane gostote onemogočajo stabilen prenos energije.

V teh zapletljajvih igrajo tudi vzbujaški toki veletransformatorjev, med katerimi je razpeta prenosna proga, zanimivo vlogo. Dognano je, da večja je statična stabilnost svojih prog (glej na pr.: A. Leonhard, *Statische Stabilität bei Drehstrom-Hochleistungsübertragung*, Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1942, str. 64). Zakaj bi jih torej dušili?

Sodobna prenosna tehnika pa pozna še drug problem, ki se je začel oglašati iz njenih dolgih prog. Daljnovod je nekakšna elektromagnetna struna, ki lahko niha z določenimi frekvencami. Kapacitivnost in induktivnost določata tej struni tako imenovane lastne frekvence.

Vzbujaški tok transformatorja je, kakor znano, zveržen izmenični tok. Obratne napetosti so praktično enobarvne sinusne napetosti, zato morajo tudi fluksi v transformatorskih jedrih ubogati čisti sinusni časovni zakon. Ker pa se magnetna prevodnost železa z magnetno gostoto močno spreminja, vzbujaški tok ne more postati enobarvno sinusen. Poln je izdatnih višefrekvenčnih dodatkov.

Po desetletnih naporih se je elektrotehniki posrečilo iztrebiti vse primarne višefrekvenčne impulze iz svojih trofaznih naprav. Sodobni generatorji imajo praktično čiste sinusne napetosti. Zato so transformatorska jedra neljubi povzročevalci višefrekvenčnih tokov.

Ni zelo važno, kako jaki so ti dodatni toki. Struna se začne oglašati tudi slabotnim impulzom, če se le ponavljajo v ritmu njene lastne frekvence. Zato nastanejo tudi zaradi razmeroma slabotnih višefrekvenčnih vzbujalnih tokov kaj lahko neprijetni rezonančni pojavi v dolgih prenosnih progah.

In zakaj samo v dolgih progah? Ker imajo dolge proge takšne lastne frekvence, da jih višefrekvenčni vzbujalni toki lahko naženejo v rezonančne pojave. Zato ni čudno, da so šele sodobni prenosni problemi opozorili na potrebo, osvoboditi vzbujalne toke višefrekvenčnih spremljevalcev.

Nekritični opazovalec pa zaide takoj v naslednjo zablodo: vzbujalni tok je tem bolj zveržen, čim večje magnetne gostote dosega njegov fluks. Torej proč z velikimi gostotami, proč s 15.000 G, proč tudi s 14.000 G! Magnetna prevodnost železa je muhasta. Torej ji ne dajmo preveč prilike, da se uveljavlja!

Toda rezonančni pojavi ne tehtajo, kakor že omenjeno, jakosti onih impulzov, ki jih povzročajo, nevaren jim je pred vsem ritem teh impulzov. Oslabljeni višefrekvenčni vzbujalni toki ostanejo povzročevalci rezonanc. Če jih znam iztrebiti, ali pa vsaj izločiti iz območja prenosne elektromagnetne strune, se mi ni treba bati velikih magnetnih gostot v transformatorskih jedrih.

Sodobna transformatorska panoga je našla duhovite rešitve perečega problema. Že gradi svojevrstna trofazna jedra, ki zapirajo dodatnim vzbujalnim tokom pet- in sedemkratne obratne frekvence izhode v omrežje. Tri- in devetkratne frekvence se trofazni sistemi itak ne bojé. Torej je res mogoče obvarovati prenosne proge vseh onih impulzov, ki bi ji praktično utegnili postati nevarni.

Če pa je res mogoče zatreti vse kvarne posledice permeabilitetnih vplivov na časovno obliko vzbujalnega toka, odpadejo vsi pomisleki proti onim velikim magnetnim gostotam, ki jim je veletransformator zato kos, ker je velik. Zato odpadejo tudi vsi oni oziri na vzbujalni tok, ki so nastali v območju malih močností. Tam je še danes 14.000 G nekakšna skrajna gostota. Veletransformator pa, ki zna krotiti svoje višefrekvenčne spremljevalce vzbujalnega toka, naj poseže po 16.000 ali 17.000 G — če more tako velike gostote spraviti v sklad z zahtevami problema transformacijskih stroškov.

38. Denimo, da bi danes poskusili konstruirati veletransformator za 20.800 kVA in 50 Hz in bi v strahu pred prenadležnim vzbujalnim tokom zadržali magnetno gostoto na 15.000 G, zato pa v želji, postaviti se s hladilno napravo, predpisali osnutku električno gostoto:

$$g = 55 \text{ A/mm}^2.$$

Iz izkušenj, ki jih je nabrala transformatorska panoga, bi vedeli, da doseže tako velik transformator s svojo dokaj zmerno zgornjo napetostjo (56.000 V) polnilni faktor navitja:

$$c_b = 0,5,$$

njegovo jedro pa vkljub hladilnim kanalom polnilni faktor:

$$c_z = 0,8.$$

Predvidevali bi dodatne energijske izgube v železu in bakru. Zato bi skladno z ugotovitvami predzadnjega oddelka postavili:

$$k_b = 3,0 \times 10^{-3} \text{ kW/kg}$$

in

$$k_z = 2,8 \times 10^{-3} \text{ kW/kg},$$

če bi hoteli graditi z navadno legirano pločevino.

S temi podatki dobimo najprej enotni transformacijski ceni:

$$s_b = 5 \times 0,1 + 5,5^2 \times 3,0 \times 10^{-3} \times 80 = 0,5 + 7,26 = 7,76$$

in

$$s_z = 1,25 \times 0,1 + 1,5^2 \times 2,8 \times 10^{-3} \times 80 = 0,125 + 0,504 = 0,629.$$

ki ustrezata enotnima gradbenima cenama:

$$b = 5,0 \text{ zl. kron/kg},$$

$$z = 1,25 \text{ zl. kron/kg},$$

desetodstotni obrestni in odpisni kvoti ter, z ozirom na uporabo transformatorja v čisti vodni napravi:

$$h_b \cdot p_b = h_z \cdot p_z = 80 \text{ zl. kron.}$$

Osnutek s predpisanimi elektromagnetnimi gostotami smo obravnavali v III. poglavju. Tam smo našli v enačbi 28) osnovni podatek za določitev relativnega premera stebra. Če cenimo:

$$\frac{21}{\frac{1}{2} - \delta} \doteq 4,8,$$

dobimo:

$$\sigma = 4,8 \times \frac{0,5 \times 8,9 \times 7,76}{0,8 \times 7,4 \times 0,629} \doteq 44,5.$$

čemu bi ustrežal relativni premer stebra:

$$y'_o \doteq 0.887,$$

ker je ustrezno enačbi 30)

$$44.5 = \left( \frac{0.887}{1 - 0.887} \right)^2 \times \frac{2 + 0.887}{4},$$

Če pa preusmerimo osnutek na zmernejšo močnosť 16.000 kVA in s tem na nižžano električno gostoto:

$$g = \frac{5.5}{1.3} \text{ A/mm}^2,$$

dobimo:

$$s_b = 0.5 + \frac{7.26}{1.3^2} \doteq 4.79$$

in

$$\sigma = 44.5 \times \frac{4.79}{7.76} = 27.5,$$

čemu bi ustrežal relativni premer stebra:

$$y'_o \doteq 0.861.$$

V obeh primerih zahteva osnutek izredno debele stebre. Železo potiska uporabo bakra z nepričakovano silo. Veletransformator iz 1912. l. pa je res ubral tu opisano pot. V 36. oddelku omenjeni izčrpni opis te velike konstrukcije pripoveduje, da so imeli stebri 550 mm v premeru, da so bile osi sosednih stebrov 920 mm oddaljene druga od druge, da je imelo navitje za spodnjo napetost radialno višino 16 mm, navitje za zgornjo napetost pa 54 mm radialne višine.

Te mere pomenijo, da je bilo okno v jedru:

$$920 - 550 = 370 \text{ mm}$$

široko, da je torej navitju enega stebra v celoti služilo 185 mm radialne višine. Ker pa so očividno izolacijski presledki zahtevali:

$$185 - (16 + 54) = 115 \text{ mm.}$$

je bil relativni premer stebra:

$$y'_o = \frac{550}{550 + (16 + 54)} = 0.887.$$

Bláthy ni poznal teorije, ki smo jo opisali v III. poglavju. S svojo mojstrsko roko pa je pogodil najugodnejše razmerje med železom in bakrom, ustrežajoče nenavadnim elektromagnetnim gostotam, ki jih je hotel uveljaviti. Ni pa upošteval

zakona o jarmih, katerega seveda tudi ni poznal. Zató se je zaupal izkušnjam, pridobljenim v normalnih prilikah dotedanje transformatorske panoge, in oddelil jarmoma z ene, stebrom z druge strani približno isto množino železa.

Pravilno razdelitev železa pa predpisuje enačba 32). Bláthyjevi stebri so bili 1550 mm dolgi, navitje pa povprečno samó 1225. Torej je bilo:

$$A = 1550 - 1225 = 325 \text{ mm.}$$

Zgoraj smo ugotovili:

$$\frac{1}{2} = 550 + 185 = 735 \text{ mm.}$$

Iz vseh teh mer dobimo:

$$\frac{h - A}{1 + A} = \frac{1550 - 325}{2 \times 735 + 325} = 0.682,$$

Bláthy pa je videl:

$$\frac{h}{1} = \frac{1550}{2 \times 735} \doteq 1.053.$$

torej nekakšno enakopravnost obeh delov železnega jedra.

Enačba 32) zahteva:

$$y'_0 = 0.887$$

$$y'_0 = 0.861$$

$$\frac{h - A}{1 + A} = 4 \times \frac{1 - 0.887}{2 - 0.887} = 0.406$$

$$= 4 \times \frac{1 - 0.861}{2 - 0.861} = 0.489$$

in s tem vsekakor krajše stebre. Zató bi nas neoporečni osnutek vodil do večjega premera stebra kot ga je imel Bláthyjev transformator in do jarmov, ki bi potegnili več ko dve tretjini železa nase.

39. V sliki, vzeti iz žive transformatorske panoge, doživi praktik v najprepričevalnejši obliki, kar mu prišepetava teorija, katero le prerad sumniči, da mlati prazno slamo. Zató si oglejmo otipljive transformacijske stroške transformatorja za 20.800/16.000 kVA, ki ga opisujemo v tem poglavju.

Po zgoraj zbranih podatkih moramo ocenjevati:

gradbene stroške navitja z  $2515 \times 5 = 12.575$  zl. kronami,

gradbene stroške jedra s  $13.340 \times 1.25 = 16.700$  zl. kronami

in zato obresti ter odpise z:

$$(12.575 + 16.700) \times 0.1 = 2927.5 \text{ zl. krone.}$$

Energijske izgube v železu so znašale 82 kW, torej so v letu protrosile:

$$82 \times 80 = 6.560 \text{ zl. kron.}$$

Energijske izgube v bakru slede seveda močnosti. Če začnemo ogled z 20.800 kVA, moramo misliti na 227 kW in s tem na delne transformacijske stroške:

$$227 \times 80 = 18.160 \text{ zl. kron.}$$

Vsi transformacijski stroški bi tedaj znašali:

$$2.927,5 + 6.560 + 18.160 = 27.647,5 \text{ zl. kron.}$$

če bi obveljala močnost 20.800 kVA, in konstruktivna invarianta — to pot izračunana za vse tri stebre, torej za ves trofazni transformator — bi bila:

$$I_3 = \frac{27647,5}{20800^{\frac{2}{3}}} \doteq 16.$$

Če znižamo močnost na 16.000 kVA, padejo stroški Jouleove toplote v navitju na:

$$\frac{18160}{1,3^2} \doteq 10730 \text{ zl. kron.}$$

vsi transformacijski stroški pa na:

$$2.927,5 + 6.560 + 10.730 = 20.217,5 \text{ zl. kron.}$$

Tako dobimo konstruktivno invarianto:

$$I_3 = \frac{20217,5}{16000^{\frac{2}{3}}} = 14,3.$$

Skromnejša močnost je očitno mnogo priporočljivejša. Bláthy je dobro vedel, zakaj se je odrekel varljivim možnostim, ki so se mu odpirale. Električna gostota 5,5 A/mm<sup>2</sup> je nedvomno pretirana. Toda morda je tudi znižana gostota, ki ustreza 16.000 kVA, še previsoka.

Od električne gostote neodvisni so delni transformacijski stroški:

$$2.927,5 + 6.560 = 9.487,5 \text{ zl. kron.}$$

Kolikokrat (z<sup>2</sup>-krat) pa naj znižamo stroške energijskih izgub v bakru, ki ustrezajo 20.800 kVA? Gotovo tolikokrat, da bo konstruktivna invarianta dosegla svojo najmanjšo vrednost. Iz nastavka:

$$I_{3z} = \frac{9487,5 + \frac{18160}{z^2}}{\left(\frac{20800}{z}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

dobimo najpriporočljivejši:

$$z^2 \doteq 3\cdot37, \text{ s tem } z \doteq 1\cdot832,$$

torej najcenejšo močnost:

$$\frac{20800}{1\cdot832} \doteq 11\cdot350 \text{ kVA}$$

in najnižjo dosegljivo konstruktivno invarianto:

$$I_{3 \text{ min}} = \frac{9487\cdot5 + \frac{18160}{3\cdot37}}{11350^{\frac{1}{2}}} \doteq 13\cdot57.$$

hkratu pa najcenejšo električno gostoto:

$$g = \frac{5\cdot5}{1\cdot832} \doteq 3 \text{ A/mm}^2.$$

Izledek je presenetljiv. Kako je sploh mogoče zagovarjati velike električne gostote, kakor 5·5 ali pa tudi 4·25 A/mm<sup>2</sup>, če obračun transformacijskih stroškov prepričevalno priporoča znatno nižje? Kako naj razumemo pretiravanje, vsaj dozvedno, električnih gostot, ki še ni izginilo iz transformatorske panoge?

V individualističnem gospodarstvu lahko zagovarjaš vsako navidezno zablodo, in opisani veletransformator je nastal v individualističnem gospodarstvu. Zgrajen je bil za vodno centralo, ki je imela obilo vode, pa razmeroma malo odjemalcev električne energije. Zato ji energijske izgube v bakru navitja niso mogle biti važne.

Vsaka vodna centrala, ki samotari, ki živi brez zvez s širšim električnim gospodarstvom, zbira počasi svoje odjemalce. Spočetka ji uhaja voda vsa neizkoriščena čez jez. Kasneje ji jo odjemalci vprezajo bolj in bolj. Ves ta čas pa ji energijske izgube transformatorskih jeder in navitij ne pomenijo skoraj nič. Pač pa so ji odpisi in obresti v transformatorjih zakonitih vsot nadležna bremena.

Takšne, izolirane, vodne centrale so vedno ubirale in še ubirajo neko srednjo pot: gradbeni stroški transformatorja naj bodo nizki, energijske izgube pa smejo biti velike. Za to srednjo pot so seveda izdatne hladilne naprave važne. Pot je srednja, ker postanejo nazadnje, ko zasedejo odjemalci vsa razpoložljivo močnost, energijske izgube v transformatorju vendarle predrage. Centrala se pač tolaži s tem, da so bile dolga leta silno poceni. Izolirana vodna centrala preprosto očitno ne sme letno obračunavati svojih transformacijskih

stroškov. Njeni obračuni morajo obsegati deset ali celo dvajset let kot enotno gospodarsko dobo.

Vsi ti zapletljaji se razblinijo v nič, če izgine individualistično električno gospodarstvo in se umakne kolektivnemu. Med osnutkom veletransformatorja iz 1912. l. in zgoraj opisano kritiko tega osnutka leži trideset let. Ta tri desetletja so bila dolga za električno gospodarstvo, ki živi izredno naglo in burno.

40. Za razliko med individualističnim in kolektivnim električnim gospodarstvom se skriva razlika med gradbenimi in transformacijskimi stroški v osnutkih transformatorske panoge. Kritičnemu opazovalcu razvojne poti transformatorske panoge postane usmerjanje starih osnutkov na najmanjše gradbene stroške nazadnje kar opravičljivo in razumljivo: stari osnutki so pač nastajali v še individualističnem električnem gospodarstvu.

Zasebni podjetnik zagleda krajevno pomanjkanje električne energije in zgradi elektrarno. Njegov edini smoter je obetajoči se poslovni dobiček. Njegova živa želja je, izogniti se prevelikemu riziku. Pogosto mu tudi primanjkuje potrebni denar.

Vsak zasebni podjetnik ve, da bo moral zdržati dolgo vrsto let v tesnih poslovnih prilikah, ker ne more pričakovati, da se mu bodo odjemalci električne energije takoj zbrali. Zato se boji prevelikih investicijskih stroškov. Zato se pa tudi ne boji velikih energijskih izgub v transformatorjih. Energijske izgube v navitjih pa so prav za prav itak samó na videz velike, dokler transformator ne dobi svojega polnega bremena.

Neprijetne so zasebnemu podjetniku od vsega početka energijske izgube v transformatorskih jedrih, ki pritisnejo s prvim obratnim dnem z vso svojo težo in se kasneje ne spremene. Zato zahteva sebični zasebni podjetnik nizke energijske izgube v železu, čeprav se mu izsiljeni energijski prihranki, in še celó podvojeni ali potrojeni, razblinjajo v večjih energijskih izgubah navitij.

Tu je skrit vir sicer težko razumljivega izboljšavanja transformatorske pločevine. Ni golo naključje, da prihaja najboljša pločevina ravno iz Amerike: ameriško električno gospodarstvo je strogo individualistično. Tudi to ni igra naključja, da je veletransformator za 16.000 kVA iz 1912. l. uporabil navadno legirano pločevino, saj je bil zgrajen za vodno centralo. Zasebni podjetnik se brani energijskih izgub v železu pred vsem tedaj, če troši zanje premog.

V svojih načrtih vidi seveda vsak zasebni podjetnik, da mu bodo nekoč pretirane energijske izgube transformatorskih

navitij zelo nadležne in predrage. Tolaži pa se s tem, da bo takrat že užival dovolj mastne poslovne dobičke, da bo takrat tudi lahko zamenjal potratni transformator z varčnejšim. Pred vsem pa ve, da mu niti ne bo treba odsloviti transformatorja, ki je postal predrag, saj mu lahko preprosto zniža breme in mu doda pomočnika.

Nedvomno so transformatorji, ki imajo prilagodljive hladilne naprave — Bláthyjev iz 1912. l. jo je imel — izredno prikladni zahtevam individualističnega električnega gospodarstva. Iz lahko razumljivih vzrokov posegajo samó veletransformatorji po prilagodljivih hladilnih napravah. Le umetno hlajenje pa dovoljuje reguliranje.

Kolektivno električno gospodarstvo ne išče poslovnih dobičkov, bolje rečeno, ne smelo bi jih iskati. Njegov pravi smoter je oplojevanje narodnega gospodarstva s ceneno električno energijo. Vse energijske izgube so mu nadležne, če niso opravičljive.

Kolektivno električno gospodarstvo pa ne sme pretiravati svoje borbe z energijskimi izgubami v strojih, daljnovodih in transformatorjih. Saj bi se mu pretirano nizke izgube maščevale s potratnim zaposljevanjem železa in pred vsem bakra, pa tudi gradbenih delovnih naporov. Vsak kilogram železa in bakra vsebuje določeno količino opravljenega dela, ko se pojavi v električnih napravah, opravljeno delo pa pomeni potrošeno energijo.

Razsežna kolektivna električna gospodarstva, na pr. nemško, se pogosto bore s pridobivanjem važnih gradbenih snovi; pred vsem baker, pa tudi železo, jim dela preglavice. Baker je treba uvažati, če ga v območju dotičnega električnega gospodarstva ni. Uvoz pa zahteva dodatno delo za tujino.

Vsi ti pomisleki usmerjajo osnutke sodobne transformatorske panoge na najmanjše transformacijske stroške, usmerjajo jih pa na letne transformacijske stroške, ker velika kolektivna električna gospodarstva ne poznajo počasnega nabiranja odjemalcev električne energije.

Sodobni transformatorski osnutki iščejo po vsem tem z vso pravico one najpriporočljivejše elektromagnetne gostote, ki ustrezajo že ustaljenemu bremenu transformatorja. Prilagodljive hladilne naprave velikih transformatorjev so jim le še v izjemnih prilikah, na pr. v potujočih transformatorjih, dobrodošle. Če zahteva teorija transformacijskih stroškov električne gostote, ki so manjše od nekdanjih, jih bo kolektivno električno gospodarstvo pač moralo uveljaviti.

Edina zapreka na poti do najpriporočljivejših elektromagnetnih gostot je sodobnim transformatorskim osnutkom le še

vzbujalni tok. Zató so osnutki z zadržano magnetno gostoto še zelo važni.

Tudi problem velikega transformatorja se takšnim osnutkom po vsem videzu še ne more izogniti. Toda če hoče vestno opraviti svojo nalogo, mora vendarle pred vsem ugotoviti, ali mu vzbujalni tok res zavira magnetne gostote. V 57. oddelku smo opozorili na dejstvo, da so veletransformatorski osnutki še v okovih izkušenj iz območja manjših močností. Zató moramo pač dokončno in temeljito razčistiti to vprašanje, ki ima morda svoje še neodkrите posebnosti.

41. Kakšne bi bile neki najpriporočljivejše elektromagnetne gostote veletransformatorja za 16.000 kVA, če bi ne bilo ozirov na vzbujalni tok in na svojstvene gospodarske interese izolirane vodne naprave? Izsledki IV. poglavja nam obetajo točen odgovor. Poiščimo ga!

Če vstavimo v enačbo 61) že zbrane podatke, dobimo:

$$\psi = 4 \times 4.8 \times \frac{0.5 \times 8.9 \times 5.0}{0.8 \times 7.4 \times 1.25} \doteq 57.8$$

in:

$$y_0 \doteq 0.76.$$

Iz enačb 57) in 58) pa sledi:

$$g = \sqrt{\frac{5 \times 5 \times 0.1}{3 \times 80 \times 10^{-3}}} \times \frac{2 - 0.76}{3.8 - 2} = 2.07 \text{ A/mm}^2$$

in

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \times 1.25 \times 0.1}{2.8 \times 80 \times 10^{-3}}} = \frac{2 - 0.76}{6 - 5.32} = 1.75.$$

torej:

$$B = 17.500 \text{ G.}$$

Ugotovitev je nedvomno zelo presenetljiva. Saj priporoča električno gostoto, ki je tako skromna, da je noben izkušen graditelj transformatorjev ne bo hotel sprejeti. Razen tega zahteva magnetno gostoto, ki bi si jo tako velik transformator prav za prav lahko naprtil, ne da bi izval neprebavljiv vzbujalni tok.

Torej ni treba zadržavati magnetne gostote v območju velikih močností? Torej velja res samó ukrotiti višefrekvenčne vzbujalne toke, očistiti, kakor pravimo, transformator višefrekvenčnih tokov, in pot do neoporečnih osnutkov bi bila odprta?

Če skrbno pregledamo vse račune, ki vodijo do najpriporočljivejših elektromagnetnih gostot in pazljivo sledimo go-

spodarskim vplivom v njih, se kaj kmalu prepričamo, da so cene letnih kilovatov  $p_z h_z$ , oziroma  $p_b h_b$  odgovorne za vse, kar nas v zgornjem konkretnem primeru preseneča. Te cene vplivajo vidno na elektromagnetne gostote, kar je iz enačb 57) in 58) lahko posneti. Vplivajo pa tudi nevidno, posredno, tam namreč, kjer soodločajo o relativni velikosti premera  $\gamma_0$  stebra.

Vsi ostali vplivi se odtezajo kakršnim koli ugovorom: polnilni faktor  $c_b$  je organsko povezan z močnóstjo in obratno napetostjo, specifični teži  $\gamma_z$  in  $\gamma_b$  sta nepremakljivi, enotni gradbeni ceni  $z$  in  $b$  ustaljeni. Kdor tedaj ugovarja izračunjenim elektromagnetnim gostotam, ugovarja predpostavljenim cenam letnih kilovatov.

Toda ugovor bi moral biti krepak, če naj bi opravičil dvig električne gostote od 2'07 A/mm<sup>2</sup> na 3'5 ali 4 A/mm<sup>2</sup>, tja torej, kamor stremljiva kritika. Ali hočemo res zaračunavati letni kilovat jedru in navitju s 25 zl. kronami?

Saj je mogoče, da knjži zasebni podjetnik vse energijske izgube med poslovne stroške in prepušča ustrezna gospodarska bremena svojim odjemalcem električne energije. V tem primeru ga seveda energijske izgube ne bole, pač pa mu lajšajo obrestno in odpisno breme.

Smotrno kolektivno gospodarstvo ne sme hoditi po neopravičljivih potih. Zató ne sme uporabljati kalkulacijskih trikov, ki zastrupljajo uporabo naravnih energijskih virov, pa tudi delavne sposobnosti naroda, katèremu naj služi.

Kritika presenetljivo nizkih električnih gostot, ki se vsiljuje v izsledkih teorije transformacijskih stroškov, mora brskati v sami teoriji, ne pa uveljavljati zastarele predsodke in ukoreninjene poslovne razvade.

Eno samo vdorno točko bo našla kritika v teoriji transformacijskih stroškov, namreč zakon o odvisnosti specifičnih energijskih izgub v železu od vsakokratne magnetne gostote. Doslej smo preprosto predpostavljali proporcionalnost s kvadratom te gostote. Toda ta predpostavka stoji na nekoliko šibkih nogah.

V teorijo transformacijskih stroškov je prišla, ker so jo izkušnje nekako priporočale, pred vsem pa, ker ustreza nekakšni enakopravnosti železa in bakra v transformatorju. Energijske izgube v bakru znašajo točno:

$$V_b = k_b \cdot g^2 \cdot G_b \text{ kilovatov,}$$

energijske izgube v železu naj bi torej znašale

$$V_z = k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^2 \cdot G_z \text{ kilovatov.}$$

Graditelj transformatorjev se seveda od nekdanj dobro zaveda le približne veljavnosti drugega nastavka, toda vseč mu je. Zato ga že dolgo brani z zasilnimi popravili, kakor n. pr. s premestitvijo izgub  $k_z$  z osnove 10.000 G na prikladnejšo osnovo 15.000 G.

Dokler ima graditelj transformatorjev opraviti z zadržano magnetno gostoto in zato le z ozkim območjem praktično možnih gostot, je res pravilno, da hrani in brani preprosto predpostavljeno odvisnost energijskih izgub od magnetne gostote. Kakor hitro pa postavi problemu transformacijskih izgub nalogo, da naj najde najpriporočljivejšo magnetno gostoto, mu hkratu tudi odpre široko območje teh gostot. S tem pa izpodkoplje svojemu preprostemu zakonu o energijskih izgubah v železu ves temelj, in problem transformacijskih izgub mora postati silno previden. Tu tedaj lahko zasadi kritika svoj nož. Poglejmo, kaj bo izkopala in kako bo ozdravila teorijo transformacijskih stroškov!

42. V svojem članku „Die wirtschaftlichen Transformationsgesetze und Transformatorverluste bei Berücksichtigung der wahren Änderung der Eisenverluste mit der magnetischen Liniendichte“ (Archiv für Elektrotechnik, XXXV. 11. zvezek, 1941.) je dr. V. Bedjanič, docent ljubljanske univerze, menda prvi poskusil prečistiti problem transformacijskih stroškov. Njegov izboljšani zakon o energijskih izgubah v železu se glasi:

$$V_z = k_z \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot G_z \text{ kilovatov. . . . . 2)}$$

Ta nastavek ne upošteva z vso strogostjo dejstva, da je eksponent  $u$  v resnici spremenljiv, namreč odvisen od gostote  $B$ , je pa vsekakor mnogo boljši od starega, ki ima isto obliko in vnaprej določeno vrednost:

$$u = 2.$$

Bedjanič ima prav, da priporoča preprost eksponentni zakon, ker brani z njim obračunavanje transformacijskih stroškov pred nepotrebnimi težavami, ima pa tudi prav, da se ne veže vnaprej na nobeno določeno vrednost eksponenta  $u$ . Resnične odvisnosti specifičnih energijskih izgub v železu od elektromagnetne gostote pa Bedjaničev nastavek seveda ne opisuje, ker deloma zanemarja skrito povezanost eksponenta  $u$  z gostoto  $B$ .

Vkljub temu nedostatku je mogoče z Bedjaničevim nastavkom praktično izdatno poglobiti, in pred vsem popraviti, izsledke problema transformacijskih stroškov, zato se mu

hočemo v naslednjem zaupati. Do zadnjih globin tega zamotanega problema pa z računi itak ni mogoče prodreti, ker so magnetne lastnosti železa premuhaste.

Poglobljeno raziskovanje moramo otvoriti s funkcijo elektromagnetnih gostot, ki smo jo raziskavali v 25. oddelku, toda prilagoditi jo moramo novemu zakonu o specifičnih energijskih izgubah v železu. Preoblikovana se glasi:

$$f\left(g, \frac{B}{10^4}\right) = \frac{G_z \left[ \check{z} \cdot p + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot k_z h_z p_z \right] + G_b \left[ b \cdot p + g^2 \cdot k_b h_b p_b \right]}{\left(g \cdot \frac{B}{10^4}\right)^{\frac{3}{4}}} \dots \dots \dots 72)$$

Najugodnejšo električno gostoto dobimo zopet iz enačbe:

$$\frac{\delta f\left(g, \frac{B}{10^4}\right)}{\delta g} = 0, \text{ oziroma } G_b g^2 k_b h_b p_b = \frac{3}{4} \left\{ G_z \left[ \check{z} p + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u k_z h_z p_z \right] + G_b \left[ b p + g^2 k_b h_b p_b \right] \right\}, \dots \dots 73)$$

ki zahteva, da naj energijske izgube navitja v najugodnejšem primeru zasedejo tri osmine vseh transformatorskih stroškov.

Omembe vredno je, da obdrži ta posebni zakon iz teorije transformacijskih stroškov svojo moč ne glede na obliko zakona o specifičnih izgubah v železu, torej ne glede na vrednost eksponenta u, da celó, če postavimo popolnoma splošno:

$$V_z = k_z \cdot \varphi \left(\frac{B}{10^4}\right) \cdot G_z.$$

Popolna neodvisnost najugodnejše električne gostote od vpliva magnetne gostote na specifične energijske izgube v železu pa je vendarle samó navidezna. Iz enačbe 73) dobimo lahko:

$$G_b \cdot g^2 \cdot k_b \cdot h_b \cdot p_b = \frac{3}{8} (b p + g^2 k_z h_z p_z) \times \left\{ 1 + \frac{G_z \left[ \check{z} p + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u k_z h_z p_z \right]}{G_b \left[ b p + g^2 k_z h_z p_z \right]} \right\},$$

oziroma z že znanimi oznakami preprosteje:

$$g^2 k_b h_b p_b = \frac{3}{8} (b p + g^2 k_b h_b p_b) \cdot \left[ 1 + \frac{S_z}{S_b} \right] \dots \dots 74)$$

in vidimo takoj, da vpliva na g razmerje delnih transformacijskih stroškov  $S_b : S_z$ , posredno torej vendarle tudi specifične energijske izgube v železu.

Iz enačbe 74) pa sledi:

$$g^2 = \frac{3 \text{ bp}}{k_b h_b p_b} \cdot \frac{1 + \frac{S_z}{S_b}}{5 - 3 \frac{S_z}{S_b}}, \dots \dots \dots 75)$$

kar dovoljuje takojšnjo zvezo z izsledkom, prabitim v enačbi 53). Najugodnejša električna gostota je torej:

$$g = \sqrt{\frac{3 \text{ bp}}{k_b h_b p_b} \frac{2 - y'_0}{5 y'_0 - 2}}$$

če je  $y'_0$  najugodnejši relativni premer stebra. Prav tolikšno pa smo že dobili v enačbi 57). Toda spremenjeni zakon o specifičnih energijskih izgubah v železu ima vendarle svoje prste vmes:  $y'_0$  je prav gotovo odvisen od eksponenta u.

Najugodnejšo magnetno gostoto bomo dobili iz pogojne enačbe:

$$\frac{\delta f \left( g, \frac{B}{10^4} \right)}{y \frac{B}{10^4}} = 0,$$

ki zahteva:

$$G_z \left( \frac{B}{10^4} \right)^u \cdot k_z h_z p_z = \frac{3}{4 u} \left\{ G_z \left[ \dot{z} p + \left( \frac{B}{10^4} \right)^u \cdot k_z h_z p_z \right] + \right. \\ \left. + G \left[ \text{bp} + g^2 k_b h_b p_b \right] \right\}, \dots \dots \dots 76)$$

Stroški energijskih izgub v železu naj zasedejo tedaj le v primeru  $u = 2$  tri osmine vseh transformacijskih stroškov. Zato jedro in navitje nista več enakopravna, če nastopi drugačen eksponent u. V območju magnetnih gostot, ki služi sodobni transformatorski panogi, je  $u > 2$ . Posledica je prevladovanje stroškov energijskih izgub v bakru. Na splošno velja:

$$\frac{G_b g^2 k_b h_b p_b}{G_z \left( \frac{B}{10^4} \right)^u k_z h_z p_z} = \frac{u}{2}, \dots \dots \dots 77)$$

Iz enačbe 76) vodi ista pot do najugodnejše magnetne gostote, ki nas je privedla od enačbe 75) do najugodnejše električne. To pomeni najprej:

$$\left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot k_z h_z p_z = \frac{3}{4u} \left[ \dot{z}p + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u k_z h_z p_z \right] \cdot \left(1 + \frac{S_b}{S_z}\right),$$

nato:

$$\left(\frac{B}{10^4}\right)^u = \frac{3 \dot{z}p}{k_z h_z p_z} \cdot \frac{1 + \frac{S_b}{S_z}}{(4u + 3) - 3 \frac{S_b}{S_z}}$$

in nazadnje v zvezi z enačbo 35)

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt[2]{\frac{3 \dot{z}p}{k_z h_z p_z} \cdot \frac{1}{u \cdot \frac{6 - 5 y'_0}{2 - y'_0} - 3}} \dots \dots \dots 78)$$

V posebnem primeru:

$$u = 2$$

je seveda:

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \dot{z}p}{k_z h_z p_z} \cdot \frac{2 - y'_0}{6 - 7 y'_0}}$$

skladno z enačbo 58).

Iz obeh enačb 57) in 78), ki določata najugodnejši elektromagnetni gostoti na osnovi novega zakona o specifičnih energijskih izgubah v železu, dobimo skoraj neposredno:

$$s_b = bp + g^2 k_b h_b p_b = 2 bp \frac{y'_0 + 2}{5 y'_0 - 2}$$

in

$$s_z = \dot{z}p + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u k_z h_z p_z = \frac{\dot{z}p}{1 - \frac{2 - y'_0}{6 - 5 y'_0} \cdot \frac{3}{u}} \dots \dots \dots 79)$$

S pomočjo teh dveh enotnih transformacijskih cen zgradimo prav lahko določilno enačbo za najugodnejši relativni premer stebra. Opreti se moramo le na enačbi 28) in 30), pa dospemo takoj do izraza:

$$\psi = \frac{8 \cdot l}{1 - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot l_b \cdot b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot \dot{z}} =$$

$$= \frac{u}{2} \cdot \left(\frac{y'_0}{1 - y'_0}\right)^2 \cdot \frac{(5 y'_0 - 2)(6 - 5 y'_0)}{u(6 - 5 y'_0) - 3(2 - y'_0)}, \dots \dots \dots 80)$$

ki povsem ustreza enačbi 61).

Če damo temu izrazu obliko:

$$\psi = \frac{8 \cdot l}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot \bar{z}} =$$

$$= \left( \frac{y'_0}{1 - y'_0} \right)^2 \cdot \frac{(5 y'_0 - 2)(6 - 5 y'_0)}{6 - 7 y'_0} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{6 - 7 y'_0}{6 - 5 y'_0 - \frac{3}{u}(2 - y'_0)}$$

in ga primerjamo z enačbo 61), vidimo takoj, da ustreza istemu  $y'_0$  manjši  $\psi$ , kakor hitro prekorači u vrednost 2. Iz tega sledi narobe, da zahtevajo vrednost 2 presegajoči eksponenti u novega zakona o specifičnih energijskih izgubah v železu večje relativne premere stebra kot jih pričakujemo po starem zakonu.

Razlika je lahko velika. Denimo, da je:

$$u = 3, \quad y'_0 \text{ pa} = 0\cdot8.$$

V tem primeru doseže:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{6 - 7 y'_0}{6 - 5 y'_0 - \frac{3}{u}(2 - y'_0)} = \frac{1}{2} \times \frac{6 - 5\cdot6}{6 - 4\cdot0 - \frac{3}{3} \times (2 - 0\cdot8)} = \frac{1}{4},$$

to se pravi, relativnemu premeru  $y'_0 = 0\cdot8$  ustreza 4-krat manjši  $\psi$ , če je  $u = 3$ , kakor dokler velja  $u = 2$ .

Čim večji pa postane  $y'_0$ , tem manjši je izraz:

$$\frac{6 - 5 y'_0}{2 - y'_0}.$$

Na najugodnejšo magnetno gostoto vpliva u po vsem tem, kakor razvidno iz enačbe 78), na tri načine. Vrednost 2 presegajoči u povečuje  $y'_0$  in posredno drugi ulomek pod korenem enačbe 78). Isti ulomek pa se zmanjšuje neposredno pod rastočim u. Koren sam pa daje seveda praktično tem manjši iznos, čim večji je u.

Vse to obeta dokaj drugačno sliko najugodnejšega osnutka kot jo gradi problem transformacijskih stroškov s pomočjo zastarelega zakona o specifičnih energijskih izgubah v železu. Zadržavanje magnetnih gostot zaradi vzbujalnega toka stopa z novimi izsledki v novo svetlobo.

Če pa je res, da smemo pričakovati večje relativne premere stebrov kot smo doslej mislili, moramo biti pripravljeni, da

bomo dobili še manjše električne gostote kot nam jih je doslej obetal stari eksponent  $u = 2$ . Izraz:

$$\frac{2 - y'_0}{5 y_0 - 2}$$

v enačbi 57) postaja namreč tem manjši, čim večji skuša biti  $y'_0$ .

43. Kako zamotan postane problem transformacijskih stroškov, če ga podpremo z natančnejšim zakonom o specifičnih energijskih izgubah v železu, vidimo najboljše, če spreminjamo eksponent  $u$ , ko izračunavamo najugodnejše elektromagnetne gostote in najpriporočljivejši relativni premer stebra.

V 41. oddelku smo našli vrednost:

$$\psi = 57.8$$

kot oporo za osnutek transformatorja za 16.000 kVA. Če sedaj pritegnemo enačbo 80), razen tega pa še obe enačbi 57) in 78), hkratu pa popravimo  $k_z$  od 2'8 na 2'3, ker pač predpostavljamo, da so navidezne dodatne izgube v železu zasidrane v svojevrstnem naraščanju izgub z rastočo gostoto, dobimo za različne eksponente  $u$  naslednjo razporednico:

$u$	$y'_0$	$B$	$g$
2'0	0'76	19.500	2'07
2'2	0'78	15.450	2'01
2'5	0'80	12.500	1'93
2'85	0'82	10.900	1'87

V nji je najvažnejši odnos med  $B$  in  $u$ , ki pa je seveda ves samó izraz zahtev problema transformacijskih stroškov. Toda  $B$  in  $u$  sta še v fizikalnih odnosih, ki jih mora ugotoviti eksperiment. Tam, kjer se ta dva odnosa križata, leži najugodnejša magnetna gostota.

Zgornja razporednica nam pripoveduje, da se najugodnejša magnetna gostota manjša, če raste  $u$ . Eksperiment pa prinaša drugo sliko:  $u$  postaja večji in večji, če raste  $B$ . Po izkušnjah, ki jih je zbrala transformatorska panoga, smemo trditi, da bo v zgornjem primeru resnično najugodnejša gostota ležala nekje v bližini 13.000 G.

Navadna legirana pločevina ( $k_z = 2'3$ ,  $z = 1'25$ ) bi tedaj niti ne potrebovala vsega razmaha, ki ga vzbujalni tok dovoljuje magnetnim gostotam. Verjetno je celó, da bi se veliki transformator brez posebnih težav dokopal do magnetne go-

stote, ki jo zahteva problem transformacijskih stroškov, tudi če bi uporabljali močno legirano, dražjo pločevino.

Vsi ti izsledki so dokaj nasprotni dosedanjemu praktičnemu stališču transformatorske, pred vsem pa veletransformatorske panoge. Le če mislimo na uporabo najboljše pločevine, vidimo, da so zaželenne magnetne gostote nekako v skladu s teoretičnimi. Pa tudi v tem primeru priporoča teorija manjše električne gostote.

Če bi na pr. preusmerili zgoraj obravnavani osnutek veletransformatorja za 16.000 kVA na močno legirano pločevino, bi predvsem ž postal nekako 1'5-krat večji. Torej bi dobili:

$$\psi = \frac{57.8}{1.5} \doteq 38.5.$$

Enačba 80) nam omogoča potem naslednjo razpredelnico:

u	y' <sub>o</sub>	B (G)	g (A/mm <sup>2</sup> )
2'0	0'74	28.700	2'36
2'2	0'76	22.500	2'27
2'5	0'78	17.700	2'19
3'1	0'80	13.500	2'12

ki predpostavlja specifične energijske izgube v železu:

$$k_z = 1.3 \times 10^{-3} \text{ kW/kg.}$$

Najugodnejša magnetna gostota bi torej v tem primeru ležala nekje v bližini 17.000 G in bi bila najbrže uresničljiva, če bi bil transformator brez dodatnih višefrekvenčnih vzbujačnih tokov, oziroma, če bi ti njegovi višefrekvenčni toki ne posegali v omrežje. Najugodnejša električna gostota pa bi očitvidno ostala skromna.

Transformatorska panoga se je doslej vsekakor premalo zanimala za porast energijskih izgub v območju magnetnih gostot nad 15.000 G. Premalo poznamo tudi še morebitna kolebanja eksponentov u ob isti magnetni gostoti toda različnih kakovostih transformatorske pločevine.

Vsa ta zanemarjena vprašanja bo treba temeljito razčistiti. Saj vidimo, da posega eksponent u globoko v problem transformacijskih stroškov, hkratu pa seveda v osnutke velikih in majhnih transformatorjev. V njegovi oblasti je odgovor na vprašanje, ali nam je res treba zadrževati magnetne gostote v transformatorski panogi.

Ta odgovor pa je odvisen tudi od vprašanja, kakšno pločevino naj uporablja transformatorska panoga. Iz dveh dosedanjih računov je razvidno, da navadna legirana pločevina ne zavira prodiranja do magnetne gostote, ki jo zahteva problem transformacijskih stroškov. Z druge strani pa vidimo, da posega sodobna transformatorska panoga skoraj izključno po boljši in najboljši pločevini.

Seveda je osnutek zadržano magnetno gostoto, ki ustreza boljši pločevini, lahko ugodnejši od neoviranega, ki predvideva navadno, cenejšo pločevino, čeprav mu je pot do idealnega izsledka zaprta. Živa transformatorska panoga ima nedvomno vendarle svoje tehtne razloge za uporabo izvrstnega železa. Težko je si predstavljati, da bi vestni in resni graditelji transformatorjev samó zato trajno hodili po slabši poti, da lahko izpolnjujejo nezadostno utemeljene želje, ki prihajajo iz električnega gospodarstva.

Po vsem tem je treba dodobra razčistiti vprašanje osnutka zadržano magnetno gostoto. Odgovor na vprašanje, kakšno pločevino naj uporabljamo, mora dati pač primerjanje osnutkov za obe vrsti pločevine. Ker pa tehnika neumorno izboljšava transformatorsko pločevino in jo seveda hkratu draži, bo najbrže iz stalnih primerjav na različnih predpostavkah zgrajenih osnutkov nazadnje le zrastlo spoznanje, da se bo treba nekje ustaviti. Morda pa smo že predaleč zašli.

44. Osnutek zadržano magnetno gostoto je hitro odpravljen. Ugotovili smo, da se najugodnejša električna gostota ne meni za zapletljaje v okviru specifičnih energijskih izgub v železu. Zato ji tudi v osnutku zadržano magnetno gostoto enačba 57) kaže pot. Iz istega razloga ostane enačba 59):

$$s_b = 2bp \frac{y'_o + 2}{5y'_o - 2}$$

nemoteno veljavna.

Če pa smo osnutku prepisali določeno magnetno gostoto B in hkratu nji ustrezajočo specifično energijsko izgubo:

$$k_z \cdot \left( \frac{B}{10^4} \right)^u,$$

moramo računati z drugo enotno transformacijsko ceno:

$$s_z = \dot{z}_p \left[ \frac{1 + \left( \frac{B}{10^4} \right)^u k_z h_z p_z}{\dot{z}_p} \right] \dots \dots \dots 81)$$

Tako dobimo iz enačbe 28):

$$\sigma = \frac{2 \cdot 1}{1 - \delta} \cdot \frac{c_b / b b}{c_z \gamma_z \check{z}} \cdot \frac{2}{1 + \frac{\left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot k_z h_z p_z}{\check{z} p}} \cdot \frac{y'_0 + 2}{5 y'_0 - 2}$$

in s pomočjo enačbe 30) nastavek:

$$\psi = \frac{2 \cdot 1}{1 - \delta} \cdot \frac{c_b / b b}{c_z \gamma_z \check{z}} = \frac{1 + \frac{\left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot k_z h_z p_z}{\check{z} p}}{2} \cdot \left(\frac{y'_0}{1 - y'_0}\right)^2 \cdot (5 y'_0 - 2), \quad \dots \dots \dots 82)$$

iz katerega je lahko izslediti najugodnejši relativni premer stebra  $y'_0$ .

Ker veljajo osnutki z zadržano magnetno gostoto pred vsem najboljši transformatorski pločevini, se izraz:

$$\frac{1 + \left(\frac{B}{10^4}\right)^u \cdot \frac{k_z h_z p_z}{\check{z} p}}{2}$$

praktično ne bo pomembno razlikoval od enote. Zató bo ostala vsa razlika med popolnoma svobodnim osnutkom in onim, ki ima zadržano magnetno gostoto, praktično zasidrana v faktorju:

$$\frac{6 - 5 y'_0}{6 - 7 y'_0},$$

ki ga vidimo v enačbi 61), ki ga pa v pravkar ugotovljeni enačbi 82) ni.

Ta faktor je večji od ene. Zato ustreza istemu relativnemu premeru stebra ( $y'_0$ ) v primeru zadržane magnetne gostote manjši  $\psi$ . Obratno zahteva isti  $\psi$  večji relativni premer stebra, če je magnetna gostota zadržana.

Železo, ki ne sme takó gostiti magnetnih smernic kakor zahteva problem transformacijskih stroškov, ker ga zadržujejo oziri na vzbujalni tok, poskuša očitvidno na drug način potegniti dovoljen del transformacijskih stroškov nase, s tem pač, da se uveljavlja z večjo težo. To je smisel ugotovitve, ki smo jo pridobili s primerjanjem osnutkov brez in z zadržano magnetno gostoto.

Ker pa rastoči relativni premeri stebrov tlačijo najugodnejšo električno gostoto, vpliva zadržavanje magnetnih gostot

posredno tudi na električni del transformacijskih stroškov. Električna gostota je pač tudi v primeru zadržane magnetne le na videz popolnoma neodvisna od tega, kar se v železu godi.

Če ima sodobna transformatorska panoga prav, da odriva slabšo in zato cenejšo pločevino, ji uhajajo idealni osnutki čez mejo magnetne gostote, ki jo straži vzbujačni tok. Ta meja ni nepremakljiva. Transformator jo itak sam neprestano premika, ko se vzpenja do višjih in višjih močnosti. Graditelji transformatorjev pa upajo, da bo železarska tehnika, ki je prinašala zlitine s postopoma manjšajočimi se specifičnimi energijskimi izgubami, naposled našla tudi pot do ugodnejših permeabilnosti v območju magnetnih gostot, ki bi jih njihovi osnutki radi dosegli. Američani so menda v zadnjem času res že našli, kar transformatorska panoga potrebuje.

Podoba je, da so graditelji transformatorjev bakru navalili, česar doslej železu niso smeli. Toda stališče, da morajo biti dinamični transformacijski stroški trikrat večji od statičnih, brez ozira na svoj notranji ustroj, ni neoporečno. Problem transformacijskih stroškov ima celo vrsto zahtev. Če eni izmed njih ne moremo ugoditi — če na pr. ne moremo uveljaviti najpriporočljivejše magnetne gostote —, se konstruktivna invarianta odmakne od svoje najnižje vrednosti. Seveda je mogoče naknadno zmanjšati ta odmik, s tem namreč, da ostalim zahtevam spretno izmikamo, kar lahko prizadeti koristi. Kdor pa preobremenjuje baker, ker ne sme dovolj obremeniti železa, večja nesorazmerje med energijskimi izgubami železa in bakra, ki ga ustvarja zadržana gostota, večja torej že odprto rano.

Zahteve problema transformacijskih stroškov so, kakor uče vse izkušnje, precej prizanesljive, dokler si dovoljujemo majhne prestopke. Zato je vedno pravilneje, porazdeliti izsiljni odmik od idealnega osnutka na same manjše odmike od posameznih idealov osnutka. Več manjših prestopkov se je mnogo manj bati kot enega samega velikega.

Vse to pojasnjuje, nekako vsaj, nesoglasje med živo transformatorsko panogo in teorijo transformacijskih stroškov, tikajoče se najugodnejše električne gostote. Pretežni del tega nesoglasja pa leži v predsodkih in v napačnem ocenjevanju energije, ki jo trosi transformator.

## VII. RESNIČNI VZGON IDEJE VELIKEGA TRANSFORMATORJA

45. Vsestransko razčiščeni problem transformacijskih stroškov nam odkriva v zgodovini transformatorske panoge številne zmote in zablode, omogoča nam pa tudi dokončno presojo ideje velikega transformatorja. V svoji prvotni obliki je bila ta ideja izredno preprosta: oklepala se je neke določene oblike transformatorskega jedra in stalnih elektromagnetnih gostot. Oblike in gostot transformatorja pa se je krčevito oklepala tudi še potem, ko smo jo poglobili. Ima li prav?

Ideja velikega transformatorja obeta, kakor smo že v I. poglavju ugotovili, velike gospodarske koristi. Gospodarska vprašanja transformacije pa so nazadnje vsa zbrana v problemu transformacijskih stroškov. Ta problem nam mora tedaj odgovoriti na vprašanje: je li mogoče obdržati isto obliko železnega jedra in iste elektromagnetne gostote skozi vso dolgo vrsto rastočih močností?

Še vsi zaposleni z izsledki teorije transformacijskih stroškov, ki smo jih zbrali v zadnjih poglavjih, bi nehote odgovorili: ne, ni mogoče; oblika, najugodnejša oblika jedra seveda, se spreminja, če raste močnosť, z njo pa tudi elektromagnetne gostote; veliki transformator hoče imeti relativno debelejše stebre.

Toda preprosta logika, ki je ne omamljajo zamotani računski iz teorije transformacijskih stroškov, odgovarja drugače. Zakaj bi veliki transformator ne smel oblikovati svojega jedra po istem načrtu kot mali in zakaj bi ne smel uporabljati njegovih elektromagnetnih gostot? V II. poglavju smo vendar ugotovili, da ideja velikega transformatorja ne pači raznih važnih obratnih lastnosti, ki jih mora transformator skrbno negovati.

In res sme veliki transformator, če hoče, slediti prvotnemu načrtu ideje, ki ga je rodila. Brez pomisleka se lahko oklepa oblike, ki obeta malemu transformatorju najnižje transformacijske stroške, hkratu pa tudi elektromagnetnih gostot, ki najbolj služijo mali močností. Toda kaj kmalu bo spoznal, da zahaja v svojevrstno izobilje: njegovo navitje bo našlo preveč razpoložljivega prostora, tem več, čim večja postane močnosť.

Polnilni faktor navitja  $c_b$  je lahko tem večji, čim večji je transformator. Pritlikavec za 10 kVA, 10.000 V in 50 Hz, ki smo ga opisovali v V. poglavju, je s svojim bakrom napolnil komaj 10 odstotkov prereza, ki mu ga je odpiralo okno v železnem jedru. Velikan za 16.000 kVA, 56.000 V in 50 Hz pa je s svojim bakrom brez navora izkoristil 50 odstotkov prostora, ki je bil odmerjen navitju.

Polnilni faktor  $c_b$  je tedaj nedvomno oni činitelj, ki posega odločilno v osnutke, ki krivi prvotno premočrtno idejo velikega transformatorja, ki spreminja železnemu jedru najugodnejšo obliko, hkratu pa tudi najugodnejše elektromagnetne gostote.

Kaj lahko pa je spoznati, da obeta višji polnilni faktor navitja dodatne koristi, koristi, ki jih prvotna ideja velikega transformatorja v svojih načrtih ne predvideva. Denimo, da bi namenoma tudi velikemu transformatorju vsilili neznamni polnilni faktor  $c_b$ , ki ga zmore mali. Nedvomno bi nas v tem primeru teorija transformacijskih stroškov prisilila, da bi velikemu jedru dali isto obliko, ki jo je imel mali, hkratu pa tudi iste elektromagnetne gostote. Toda navitje bi puščalo v odmerjenem mu prostoru velike nepotrebne praznine. Če bi tedaj v še razpoložljivi prostor namestili dodatne ovoje — saj bi prvotne lahko podvojili ali potrojili — bi dobili tako rekoč dodaten transformator, ki bi ne potreboval posebnega jedra, ker bi pač izkoriščal že prvotnim ovajem služeče. Dodatni transformator bi na ta način postal izredno skromen, njegovi transformacijski stroški bi bili nedvomno mnogo nižji od stroškov prvotnega transformatorja.

Ideja velikega transformatorja ima po vsem tem še mnogo močnejši vzgon kot ga očituje v svoji prvotni preprosti obliki. Dejstvo, da se polnilni faktor  $c_b$  navitja sam od sebe dviga, če raste močnost, prinaša zelo pomembne dodatne gospodarske koristi.

Toda zakaj pa vendarle zametavamo nespremenjeno obliko malega železnega jedra, zakaj večamo z rastočo močnostjo relativni premer stebra, če obeta rastoči polnilni faktor navitja pravkar opisane izredne dodatne gospodarske koristi? Zakaj jih ne poberemo vse sveže in neokrnjene?

Ker nam prinaša preoblikovanje železnega jedra še več. Ker bi preprosto brutalno izkoriščanje odpirajočega se dodatnega prostora z dodatnimi ovoji ustvarjalo sicer zmogljivejši transformator, toda transformator, čigar ustroj ne bi ustrezal zahtevam problema transformacijskih stroškov. Večanje relativnega premera stebra je le naknadno popravljanje, naknadno dodatno izboljšanje.

Polnilni faktor navitja pa ni samo funkcija močnosti, temveč je tudi v oblasti napetosti. Rastoča močnost dviga  $c_b$ , rastoča napetost ga pa tlačí. Navitje trosi prostor s svojimi izolacijskimi plastmi in presledki. Čim večja je napetost, tem močnejši morajo biti presledki in izolacijske plasti.

Lahko si tedaj predstavljamo veletransformatorje, ki se oklepajo neke že ustaljene najugodnejše oblike železnega jedra, ker jim polnilni faktor  $c_b$  ne raste z rastočo močnostjo, toda v takšno sliko sodijo napetosti, ki postajajo hitreje večje kot mere železnega jedra. Dodatni vzgon ideje velikega transformatorja, ki prihaja iz polnilnega faktorja  $c_b$ , služi pač lahko dviganju obratne napetosti, če ga ne izkoristimo za nižanje transformacijskih stroškov.

46. V 21. oddelku smo pribili za konstruktivno invarianto onega dela transformatorja, ki je povezan z enim stebro, oziroma z eno fazo, izraz:

$$I = 2,51 \cdot \frac{s_z}{\left(c_b \cdot \frac{B}{10^4} \cdot g\right)^{\frac{3}{4}}} \cdot \frac{1}{y'} \cdot \left[\frac{y'^2 + (1 - y')}{1 \cdot y'}\right]^{\frac{3}{4}}.$$

Smoter vsakega osnutka je najmanjša dosegljiva vrednost konstruktivne invariante, pot do nje pa vodi čez najpriporočljivejše vrednosti činiteljev  $s_z$ ,  $B$ ,  $g$ ,  $y'$  in  $\sigma$ .

Raziskavanje transformacijskih stroškov nas je privedlo do spoznanja, da ni boljše izbere od naslednje:

$$s_z = 2 \text{ žp} \frac{R - 5 y'_0}{\frac{7 y'_0}{c}} \quad (\text{enačba 60}).$$

$$\frac{B}{10^4} = \sqrt{\frac{3 \text{ žp}}{k_z h_z p_z} \cdot \frac{2 - y'_0}{6 - 7 y'_0}} \quad (\text{enačba 58}),$$

$$g = \sqrt{\frac{3 \text{ bp}}{k_z h_z p_z} \cdot \frac{2 - y'_0}{5 y'_0 - 2}} \quad (\text{enačba 57}),$$

$$y' = y'_0,$$

$$\sigma = \left(\frac{y'_0}{1 - y'_0}\right)^2 \cdot \frac{y'_0 + 2}{4} \quad (\text{enačba 30}),$$

pod pogojem, da rastejo energijske izgube v železu s kvadratom magnetne gostote in pod nadaljnim pogojem, da ustreza  $y'_0 = y'$  določilni enačbi 61):

$$\psi = \frac{8 \cdot l}{2} \cdot \frac{c_b \cdot \gamma_b \cdot c}{c_z \cdot \gamma_z \cdot \dot{z}} = \left(\frac{y'_0}{1 - y'_0}\right)^2 \cdot \frac{(5 y'_0 - 2)(6 - 5 y'_0)}{6 - 7 y'_0}.$$

To določilno enačbo pa lahko preoblikujemo. Saj je sedaj jasno, da izhaja ves vpliv izraza  $\psi$  na relativni premer stebra  $y'_o$  iz polnilnega faktorja  $c_b$ , ki je, kakor smo ugotovili, nestalen, med tem ko je faktor

$$\frac{8.1}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{\gamma_b \cdot b}{c_z \cdot \gamma_z \cdot z}$$

praktično neodvisen od močnosti in od obratne napetosti. Tako dobimo:

$$c_b = \frac{c_z \cdot \gamma_z \cdot z}{\gamma_b \cdot b} \cdot \frac{1}{8.1} \cdot \frac{1}{2 - \delta} \cdot (1 - y'_o)^2 \cdot \frac{(5 y'_o - 2)(6 - 5 y'_o)}{0 - 7 y'_o} \dots \dots \dots S5)$$

Dodatni vzgon ideje velikega transformatorja, zasidran v naraščanju polnilnega faktorja  $c_b$  z rastočo močnostjo, mora biti nedvomno viden v izrazu za najmanjšo dosegljivo vrednost konstruktivne invariante. Zato ni odveč združiti vse zgoraj navedene enačbe z eno samo, namreč v nastavek:

$$I_{\min} = \left[ \frac{1}{\frac{1}{2} - \delta} \cdot \frac{\gamma_b}{c_z \cdot \gamma_z} \cdot \frac{(bp)^{\frac{1}{2}}}{(bz)^{\frac{1}{2}}} \cdot (k_z h_z D_z \cdot k_b h_b P_b)^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{3}{4}} \times \\ \times \frac{8.45}{y'_o} \cdot \left[ \frac{(6 - 7 y'_o)(6 - 5 y'_o)^2}{(5 y'_o - 2)} \right]^{\frac{1}{8}} \dots \dots \dots S4)$$

Če upoštevamo samo spremenljivi del te enačbe, dobimo naslednjo razpredelnico:

$y'_o$	$\frac{1}{y'_o} \left[ \frac{(6 - 7 y'_o)(6 - 5 y'_o)^2}{(5 y'_o - 2)^2} \right]^{\frac{1}{8}}$
0'4	$\infty$
0'5	5'98
0'6	2'57
$\frac{2}{3}$	1'78
0'7	1'56
0'75	1'27
0'8	1'02
$\frac{6}{7}$	0 :

ki obeta hitro padanje najugodnejše konstruktivne invariante z rastočim relativnim premerom stebra  $y'_0$ .

Toda če mislimo na svoboden osnutek, torej na osnutek brez zadržanih gostot, in pričakujemo nekako pri močnósti 10 kVA in napetosti 10 kVA vrednost

$$\psi \sim 10,$$

kar bi ustrezalo izsledkom iz 27. oddelka, pri močnósti 16.000 kVA ter napetosti 56.000 V pa vrednost:

$$\psi \sim 50.$$

kar bi bilo v skladu z izsledki iz 38. oddelka, smemo praktično upoštevati samó porast relativnega premera stebra od

$$y'_0 = \frac{2}{3} \quad \text{do} \quad v'_0 = 0,8.$$

V tem okviru, ki oklepa območje od 10 kVA do najvišjih močnósti, pada najugodnejša konstruktivna invariante v razmerju 1'78 : 1'02, to se pravi za skoraj 45 odstotkov. V tem gotovo pomembnem dodatnem uspehu ideje velikega transformatorja, ki pa je ves plod z rastočo močnóstjo naraščajočega polnilnega faktorja  $c_b$ , tiči izreden dodaten vzgon, ki ga prvotna preprosta ideja velikega transformatorja ne pozna. Saj bi nji ustrezala konstruktivna invariante, ki bi ostajala neomajno na isti višini, tudi če bi se močnóst dvignila v bajne višine.

Ves ta obračun dokazuje, da smo bili v prejšnjem oddelku na pravi poti in da je vpliv polnilnega faktorja  $c_b$  res takšen, kakršnega smo si tam predstavljali. Obračun pa dokazuje tudi, da je treba poseči po vseh uspehih, ki se obetajo naraščajočemu polnilnemu faktorju navitja. Preizdatni so, da bi jih smeli zametavati. Zató jim moramo žrtvovati preproste predpostavke prvotne ideje velikega transformatorja. Stalna oblika železnega jedra je iz gospodarskih ozirov nevzdržna. Prav tako pa so nevzdržne v vsem razsežnem območju možnih močnósti stalne elektromagnetne gostote.

Res je, da raste relativni premer stebra le počasi, če se dvigamo iz območja majnih močnósti v območje veletransformatorjev. Praktik sme misliti na stalne oblike železnih jader v ožjih območjih močnósti in, v zvezi s tem, na naraščanje relativnega premera stebra v skokih. Zató sme tudi misliti na stalne elektromagnetne gostote v istih območjih močnósti. Vse to pa ne more zabrisati velike razvojne črte, kateri sledi transformator ob rastoči močnósti, črte, vzdolž katere se spreminjajo elektromagnetne gostote in oblika železnega jedra.

47. Enačba 84), ki določa najmanjšo dosegljivo konstruktivno invarianto, odpira mimogredé pot do rešitve onega važnega vprašanja transformatorske panoge, ki smo nanj že večkrat naleteli v teh vrsticah, ne da bi mu bili doslej mogli dati jasen odgovor. Kakšno pločevino naj uporablja transformatorska panoga: drago, z nizkimi, ali ceneno, z višjimi specifičnimi energijskimi izgubami?

V enačbi 84) vidimo faktor:

$$\left(\frac{k_z^{\frac{1}{2}}}{z^{\frac{1}{6}}}\right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{k_z^3}{z}\right)^{\frac{1}{6}},$$

kateremu je konstruktivna invarianta proporcionalna. Toda enačba 6f) nam pripoveduje, da ima  $z$  svoj vpliv na relativni premer stebra. Vprašanje, ki nas zanima, je tedaj vendarle bolj zamotano kot se zdi.

Denimo, da bi bilo, kakor smo že v 54. oddelku poskusili trditi:

$$k_z \cdot z = \text{konst.}$$

V tem primeru bi bila konstruktivna invarianta proporcionalna kvadratnemu korenu iz  $k_z$ . Prehod iz območja močno legirane v območje navadne legirane pločevine bi tedaj pomenil povečanje konstruktivne invariante za nekako 25 do 50 odstotkov.

Tega povečanja transformacijskih stroškov bi ustrezno povečanje relativnega premera stebra prav gotovo ne spravilo iz sveta. Zató ima transformatorska panoga po vsem videzu prav, da uporablja boljše in boljše pločevino, dokler ji cena ne raste hitreje kot padajo specifične energijske izgube v nji.

S tem pa problema vendarle še nismo odpravili. Rešitev, ki smo jo našli, je sicer jasna, predpostavlja pa svobodne osnutke. Čim boljša pa je pločevina, tem teže je z njo doseči najugodnejšo magnetno gostoto, ker jo vse bolj zadržuje vzbujalni tok. Če pa dovoljuje uporaba slabše pločevine uveljavljenje najugodnejše magnetne gostote, med tem ko izsiljuje boljše pločevino osnutke z zadržano gostoto, izgubi boljše pločevina prav lahko vso prednost, ki jo po zgornjem računu teoretično nesporno ima.

Osnutki z zadržano magnetno gostoto so pohabljeni osnutki. Zadržavanje magnetne gostote pomeni prestopok, ki ga zagrešimo pod pritiskom zunanjih vplivov. Idealni osnutek ima celo vrsto zahtev. Osnutek z zadržano magnetno gostoto porazdeljuje kvarne posledice izsiljenega prestopka na vse zahteve idealnega osnutka, ker je vedno bolje zagrešiti več manjših kot en sam velik prestopok.

Iz vsega tega sledi, da bi bilo nápak, znižati v idealnem osnutku magnetno gostoto na še dopustno višino in primerjati prvotno konstruktivno invarianto s takó popravljeno. Pravilno je le primerjati idealni osnutek z onim, ki smotrno zadržuje magnetno gostoto. Le na ta način je mogoče neoporečno dognati, koliko škoduje boljši pločevini izsiljeno zadržavanje magnetnih gostot.

Zamudno primerjanje osnutkov, ki izhajajo iz različnih predpostavk, pa je vendarle nepotrebno, dokler je treba samo soditi, katera pločevina je priporočljivejša. Prav lahko je namreč dokazati, da preprosto znižanje magnetne gostote v sodobnem idealnem osnutku na dopustno višino ne kvari konstruktivne invariante takó občutno, da bi zgoraj ocenjena prednost boljše pločevine mogla izginiti. Tem manj pa pomeni potem zadržana magnetna gostota v prilagodnem ji osnutku, ki skrbno blaži posledice oddaljevanja od idealne gostote in jih izdatno manjša.

Idealni osnutek razkosava, kakor smo videli v 23. oddelku, transformacijske stroške na tri različne dele: 25 odstotkov vseh stroškov naj služi odpisom in obrestim, 37,5 odstotkov vrednosti energijskih izgub v bakru, ostalih 37,5 odstotkov pa vrednosti energijskih izgub v železu. Ta razdelitev ustreza sicer samo starejšemu zakonu o energijskih izgubah v železu, je pa svrham problema, ki ga tu obravnavamo, zadovoljivo računsko izhodišče. Stisnjena v obliko preproste enačbe pomeni:

$$S = 25 + 37,5 + 37,5 = 100 \text{ odstotkov.}$$

Tem stroškom ustrezajoča konstruktivna invarianta bodi  $I_{\min}$ . Zanima nas pa vprašanje, kolikšna postane konstruktivna invarianta, če znižamo v idealnem osnutku magnetno gostoto, recimo v razmerju 1,5 : 1.

Odgovor je lahek. Magnetna gostota vpliva samó na oni del transformacijskih stroškov, ki je v idealnem osnutku odmerjen energijskim izgubam v železu. Toda močnosť raste in pada proporcionalno z magnetno gostoto. Torej bo nova konstruktivna invarianta.

$$I = I_{\min} \cdot \frac{25 + 37,5 + 37,5 \times \frac{1}{1,5^2}}{100 \times \left(\frac{1}{1,5^2}\right)^2} = 1,072 I_{\min}$$

Neomiljene posledice nižanja magnetne gostote v razmerju 3 : 2 so prav za prav presenetljivo skromne: dobrih 7 odstotkov idealne konstruktivne invariante prinašajo kot dodatno gospo-

darsko breme. Omiljene bodo seveda še skromnejše. Pravilni osnutek z zadržano magnetno gostoto jih bo gotovo potisnil na 5 odstotkov. Pa če bi jih tudi ne, obeta boljša pločevina, kakor smo zgoraj videli, večkrat večjo korist, če je ne zavira potrebni večji relativni premer stebra. Ta pa tudi ne more tako skvariti slike, da bi izginil ves ostanek od 25 do 50 manj 5 do 7 odstotkov idealne konstruktivne invariante.

Po vsem tem je gotovo, da uporablja transformatorska panoga z vso pravico boljšo pločevino in gotovo je tudi, da bo smela posegati po še boljšem železu, dokler mu ne bo cena hitreje rastla kot mu padajo specifične energijske izgube. Prav gotovo pa naj uporablja veliki transformator boljšo pločevino. Čim večji je, tem manj nepravilnosti mu namreč more prinašati vzbujalni tok, tem manj mu je treba zadržavati magnetno gostoto.

Te ugotovitve predpostavljajo, kakor smo že omenili, naraščanje energijskih izgub v železu s kvadratom gostote. Toda hitrejša naraščanja izgub bi samo večalo prednost boljše pločevine. Čim hitreje padajo izgube v železu, tem počasneje raste konstruktivna invarianta ob nižajoči se magnetni gostoti. Razen tega smo v 45. oddelku videli, da prodre dopustna magnetna gostota bliže idealni, če postane eksponent  $u$  v zakonu o specifičnih izgubah v železu večji od 2.

48. Osrednji činitelj vseh pravilnih transformatorskih osnutkov je polnilni faktor navitja  $c_b$ : to je zadnja, zaključna ugotovitev naše teorije transformacijskih stroškov. Neizkušeni graditelj transformatorjev si domišlja, da gradi za neko določeno močnost, izkušenejši vidi, da mu energijske izgube v železu in bakru delajo največ preglavic in je zato prepričan, da gradi za v transformatorju potrošeno močnost, ne pa za transformirano. Le, kdor pogleda v vse globine transformatorskih osnutkov, sprevidi, da gradimo za določene polnilne faktorje navitja.

V vseh svojih vejah, v primeru predpisanih elektromagnetnih gostot, v primeru svobodnih gostot, ki vodijo do idealnih osnutkov, pa tudi v primeru zadržane magnetne gostote, prihaja teorija transformacijskih stroškov do izraza:

$$\frac{1}{2 - \gamma} \cdot \frac{\gamma_b \cdot \dot{b}}{c_z \cdot \gamma_z \cdot \dot{z}} \cdot c_b,$$

ki določa stebri relativni premer, posredno pa relativno dolžino stebra in hkratu obliko železnega jedra.

V tem izrazu nima močnosť nobene besede, pa tudi ne energijske izgube v železu in bakru. V njem je  $c_b$  edina nestalna veličina. Vse druge smemo praktično združiti v eno samo konstruktivno konstanto. Torej ne vodijo osnutkov, kakor se je zdelo, izrazi  $\sigma$  ali  $\psi$ , vodi jih vseskozi samó  $c_b$ .

Težko je odrekati faktorju:

$$\frac{1}{\frac{1}{2} - \delta}$$

praktično stalnosti, dokler velja načelo, da naj raste visoka napetost v transformatorju s četrtrim korenóm iz močností, torej takó kakor  $l$  ali  $\delta$ . Saj morajo biti izolacijski presledki, ki se skrivajo za  $\delta$ , proporcionalni obratni napetosti.

Nemogoče je odrekati stalnost specifičnima težama  $\gamma_z$  in  $\gamma_b$  železa in bakra. Da je polnilni faktor  $c_z$  praktično stalen, je znana stvar. Mogoče pa bi bilo dvomiti o stalnosti enotnih gradbenih cen  $z$  in  $b$  železnega jedra in navitja.

V teh enotnih gradbenih cenah tiče cene gradiv, mezde in z njimi povezani stroški za gradbeno delo. Z manjšim transformatorjem je združeno relativno obsežnejše gradbeno delo, kakor nosi vsaka tehnična tvorba relativno tem več dela, čim manjša je. Toda manjši transformator ima manjše navitje in manjše jedro. Njegova  $z$  in  $b$  sta večja od onih, ki jih postavlja veliki transformator, toda oba hkratu.

V zgoraj navedenem odločilnem izrazu teorije transformacijskih stroškov ne igrata  $z$  in  $b$  ločenih vlog: samó njuno razmerje  $b : z$  posega v osnutke. Razmerju enotnih gradbenih cen pa praktično pač lahko pripisujemo stalnost, vsaj, če se izogibamo izredno majhnim močnostim, ki pa zahtevajo itak izredne konstruktivne ukrepe.

Po vsem tem določa res polnilni faktor  $c_b$  obliko železnega jedra in elektromagnetni gostoti. Če bi otrpnil, torej postal stalen, bi okamenela oblika transformatorja ne glede na vsakokratno močnosť, z njo pa tudi električna in magnetna gostota. Vsa transformatorska panoga bi potem potrebovala en sam osnutek. Spreminjala bi samó merilo v sliki železnega jedra.

Toda polnilni faktor  $c_b$  ni sam svoj gospodar. Navitje trosi za izolacijske snovi tem več razpoložljivega prostora, čim večjo obratno napetost mu vsiljujemo. Navitje potrebuje hladilne kanale, katerih prostornina se prilagodeva načinu hlajenja: suhi transformatorji potrebujejo izdatnejše kanale kot transformatorji v olju, veliki transformatorji z umetnim hlajenjem,

torej s pospešenim kroženjem hladečega olja, smejo ožiti hladilne kanale. Polnilni faktor  $c_b$  je le v tem pravcu samostojen, da raste z rastočo močnostíjo.

Zakaj moramo predpostavljati, da gre večji močností večji polnilni faktor  $c_b$ ? Samó zato, ker so izolacijski plašči vseh transformatorskih ovojev enako debeli. Prerez izolacijskega plašča je zato proporcionalen obsegu bakrenega prereza vodnika, raste torej s prvo potenco vseh mer, med tem ko raste prerez vodnika z drugo. Ker pa predpisuje ideja velikega transformatorja naraščanje obratne napetosti s četrtrim korenom iz močností, mora število ovojev s tem korenom padati. To pomeni porast bakrenega prereza ovoja s tretjo potenco vseh mer in prereza izolacijskega plašča s poldrugo potenco. V celoti pa raste  $c_b$  seveda takó, da se asimptotično približuje neki najvišji vrednosti.

Ko je transformator pred desetletji lezel iz zraka v olje, je opravičeval dodatne gradbene izdatke za olje in kotel s prihranki bakra in železa. Takrat mu je transformatorska panoga verjela, ker v svojih osnutkih še ni upoštevala energijskih izgub transformacije. Opravičevanje je bilo seveda jalovo.

Pač pa bi bil transformator na prehodu iz zraka v olje smel opozarjati na obetajoči se večji polnilni faktor  $c_b$  in na s tem večanjem vezano manjšanje konstruktivne invariante. Na ta način bi bil lahko res opravičil vsaj del dodatnih gradbenih izdatkov za olje in kotel.

Suhi transformatorji razčlenjujejo svoja navitja v tuljavnice, ki potrebujejo izdatne izolacijske plašče. Teh plaščev transformator v olju ne potrebuje več. Olje mu daje samo dovolj zanesljive izolacijske plašče. V olju postane torej polnilni faktor  $c_b$  res večji, hkratu pa odpadejo neposredno izdatki za plašče tuljavic.

Toda v olju transformator tudi ne potrebuje več tako izdatnih hladilnih kanalov kot jih je moral imeti v zraku. Potrebno razmerje je nekako 75:3. Ustrezajoči prihranjeni prostor zasede seveda baker, in polnilni faktor  $c_b$  se izdatno poveča.

Prehod iz zraka v olje pomeni vsekakor skok, ki se neizbežno očituje v obliki železnega jedra, pa tudi v elektromagnetnih gostotah. Suhi transformatorji so nekakšna posebna pasma. Zató je nedopustno, sklepati iz razmer majnega suhega na razmere velikega transformatorja, ki živi ne samo v olju, temveč navadno še celó v območju umetno pospešenega hlajenja.

49. Kolikšni so prav za prav letni transformacijski stroški velikega transformatorja? Ves čas se v tej razpravi sučemo okoli relativnih transformacijskih stroškov. Dognali smo pogoje, pod katerimi postanejo tako majhni kot le mogoče, toda absolutne vrednosti jim še nismo ugotovili. Kolikšna je? Kolikšna je vsaj približno?

Odgovor nam ponuja enačba 84). Poslužimo se je! Vstavimo:

$$\frac{1}{\frac{1}{2} - \delta} = 24,$$

$$b_p = 5 \times 0.1 = 0.5 \text{ zl. kron}$$

in, ker mislimo na močno legirano pločevino,

$$z_p = 1.875 \times 0.1 = 0.1875 \text{ zl. kron};$$

nadalje:

$$k_z h_z p_z = 1.3 \times 10^{-3} \times 80 = 0.104 \text{ zl. kron},$$

$$k_b h_b p_b = 2.5 \times 10^{-3} \times 60 = 0.15 \text{ zl. kron}$$

ter seveda:

$$c_z = 0.8.$$

$$\gamma_b = 8.9,$$

$$\gamma_z = 7.4.$$

Dobimo:

$$I_{\min} \doteq 4.4 \cdot \frac{1}{y'_0} \left[ \frac{(6 - 7y'_0)(6 - 5y'_0)^2}{(5y'_0 - 2)^3} \right]^{\frac{1}{8}}.$$

Ta izsledek velja, če obračunavamo močnosti v kilovolt-amperjih, razen tega pa meri na en sam steber, oziroma na eno fazo trofaznega transformatorja. Če pa hočemo govoriti o stroških vsega trofaznega transformatorja, moramo računati s  $\sqrt[4]{3}$ -krat večjo konstruktivno invarianto:

$$I_{\min}^{(3)} \doteq 5.61 \cdot \frac{1}{y'_0} \left[ \frac{(6 - 7y'_0)(6 - 5y'_0)^2}{(5y'_0 - 2)^3} \right]^{\frac{1}{8}},$$

oziroma z naslednjo razpredelnico:

$y'_0$	$I_{\min}^{(3)}$
0.4	$\infty$
0.5	25.1
0.6	15.7
$\frac{2}{3}$	10.55
0.7	9.07
0.75	7.58
0.8	5.95
$\frac{6}{7}$	0

Praktično se relativni premer stebra premika med  $\frac{2}{3}$  in 0'8,  $I_{\min}^{(5)}$  torej nekako med 10 in 6, dokler so idealni osnutki uresničljivi. Tem mejam ustreza nekako na eni strani  $c_b \doteq 0'1$ , na drugi pa  $c_b \doteq 0'5$ . Neizbežno zadržavanje elektromagnetnih gostot kvari, kakor smo videli, konstruktivne invariante le za nekaj odstotkov.

Problem transformacijskih stroškov raziskuje možna spreminjanja konstruktivne invariante, zato zanemarja stroške, ki jih povzročajo olje, kotel in oprema transformatorja. Ti stroški so pač praktično neodvisni od oblike železnega jedra in elektromagnetnih gostot. Kakor hitro pa začnemo razpravljati o absolutni višini letnih transformacijskih stroškov, moramo misliti tudi na doslej neupoštevana bremena transformacije.

Veletransformatorski letni transformacijski stroški ne presegajo zneska, ki ga lahko določimo iz previdno postaljenega nastavka:

$$I^{(5)} = 10.$$

Kaj pomeni ta nastavek? Iz:

$$I^{(5)} = \frac{S}{N_{kVA}^{\frac{3}{2}}} = 10$$

dobimo:

$$S = 10 N_{kVA}^{\frac{3}{2}},$$

oziroma:

$$\frac{S}{N_{kVA}} = \frac{10}{\sqrt[4]{N_{kVA}}} \dots \dots \dots 85)$$

Letni transformacijski stroški trofaznega veletransformatorja za 10.000 kVA, 50 Hz bi potemtakem znašali nekako:

$$\frac{S}{N_{kVA}} = \frac{10}{\sqrt[4]{10000}} = 1 \text{ zl. krono/kVA,}$$

oziroma:

$$1 \times 10.000 = 10.000 \text{ zl. kron.}$$

Ce ocenjujemo letni kilovat z 80 zl. kronami in pripisujemo obratu  $\cos\varphi = 0'8$ , vidimo, da veletransformatorska transformacija uniči:

$$100 \times 1 \times \left(\frac{1}{0'8}\right)^{\frac{3}{2}} \times \frac{1}{80} \doteq 1'5 \text{ odstotka}$$

vrednosti transformirane močnosti.

V enačbi 85) se vnovič očituje ideja velikega transformatorja, ki obeta manjšanje stroškov s četrim korenem iz močnosti. Dodatnega vzgona te ideje, katerega ji daje z močnóstjo rastoči polnilni faktor navitja, pa enačba 85) seveda ne more izraziti, ker smo ga zadušili s previdno ocenitvijo praktično dosegljive konstruktivne invariante  $I^{(3)}$ . Po vsem tem obeta enačba 85) opazovalcu, ki se zanima za stroške veletransformatorskega obratovanja, sicer zanesljivo, toda le okorno oporo.

## VIII. POTUJOČI VELETRANSFORMATOR

50. Spoznanje, da ne gradimo transformatorjev ne za določene močnosti ne za predpisane energijske izgube — o transformatorju samem govorimo, ne pa o njegovi hladilni napravi —, temveč samo za vsakokrat dosegljivi polnilni faktor navitja  $c_b$ , spoznanje, ki ga nam vsiljujejo jasni in neoporečni izsledki teorije transformacijskih stroškov, zahteva s povdarkom, da kritično revidiramo na videz tako jasen, ter izredno udomačen pojem transformatorske močnosti.

Praktik seveda te zahteve ne bo takoj razumel, vsaj spočetka se mu bo zdela skoraj smešna: vsak transformator ima vendar svojo tablico, ki ga spremlja skozi življenje, tablico, na kateri je točno napisana močnost, tablico, ki ne dovoljuje nobenega ugovora. Čemu torej dolgovезne razprave?

Omenimo pred vsem le mimogredé, da govori tablica o navidezni močnosti, o voltamperjih, oziroma o kilovoltamperjih, ne pa o kilovatih. To opozorilo je kajpak nepotrebno. Toda vkljub svoji nepotrebniosti ima svoj pomen: tablica govori o kilovoltamperjih, ker hoče povedati, da transformator prenese toliko voltov in toliko amperjev. Saj navidezna močnost ni njen edini podatek, tudi volte in amperje nam navaja z isto skrbnostjo. Tablica predpisuje po vsem tem nedvomno napetostim in tokom skrajne meje, tiste meje namreč, ki jih zahteva v prvi vrsti hladilna naprava, in njena navidezna močnost je le nek malo pomemben zmožek zelo važnih voltov in amperjev. Tablica je tako rekoč zastopnica hladilne naprave, olja in kotla. Izkušeni graditelj bi tudi res transformatorju samemu ne hotel vsiljevati predpisov in jih vklesavati v tablico iz medi. Da je tablica zunaj, na kotlu, vidna, da bi pa bila, pribita na transformator, ki se skriva v olju, praktično neuporabna, je važen razlog za zmotno domnevo, da govori iz nje transformator.

Rekli smo, da ne gradimo transformatorjev ne za določene močnosti ne za določene energijske izgube, to se pravi, za določene hladilne naprave. V prejšnjem poglavju pa smo ugotovili, da je polnilni faktor navitja  $c_b$  funkcija močnosti — navidezne seveda — ter obratne napetosti. Če gradimo zanj, gradimo torej vendarle tudi za močnost?

Dokler je močnost transformatorja nerazčiščen poj. je na videz nemogoče odgovoriti na pravkar stavljeno vprašanje. Toda videz vara. Polnilni faktor  $c_b$  raste zelo počasi z močnostjo, s tisto močnostjo namreč, ki jo vklesavamo v tablice in je v širokih območjih močnosti praktično stalen. Dovolj je tedaj, da približno vemo, v katero območje transformatorske vrste stremi osnutek, z drugimi besedami povedano, osnutek je nekako zadovoljen z nerazčiščenim pojmom močnosti.

Toda osnutek ugotovi s pomočjo polnilnega faktorja  $c_b$  samo obliko železnega jedra in hkratu obliko vsega transformatorja. To nam potrjujejo izsledki vseh poglavij te študije, ki obravnavajo teorijo transformacijskih stroškov. V trenutku pa, ko načenja osnutek tudi vprašanje elektromagnetnih gostot, stopi polnilni faktor  $c_b$  v ozadje, in cene letnih kilovatov, ki naj krijejo energijske izgube v železu in bakru, prevzamejo besedo. Te cene si nesporno laste pravico, da določijo transformatorju, čigar oblika je že ugotovljena, *g o s p o d a r s k o m o č n o s t*, gospodarsko navidezno močnost seveda.

Teorija transformacijskih stroškov je bila, kakor smo ugotovili, dolgo brez prave moči, ker ji električno gospodarstvo ni moglo predpisovati stalnih cen letnih kilovatov. Toda pozorni raziskovalec bo našel tudi danes, ko že imamo velika električna gospodarstva in v njih dokaj ustaljene cene letnih kilovatov, v teoriji transformacijskih stroškov točko, ki ga bo vznemirjala: letne obratne ure, ki ustrezajo Jouleovi toploti transformacijskih navitij, so zelo muhaste. Osnutki se pač lahko oklepajo nekih povprečnih letnih obratnih ur, toda priznati morajo, da ugibajo.

Kaj pa nam koristi osnutek, ki skrbno izpolnjuje vse zahteve teorije transformacijskih stroškov, če ta teorija ne ve zanesljivo, kaj naj zahteva? Kateri graditelj more vedeti, v kakšne obratne razmere bo njegov transformator zašel?

Praktik pozna vse te težave in ostane zato skeptičen, če mu govorimo o idealnih osnutkih, o najugodnejši obliki železnega jedra in o najpriporočljivejših elektromagnetnih gostotah. Nabavna cena transformatorja mu je edina otipljiva opora v obilici vprašanj, ki se mu zde nerešljiva.

Toda transformacija je prevažen del električnega gospodarstva, da bi smeli položiti orožje pred njo. Najmanjši dosegljivi transformacijski stroški morajo ostati smoter vseh osnutkov, in če je res, da se nam ta smoter izmika v meglo nestanovitnih obratnih prilik, ga moramo potegniti iz nje.

Ta naloga je rešljiva. Pot do njene rešitve pa vodi čez razčiščenje pojma transformatorske navidezne močnosti. Praktik zato ne more zaupati teoriji transformacijskih stroškov,

ker ga motijo predsodki, ker slepo veruje tablici na kotlu transformatorja, da je njena navidezna močnost hkratu tudi resnična, ker ravno še dopustna, zmožljivost, torej konica obratnega diagrama, iz katerega bi moral idealni osnutek prav za prav izvleči resnično število letnih obratnih ur Jouleove toplote v navitju.

51. Zadeva je prav za prav presenetljivo preprosta. Na tablici transformatorja določena močnost pomeni tisto najvišjo jakost bremenskega toka, ki jo hladilna naprava ravno še prenese, ne pomeni pa one druge najvišje jakosti bremenskega toka, ki bi z ustrežajočim obratnim diagramom ravno dosegla najugodnejše letne energijske izgube v bakru. Tablica svari pred pretiranimi bremenji, ki bi transformatorju po nepotrebnem krajšala življenje. Naloga obratnega inženjerja pa je, najti prikladno najvišjo močnost — pod ono seveda, ki jo navaja tablica —, ki se zadovoljivo približuje najnižjim transformacijskim stroškom. Dolžnost graditelja transformatorjev končno je, graditi takó, da je mogoče najti gospodarsko močnost nekje pod dopustno.

Transformator torej sploh „nima“ določene navidezne močnosti, ko zapušča tovarno, ki ga je zgradila, ima pa hladilno napravo, ki omejuje obremenjevanje. Vsak napetostni transformator je zgrajen za določeno obratno napetost in se je skrbno oklepa, ko stopa v delovno življenje. Magnetna gostota stoji v vsakem osnutku na trdnih tleh — tudi za skeptičnega praktika. Teorija transformacijskih stroškov ne dopušča nobenega dvoma, da je takó. Saj v nji število obratnih ur, ki ustrezajo energijskim izgubam v železu, ni dvomljivo ali pa nezanesljivo. Tablica na kotlu transformatorja svari očitvidno res samó pred prejakimi bremenskimi toki, ne pa pred prevelikimi močnostmi.

Transformator, ki si še ni izbral svojega mesta v električnem gospodarstvu, ne ve, katera električna gostota je najpriporočljivejša. Tista, ki jo predvideva osnutek, je le začasna, je samó verjetno nekako najpriporočljivejša. Tista, ki ustreza predpisom na tablici, mora biti znatno višja od začasne v idealnem osnutku. Od tod torej presenetljivo nizke „najpriporočljivejše“ električne gostote v naši teoriji transformacijskih stroškov!

Vse, kar je za obračun letnih transformacijskih stroškov važno, sme in mora graditelj vtisniti svojemu transformatorju takó, da mu praktični obrat ne more do živenga, z edino izjemo električne gostote. Gradbeni stroški transformatorja morajo biti že v osnutku v takšnem razmerju do energijskih izgub v

železu, da stanejo te energijske izgube v živem obratu letno 1'5-krat toliko kot obresti in odpisi gradbenih stroškov. Osnovna zahteva teorije idealnega osnutka je: obresti in odpisi naj zasedejo eno četrtrino, energijske izgube v železu tri osmine, energijske izgube v bakru pa ostale tri osmine celokupnih transformacijskih stroškov. Graditelj izpolni in pribije prva dva dela te zahteve, zadnjo mora izpolniti obratovatelj sam: graditelj mu lahko samo utira pot.

To pomeni nedvomno, da mora obratovatelj resnično sodelovati, ne pa samó brezskrbno upoštevati svarilo transformatorske tablice. Obratovatelj mora biti krmar, ki usmerja transformacijsko delo. On edini ve, ali pa vsaj lahko dožene, s kakšno najvišjo močnostjo doseže transformator energijske izgube v bakru, katerih vrednost ustreza trem osminam vseh transformacijskih stroškov.

Če vnovič pregledamo oni del teorije idealnega osnutka, ki obravnava energijske izgube v bakru, spoznamo, da so ji letne obratne ure Jouleove toplote navitja le dokaj okoren pripomoček v stiski, iz katere osnutek nima zanesljivega izhoda. V resnici namreč to število letnih obratnih ur nikakor ni važno. Važna je samó zahteva, da naj zasedejo stroški letnih energijskih izgub v bakru tri osmine vseh letnih transformacijskih stroškov.

Ta zahteva je, kakor smo videli, izredno samostojna. Neodvisna je ne samó od vseh ostalih zahtev idealnega osnutka, temveč celó od osnovnih lastnosti osnutka samega: osnutki z zadržano magnetno gostoto jo uporabljajo neizpremenjeno. Celó spremembe zakona o naraščanju specifičnih energijskih izgub v železu z magnetno gostoto, ki spreminjajo velikost deleža, katerega prevzemajo v transformaciji energijske izgube železnega jedra, se ne dotikajo deleža energijskih izgub v bakru.

Izgovor, da je z dviganjem ali pa nižanjem najvišje letne močnosti nemogoče doseči one obratne ure Jouleove toplote v navitju, ki jih predvideva idealni osnutek in da je zató sodelovanje obratovatelja obsojeno na neuspeh, je po vsem tem jalov. Idealni osnutek govori o obratnih urah in o neki močnosti, ker ne more drugače, misli pa samó na one tri osmine transformacijskih stroškov, ki jih ustrezajoča močnost odmerja energijskim izgubam v bakru. Ta močnost, ta gospodarska navidezna močnost, je živa, kakor je obrat živ. V tablico iz medi jo zaman poskušáš vklesati.

Obratovatelj pa ima tehten ugovor proti uveljavljenju pravkar opisane gospodarske močnosti, če hoče, namreč dejstvo, da bremen transformatorjev praktično ne moremo re-

gulirati. Transformator dobiva svoja bremena iz omrežja, kateremu služi, omrežje pa počenja, kar hoče — do neke predpisane meje seveda.

Torej je vse razpravljanje o najugodnejših električnih gostotah in o gospodarski močnosti vendarle neplodno? Torej ima skeptični praktik prav, da se malo meni za teorijo idealnega osnutka, pač pa mnogo za nabavno ceno transformatorja?

Če mu je teorija transformacijskih stroškov še takó malo važna, gospodarska previdnost mu vendarle narekuje nabave prevelikih transformatorjev. Tiste močnósti, ki je vklesana v tablico na kotlu, transformator včasih sploh ne doseže, včasih le po dolgih obratnih letih, včasih pa šele prav proti koncu svojega življenja. Na razmeroma dolgi poti od začetnega nizkega bremena do zaključnega, ravno še dopustnega, pa naj transformator nekje križa svojo gospodarsko močnóst. Če služi treznemu gospodarju, ki ni ne pretirano previden, pa tudi ne lahkomišelnó drzen, živi transformator povprečno vendarle nekako s svojo gospodarsko močnóstjo, ki pa je tudi v tem primeru očitvidno dokaj nižja od zmogljivosti. Vnovič vidimo, da je v redu, da najpriporočljivejše gostote idealnih osnutkov znatno zaostajajo za dopustnimi, tistimi torej, ki ustrezajo dopustni, v tablico vklesani navidezni močnósti.

Vidimo pa tudi, da bi teorija transformacijskih stroškov prav za prav morala govoriti o življenjskih obratnih urah Jouleove toplote v navitju, ne pa o letnih. Seveda bi našla, da bi življenjske obratne ure, enakomerno porazdeljene na življenjska leta transformatorja, znatno zaostajale za onimi obratnimi urami, ki ustrezajo po cenitvah 31. oddelka navidezni zmogljivosti. Zató bi pa tudi nujno zahtevala višje električne gostote.

Vse to pa ne pomiri vestnega raziskovalca transformacijskega problema, katerega vznemirja ugotovitev, da ni mogoče regulirati transformacijskih bremen, z vso pravico. Je li res nemogoče? Morda pa le nekaj prenagljeno ugotavljamo, namesto da bi se zavedali važnega problema?

52. Če prepustimo transformacijo močnósti, ki jo potrebuje neko omrežje, enemu samemu transformatorju, je res odveč misliti na reguliranje njegovega bremena. Zahtevati od omrežja, da naj se prilagodi transformacijskim stroškom, je nemogoče, skoraj smešno. Toda, če razkosamo vse iz omrežja prihajajoče breme na več — enakih ali pa neenakih — delov in postavimo za vsak del poseben transformator, je regulacija vendarle mogoča: koliko transformatorjev je vsakokrat v obratu, je odvisno edino od obratovatelja. Če je transforma-

cija dovolj razkosana in obratovatelj spreten, postane problem gospodarske močnosti nenadoma lepo rešljiv.

Kdo pa bi hotel biti takó nespameten, da bi reguliranju transformatorskih bremen žrtvoval idejo velikega transformatorja, kdo bi neznatnim koristim, ki jih obeta stalna ali skoraj stalna gospodarska močnost, na ljubo razkosaval kilovoltamperje, ki jih je združene mogoče tako ugodno transformirati?

Preprost račun nas res kaj kmalu prepriča, da sta ideji reguliranja transformatorskih bremen in večanja transformatorskih močnosti zelo neenaki nasprotnici. V dve enaki polovici razrezana močnost podraži vso transformacijo:

$$2 \times \frac{1}{2^2} \doteq 1.19 \text{ krat,}$$

če jo pa porazdelimo na tri transformatorje:

$$3 \times \frac{1}{3^2} \doteq 1.315 \text{ krat.}$$

Najmanjša možna podražitev znaša tedaj 19 odstotkov, če upoštevamo samó razkosavanje močnosti na enake dele.

Z druge strani pa vidimo v idealnem primeru znani sestav transformacijskih stroškov:

$$S = 25 + 37.5 + 37.5 = 100 \text{ odstotkov}$$

in vemo, da se spreminja Jouleova toplota v navitju s kvadratom vsakokratne močnosti. Idealna konstruktivna invarianta  $I_{\min}$  se poveča v invarianto  $I_x$ :

$$I_x = \frac{25 + 37.5 + 37.5 x^2}{100 \cdot x^2} \cdot I_{\min}$$

če postane transformacijsko breme  $x$ -krat večje kot v idealnem primeru. Toda, na pr.  $x = 1.5$  pomeni:

$$I_x = \frac{25 + 37.5 + 84.5}{100 \cdot 1.365} \cdot I_{\min} = 1.083 I_{\min}$$

$x = 0.75$  pa:

$$I_x = \frac{25 + 37.5 + 21.1}{100 \cdot 0.805} \cdot I_{\min} = 1.038 I_{\min}$$

Če torej zgradimo transformator tako, da doseže  $I_{\min}$  ob dveh tretjinah zmogljivosti, ki jo dovoljuje tablica, bo do kraja obremenjen za 8.3, polovično obremenjen pa za 3.8 odstotkov slabše transformiral kot v idealnem primeru. Kdo bi poskušal „izboljšavati“ to obratno sliko z razkosavanjem močnosti?

Račun, ki smo ga pravkar provedli, pa nam odpira pot do zelo zadovoljive rešitve problema, ki ga regulacija močnosti očitvidno ne more rešiti: položimo gospodarsko močnost, ki obeta najmanjšo konstruktivno invarianto, nekako v središče tistega bremenskega območja, ki ga bo transformator predvidoma potreboval. To območje bo imelo seveda zmožljivost vselej na svoji zgornji meji. Čim razsežnejše bo hotelo postati, tem globlje bo morala idealnemu osnutku ustrezajoča močnost ostajati pod zmožljivostjo, tem manjša bo najpriporočljivejša električna gostota v primeri z dopustno.

V mladi transformacijski panogi je igral tako imenovani učinek (gospodarski faktor) veliko vlogo. Kasneje so praktiki uvideli, da je zmožljivosti ustrezajoči učinek samó nepomembna „paradna številka“. Pač pa jih je začelo zanimati vprašanje, kako se učinek spreminja, če se resnična obratna močnost premika. Videli so pač, da obratuje transformator pod različnimi bremenimi, pod polnim pa le v izjemnih primerih.

V zreli transformatorski panogi so začeli vestni graditelji oblikovati krivulje učinkov, v želji seveda, da naj ostane učinek v zadostno razsežnem bremenskem območju na prilično isti višini. Zató so potiskali najvišji dosegljivi učinek nekako v središče bremenskega območja, ki se jim je zdelo važno.

Konstruktivna invarianta je tudi nekakšen učinek. Toda, med tem ko računa stari učinek povsem stvarno z nesprenemljivim transformatorjem, govori konstruktivna invarianta o prilagodevanju gradbenih stroškov ob spreminjajoči se močnosti. Zató je konstruktivni invarianti lažje biti kos večjemu bremenskemu območju.

Vse to pojasnjuje vnovič veliko razliko med najpriporočljivejšimi električnimi gostotami idealnih osnutkov in onimi, ki jih ugotavljamo iz dopustnih močnosti. Vse to pa podčrtava hkratu ogromno premoč ideje velikega transformatorja v borbi različnih gospodarskih zahtev, ki nastajajo na torišču teorije transformacijskih stroškov zaradi zunanjih vplivov.

55. Ideja velikega transformatorja odbija igranje vse napade, ki prihajajo iz teorije transformacijskih stroškov, toda vprašanje obratne varnosti, kateremu se tudi transformatorska panoga — in ravno ona morda najmanj — ni mogla izogniti, jo spravlja vendarle v težak položaj. Kaj naj ukrene obratovatelj, če se mu ponesreči edini transformator, v katerem se je združila vsa obratna močnost. Je li ideja velikega transformatorja dovolj močna, da ostane kos tudi nepreglednim gospodarskim škodam motenj, ki se včasih razpasejo v dolgotrajne prekinitve obrata?

Gotovo ne. Brez obratne rezerve je transformacija praktično nemogoča. Ponesrečeni transformator mora imeti namestnika, ki skoči nemudoma v nastalo vrzel. Staro preizkušeno pravilo pravi, da naj ima vsak obrat polno rezervo, namreč rezervni stroj, ki lahko nadomesti najmanj 25 odstotkov vseh delujočih strojev, na vsak način pa največjega med njimi.

To bi pomenilo dva transformatorja za polno močnost namesto enega samega, če uveljavljamo idejo velikega transformatorja. To bi pomenilo tri transformatorje za polovično močnost, namesto dveh, ki bi združena bila kos stavljeni nalogi. To bi pomenilo  $n+1$  transformator namesto  $n$  transformatorjev, če bi razkosali vso močnost na  $n$  enakih delov in ne upoštevali natanko starega pravila, ki hoče imeti 25-odstotno rezervo.

Na prvi pogled bi človek sodil, da se ideji velikega transformatorja ni treba meniti za problem obratne varnosti. Saj potrebuje mali transformator ravno takó svojo rezervo kakor veliki in veliki rezervni transformatorji so ravno takó v vsakem oziru ugodnejši sodelavci električnega gospodarstva od malih, kakor so obratujoči veliki transformatorji ugodnejši od malih. Skratka: ideja velikega transformatorja velja tudi velikemu rezervnemu transformatorju.

Toda praktik vidi, da je lažje postaviti poleg treh enakih transformatorjev še četrtega v rezervo, kot poleg enega samega še enega takega. Problem obratne varnosti načenja nesporno usodno vprašanje, ali ni vendarle pametneje razkosati transformacijsko močnost na več enakih delov. To vprašanje pa bije idejo velikega transformatorja z vso svojo silo.

Pa poslušajmo praktika! Pred seboj ima transformacijsko močnost  $N$  in premišljuje, na koliko enakih delov bi jo razkosal. En sam transformator za vso močnost  $N$  bi stal — praktik misli spočetka samó na nabavno ceno —  $K$  denarnih enot. Manjši transformator za  $n$ -krat manjšo močnost  $N/n$  bi stal:

$$\frac{K}{n^{\frac{3}{2}}}$$

denarnih enot,

toda obrat bi potreboval  $n+1$  takšnih manjših transformatorjev. Vprašanje je tedaj, kateri  $n$  naredi izraz:

$$K \cdot \frac{n+1}{n^{\frac{3}{2}}}$$

tako majhen kot je le mogoče. Odgovor se glasi:

$$n = 3.$$

Ce bi bil neoporečen, bi pomenil krut udarec ideji velikega transformatorja. Pa saj odgovarja na vprašanje, ki je napak postavljeno. Saj nabavna cena transformatorske skupine, ki naj složno in varno opravlja transformacijo, ni vse. Tisti časi, ko smo sodili transformatorje po nabavnih cenah, so minuli.

Seveda bi morali vprašati, katero razkosanje vse transformacijske močnosti obeta najnižje skupne transformacijske stroške. Gotovo bi potem dobili drugačen odgovor. Tisti transformator, ki počiva v rezervi, sploh nima energijskih izgub. Zato je mnogo lažje breme kot misli v nabavne cene zavezanih praktik.

Če postavim poleg enega samega obratujočega transformatorja še en enaki transformator v rezervo, sem pač podvojil nabavno ceno. Ker pa zasedajo v idealnem osnutku obresti in odpisi le 25 odstotkov transformacijskih stroškov, sem v resnici povečal te stroške preprosto v razmerju 5:4.

To je kajpak čisto drugačna slika in ideja velikega transformatorja se lahko po vsem videzu zopet oddahne. Slika pa ni točna. V problemu transformacijskih stroškov smo vrgli obresti in odpise za opremo transformatorja iz računov, ker so neodvisni od oblike železnega jedra, pa tudi od elektromagnetnih gostot. Tu pa jih ne moremo odriniti. Vendar je jasno, da nam slike pomembno ne kvarijo.

Podoba je vsekakor, da bi bilo potrebno razširiti teorijo transformacijskih stroškov na skupine enakih transformatorjev, od katerih ta ali oni počiva, med tem ko ostali delajo. Marsikaj zanimivega bi našli, če bi krenili na to pot. Avtor je temu problemu posvetil članek „Gruppenbetrieb von Transformatoren“ (Elektrotechnik und Maschinenbau, Wien, 1939). Toda tu bomo uporabili predvsem eno izmed idej, ki so opisane v navedenem članku. Načeli bomo vprašanje, ali naj rezervni transformator res počiva in čaka na nezgode, ki bi ga potegnile v obrat, ali pa naj se načelno pomeša med svoje tovariše, tako da sploh ni več mogoče povedati, kateri je rezervni transformator.

To vprašanje je izredno važno. Odgovor nanj nam namreč šele pove, kako naj obračunavamo transformacijske stroške vse transformatorske skupine. Posredno pa bo ta odgovor nekakšna sodba ideje velikega transformatorja, ki utegne postati obsodba.

54. Zakaj naj rezervni transformator počiva, med tem ko sopihajo njegovi tovariši pod težkimi bremenimi? Da lahko spočit skoči v vrzel, ki jo zareže nezgoda v transformatorsko

skupino? Da je prav gotovo sposoben prevzeti breme, če nastane potreba?

Pojm spočitega transformatorja je prazen. Zanj se najbolje sploh ne menimo. Preveč je prikrojen človeškim predsodkom in vsakdanjim pojmom. Transformator je zdrav, če ima izolacijo v redu, če ni mehansko poškodovan in če je njegovo olje suho. Izolacijske snovi, pa tudi olje, se obrabljajo. Vsak transformator se stara. Rezervni transformator, ki dolgo počiva, ostane dolgo mlad. To je vse, kar govori za počivanje rezervnega transformatorja.

Z druge strani pa vidimo, da je transformator, ki stalno obratuje, gotovo v redu. Ravno s svojim delom nam dokazuje, da je sposoben delati. Rezervnega transformatorja, ki itak že obratuje, niti vklopiti ni treba, če se dogodi transformatorski skupini nezgoda. Razen tega se obratnim transformatorjem verjetnost nezgode v razmerju  $n : (n + 1)$  zmanjša, če se rezervni transformator pomeša med nje.

Za trajno, redno sodelovanje rezervnega transformatorja pa govore nedvoumno oziri na življensko dobo vse zaposlene transformatorske skupine in, posredno, povsem upravičeno pričakovanje, da bo transformator tem manj podlegel nezgodam, čim počasneje bo živel.

Če razdelim transformacijsko močnóst na vseh  $n + 1$  transformatorjev, namesto da bi ga naprtil  $n$  obratnim, rezervnemu pa odredil počitek, znižam Jouleovo toploto navitij v razmerju  $n^2 : (n + 1)^2$ , s tem pa tudi temperaturo v njih. Seveda se sodelujoči rezervni transformator ravno tako ogreje kot vsi ostali, med tem ko ostane mrzel, če počiva. Toda, če imajo Američani prav, ko trdijo, da se življenjska doba transformatorju podvoji, če se temperatura v navitju za  $8^{\circ}\text{C}$  zniža, mora transformatorska skupina ostati mnogo odpornejša, če rezervni transformator ne počiva.

Težko se je odtegniti ozirom na življenjsko dobo, ki zahtevajo z velikim povdarkom kar se dá zmerno obremenjevanje. Vse, kar bi poskušali uveljaviti proti njim, bi ne zdržalo ostre kritike. Predsodki so seveda navadno najmočnejši nasprotniki dobro premišljenih in skrbno utemeljenih ukrepov. Toda v znanstvenih raziskavah predsodki nimajo domovinske pravice. Zató bomo poskusili rešiti problem obratne rezerve s pomočjo predpostavke, da naj rezervni transformator trajno in redno sodeluje.

Naslednja slika se vsiljuje: transformacijsko močnóst  $N$  naj prevzame  $n$  enakih transformatorjev kot skupno zmogljivost. Vsak izmed teh enakih transformatorjev pa naj doseže svojo idealno, gospodarsko, močnóst z bremenom, ki je v raz-

merju  $n : (n + 1)$  manjši od dopustnega. Za rezervo naj skupina dobi dodaten transformator enake konstrukcije. V nemotenem obratu naj dela vseh  $n + 1$  edinic, vse seveda z gospodarsko močnostíjo. V primeru nezgode naj izskoči ponesrečeni transformator, ostalim pa naj se breme dvigne na zmogljivost, tako da skupina nemoteno nadaljuje delo s skupno močnostíjo  $N$ .

Denimo, da bi bilo:

$$n = 1.$$

V tem primeru bi imeli en obratni in en rezervni transformator. Zmogljivost prvega in drugega bi bila  $N$ , torej enaka transformacijski močnostíi, gospodarska močnosť pa  $N/2$ . V nemotenem obratu bi transformatorja nosila vsak polovico vsega transformacijskega bremena, v primeru nezgode bi pa zdravi transformator prevzel vso močnosť  $N$  kot ravno še zmogljivo.

Primer je zelo oster, toda morda uresničljiv. Posebno veliki transformatorji, ki radi posegajo po umetnem hlajenju, dopuščajo tudi zelo velike razlike med zmogljivostjo in gospodarsko močnostíjo, ker lahko po potrebi vprezajo rezerve svojih hladilnih naprav. Z rastočim  $n$  pa gine ostrost predlagane ureditve. Zató zasluži vprašanje, kateri  $n$  obeta problemu obratne rezerve najboljšo rešitev v smislu predlagane ureditve. poln odgovor.

V nemotenem obratu je transformacijska močnosť razkosana na  $n + 1$  enakih delov. Zató so transformacijski stroški  $(n + 1)^{\frac{1}{2}}$  - krat večji od onih, ki bi jih prinašal en sam transformator z vsem transformacijskim bremenom kot svojo gospodarsko močnostíjo. Z njim pa bi nam seveda ne bilo ustrezno, ker bi obrat ostal brez rezerve. Torej ne smemo sklepati, da mora  $n$  postati kar se dá majhen.

Začnimo rajši s takojšnjim upoštevanjem predlagane ureditve in oprimo se na transformacijske stroške, ki bi jih imel en sam transformator s polovično transformacijsko kot svojo gospodarsko močnostíjo ( $N/2$ ). Imenujmo te stroške  $S$ :

$$S = S \frac{25 + 37.5 + 37.5}{100}$$

Pod polnim bremenom  $N$  bi ti stroški narastli na:

$$S' = S \frac{25 + 37.5 + 4 \times 37.5}{100}$$

to se pravi na:

$$S' = S \frac{25 + 37.5 + \left(\frac{n+1}{n}\right)^2 \cdot 37.5}{100} \quad z \quad n = 1$$

in N bi postal zmogljivost tega transformatorja.

Primer:

$$n = 1.$$

bi tedaj zahteval transformacijske stroške  $2S$ , če bi rezervni transformator sodeloval in

$$S' + S \frac{25}{100} = 2.375 S,$$

če bi rezervni transformator počival, tako, da bi mu tekle samó obresti in odpisi.

V splošnem primeru bi pa seveda morali pričakovati:

$$2S \left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

transformacijskih stroškov, če bi rezervni transformator sodeloval in

$$S \frac{25}{100} \cdot \left(\frac{2}{n+1}\right)^{\frac{3}{2}} + n \cdot \frac{S}{\left(\frac{n+1}{2}\right)^{\frac{3}{2}}} \cdot \frac{25 + 37.5 + \left(\frac{n+1}{n}\right)^2 \cdot 37.5}{100},$$

če bi počival.

Izledek priporoča na videz ureditev  $n = 1$ , praktično najbrže  $n = 2$ , vsekakor pa ne zahteva izdatnega razkosavanja transformatorske močnosti.

Razpredelnica:

n	stroški ob sodelovanju rezervnega transformatorja	stroški brez sodelovanja
1	$2S$	$2.375S$ ,
2	$1.106 \times 2S$	$2.354S = 0.991 \times 2.375S$ ,
3	$1.19 \times 2S$	$2.46S$ ,

ki ustreza pravkar zaključenemu računu, ne upošteva obresti in odpisov za transformatorsko opremo in zato preveč podčrtava prednosti manjših  $n$ .

Pred vsem pa iz tega preprostega računa ni razvidno, da bi ureditve z manjšimi  $n$  zahtevale relativno dražje hladilne naprave. V primeru  $n = 1$  bi transformator moral v skrajnem

primeru prevzeti dvojno gospodarsko najpriporočljivejše breme, njegova hladilna naprava bi torej morala biti kos štirikratni Jouleovi toploti idealnega osnutka. Primer  $n = 2$  pa zahteva samo še 1'5-kratno gospodarsko močnost, kateri ustreza 2'25-kratna Jouleova toplota. Prve, silne, razlike ni lahko opravičiti. Težko je si predstavljati konstrukcijo, ki bi tvegala trajno preobremenitev za 100 odstotkov. Praktično torej res ni misliti na drugačno rešitev kot:

$$n = 2.$$

Z njo začena vdirati v problem velikega transformatorja zavirajoča sila, katere se velike močnosti brez izdatnih naporov ne morejo otresti. Razpolavljanje močnosti pomeni seveda 19 odstotno podražitev velike transformacije. Kdo bi jo pohlevno sprejel? Kdo bi ne iskal rešitve iz skoraj neznosnega položaja, ki ga ustvarja problem obratne varnosti? Seveda je gospodarski pomen obratne varnosti dovolj močan, da se lahko kosa z gospodarskim pomenom transformacijskih stroškov. Toda borba med tema dvema gospodarskima činiteljema se zdi neizbežna.

55. Transformacijska naprava, ki živi svoje izolirano življenje, ki ne more pričakovati nobene pomoči od morebitnih drugih transformacijskih naprav, mora rešiti svoj problem obratne varnosti tako, kot smo ga rešili v zadnjem oddelku, žrtvovati mora del dosegljivih transformacijskih ugodnosti ozirom na varen obrat. Če pa obratuje poleg nje, ali pa vsaj v dosegljivi bližini, druga podobna transformacijska naprava, ji postane problem obratne varnosti mnogo lažji: dve ali pa tudi več transformacijskih naprav poseže lahko po skupni obratni rezervi.

Samostojne električne naprave imajo v individualističnem gospodarstvu mnogo manjših transformacijskih naprav, toda samo dve veliki, namreč na obeh koncih daljnovoda, če prenašajo energijo samo v eno daljnovodno smer. Lahko jim je organizirati skupno obratno rezervo za manjše močnosti, težko pa za velike.

Skupna obratna rezerva za velike močnosti pa postane v velikem električnem gospodarstvu, ki ima številne daljnovode in obilo velikih transformacijskih naprav, važen in mnogo obetajoč problem. Transformatorska panoga se ga je seveda takoj lotila, ko so se pojavila razsežna električna gospodarstva. Rešila ga je s takó imenovanim potujočim transformatorjem.

Potujoči transformator je velikan, ki je kos največji v dotičnem gospodarstvu potrebni močnosti, ki pa je hkratu vsak čas pripravljen skočiti v obrat, če postane njegova pomoč potrebna. Potujoči transformator je ogromen rezervni transformator, ki živi na kolesih. Kot skupni rezervni transformator mnogih velikih transformacijskih naprav pač ne sme izgubljeni časa, ko se podaja na delo.

Ugotovimo pred vsem, da rešuje ideja skupnega rezervnega transformatorja za več transformacijskih naprav pereči problem obratne varnosti z razkosavanjem močnosti, ki je itak že opravljen, ki torej ne zahteva nobenih dodatnih gospodarskih žrtev. Transformatorskih močnosti ločenih transformacijskih naprav seveda ni mogoče družiti v velikih edinicah.

Z druge strani pa vidimo, da pomeni skupni rezervni transformator ločenih naprav poseganje po ulomkih rezervnega transformatorja in zato po znatnem pocenjevanju obratne rezerve. Če dobi pet naprav skupen rezervni transformator, si naprti vsaka naprava samo petino rezervnega transformatorja.

Vse to predpostavlja seveda vero v dobršno zanesljivost transformatorskih naprav, ker rezervni transformator vendarle ne more hkratu pomagati dvema ponesrečenima napravama ali pa celo trem. Zato pa lahko dodamo petim ločenim napravam dva skupna rezervna transformatorja, če hočemo. Transformatorski ulomek bi se v tem primeru dvignil na dve petini.

Električna gospodarstva so se v območju manjših močnosti pač že dolgo odrekla stalnim, tako rekoč nepremičnim rezervnim transformatorjem in že dolgo izkoriščajo idejo skupne obratne rezerve. Toda manjšim transformatorjem ni potrebna posebna transportna oprema. Transformator za 100 kVA na pr. naložiš na voz in ga zapelješ na kraj nezgode. V območju manjših močnosti ni težko pripraviti dovolj velik rezervni transformator.

Toda v veletransformaciji pomeni skupna obratna rezerva važen transportni problem, hkratu pa tudi težak problem velike močnosti. Kombinacija obeh daje problemu potujočega transformatorja izredno vsebino. V tej kombinaciji se je povzpел problem velikega transformatorja do vse svoje višine, hkratu je z njo došel do vse svoje ostrine in zabredel v svojo krizo.

Pozabiti ne smemo, da je na velikem skupnem rezervnem transformatorju vse veliko: močnost, napetost, teža in seveda tudi delovno območje. Manjše transformacijske naprave delujejo tesno druga ob drugi: od ene do druge, oziroma od shrambe za skupne rezervne transformatorje do posameznih naprav, je kratka pot. Manjši skupni rezervni transformator

dvigneš s preprostim dvigalom na tovorni voz in ga prepelješ v bežnih minutah na kraj nezgode, kjer ga kmalu lahko vklopiš.

Potujoči veletransformator je težak, 200 ton ni nemogoča teža. V primeru obratne motnje nimamo časa, da bi se mučili z dviganjem takšnih bremen. Nakladanje in razkladanje rezervnega veletransformatorja mora biti opravljeno, ne da bi obrat moral čakati, skratka: rezervni veletransformator mora res živeti na kolesih.

Potovanje je seveda mogoče samo po železnici, če hočemo prevažati popolnoma opremljene in z oljem napolnjene izredno težke veletransformatorje. Razmeroma dolga pot do delovnega mesta troši dragocen čas, ki ga ni mogoče krajšati. Tudi zato se mora veliki skupni rezervni transformator izogibati vsem drugim časovnim izgubam.

Jasne in neizprosne zahteve ideje velikega skupnega rezervnega transformatorja pa vodijo v nepričakovano zagato: ker mora biti potujoči veletransformator hkratu železniški voz, se mora ukloniti železniškemu profilu. Obenj pa zadeva, ker je velik in ker ga ideja velikega transformatorja pritiska, da naj postaja večji in večji.

Vse druge zapreke je ideja velikega transformatorja premagala. iz vseh svojih težav se je zmagovita izmotala, dokler ni v borbi s problemom obratne varnosti posegla po potujočem veletransformatorju. Železniškemu profilu pa po vsem videzu ni kos. Takó silna in zdrava je bila, da je moral zunanji sovražnik, tujec v transformatorski panogi, usodno križati pot rastočih močností.

56. Majhen transformator postaviš v železniški tovorni voz in ga pelješ, kamor hočeš. Toda če neprestano večaj vse mere transformatorja, ker dvigaš močností, boš nazadnje zadel ob stene vagona. Res je, da se višina, širina in dolžina transformatorja večajo počasi, namreč s četrtim korenem iz močností. Ideja velikega transformatorja je pa nenasitna. Gospodarske koristi, ki jih obeta, so tolikšne, da je konec neizbežen: transformator ne gre več v vagon.

Predstavlja ti si, da je transformatorska panoga preprosto položila orožje, ko je veliki transformator prvič zadel ob stene tovornega voza, bi bilo navno. Tako silnih gospodarskih idej kot je ideja velikega transformatorja, ni mogoče takó preprosto krotiti. V trenutku, ko je veliki transformator prvič zadel ob železniški profil, se je vnela ljuta borba, ki traja že nekaj desetletij in še danes ni zaključena. Ideja velikega

transformatorja se bori z železniškim profilom neverjetno žilavo in vztrajno.

V prvem presenečenju se je transformatorska panoga pač nekako umaknila železniškemu profilu. Pohlevno je pospravila opremo transformatorskih kotlov, pred vsem prevodne izolatorje, ki sede navadno na pokrovu kotla in potrebujejo obilo prostora, posebno če služijo zelo veliki napetosti. Šaj je res mogoče izdatno zmanjšati višino transformatorja, če se odločimo, da bomo montirali prevodne izolatorje po končanem potovanju. Isto velja za konservatorsko posodo, ki rada čepi na pokrovu kotla.

Popustljivejši in manj bojevití graditelji transformatorjev so bili spočetka celó pripravljeni, postaviti v tovorni voz razdejan transformator, to se pravi, transformator zase, njegov kotel brez opreme zase, olje in vso opremo pa zase. Celó kotel, ki potrebuje mnogo več prostora kot transformator sam, bi bili hoteli zvariti šele po končanem potovanju.

Vsi ti ukrepi so očividno obetali izdatno odložitev vse borbe z železniškim profilom in temeljito podaljšanje poti, po kateri prodira ideja velikega transformatorja. Vsi ti ukrepi pa nasprotujejo pred vsem ideji potujočega veletransformatorja. Razen tega so zelo nevarni. Transformatorska panoga se jim je zgodaj odpovedala. Uvidela je kmalu, da s popuščanjem železniškemu profilu ne bo kos.

Pred desetletji je mlada transformatorska panoga večkrat poskusila pošiljati tudi manjše transformatorje brez olja po železnici. V svoji neizkušenosti si je hotela prihraniti del transportnih stroškov. Vedela je pač, da je mogoče transformatorju kupiti olje tam, kamor je namenjen.

Bridke izkušnje so bile posledice zmotne varčljivosti. Transformatorsko olje je izredno občutljivo izolacijsko sredstvo. Najmanjši primeski vode mu močno kvarijo električno prebojno odpornost. Nobeno kupljeno transformatorsko olje ni dovolj suho.

Pa tudi transformator sam, oziroma njegovo navitje, ni suho, če ima za seboj potovanje, katero je opravilo brez olja. Transformator, ki ga postaviš v olje, je poln nevarne vlage, pa tudi zraka, ki se skriva v olju teže dostopnih kotičkih in tam ogroža prebojno odpornost navitja. Izkušeni graditelj, pa tudi obratovatelj, poznata kaj dobro vso zamudnost in nevšečnost osuševanja in razračevanja. Včasih traja ta posel tedne in mesece, preden je temeljito opravljen, preden torej stopi transformator pod obratno napetost.

Vsa ta spoznanja so že pred desetletji graditeljem transformatorjev vsilila načelo: transformator sme le osušen in raz-

zračn. v olju seveda, na pot, v železniški tovorni voz. Načelo velja za vse transformatorje, majhne in velike. Prav posebno pa velja seveda za velike rezervne, za tako imenovane potujoče transformatorje.

V območju velikih močnosti so zelo velike napetosti doma. Tem ustrezajo zelo veliki prevodni izolatorji, na katerih sede sponke navitja. Zelo velika napetost pa zahteva seveda posebno skrbno zgrajene prevodne izolatorje, ki posegajo radi po olju kot pomožnem izolacijskem sredstvu. Zato je zgoraj navedeno načelo v območju velikih močnosti položilo svojo trdo pest tudi na transportu silno nadležne prevodne izolatorje, hkratu pa iz razumljivih vzrokov tudi na konservatorske posode za olje. Začelo je zahtevati transport popolnoma opremljenih in takoj uporabljivih transformatorjev.

Možno bi bilo razpravljati o popustljivosti prvotnega in poostreženega transportnega načela, dokler mislimo samo na stalne, tako rekoč nepremakljive veletransformatorje. Nazadnje je vendarle mogoče preložiti osuševanje in razžračevanje iz tovarne na delovno mesto, zamudno je pač tu in tam. Res je sicer, da ima tovarna vse potrebne priprave pri roki, transformacijska naprava pa si jih mora šele pridobiti. Toda ideji velikega transformatorja bi nazadnje žrtvovali tudi še vse te pomisleke.

Vsaka razprava o teh stvareh pa je od vsega početka izključena, če mislimo na potujoče veletransformatorje. Tem manjka čas. Potujoči veletransformator goni transformatorsko panogo v neizprosno borbo z železniškim profilom, hkratu pa idejo velikega transformatorja v krizo. Ker pa mora biti potujoči veletransformator pred vsem velik, vodi borbo z železniškim profilom ne samó zase, temveč hkratu za vse veletransformatorje.

57. Trofazno železno jedro, ki ga uporabljajo transformatorji evropskega kova že skozi desetletja, potiska osi vseh treh stebrov v isto ravnino. Zato je jedro dokaj ploščata tvorba. Po zunanjih obrisih bi bilo podobno veliki knjigi. Izmed njegovih treh pglavitnih mer je največja tista, ki ustreza zaporedju treh stebrov. Zelo važna je njegova višina, ki ustreza dolžini stebra in dvojni višini jarma.

Na stebrih sede navitja, ki imajo navadno obliko okroglih valjev. Premer teh valjev je nekako dvakrat večji od premera golega stebra. Navitje dvoji potemtakem tretjo pglavitno mero železnega jedra. Toda ta okolnost ni nevarna transportnemu problemu, s katerim se bori veliki transformator.

Lahko je uvideti, da mora dobiti kotel trofaznega transformatorja nekako isto zunanjo obliko kot jo ima transformator sam, samo dokaj večji je. Če tedaj postavljamo popolnoma opremljeni transformator v železniški voz, morajo njegovi trije stebri slediti drug drugemu v smeri proge. V tej smeri transportni problem nedvomno ne išče zaprek.

Transformator pa mora očitvidno stati v svojem vozu, osi njegovih stebrov sodijo nedvomno v navpično smer. Višina popolnoma opremljenega transformatorja je njegova kritična razsežnost. Z njo se zadeva ob železniški profil, z njo stopa v boj.

Tej višini dajejo prevodni izolatorji, pa tudi konservatorska posoda za olje, nepotrebno ostrino. Transformatorska panoga je to ostrino spretno odstranila: konservatorska posoda najde tudi poleg transformatorja svoje mesto, če ne sme sedeti na njem, prevodni izolatorji, ki so včasih zelo dolgi, se pa lahko umaknejo v smer železniške proge, če se vsedejo na ozki stranski steni kotla (slika 25).

To bi bili obrambni ukrepi transformatorske panoge v borbi s transportnim problemom, in nedvomno so uporabljivi, pa tudi izredno izdatni. Potujoči veletransformator je posegel po njih. Toda veletransformatorska panoga je uporabila tudi napadalne ukrepe.

Železniški voz ima navadno tla, ki leže precej visoko nad tračnicami. Čemu tla, če jih kotel veletransformatorja itak ima? Čemu zapravljanje dragocenega dela profilne višine? Tudi največji, tudi najtežji transformator lahko varno obesiš na posebno nosilno napravo, med dva voza, tako da se pogreza skoraj do tal železniškega profila (slika 25).

Ogromno težo transformatorskega velikana je itak treba porazdeliti na številne osi voza ali voz, ki opravljajo transport. Potujoči veletransformator pa mora imeti svoj lastni železniški voz, če hoče biti res vedno pripravljen, da krene na službeno potovanje. Torej res ni mogoče oporekati drznemu izkoriščanju vse profilne višine.

Vse to priča o neugnanosti žive tehnike, pa tudi o silnem vzgonu veletransformatorske ideje. Če pomislimo, da so pred desetletji veletransformatorji za 10.000 kVA že imeli svoje prve nepravilike v borbi s transportnim problemom, to se pravi z višino železniškega profila, in upoštevamo, da je veletransformatorska panoga vendarle že prodrla do 100.000, da celo do 120.000 kVA in 220.000 V, da pa je prepričana o dosegljivosti 150.000 kVA in 400.000 V, moramo priznati, da so uspehi njenih dosedanjih ukrepov v velikem transportnem problemu čudoviti.

Prav za prav so nepojmljivi. Kdor ne vidi v globine transportnega problema, res ne more razumeti, da je bilo mogoče v tolikšni meri kljubovati neizprosному okviru, ki ga graditelju transformatorjev predpisuje železniški profil.

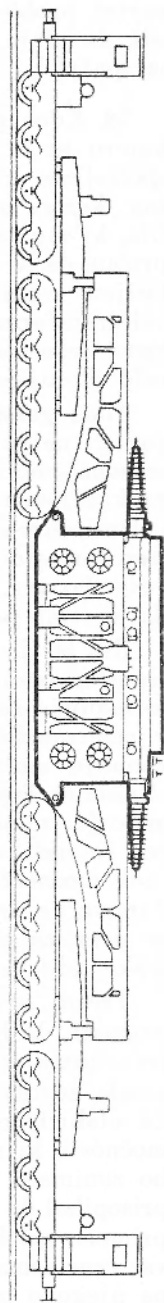
Seveda ima veletransformatorska panoga svoje skrivnosti, ki jih nepoučeni opazovalec zgreši, ker vidi samo kotel in prav lahko pozabi, da se oblika kotla prilagodeva obliki samega transformatorja. Zadnje sredstvo veletransformatorske panoge pa je nedvomno prilagodevanje oblike transformatorja zahtevam transportnega problema.

Na tej točki se kritika veletransformatorskih problemov nehote ustavi. Ali ni oblika železnega jedra in z njo vsega transformatorja smoter vseh poskusov, zmanjšati transformacijske stroške na dosegljivi minimum? Ali ni problem transformacijskih stroškov osrednji gospodarski problem vse transformatorske panoge? Ali hočemo res transformacijske stroške podrediti ideji velikega transformatorja, ki je na koncu koncev vendarle pred vsem gospodarska ideja?

Kritični opazovalec transportnih težav, ki mučijo velike transformatorje, sluti, da začenjamo izpodkopavati veletransformatorju tla, če poskušamo železnemu jedru manjšati najugodnejšo konstrukcijsko višino. Zato sluti krizo veletransformatorske ideje, ki mori vzgon, ki celó obeta konec vsem poskusom, vdirati v območje zaželenih, izredno velikih močností.

Seveda, nekje je nepremagljiva meja. Železniški profil je neizprosén. Lahko se borimo z njim, lahko mu nalagamo težja in težja bremena, nazadnje mu, če smo spretni, iztisnemo vse možnosti. Če pa smo ga izželi kot citrono, stojimo pred neprodirno steno.

Veletransformatorska panoga izčrpava zadnje možnosti, ki jih dopušča njen trans-



Slika 25.

portni problem. Zató se muči, zató je v krizi, zato se nam zdi, da ideja velikega transformatorja peša. Kdaj se bo neki izčrpala?

58. Kdor gleda na stisko veletransformatorske panoge, v katero jo je spravil njen transportni problem, samó z očmi specialista, ki bi rad gradil transformatorje-velikane, pa ne sme, ker ga ovira skoraj smešna naključnost železniškega profila, ki mu je vsaka dosežena močnosť premajhna, ki je prepričan, da so njegovi problemi važnejši od vseh drugih na tem božjem svetu, dobi seveda močno popačeno in zverženo sliko veletransformatorskega problemskega kompleksa. V tej sliki grozi transformatorski panogi po vsem videzu neizbežen in celo skorajšen zastoj.

Toda geslo *l'art pour l'art* bi bilo v veletransformatorski panogi naivno. Saj ne gradimo velikih transformatorjev, da se ponašamo z njimi. Kaj pa bi začeli z vse dosedanje močnosti prekašajočim velikanom, če bi ga ne mogli zaposliti in dovoljno obremeniti. Torej je treba pogledati na stisko veletransformatorske panoge tudi od zunaj, s stališča električnega gospodarstva, kateremu je transformator na vse zadnje vendarle samó pomagač.

Res je, da električno gospodarstvo že potrebuje zelo velike transformatorje. Res je, da že imamo trofazne potujoče transformatorje za 120.000 kVA, 50 Hz in 220.000 V. Res je, da smo v veletransformatorskem transportnem problemu izčrpali vse zunanje možnosti in da smo se že umaknili na notranjo obrambno črto, kjer se je borba lotila oblike samega transformatorja, to se pravi oblike njegovega železnega jedra. Toda res je tudi, da na notranji obrambni črti še nismo izčrpali vseh možnosti, predvsem pa je res, da nas električno gospodarstvo ne pritiska prehudo, da lahko še mirno dihamo in da se prav za prav le razburjamo, ker vidimo, da bodo prišle težke zahteve iz električnega gospodarstva v doglednem času.

Trezni opazovalec veletransformatorskih problemov mora priznati, da bo nekoč železniški profil zadušil idejo velikega transformatorja, ker je malo verjetno, da bi ta ideja kedaj mogla zdrobiti zoperni profil. Trezni opazovalec pa tudi ve, da električno gospodarstvo ne bo moglo v nedogled večati močnosti, ki naj jih prenašajo dolge prenosne proge. Zato ga bo zanimalo vprašanje, ali bo veliki transformator morda le prisopihal do smotra, ki ga električno gospodarstvo v skrajnem primeru sploh more postaviti. S tem vprašanjem bo odstranil vse črne sence, ki leže na popačeni sliki specialista, pred vsem pa njegovo preuranjeno obupavanje.

Seveda je res, da potrebuje človeštvo od dneva do dneva več električne energije, in da so mu zato neprestano vse elektrarne premajhne. Toda energijska žeja človeškega gospodarstva ne zahteva maloštevilnih ogromnih kozarcev: energijo je treba takó piti kakor jo narava toči. Narava pa ima raznolike vrče in ročaji teh vrčev so transformatorji. Kakršen vrč, tak ročaj.

Dokler nam fizika ne odpre povsem novih poti, moramo izkoriščati energijo, ki spi v premogu, tudi v mineralnem olju, in ki se doslej neplodno izživlja v padajoči vodi. Že dolgo vemo, da je treba zagrabit razpoložljivo premogovno energijo v samem premogovniku. Da moramo energiji padajoče vode obleči električno obleko tam, kjer voda pada, je itak jasno. Vprašanje je tedaj, kakšne močnosti vsiljujejo premogovniki in vodne sile neizbežnemu prenosu energije, hkratu pa kajpak tudi transformaciji.

Elektrotehnika se je v svoji mladosti izogibala prenašanju električne energije, najbrže le zato, ker mu ni bila kos. Zato je pač tu in tam posegla po tej ali oni posebno ugodni vodni sili, rajši pa je postavljala svoje elektrarne v bližino velikih konsumnih središč in prenašala premogovno energijo z železniškimi vozovi.

Kasneje je dozorevajoča elektrotehnika spoznala, da daljnovodi ceneje prenašajo energijo kot železnice. Ko je torej že znala prenašati svojo energijo, je začela postavljati velike kalorične centrale v premogovnike. Hkratu je bolj in bolj posegala po vodnih silah, posebno odkar je uvidela, da obeta sodelovanje kaloričnih central z vodnimi izdatne koristi.

Energijska žeja raste. Skrbni in trezni gospodarji nočejo živeti iz dneva v dan. Kratkovidno hlantanje posameznikov po malo važnih osebnih koristih se bolj in bolj umika zahtevam in potrebam skupnosti. Človeštvo začenja živeti svoje večje življenje in goji zato gospodarske načrte, ki segajo čez dolgo vrsto pokolenj. Električno gospodarstvo dobiva novo, veliko smer.

Dokler je res, da moramo gospodariti s premogovno in z vodno energijo — mineralna olja morajo služiti posebnim svrham — ne smemo prezirati usodnega dejstva, da pomenijo premogovna skladišča pridedovano energijsko premoženje, padajoča voda pa tekoče energijske dohodke. Zato ne moremo mimo načela, da moramo pred vsem izkoriščati energijo padajoče vode in skrbno varčevati s premogom.

Smer elektrotehnike prihajajočih let in desetletij meri potemtakem v grajenje velikih vodnih central. Po vsem svetu so raztresene še neizkoriščene izdatne vodne sile. Greh, da,

lahkomiselno bi bilo, jih zanemarjati. Res je, da leže po večini daleč od krajev, kjer je energijska žeja velika. Toda danes smo že kos velikim prenosnim problemom, ker že gradimo zelo velike transformatorje.

Vodne sile so raznolike, toda neizmerne izdatnosti pa vendarle nikjer na zemlji ne dosežejo. Največja vodna sila bi nekako imela pravico postaviti veletransformatorski panogi dokončni smoter. Kaj bi neki zahtevala?

Po vsem videzu mnogo več, kot more veletransformatorska panoga doseči. Niagarafalls zmorejo nad 5 milijone konjskih sil in Victoriafalls v osrednji Afriki so še izdatnejši. Več milijonov kilovoltamperjev ne bomo mogli nikoli nakopičiti v enem samem transformatorju.

Videz pa vendarle vara. Naravni viri energije so res, kakor vidimo, mestoma izredno izdatni, toda konzum se nikjer tako ne kopiči, kot se kopiči padajoča voda. Nihče ne bo verjel, da bo treba vso močnóst največjih vodnih sil prenašati v eno samo smer. Potrebe človeškega gospodarstva zahtevajo razkosavanje ogromnih močnósti na samem mestu, kjer jih zajemamo, in odpravljanje v različne smeri.

Vsaka prenosna smer potrebuje svojo prenosno progo in seveda svojo transformacijo. Če razkosam celokupno močnóst, ki jo nudijo Niagarafalls na deset kosov, bom dobil delne močnósti, ki bodo dosegle le nekaj sto megavatov. No, več kot sto megavatov pa mi veletransformator itak že zmore.

Velike prenosne proge imajo vse po dva tira. To pomeni nadaljno razkosavanje prenosne močnósti. Seveda smem združiti transformacijo obeh prenosnih tirov v enem samem transformatorju. Če pa hočem tudi transformaciji nuditi dva tira, moram postaviti najmanj po dva transformatorja na obeh konceh prenosne proge.

Problem se vse bolj zožuje. Bleda nada se dviga iz vse te slike, da bomo nazadnje vendarle dosegli smoter, ki ga postavlja živo električno gospodarstvo. Borba veletransformatorske ideje s transportnim problemom se nam ne more več zdeti obupna. Zató moramo natanko pregledati, kaj je mogoče še doseči, če vržemo še obliko transformatorja samega v boj.

## IX. ZAKLJUČNI VELETRANSFORMATORSKI PROBLEMI

59. Tehnika je polna možnosti, pred vsem pa je polna iznajdljivosti. Neštetokrat je že stala pred na videz neprodirnimi stenami, neštetokrat je našla pot mimo njih in skozi nje. Iz vseh zagat se izmotava, vsem težavam se prilagodeva: govoriti o zaključnih problemih katere koli tehnične panoge je več kot tvegano.

Toda veletransformator ima vendarle svoje zaključne probleme, ker se nedvomno stiska v nerazdrobljiv okvir. Železniški profil bo po vsem videzu zdržal vse napore veletransformatorske panoge. Možno je, da bo nazadnje obrobljal danes še neverjetne močnosti, toda le skozenj vodi pot največjega možnega transformatorja v življenje.

Prav za prav davi železniški profil samó potujoče veletransformatorje, stabilni imajo po vsem videzu mnogo večje življenske možnosti. Morda bo res potujoči veletransformator dozorel in otrpnil, med tem ko bo stabilni še rasel in se še razvijal. Če bi hoteli biti previdni, bi torej morali govoriti o zaključnih problemih potujočih velikih transformatorjev.

Danes pa je podoba, da stabilni veletransformatorji izumirajo in da postaja potujoči veletransformator bolj in bolj edini zastopnik veletransformatorske panoge. To je povsem razumljivo. Del ideje potujočega transformatorja je pač kar se dá velika močnost. Če pa potujoči transformator zmore dovolj veliko močnost, bi bilo gotovo nesmisleno, nakopavati si neprilike, ki jih povzroča transport razkosanega velikega transformatorja.

Dokler bo torej močnost potujočega transformatorja še rastle, bo manj in manj veletransformatorjev stabilnega tipa. to se pravi veletransformatorjev, ki se izogibajo železniškemu profilu. Zató smemo danes s polno pravico govoriti o zaključnih veletransformatorskih problemih.

Seveda, ko bomo te probleme res zaključili, ko bo konec nalog, katerih se je lotil potujoči veletransformator, bomo morda hiteli zatrjevati, da je ideja velikega transformatorja še živa in zdrava, da je preživela dušeci napad železniškega profila in da je stabilni veletransformator pravi zastopnik veletransformatorske panoge — če bo še treba.

Problemi, ki postajajo nerešljivi, so borbenemu človeškemu duhu od nekdaj zoprni, neznosni. Skoraj vsi izzovejo nazadnje najostrejšo kritiko, ki brska takó dolgo po njih, dokler ne najde, da smo si sami naredili svoj problem nerešljiv. Tako se bo morda godilo tudi problemu potujočega veletransformatorja.

Spomnimo se, kako smo zašli vanj! Ugotovili smo, da je vsak transformator lahko žrtev nepredvidljivih nezgod, ki povzročajo obratne motnje. Z vso pravico smo postavili zahtevo obratne varnosti v ospredje transformacijskih nalog. Tako smo prišli do obratne rezerve.

Iz tega novega problema so se začele dvigati ideji velikega transformatorja nevarne ostrine. Če bi jih bili sprejeli takšne, kakršne so, bi bili doživeli enkratno zastoj v naraščanju močnosti, morda celo enkratno umik, toda po prestanem udarcu bi bili lahko nemoteno sledili vzgonu veletransformatorske ideje.

Ubrali smo drugo pot. Presekali smo problem obratne rezerve, namreč stabilne obratne rezerve, in se vrgli v objem novi, nekoliko drzni, toda mnogo obetajoči ideji: ideji potujočega rezervnega transformatorja. Šele s tem smo se dokončno zagostili v železniški profil.

Ni popolnoma izključeno, da bomo vendarle dosegli smoter, ki ga živo električno gospodarstvo sploh more postaviti ideji velikega transformatorja, čeprav smo si nakopali borbo z železniškim profilom. Če pa bomo prej omagali, bomo pač morali vnovič načeti problem obratne rezerve, vsaj v območju zelo velikih močnosti.

Toda na poti do tistih največjih močnosti, ki jih živo električno gospodarstvo sploh more zahtevati od transformatorske panoge, leže vsekakor zaključni veletransformatorski problemi. Zato je dovoljeno govoriti o njih. Smemo pa začasno takó govoriti o njih, kot da bi veljali samó potujočemu veletransformatorju.

Prenos zelo velikih močnosti čez velike razdalje pa načanja nepričakovana vprašanja, ki so danes še vsa nerazčiščena in polna nepričakovanih možnosti. Danes je že skoraj gotovo, da moramo resno misliti na prenašanje velikih močnosti s pomočjo istosmernega toka. Morda smo v območju veleprenosa bližji preusmeritvi elektrotehnike kot mislimo.

Prav lahko je mogoče, da bo živo električno gospodarstvo vrinilo med najvišje praktično potrebne močnosti in one, ki jih potujoči veletransformator morda res še more doseči, veleprenos z istosmernim tokom. Če bo to res storilo, bodo za-

## IX. ZAKLJUČNI VELETRANSFORMATORSKI PROBLEMI

59. Tehnika je polna možnosti, pred vsem pa je polna iznajdljivosti. Neštetokrat je že stala pred na videz neprodornimi stenami, neštetokrat je našla pot mimo njih in skozi nje. Iz vseh zagat se izmotava, vsem težavam se prilagodeva: govoriti o zaključnih problemih katere koli tehnične panoge je več kot tvegano.

Toda veletransformator ima vendarle svoje zaključne probleme, ker se nedvomno stiska v nerazdrobljiv okvir. Železniški profil bo po vsem videzu zdržal vse napore veletransformatorske panoge. Možno je, da bo nazadnje obrobil danes še neverjetne močnosti, toda le skozenj vodi pot največjega možnega transformatorja v življenje.

Prav za prav davi železniški profil samó potujoče veletransformatorje, stabilni imajo po vsem videzu mnogo večje življenske možnosti. Morda bo res potujoči veletransformator dozorel in otrpnil, med tem ko bo stabilni še rasel in se še razvijal. Če bi hoteli biti previdni, bi torej morali govoriti o zaključnih problemih potujočih velikih transformatorjev.

Danes pa je podoba, da stabilni veletransformatorji izumirajo in da postaja potujoči veletransformator bolj in bolj edini zastopnik veletransformatorske panoge. To je povsem razumljivo. Del ideje potujočega transformatorja je pač kar se dá velika močnost. Če pa potujoči transformator zmore dovolj veliko močnost, bi bilo gotovo nesmisleno, nakopavati si nepravilike, ki jih povzroča transport razkosanega velikega transformatorja.

Dokler bo torej močnost potujočega transformatorja še rastle, bo manj in manj veletransformatorjev stabilnega tipa. to se pravi veletransformatorjev, ki se izogibajo železniškemu profilu. Zató smemo danes s polno pravico govoriti o zaključnih veletransformatorskih problemih.

Seveda, ko bomo te probleme res zaključili, ko bo konec nalog, katerih se je lotil potujoči veletransformator, bomo morda hiteli zatrdjevati, da je ideja velikega transformatorja še živa in zdrava, da je preživela dušeči napad železniškega profila in da je stabilni veletransformator pravi zastopnik veletransformatorske panoge — če bo še treba.

Problemi, ki postajajo nerešljivi, so borbenemu človeškemu duhu od nekdaj zoprni, neznosni. Skoraj vsi izzovejo nazadnje najostrejšo kritiko, ki brska takó dolgo po njih, dokler ne najde, da smo si sami naredili svoj problem nerešljiv. Tako se bo morda godilo tudi problemu potujočega veletransformatorja.

Spomnimo se, kako smo zašli vanj! Ugotovili smo, da je vsak transformator lahko žrtev nepredvidljivih nezgod, ki povzročajo obratne motnje. Z vso pravico smo postavili zahtevo obratne varnosti v ospredje transformacijskih nalog. Tako smo prišli do obratne rezerve.

Iz tega novega problema so se začele dvigati ideji velikega transformatorja nevarne ostrine. Če bi jih bili sprejeli takšne, kakršne so, bi bili doživeli enkratno zastojo v naraščanju močnosti, morda celo enkratno umik, toda po prestanem udarcu bi bili lahko nemoteno sledili vzgonu veletransformatorske ideje.

Ubrali smo drugo pot. Presekali smo problem obratne rezerve, namreč stabilne obratne rezerve, in se vrgli v objem novi, nekoliko drzni, toda mnogo obetajoči ideji: ideji potujočega rezervnega transformatorja. Šele s tem smo se dokončno zagostili v železniški profil.

Ni popolnoma izključeno, da bomo vendarle dosegli smoter, ki ga živo električno gospodarstvo sploh more postaviti ideji velikega transformatorja, čeprav smo si nakopali borbo z železniškim profilom. Če pa bomo prej omagali, bomo pač morali vnovič načeti problem obratne rezerve, vsaj v območju zelo velikih močnosti.

Toda na poti do tistih največjih močnosti, ki jih živo električno gospodarstvo sploh more zahtevati od transformatorske panoge, leže vsekakor zaključni veletransformatorski problemi. Zató je dovoljeno govoriti o njih. Smemo pa začasno tako govoriti o njih, kot da bi veljali samó potujočemu veletransformatorju.

Prenos zelo velikih močnosti čez velike razdalje pa načanja nepričakovana vprašanja, ki so danes še vsa nerazčiščena in polna nepričakovanih možnosti. Danes je že skoraj gotovo, da moramo resno misliti na prenašanje velikih močnosti s pomočjo istosmernega toka. Morda smo v območju veleprenosa bližji preusmeritvi elektrotehnike kot mislimo.

Prav lahko je mogoče, da bo živo električno gospodarstvo vrinilo med najvišje praktično potrebne močnosti in one, ki jih potujoči veletransformator morda res še more doseči, veleprenos z istosmernim tokom. Če bo to res storilo, bodo za-

ključni problemi potujočega veletransformatorja najbrže ostali zaključni problemi veletransformatorske panoge.

Seveda je res, da bo veleprenos z istosmernim tokom, če se bo uveljavil in odrinil vrtilni tok, po vsem videzu vendarle potreboval transformacijo in z njo transformatorje, veletransformatorje pred vsem. Tem pa ne veljajo raziskavanja te razprave. Govoriti o svojevrstnih velikih transformatorjih, ki bodo gotovo imeli svoje posebne probleme — saj prav za prav še ne vemo natančno kakšne —, kot da bi bili trofazni transformatorji preizkušene kova. bi bilo nedvomno nedopustno.

Ta razprava velja veliki ideji one panoge, ki je vodila elektrotehniko iz skromnih začetkov v neslutene uspehe. Zastavili smo si dovolj obširno nalogo. Pa saj je niti izčrpati ne moremo. Zaključni problemi sedanjih velikih transformatorjev se še razvijajo. Poglejmo, kakšni so danes:

60. V svoji knjigi „Die Transformatoren“ (J. Springer, Berlin, 2. izdaja, str. 649) je avtor 1925. l. opisal trofazni veletransformator za 30.000 kVA, 50 Hz, 26.000/104.000 V, ki ga je zgradila tvrdka Siemens-Schuckert-Werke v Nürnbergu. Iz slik, ki spremljajo opis, je razvidno, da je imel ta velikan sicer železno jedro navadnega, evropskega trofaznega kova, da pa so stebri dobili štirioglate prereze namesto običajnih okroglih in da je bilo navitje „dvojno koncentrično“. Toda to dvoje ne pomeni mnogo in ne vdira nikjer v normalni ustroj trofaznega transformatorja. Opisne slike pa opozarjajo s poudarkom na transportni problem: veletransformator za 30.000 kVA je pred dvajsetimi leti izkoristil vso višino železniškega profila, pa še celo svoje prevodne izolatorje, ki mu v obratu sedé na pokrovu kotla, je snel, ko se je podal na potovanje.

Kako je bilo le mogoče, premostiti ogromno vrzel med 30.000 kVA, 104.000 V in 120.000 kVA, 220.000 V pod neizprosnim pritiskom železniškega profila? Kaj se je zgodilo v transformatorski panogi v teku zadnjih dvajsetih let, da konstrukcijska višina vkljub štirikratni močnosti ni postala večja? Po vseh pravilih bi se bila morala vendar:

$$\sqrt[4]{4} = 1,41 \text{ krat}$$

povečati. So li elektromagnetne gostote v zadnjem času tako bujno šle v klasje?

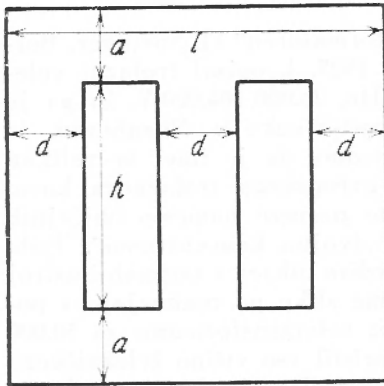
Kar koli se je zgodilo: na svoji zadnji obrambni črti, v borbi oblike železnega jedra z železniškim profilom, je veletransformator izvojeval sijajno, prebojno zmago. Saj ni smel večati svojih elektromagnetnih gostot, ker bi bil sicer izgubil

svoj smisel. Kar je dosegel, je dosegel brez gospodarskih žrtev.

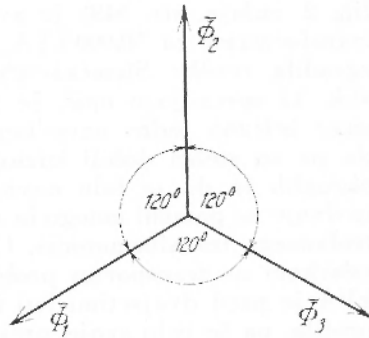
Poučeni graditelj veletransformatorjev pozna skrivnost te velike zmage: tako imenovano peterostebarno jedro jo je omogočilo. V svojem članku „Der funfschenklige Eisenkern des dreiphasigen Grosstransformators“ (Archiv für Elektrotechnik) je avtor že 1931. leta dokazal, da prihrani peterostebarno jedro običajnemu trostebnemu nekako eno tretjino konstruktivne višine.

Oglejmo si najprej normalno trostebarno jedro! Steber naj ima premer  $d$ , in dolžino  $h$ , jarem pa dolžino  $l$  in višino  $a$  (slika 26). Jarma in stebri naj imajo povsod isti železni prerez. Konstruktivna višina vsega jedra je potemtakem:

$$H = h + 2a.$$



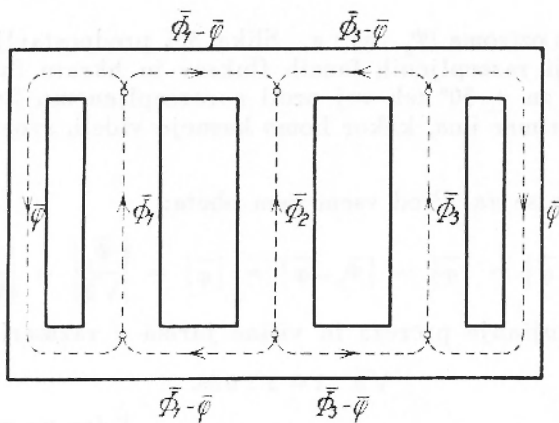
Slika 26.



Slika 27.

Ker služi vsak steber svoji fazi, morajo biti fazni fluksi sicer enako močni, toda po  $120^\circ$  drug proti drugemu v fazi premaknjeni (slika 27). Pod in nad srednjim stebrom se v jarmih fazni fluksi združujejo v vsoto nič. V jarmih poljejo fluksi, ki imajo seveda isto jakost kot fluksi v stebrih. Zato dobi jarem trostebarnega jedra isti železni prerez kot steber.

Če dodam trostebnemu jedru dva dodatna, pomožna, stebra (slika 28), ki pa naj ne nosita nobenih navitij, odprem fluksova obeh zunanjih pravih stebrov stranske poti. Prav za prav sta torej pomožna stebra le nekakšna pomožna jarma. Iz zunanjega pravega stebra prihajajoči fluks  $\bar{\Phi}_1$  se razcepi v dve veji. Delni fluks  $\bar{\Phi}$  se sklone čez pomožni steber, ostanek  $\bar{\Phi}_1 - \bar{\Phi}$  pa krene po stari poti proti navadnemu shajališču vseh treh faznih fluksov.



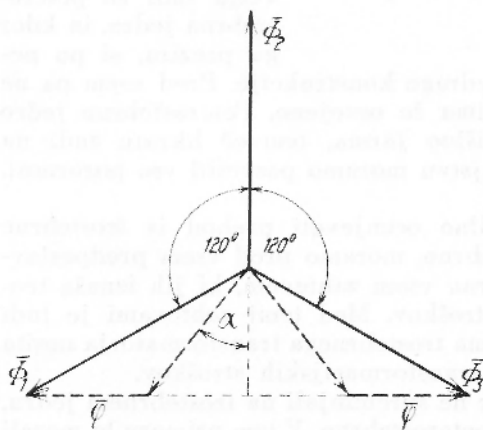
Slika 28.

Takoj je jasno, da jarem ne potrebuje več istega prereza, kot ga ima steber. Ista magnetna gostota zahteva nedvomno

$$\frac{\Phi_1 - \bar{\varphi}}{\Phi_1} \text{ krat}$$

večji prerez, z njim ravno tolikokrat večjo višino jarma in seveda ustrezno večjo konstruktivno višino vsega jedra.

V shajališču vseh treh faznih fluksov, pod in nad srednjim stebrom, mora kajpak slej ko prej nastati vsota nič vseh shajajočih se smernic. Torej mora v kazalčnem diagramu (slika 29) kazalec  $\bar{\varphi}$  stati pravokotno na kazalcu fluksa  $\bar{\Phi}_2$  srednje faze, razen tega pa mora tudi fluks v drugem zunanjem stebri



Slika 29.

mora tudi fluks v drugem zunanjem stebri  $\bar{\Phi}_3$  pognati vejo  $\bar{\varphi}$  čez svoj pomožni steber.

Lahko je uvideti, da so možne najrazličnejše cepitve faznih fluksov  $\bar{\Phi}_1$  in  $\bar{\Phi}_2$ , to se pravi, najrazličnejše relativne jakosti stranskih fluksov  $\bar{\varphi}$ . Razmerje magnetnih uporov v obeh vzporednih strugah, čez pomožni steber in čez pravi jarem, kroji razmerje

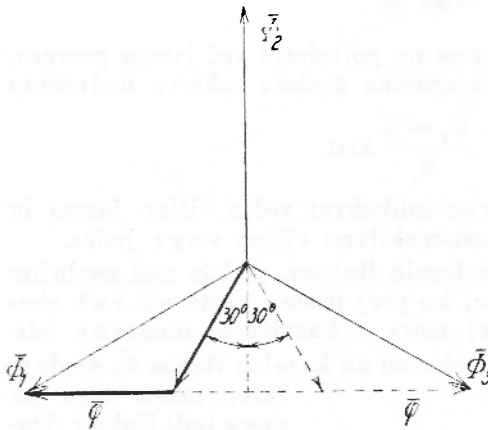
$(\Phi_1 - \varphi) : \varphi$  oziroma  $(\Phi_3 - \varphi) : \varphi$ . Slika 30) predpostavlja enako močni veji razcepljenih faznih fluksov in hkratu fazno premaknitev za  $\pm 30^\circ$  teh vej proti nerazcepljenemu fluksu. Ta posebni primer ima, kakor bomo kasneje videli, svoj poseben pomen.

Držimo se ga! Pred vsem nam obeta:

$$|\bar{\Phi}_1 - \bar{\varphi}| = |\bar{\varphi}| = |\bar{\Phi}_3 - \bar{\varphi}| = |\bar{\varphi}| = \left| \frac{\bar{\Phi}_1}{\sqrt{3}} \right| = \left| \frac{\bar{\Phi}_3}{\sqrt{3}} \right|,$$

torej zmanjšanje prereza in višine jarma v razmerju:

$$\sqrt{3} : 1 \doteq 1 : 0{,}58.$$



Slika 30.

Kdor ne pozna avtorjevega zakona o jarmih, bi utegnil tu se ustaviti in se zadovoljiti z doseženim uspehom. Nekateri teoretiki so res prezrli nadaljne možnosti, ki se skrivajo v ideji peterostebnega jedra in so preprosto ugotovili, da prihrani nova konstrukcija skoraj polno višino enega jarma. Toda zakon o jarmih velja tudi za peterostebna jedra, in kdor ga prezira, si po

potrebem nakopava predrage konstrukcije. Pred vsem pa ne izkorišča zmage, ki jo ima že osvojeno. Peterostebno jedro ne pritiska samó na višino jarma, temveč hkratu tudi na dolžino stebra. Temu dejstvu moramo posvetiti vso pozornost.

61. Če hočemo pravilno ocenjevati prehod iz trostebne konstrukcije v peterostebno, moramo pred vsem predpostavljati, da ustreza trostebna vsem zahtevam, ki jih iznaša teorija transformacijskih stroškov. Med temi zahtevami je tudi zakon o jarmih. Oba jarma trostebnega transformatorja nosita torej eno četrtno vseh transformacijskih stroškov.

Denimo, da bi ničesar ne spreminjali na trostebnem jedru, ko ga izpopolnjujemo v peterostebno. V tem primeru bi morali jarem le nekoliko podaljšati, poleg starih treh stebrov pa

postaviti dva dodatna, šibkejša. Na razmerju med delnimi gradbenimi stroški, ki veljajo jarmoma, in vsemi gradbenimi stroški bi se praktično ne spremenilo skoraj nič.

Toda prerez jarma je sedaj v razmerju  $\sqrt{5} : 1$  prevelik. Če ga naknadno v tem razmerju zmanjšamo — pomožni steber je itak že dobil manjši prerez — se slika močno spremeni: ne samo gradbeni, temveč tudi transformacijski stroški so nenadoma očitno krivično razdeljeni. Jarma nosita v razmerju  $1 : \sqrt{5}$  prešibko gospodarsko breme.

Kaj bomo ukrenili? Če skrajšamo stebre v razmerju  $\sqrt{5} : 1$ , pride zakon o jarmih zopet do veljave. Saj potem jarma vnovič prevzmeta predpisano četrtnino vseh transformacijskih stroškov. Seveda, močnost se nam hkratu zmanjša v istem razmerju  $\sqrt{5} : 1$ , če ne spremenimo elektromagnetnih gostot.

Premajhno peterostebrno železno jedro pa je vendarle dragocena pridobitev. Njegova konstruktivna višina je v razmerju  $\sqrt{5} : 1$  manjša od konstruktivne višine prvotnega trostebrnega jedra. Če se hočemo zopet povzpeti do prvotne močnosti, moramo pač preprosto vse mere premajhnega peterostebrnega jedra v razmerju:

$$(\sqrt{3})^{\frac{1}{2}} : 1$$

povečati.

V tem razmerju se torej konstruktivna višina naknadno zopet zveča. Kakšna je tedaj, ko je ves preoblikovalni postopek zaključen? Nedvomno ostane:

$$\frac{(\sqrt{3})^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{3}} = \frac{1}{(\sqrt{3})^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{1,51} = 0,66 \text{ krat}$$

večja kot je bila v trostebrnem jedru, to se pravi, nekako v razmerju  $5 : 2$  manjša.

Slika peterostebrnega jedra ima še svoje potankosti. Če se poglobimo vanje, opazimo kmalu, da se je po vsem zgoraj opisanem preoblikovanju trostebrne konstrukcije v peterostebrno razmerje med transformacijskimi stroški železa in bakra nekoliko premaknilo: železo je dobilo nekoliko preveliko breme.

To napako, ki pa osnutka znatno ne kvari, popravimo, če hočemo, s tem, da nekoliko zmanjšamo premer stebra in hkratu ojačimo navitje. Seveda prinaša ta popravek le neznatno zmanjšanje konstruktivne invariante.

Podrobni računi — avtor jih je opisal v zgoraj navedenem članku — dokazujejo, da transformacijski stroški peterostebnega transformatorja praktično niso večji od transformacijskih stroškov ustreznega trostebnega. Morebitne razlike, ki jih ni več mogoče izgladiti, ne presegajo dveh, treh odstotkov. Torej je res, da je mogoče navadnemu trofaznemu transformatorju brez pomembnih gospodarskih žrtev znižati konstruktivno višino za celo tretjino.

Dokler v transformatorski panogi ni bilo transportnega problema, seveda tudi ni bilo zanimanja za peterostebno jedro. Čemu naj bi neki spreminjali konstrukcijo, ki je skozi desetletja vzorno služila, če sprememba ne obeta nobene gospodarske koristi. Ko pa se je pojavil transportni problem, je zadostovala že površna ugotovitev, da prihrani peterostebno jedro skoraj polno višino enega jarma: nenadoma je bilo novo trofazno jedro v žarišču veletransformatorske panoge.

Peterostebno jedro ima svoje muhe: dodatni enofazni fluksi, ki se pojavljajo v trofaznih transformatorjih, kadar nastopajo notranje ali pa zunanje obratne nesimetrije, se v njem bohotno razvijajo, in čez obroč, ki ga sestavljata oba jarma z obema pomožnima stebroma, poljejo močni fluksi trojne frekvence. Toda trikotni stik primarnega navitja duši izvrstno vse nesimetrijske enofazne dodatne flukse in magnetni krog jarmov ter pomožnih stebrov dobi vselej lahko svoje posebno dušilno navitje.

Teorija je nazadnje uveljavila zakon o jarmih in peterostebno jedro je dobilo svojo dokončno obliko. Res je, da so veliki transformatorji vedno v službi velike napetosti in da potrebujejo zato na obeh koncih stebrov izdatne izolacijske presledke ( $\Delta$ ). Ti nepoviti konci stebrov so, kakor že vemo, priveski jarmov. Torej ni čisto res, da prihrani peterostebno jedro trostebnemu tretjino konstruktivne višine.

Toda do štirikratne močnosti pa prodre peterostebni transformator vendarle s pravilno spremenjeno konstruktivno višino trostebnega, če že ne doseže:

$$\left[ \frac{\sqrt{3}}{(\sqrt{3})^{\frac{1}{2}}} \right]^4 = 5 \cdot 2 \text{ kratne.}$$

Res je dosegel 120.000 kVA in 220.000 V, čeprav se je trostebni transformator za 50.000 kVA in 104.000 V že pred dvajsetimi leti boril z železniškim profilom.

Velika bitka na notranji obrambni črti pa je v transportnem problemu zaključena. Peterostebrno jedro je po vsem videzu že doseglo, kar je moglo doseči. Svojevrsna oblika, ki je takó izdatno orožje proti trdotam transportnega problema, je iztrošena. Problem potujočega veletransformatorja se zato ozira po novih morebitnih možnostih. Njegova stiska se veča.

62. Teorija transformacijskih stroškov govori neprestano o zadržanih magnetnih gostotah. Ugotovila je, da obeta močno legirana pločevina cenene osnutke, hkratu pa se je prepričala, da je pot do idealnih magnetnih gostot, kakršne zahteva prvovrstna pločevina, zaprta. Vse idealne gostote leže nekako 40 do 50 odstotkov nad mejo, katero po vsem videzu stražijo oziri na vzbujalni tok.

Kdo bi ne gledal čez plot, če mu postaja življenje za njim neznosno? Kdo bi, skrivaj vsaj, ne mislil na teoretično možni skok od že doseženih 120.000 kVA na

$$1,5 \times 120.000 = 180.000 \text{ kVA,}$$

ki ne zahteva nobenih gospodarskih žrtev, ki celó obeta manjšanje dosežene konstruktivne invariante?

Graditelji veletransformatorjev slutijo, da skriva transportni problem še eno veliko možno zmago, samó pot do nje se jim zdi še trdo zaprta. V zadnjih letih govore neprestano o vzbujalnem toku in o njegovem pritisku na magnetno gostoto. Že se oglašajo drznejši posamezniki, ki zahtevajo 16.000, tudi 17.000 gausov v veletransformatorskih jedrih: o 20.000 G in o še višjih gostotah se pa pač še nihče ne upa govoriti, čeprav meri teorija transformacijskih stroškov morda tudi v te višine.

Denimo, da bi vzbujalni tok v območju velikih močnosti izgubil svojo staro oblast. Bi se li veletransformatorska panoga res pognala čez dosedanje gostotne meje? Seveda bi se. In bi res posegla po idealnih gostotah, ki smo jih v nekaterih praktičnih primerih našli onstran 20.000 G?

Odgovor na to drugo vprašanje je težak. Saj ne poznamo magnetnih lastnosti močno legirane pločevine v območju izredno visokih gostot. Predolgo smo bili v okovih vzbujalnega toka, da bi bili začeli s potrebno vestnostjo preiskavati prepovedano gostotno območje. Zató oklevamo, če stojimo pred možnostjo, da se dosedanja gostotna meja podre.

Dozdevne idealne gostote v okolici 20.000 G rastejo v onih raziskavanih transformacijskih stroškov, ki predpostavljajo

naraščanje energijskih izgub v železu z drugo potenco gostote. Kdo pa veruje v eksponent  $u = 2$ ?

V 45. oddelku smo videli, da se idealne magnetne gostote naglo krčijo, če raste  $u$  čez vrednost 2. Morda se torej veletransformatorska panoga udaja varljivim nadam, ko sanja o velikih še možnih zmagah nad transportnim problemom.

Toda pot v območje še večjih močnosti vodi, če sploh, čez gostotno mejo, ki jo že desetletja straži vzbujaalni tok. Zató je sodobna veletransformatorska panoga vsa zaposlena z vzbujaalnimi toki, z njim še ustrezajočimi magnetnimi gostotami in z nadležnimi višefrekvenčnimi spremljevalci osnovnih vzbujaalnih tokov.

Vzbujaalni veletransformatorski problemi so potemtakem najbrže resnični zaključni problemi ideje velikega transformatorja. Saj poleg njih ne najdemo nobenih vprašanj več, ki bi jih dušeči transportni problem še načenjaval. Z magnetno gostoto bomo morda še enkrat, zadnjič, skočili v doslej nedosegljive močnostne višine. Potem pa se bomo samo še plazili naprej, polet bo ostal strt.

Prav za prav bi se moral zadnji zalet veletransformatorja začeti s temeljitim raziskovanjem magnetnih lastnosti močno legirane pločevine. Saj bi bilo nesmiselno se mučiti s problemi izredno velikih magnetnih gostot, če bi teorija transformacijskih stroškov nazadnje morala priznati, da smo idealne magnetne gostote itak že dosegli. S pretiranimi elektromagnetnimi gostotami dosežemo seveda vsako močnost, če hočemo. Toda kdo bo tvegala gospodarske žrtve, če stremi pod vodstvom ideje velikega transformatorja po gospodarskih uspehih?

Morda je torej naravno, da hodijo sodobni graditelji transformatorjev po drugi poti. Sami sebe in pa vso živo elektrotehniko hočejo najprej prepričati, da veletransformatorju vzbujaalni tok ni takó nevaren, kakor se zdi: stari okovi pač še rožljajo za njimi. Podoba je, da je treba pred vsem zdrobiti in odvreči te stare okove, potem pa šele začeti z vdiranjem v doslej nepovedane kraje.

Priznati moramo, da so postali vzbujaalni toki veletransformatorjev, ki se še boje gostotne meje 15.000 G, smešno majhni. Priznati je treba tudi, da kopiči veleprenos popolnoma drugačne probleme, kot jih je imela mlajša prenosna tehnika. Kdor misli na tako imenovano *n a r a v n o p r e n o s n o m o č n ó s t*, gleda transformatorske vzbujaalne toke z drugačnimi očmi, kot jih je gledal prenosni tehnik v tistih časih, ko je bil  $\cos \varphi$  le prepogosto najvažnejši prenosni činitelj. In kogar

skrbé stabilnostni problemi dolgih prenosnih prog, krepki vzbujalni toki res nikakor ne morejo vznemirjati.

Seveda, tisti časi, ko smo izražali transformatorske vzbujalne toke v odstotkih bremenskih tokov in bili zadovoljni, če smo videli, da imamo opravka s 5, 6 ali celo 8 jalovimi odstotki, so minuli. Danes se zavedamo, da imamo v istem transformatorju celo verigo vzbujalnih tokov in za nadležnost teh po frekvenci med seboj razlikujočih se vzbujalnih tokov imamo svojevrsten, nov, način ocenjevanja.

V približnih slikah nam določuje zmnožek:

$$f \cdot l = \text{konst.},$$

dolžine  $l$  prenosne proge in frekvence  $f$  vzbujalnega toka, rezonančno konstanto, kateri se po možnosti izogibamo. V starih časih so bile prenosne razdalje pohlevne in rezonančne nevarnosti so se skrivale v visokih frekvencah. Kdo pa se je menil za višefrekvenčni vzbujalni tokovni nameček 13- ali 11-kratne osnovne frekvence? Saj ga komaj opazimo, tako neznamenat je. V tistih časih smo imeli prav, da smo mislili samo na dodatno obremenjevanje prenosnih žil, če smo ocenjevali transformatorske vzbujalne toke.

Prenosne razdalje so neprestano rastle, ko se je elektrotehnika lotevala večjih in večjih elektrifikacijskih problemov. Zato je rezonančna nevarnost, ki čepi v vzbujalnih tokih, počasi lezla v območje nižjih frekvenc. Dosegla je sedemkratno, tudi petkratno osnovno frekvenco. Našla pa je hkratu ustrezne višefrekvenčne vzbujalne toke, ki niso bili več neznamiti. Znamo je, da so višefrekvenčni vzbujalni toki relativno tem jačji, čim manjša je njihova frekvenca.

Veletransformator ima morda res samo še 2-odstotni vzbujalni tok, med tem ko se transformator za 100 kVA težko ubrani 8-odstotnega. Toda veletransformatorski vzbujalni spremljevalec osnovnega vzbujalnega toka s petkratno frekvenco je vendarle relativno mnogo jačji od malotransformatorskega spremljevalca enajstkrate frekvence, čeprav obeta veletransformator štirikrat ugodnejšo vzbujalno sliko. Skratka: veletransformator ni s svojimi vzbujalnimi toki manj nadležen od malega transformatorja, če merimo nadležnost z rezonančnimi nevarnostmi, čeprav spoštuje gostotno mejo, ki so nam jo v starih časih potegnili oziri na jalove vzbujalne toke.

To spoznanje pada kajpak kot ledena slana na vse nade, ki se oklepajo dozdevnih idealnih magnetnih gostot in obetajo

veletransformatorju zadnji energični dvig. Rezonančne nevarnosti so ustvarile nov, obsežen problemski kompleks, ki objema že vso transformatorsko panogo. Zrastle so iz veleprenosa, torej le posredno iz veletransformatorske panoge. Mimo njih pa seveda veliki transformator nima poti. Zato je krenil skozi nje.

63. Med najčudovitejše ideje sodi v transformatorski panogi nedvomno izločitev višefrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosne proge, katero so začeli tako nadležno ogrožati z rezonančnimi pojavi. Da je mogoče dovajati transformatorju neobhodno potrebne vzbujalne toke trojne, petorne, sedmorne in devetorne frekvence, ne da bi pritekali po prenosni prog, kateri transformator služi, ne da bi sploh prihajali iz katerega koli zunanjega vira, je vsakemu nepoučenemu opazovalcu nepojmljivo. Pa saj je res skoraj čudežno.

Izločevanje višefrekvenčnih vzbujalnih tokov iz vidnega obrata se je v transformatorski panogi začelo že pred desetletji, toda vtihotapilo se je, ne da bi graditelji transformatorjev spöčetka sploh opazili, kaj se godi. V svojih začetkih se je lotilo vzbujalnega toka trojne in devetorne frekvence, prav za prav vseh frekvenc, ki tvorijo skupino trikratne osnovne frekvence.

Trofazni transformatorji evropskega kova vise navadno na trožilnih omrežjih, ki nimajo neutralnega vodnika. Ker je poleg tega zvezdni stik najcenejši stik primarnega transformatorskega navitja, je evropski trofazni transformator že v svoji mladosti zašel v neprijetno zagato: neobhodno potrebni vzbujalni fazni toki trojne, devetorne, petnajstorne itd. frekvence mu sploh niso mogli dotekati. Presenetljivo je le, da te zagate dolgo nihče ni opazil.

Zadeva je preprosta. Osnovni fazni vzbujalni toki so drug proti drugemu za 120 električnih stopinj premaknjeni, ker služijo trem tako ustrojenim faznim fluksom. Njihovi spremljevalci iz družine trojne frekvence dobe nujno  $5 \times 120$  električnih stopinj fazne premaknitve, to se pravi: istofazni so. Zato je izključeno, da bi se v zvezdišču trofaznega sistema seštevali v vsoto nič. Zato pa je tudi izključeno, da bi transformatorju sploh mogli dotekati.

Napetostno ravnotežje v primarnem navitju zahteva neizprosno svoj trofazni sinusni fluks, če je transformatorju vsiljeni napetostni sistem sinusen. Transformator mora dobiti

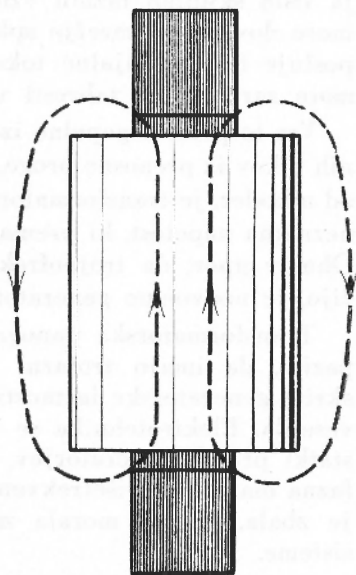
svoje višefrekvenčne fazne vzbujalne toke, tudi vse tiste, ki so člani trojnofrekvenčne družine. Toda od kod naj jih vzame?

Vtihataplja jih. Hkratu z njimi vleče iz omrežja nepotrebne enako močne, toda nasprotno usmerjene fazne vzbujalne toke trojnofrekvenčne skupine. Na videz se igramo z besedami: plus a in minus a je nič, transformator ostane torej brez teh vzbujalnih tokov. Videz pa vara. Transformator dobi res svoje potrebne vzbujalne toke iz kočljive trojnofrekvenčne skupine, ki mu pomagajo graditi trofazni fluks, dobi pa za nameček nepotrebne vzbujalne toke iste frekvence z nasprotno smerjo. Vprašanje je le, kako se ta nezaželeni nameček izživlja.

Vsa slika, ki smo jo tu sestavili, ostane pravilna, če zamenjamo zvezdni stik primarnega navitja s trikotnikom. Toda v trikotu sklenjeno trofazno navitje prinaša nov element: faznim tokom, ki postanejo kot pripadniki trojnofrekvenčne skupine istofazni, nudi praktično na kratko sklenjeno pot, ki ostane prenosni progi skrita. Ohmov upor te sklenjene poti je navadno tako neznamenat, da ga ni treba upoštevati, dokler ne iščemo zelo natančnih slik.

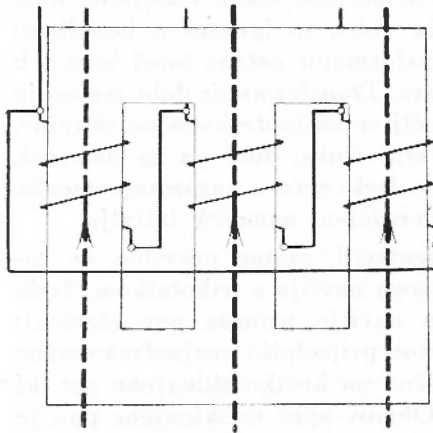
Poglejmo sedaj, kaj počenja-jo nezaželeni, ker nepotrebni dodatni negativni vzbujalni toki trojnofrekvenčne skupine. Ker so na vseh treh stebrih transformatorja istofazni, vzbujajo dodatni enofazni, toda v tri veje razcepljen fluks ustrezne frekvence, ki sklepa svoje smernice skozi zrak v okolici železnega jedra (slika 31).

Ni treba, da raziskujemo posledice tega nezaželenega dodatnega fluksa v transformatorjih, ki sklepajo svoja primarna navitja v zvezdo. Tu nas zanima trikotni stik. Ta stik pa ovija okoli dodatnega fluksa dušilno, praktično na kratko sklenjeno, iz vseh treh primarnih faznih navitij sestavljeno tuljavo (slika 32).



Slika 31.

Seveda inducira oviti dodatni fluks v dušilni tuljavi napetost, ta pa požene po sklenjeni poti tok. Ohmov upor — edini, ki ovira tok — je neznatn. Torej more nastati le



Slika 52.

neznatna napetost, z drugimi besedami povedano: dodatni fluks izgine skoraj popolnoma, kratkostični tok pa doseže skoraj polno višino onega, ki je vzbudil dodatni fluks, obdrži pa nasprotno smer.

Zaključna slika je potemtakem preprosta: v trikotu primarnega navitja krožijo toki trojnofrekvenčne skupine, ki imajo pravo smer in skoraj natančno pravilno jakost potrebnih vzbujalnih tokov trojnofrekvenčne skupine.

Primarno v trikotu sklenjeno navitje si takorekoč samo ustvarja tisto skupino faznih vzbujalnih tokov, ki je omrežje ne more dovajati. Omrežje sploh ne opazi, da transformator zaposluje tudi vzbujalne toke trojnofrekvenčne skupine in ne more zaradi njih zabresti v nikakršne rezonančne nepravilike.

Vse to pomeni popolno izločitev trojnofrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosne proge. Ker pa ti toki očitno ne pritekajo od nikoder, je transformator nedvomno njihov generator. Tista neznatna napetost, ki premaguje v trikotu primarnega navitja Ohmov upor, da trojnofrekvenčni vzbujalni toki lahko krožijo, je nedvomno generatorska napetost.

Transformatorska panoga je šele v svojih zrelih letih zapazila, da imajo trofazni transformatorji evropskega kova skrite generatorske lastnosti. Ko jih je odkrila, se jih ni razveselila. Elektrotehnika se je skozi desetletja borila z nedostatki pravih generatorjev, ki so le preradi zastrupljali trofazna omrežja z višefrekvenčnimi napetostmi in opravičeno se je zbalala, da bo morala znova začeti čistiti svoje trofazne sisteme.

Vsekakor: izločitev trojnofrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosnih prog s pomočjo v trikotu sklenjenih primarnih na-

vitij je čudovita pridobitev transformatorske tehnike. Prišla je skoraj neopažena. Še čudovitejša pa je izločitev vzbujalnih tokov petkratne in sedemkratne osnovne frekvence. Prinesel jo je peterostebrni transformator, zrastle je torej prav za prav na trdih tleh veletransformatorskega transportnega problema.

64. V 60. oddelku smo govorili o tem, da se v peterostebrnem jedru fazna fluksa ( $\bar{\Phi}_1$  in  $\bar{\Phi}_3$ ), ki prihajata iz zunanjih dveh pravih stebrov, cepita, ko prestopata v jarem. Ena veja se jima sklene čez dodatni steber, ki je prav za prav pomožni jarem. Ugotovili smo na istem mestu tudi, da sta le v posebnem primeru plod cepitve dve enako močni veji, torej dva enako močna delna fazna fluksa, ki pa sta za  $+50$  oziroma  $-50$  električnih stopinj v fazi proti necepljenemu fluksu premaknjena.

To sliko moramo izpopolniti: tudi iz srednjega stebra prihajajoči fazni fluks ( $\bar{\Phi}_2$ ) se cepi na dve veji, ko prestopa v jarem. Saj se cepi že v trostebrnem jedru, v katerem ostaneta ostala dva fazna fluksa necepljena. V pravkar omenjenem posebnem primeru pa cepi peterostebrni transformator svojemu srednjemu steburu fazni fluks seveda v dve enako močni veji kakor v neštetih drugih možnih primerih, toda ti dve veji očitujeta isto fazno premaknitev za  $+50$  oziroma  $-50$  električnih stopinj proti necepljenemu deblu kakor veji zunanjih dveh faznih fluksov. To dejstvo razberemo iz kazalčne slike 30) brez težav.

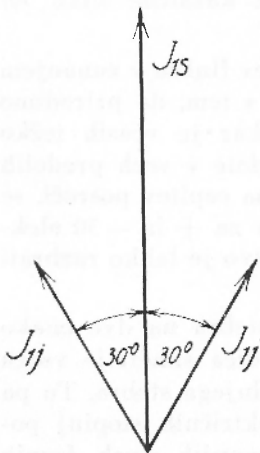
Lahko pa je uvideti, da dosežemo cepitev fluksa v zunanjem pravem steburu na dve enako močni veji s tem, da priredimo vejama enako velika magnetna upora, kar je včasih težko doseči, če se oklepamo iste magnetne gostote v vseh predelih peterostebrnega jedra. Če pa se ta posebna cepitev posreči, se pojavi spremljajoča jo fazna premaknitev za  $+$  in  $-50$  električnih stopinj sama od sebe. Tudi to dejstvo je lahko razbrati iz kazalčne slike 30.

Cepitev faznega fluksa iz srednjega stebra na dve enako močni veji je nedvomno preprosta posledica simetrije vsega peterostebrnega jedra z ozirom na os srednjega stebra. Tu pa je fazna premaknitev za  $+$  in  $-50$  električnih stopinj povezana s posebnim načinom cepitve zunanjih dveh faznih fluksov; le če se tam pojavi ta posebna fazna premaknitev,

se vleže tudi na srednji steber. Vse to je razvidno iz kazalčne slike 30.

Najbrže so prvi graditelji peterostebrih transformatorjev le nekako instinktivno posegli po opisani posebni ureditvi trofaznega fluksa, po oni med neštetimi možnimi, ki obetajo nekakšne delne simetrije. Tiste fazne premaknitve za  $+30$  električnih stopinj jim s početka gotovo niso mnogo pomenile: važnejša se jim je nedvomno zdela enaka jakost vej cepljenih faznih fluksov. Desetletja je trajalo, preden je transformatorska panoga odkrila, da obeta skupno vzbujanje cepljenega in necepljenega fluksa čudovite možnosti in da se skriva za tistimi posebnimi faznimi premaknitvami za  $+30$  in  $-30$  električnih stopinj rešitev naloge, ki išče izločitev vzbujalnih tokov pet- in sedemkratne osnovne frekvence iz občutljive prenosne proge, izločitev, ki je še mnogo čudovitejša od one, ki se je posrečila vzbujalnim tokom trojne frekvence.

Primarno fazno navitje, ki skrbi za vzbujanje faznega fluksa, sedi na stebru in oklepa še necepljeni fazni fluks. Vzbujalni tok združi v navitju dve seštevajoči se skupini vzbujalnih pretokov: prva ustreza poti smernic skozi steber, druga pa rezultanti onih dveh enako močnih, toda za  $+30$  in  $-30$  električnih stopinj premaknjenih delnih vzbujalnih pretokov, ki jih potrebujeta veji že cepljenega fluksa. Prav za prav velja ta slika samó vzbujalnemu toku osnovne frekvence. Poglobimo se nekoliko vanjo (slika 33)!



Slika 33.

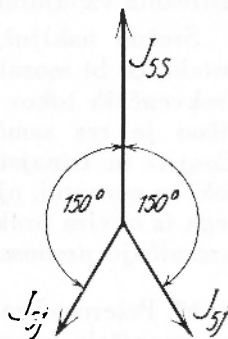
Lahko je uvideti, da bi ostal ustroj kazalčne slike isti, če bi se fazni fluks ne cepil na enako močni veji. V vsakem primeru potrebuje primarno navitje vsoto dveh skupin vzbujalnih pretokov in v vsakem primeru ustreza cepljenemu delu fluksa rezultanta potrebnih delnih vzbujalnih pretokov. Slika 29) pa tudi ne zahteva nobenega posebnega razmerja med obema skupinama ampernih ovojev, ki se združujeta v celotno magnetno napetost navitja. Pa saj ne sledimo nobenemu posebnemu smotru, ko gradimo vzbujalne pretoke osnovne frekvence.

Sinusni fluksi potrebujejo poleg osnovnih vselej tudi višefrekvenčne vzbujalne toke. Seveda ima ves kompleks vzbujalnih tokov, ki služi svojemu

sinusnemu fluksu, svoj trden ustroj: viški vseh vzbujalnih tokov pritisnejo v trenutku, ko velja pognati fluks na najvišjo gostoto, vsi v isto smer. Zató nastanejo med višefrekvenčnimi vzbujalci cepljenih delov faznih fluksov svojevrstne fazne premaknitve.

Če sta osnovna vzbujalca vej faznega fluksa za  $+$  in  $-$  50 električnih stopinj proti rezultanti premaknjena, morata na pr. njihova spremljevalca petkratne frekvence stopiti v fazno premaknitev  $+$  in  $-$  ( $5 \times 50$ ) električnih stopinj proti spremljevalcu petkratne frekvence, ki bi ga normalno imela rezultanta osnovnih vzbujalcev.

Iz tega pa sledi takoj, da se rezultanta vzbujalnih tokov petkratne frekvence, ki jih potrebuje razcepljeni fluks, obrne za 180 električnih stopinj proti spremljevalcu petkratne frekvence osnovnega vzbujalca, ki služi necepljenemu delu fluksa (slika 34). Vsota vseh potrebnih vzbujalnih tokov petkratne frekvence postane tedaj lahko nič: ta višefrekvenčni tok izgine potem popolnoma, ne samo iz prenosne proge, temveč tudi iz transformatorja. Treba je le urediti peterostebрно jedro takó, da potrebujeta cepljeni in necepljeni del faznega fluksa isti magnetni napetosti.



Slika 34.

Zeló podobno sliko dobimo, če raziskujemo ustroj delnih vzbujalnih tokov sedemkratne osnovne frekvence. Njihove fazne premaknitve so seveda  $\pm$  ( $5 \times 70$ ) električnih stopinj, torej ravno tako ( $180 \pm 50$ ) stopinj kot v primeru petkratne frekvence, le vrstni red je obrnjen. Vnovič, in pod istimi pogoji, postane vsota vseh potrebnih vzbujalnih tokov sedemkratne frekvence lahko nič.

Kočljivi problem nadležnih vzbujalnih tokov pet- in sedemkratne frekvence je tedaj v peterosteburnem jedru temeljito in vrh vsega z istim ukrepom rešljiv: stebri in jarmi si tako rekoč medsebojno izposojajo potrebne višefrekvenčne toke, ki jih nimajo, ker jih od nikoder ne dobivajo. Pojav je čudovit, skoraj čudežen, pa vendar popolnoma realen: sodobna transformatorska panoga ga je že s polnim uspehom uresničila in izkoristila.

Pojav pa se pošastno zverži, če ima opravka s trojno frekvenco. Nji ustrezata fazni premaknitvi  $+$  ( $5 \times 30$ ) in

—  $(3 \times 30)$  električnih stopinj. Cepljeni del fluksa potrebuje očitno dva vzbujalca trojne frekvence, ki se uničujeta. Zato je nemogoče iz skupnega vzbujalnega navitja vplivati na trojno-frekvenčni del magnetnega obrata v jarmih in samó zato poljejo v okviru, ki ga sestavljajo pomožni stebri in jarmi, močni dodatni fluksi trojne frekvence, ki jih je treba dušiti.

Kar velja za trojno, velja tudi za devetkratno osnovno frekvenco. Onkraj te pa ležita enajst- in trinajstkratna frekvenca, ki pa vzbujalnemu problemu ne pomenita skoraj nič. Njuni toki so že silno šibki. Če bi ne bili, če bi itak ne zaslužili nobene pozornosti, bi jim ne mogli do živega. Fazna premaknitev, ki je tako izdatno pomagala uničevati nadležne vzbujalce pet- in sedemkratne frekvence, je brez moči, če se spremeni v  $\pm (11 \times 30) = 360 \pm 30$ , oziroma  $\pm (13 \times 30) = 360 \pm 30$  električnih stopinj, saj vendar izsili istofaznost ustreznih vzbujalnih tokov za cepljeni in necepljeni del fluksa.

Srečno naključje nam je prihranilo razočaranje, ki bi ostalo, če bi morali priznati, da je problem izločevanja višefrekvenčnih tokov iz prenosne proge le delno rešljiv. Teoretično je res samó delno rešljiv, praktično pa popolnoma. Enajst- in trinajstkratna frekvenca sta brez pomena. Njuni toki so neznatni, njune rezonančne nevarnosti pa padajo razen tega iz okvira praktičnih možnosti, bolje rečeno potreb, ki jih uresničuje prenosna tehnika.

65. Peterostebrno jedro je trofaznemu transformatorju izdatno zmanjšalo konstruktivno višino in s tem izvojevalo sijajno zmago nad veletransformatorskim transportnim problemom, skrivaj pa je tudi odprlo pot do izločevanja višefrekvenčnih vzbujalnih tokov iz prenosnih prog. Veletransformatorskim vzbujalnim tokom je praktično omogočilo čisto enobarvno sinusno obliko: druga zelo izdatna zmaga nad transportnim problemom se obeta veletransformatorski panogi, ki prav za prav še ni dokončno dogradila svojega peterostebrnega jedra.

V zadnjem oddelku smo večkrat zadeli ob pogoje, ki jih mora peterostebrno jedro izpolniti, če hoče temeljito izločiti vzbujalne toke pet- in sedemkratne osnovne frekvence. Ti pogoji utesnjujejo oblikovanje jedra, ki naj bi sicer sledilo zahtevam teorije transformacijskih stroškov. Kdor se jim hoče izogniti, mora žrtvovati enomerno magnetno gostoto v vseh delih železnega jedra in si nakopati nove neprilike z višefrekvenčnimi delnimi vzbujalnimi toki.

Ves ta kompleks konstruktivnih vprašanj je danes pač že dokaj preoran, toda veletransformatorska panoga se še muči z njim. Največ preglavic ji dela pač ona nesimetrija v peterostebrnem jedru, ki kvari, morda še mnogo bolj, tudi preprostejše trostebrno jedro: srednji steber ima svoj poseben položaj.

Toda denimo, da bi vseh teh težav ne bilo, da bi se posrečilo dokončno izkoristiti vse, kar peterostebrno jedro obeta. Kaj bi peterostebrni transformator še lahko iztrgal železniškemu profilu, potem ko mu je že s tolikšnim uspehom prilagodil svojo konstruktivno višino?

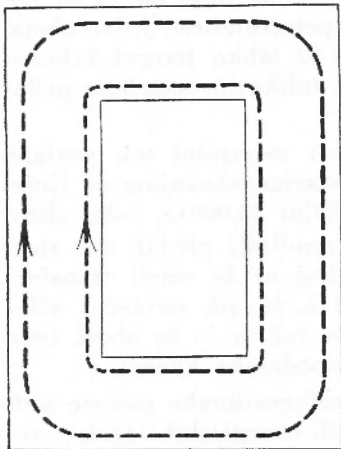
Višefrekvenčnih dodatkov očiščeni vzbujalni tok postane v območju velikih močnosti, če mu starim izkušnjam na ljubo zadržujemo magnetno gostoto v bližini 14.000 G, tako skromen, da začne tudi najprevidnejši graditelj gledati čez stari plot. Saj je res težko povedati, zakaj ne bi smeli transformatorjem-velikanom dovoliti 20.000 G, če jih nevšečni višefrekvenčni vzbujalni toki ne mučijo več in — če obeta tako izdatno zvišana gostota resnične gospodarske koristi.

Med zaključne probleme veletransformatorske panoge sodi potemtakem tudi odvisnost specifičnih energijskih izgub v železu od magnetne gostote. Le na videz je ta nedvomno zanimivi problem čisto fizikalen problem, ki mu tehnika ne more do živega. Železarska tehnika oblikuje vendar že desetletja specifične energijske izgube svojih transformatorskih pločevin. Marsikaj ji je uspelo, prav za prav mnogo več kot smo pričakovali, morda celo več kot smo želeli. Zakaj bi naj ji ne uspelo vplivati tudi na eksponent magnetne gostote, ki vodi specifične energijske izgube skozi gostotno območje od 10.000 do 20.000 G?

Če bi se ta eksponent ustalil na vrednosti 2, bi se veletransformator lahko pognal na 20.000 G in bi s tem dosegel idealni osnutek, ki obeta najmanjšo možno konstruktivno invarianto. In kar je še važnejše: najvišja močnost bi skočila od doseženih 120.000 kVA na 160.000 do 180.000 kVA in 220.000 V ali pa nekako na 150.000 kVA in 400.000 V.

Pa saj ne vemo, kolikšen je eksponent  $u$  v območju še ne uresničenih visokih transformatorskih magnetnih gostot. Morda je le maló prekoračil vrednost 2, morda pa se neprijetno več, ko raste gostota. Skoraj vse dosadenje meritve so se ustavile ob 15.000 G — tolikšen je še strah pred dozdevnimi nevarnostmi močnih vzbujalnih tokov.

Toda priznati je treba, da nam običajne laboratorijske meritve, ki obdelavajo poskusne količine transformatorske pločevine, ne morejo dokončno razčistiti perečega problema. Težava je v tem, da se fluksi v transformatorskih jedrih ne porazdeljujejo enakomerno čez železne prereze. Bežen pogled na preprosto enofazno jedro, ki ga prikazuje slika 35) nam



Slika 35.

pove, da smernice niso vse enako dolge, da je med dolžinama najkrajše in najdaljše — obe sta v sliki 35) naznačeni — celó velika razlika. Oblika železnega jedra posega nedvomno v ustroj delovnega fluksa. Torej bi morale laboratorijske meritve uporabljati ustrezne modele in bi dokončno le tedaj uspele, če bi se oblika veletransformatorskega jedra dokončno ustalila.

Vse to narekuje graditelju veletransformatorjev veliko opreznost in postopno prodiranje v doslej nedoseženo območje visokih magnetnih gostot. V strahu pred morebitnim pre naglim naraščanjem specifičnih energijskih izgub v železu se pripravljamo,

da bomo tvegali 16.000—17.000 G. V tej višini slutimo začasno idealno magnetno gostoto.

Drznejši graditelji pa gotovo že merijo više. Zagotavljanje, da idealni osnutki najbrže ne zahtevajo več kot 17.000 G, ker je eksponent  $u$  v zakonu o specifičnih energijskih izgubah gotovo višji od 2, jih nikakor ne zadržuje.

Kdor sprevidi, da mu je samó strah pred vzbujalnim tokom doslej zadrževal magnetno gostoto v veletransformatorjih na 14.000 — 15.000 G in hkratu kvaril osnutke, je kaj lahko pripravljen, kvariti osnutek v isti izmeri v nasprotno smer. Saj se mu s tem konstruktivna invariants, s katero je bil doslej zadovoljen, ne popači. Zakaj bi torej ne tvegali 20.000 G?

Najbrže bomo reševali gostotni problem nekako takó, kakor rešuje topničar svojega: streljali bomo pred in čez dozdevni smoter, dokler ga nazadnje ne bomo pogodili. Dokler pa bomo le poskušali, bomo skrbno preiskavali svoje zadetke.

Magnetne lastnosti železa so izredno muhaste in se ne prestando izmikajo računom. Treba jih je torej krotiti s sred-

stvi, ki jih ima tehnika poleg teoretskih v izobilju. Seveda, veletransformator je preogromna tvorba, da bi mogel postati eksperimentatorjem igrača. Že zato se bo nedvomno zelo počasi in zelo previdno boril s svojim zaključnim magnetnim problemom.

66.) V prejšnjem oddelku smo razpravljali o možnih visokih magnetnih gostotah, predpostavljali pa smo, da bo peterostebrno jedro kos vsem zahtevam, ki prihajajo iz izločevanja višefrekvenčnih vzbujalnih tokov. Omenili smo nevšečno nesimetrijo, ki potiska srednji steber v poseben položaj.

To nesimetrijo si je nakopala še mlada transformatorska panoga, ko je pred desetletji zavrgla vse starejše oblike trofaznih jeder in postavila osi vseh treh stebrov v eno ravnino. Takrat je dokaj lahkomišlno grešila, saj je vedela, da zahteva trofazni sistem vsestransko simetrijo, to se pravi, popolno enakopravnost svojih treh faz.

Dolgo je šlo vse po sreči. Nihče ni opazil, da se srednjemu steburu godi bolje kot obema zunanjima. Specialisti so seveda vedeli, da potrebuje srednji steber mnogo manjši vzbujalni tok, toda molčali so. Vzbujalni toki so jim bili vedno nadležen nameček transformacije, ki ne zasluži nobenega obzira.

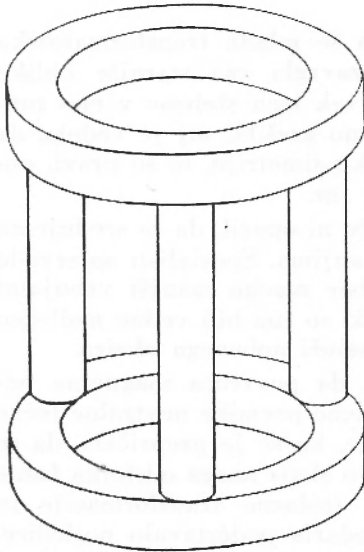
Kasneje je teorija ugotovila, da povzročča magnetna nesimetrija trofaznega jedra nezaželene premike nevtralne točke v transformatorju. Potolažila se je, ko se je prepričala, da so ti premiki neznatni, da ne dosežejo zlepa enega odstotka fazne napetosti. Toda izpopolnjevanje trofazne transformacije in trofaznega prenosa je počasi vendarle podčrtavalo posledice, ki jih prinaša nesimetrija navadnega trofaznega jedra. Stari greh se je začel oglašati.

Peterostebrno jedro ga je prevzelo. V njem pa je začel resno zastrupljati obratne slike. Transformatorska panoga se ga torej z brezbriznostjo ni mogla otresti. Nazadnje ji je postal problem. Zlezal je med zaključne veletransformatorske probleme.

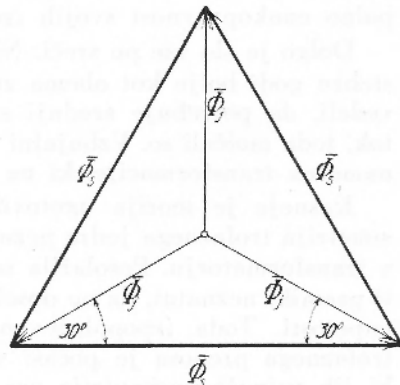
V prvih svojih razvojnih letih pa je transformatorska panoga imela trofazno jedro, ki je bilo popolnoma simetrično. Njegovi trije stebri so stali na oglih enakostraničnega trikotnika in njegova jarma sta bila okrogla. To je bila tako imenovana tempeljska tipa (slika 36). V zadnjem času uhajajo misli specialistov češče in češče, čeprav sramežljivo, k nji nazaj.

Tempeljska tipa združuje fazne flukse na obeh koncih stebrov v trikotnem stiku. Kazalčna slika 37) obrača sicer vrstni red zvezde in trikota, prikazuje pa flukse v stebrih in kosih jarmov pravilno. Jarem nosi očitno v razmerju  $\sqrt{3}:1$  šibkejše flukse kot stebri.

Kazalčni sliki 37) pa odberemo tudi brez težave, da se fazni fluksi, ko izstopajo v trikotni jarem, cepijo v veje, ki so za + in - 30 električnih stopinj proti njim v fazi premaknjene. Vsi ti odnosi so nam že znani: v peterostebnem jedru smo jih našli, toda le v posebnem primeru med neštetimi možnimi.



Slika 36.



Slika 37.

Ta posebni primer nam je postal dragocen: odpri nam je pot do izločevanja višefrekvenčnih vzbujalnih tokov pet- in sedemkratne frekvence. V tempeljski tipi je v idealni obliki uresničen. Nasilno bi morali kvariti ta prikupni model, če bi hoteli skvariti edinstveno ugodne odnose med fluksi v stebrih in jarmih.

Nehoté se sprašujemo: zakaj se neki mučimo z nesimetrijami trostebnih, pred vsem pa peterostebnih jeder, če smo že zdavnaj imeli idealno simetrično jedro, pa še vrh vsega jedro, ki obeta vse, kar nam je prineslo peterostebno in več kot to?

Saj manjša tudi tempeljska tipa konstruktivno višino transformatorja na isti način in prav tako izdatno kot peterostebrno jedro. Brez računa slutimo, da potrebuje tempeljska tipa celó manj železa in bakra kot peterostebrna. Vsestranska simetrija ima namreč prav gotovo svoje posebne in vsestranske prednosti.

Zgornje vprašanje je treba obrniti, da postane užitnejše: zakaj je neki transformatorska panoga zavrgla tempeljsko tipó in se oklenila običajne trofazne, ki združuje osi vseh treh stebrov v eni ravnini? Ker je zagledala neke gradbene prihranke, nekakšno podkupnino za kršitev simetrije? Ker se je zbalá magnetnega trikotnega stika?

Pred petdesetimi leti, ko se je odločevala usoda tempeljske tipe, najbrže nihče ni vedel, da nastajajo v jarmskih trikotih trojnofrekvenčni dodatni fluksi, prav takšni kot v zunanem železnem okviru peterostebrnega jedra. Pa denimo, da bi bili graditelji transformatorjev že takrat odkrili ta zanimivi pojav. Najbrže bi se ne bili mnogo menili zanj. Torej je več kot verjetno, da se magnetnega trikotnega stika niso bali.

Ni pa izključeno, da so videli v novem jedru, ki združuje osi vseh treh stebrov v eni ravnini, cenejšo konstrukcijo od tempeljske. Srednji steber običajne trofazne tipe ne potrebuje nobenega jarmskega železa. To vidi opazovalec s svojim prvim pogledom. To je morda zapeljalo še neizkušeno transformatorsko panogo v nesimetrijski greh.

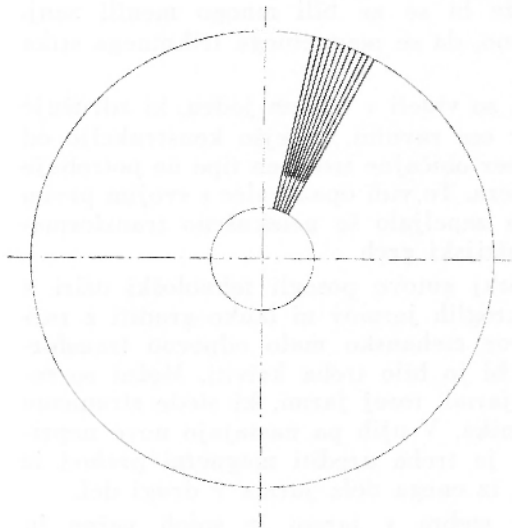
Odločilno pa so skoraj gotovo posegli tehnološki oziri v usodepolni problem. Okroglih jarmov ni lahko graditi z razmeroma krhko, vsekakor mehansko malo odporno transformatorsko pločevino, ki bi jo bilo treba kriviti. Možni so seveda lomljeni trikotni jarmi, torej jarmi, ki slede stranicam enakostraničnega trikotnika. V njih pa nastajajo nove neprilike, tam namreč, kjer je treba urediti magnetni prehod iz stebra v jarem, pa tudi iz enega dela jarma v drugi del.

Magnetni prehod iz stebra v jarem je sploh važen in kočljiv problem. Dosedanja nesimetrična trofazna tipa ga je izvrstno rešila. Njen uspeh pa je očitno plod postavitve vseh treh stebrih osi v eno ravnino.

Danes ne smemo več dovoljevati dodatnih trojnofrekvenčnih fluksov v jarmih. Znano je namreč, da vplivajo takšni dodatni fluksi na vse višefrekvenčne vzbujalne toke in težko je v naprej vedeti kakó. Danes izločujemo vzbujalne toke pet- in sedemkratne frekvence z metodami, ki predpostavljajo, da ni dodatnih magnetnih vplivov.

Naučili smo se dušiti trojnofrekvenčne flukse v trofaznih transformatorskih jedrih in zato se magnetnega trikotnega stika ne bojimo več. Spoznali smo tudi, da običajno trofazno železno jedro ni cenejše od tempeljskega. Nesimetrijski greh iz starih časov nam postaja bolj in bolj neprijeten. Toda tehnološki pomisleki so še vsi živi. Zato se rajši mučimo z nesimetričnim peterostebnim jedrom, ki ima svoj pristen, toda malce skrit trikotni magnetni stik, in se skrivaj tolažimo, da smo rešili dragoceno razvrstitev vseh stebrih osi v eni ravnini.

67.) Prav v zadnjih letih je veletransformatorska panoga tvegala korak, ki ji utegne postati usoden: načela je problem magnetnega prehoda iz stebra v jarem z nove strani. Doslej so stali v vsem transformatorskem jedru, v jarmih in stebrih, vsi odrezki pločevine pokoncu, če so imele osi stebrov to smer. Zdaj pa mislimo na pokoncu stoječe odrezke v stebrih in vodoravne v jarmih.



Slika 58.

Če postavimo v okroglih stebrih odrezke v radialno smer (slika 58), si nakopljemo seveda dokajšnje fabrikacijske nepravilike, toda fluksu odpremo radialen izstop na obeh koncih stebra, ki ga lahko podaljšamo v jarem (slika 59). Pločevinski odrezki jarma in stebra se potem res lahko pravokotno križajo.

Prvi poskusi v novi smeri so se menda dobro obnesli. Prav za prav ni pričakovati neuspehov.

Saj v ideji ni nikjer nobene kočljive točke. Če pa smo res našli dobro novo rešitev za prestopanje fluksa iz stebra v jarem, smo našli hkratu mnogo več, kot bi smeli v prvem trenutku pričakovati.

Pred vsem bi železnemu jedru vnovič lahko zmanjšali konstruktivno višino. Okrogel steber s premerom  $d$  ima navadno najširši paket pločevinskih odrezkov s širino nekako

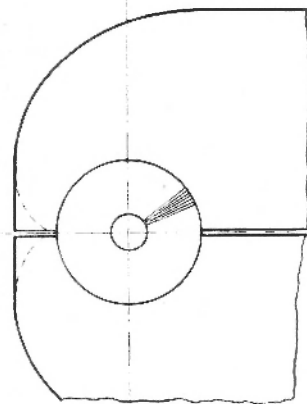
0,9 d. Tolikšna je tedaj tudi višina jarma, če ohranimo jarmu nespremenjeni železni prerez stebra. Isti okrogli steber pa ima obod  $\pi d$  in potrebuje za radialni izstop fluksa v jarem samo nekako 0,225 d dolg konec. Torej prihrani radialni izstop nekako tri četrtine dosedanje jarmske višine, v celem pa poldrugo višino enega dosedanjega jarma.

To bi bil nov ogromen uspeh v borbi s transportnim problemom. Toda nova ideja obeta še nekaj: vsi dosednji tehnološki pomisleki proti uporabi tempeljske tipe bi bili z njeno pomočjo temeljito premagani. Nesimetrijski greh, ki ga vlačimo že desetletja s seboj, bi bil nenadoma izbrisan in odpušen.

Preuranjeno bi bilo, zaključevati račune, ki smo jih komaj načeli. Novotarije morajo previdno vdirati, ker preže presenečenja vedno iz njih. Z opisano novo konstrukcijo stopamo v prvo črto težko se boreče transformatorske panoge, kjer je še vse negotovo in neustaljeno.

Toda filozofu, ki gleda zviška na početje v tem majhnem odlomku človeške delavnosti, se vsiljujejo slutnje in slike, polne minljivosti vsega, kar nastane, raste, dozoreva in ovane. Transformatorska panoga je začela svoje življenje s tempeljsko tipo. Zavrgla jo je in skoraj pozabila. Sedaj pa, v veletransformatorskih zaključnih problemih, se tempeljska tipa zopet oglašča. Življenjski krog se transformatorski panogi sklepa.

Pa saj je dovolj znakov, da življenje transformatorskega problemskega kompleksa ugaša. Že nekaj desetletij normiramo manjše transformatorje. Nekdanja pestrost manjših transformatorskih osnutkov je izginila. Danes ne razpravljamo več o obratnih lastnostih, ki naj jih ima na pr. trofazni transformator za 100 kVA. Vse so nekako že uzakonjene.



Slika 39.

Obratne napetosti so že dolgo normirane. O razdeljevalni napetosti 220 V ne razpravlja nihče. Manjši transformator pozna le nekaj prestav, ki jih naj uveljavi. Za vsako izmed njih ima pripravljene preizkušene bakrene ovojne profile.

Celo v območje velikih močností vdira normiranje. Stabilni veletransformatorji se umikajo potujočim, ti pa se prilagodevajo neizprosnemu železniškemu profilu. Tudi ta profil je prav za prav le neka norma, ki duši.

Vse, kar je normirano, je mrtvo. Transformatorska panoga umira. Umirajo pa seveda le njeni problemi, in zamenjavajo jih uspeli izsledki. Živi so le še veletransformatorski problemi, ki pa vidno pešajo. Saj so res zaključni problemi; življenjski krog transformatorskega problemskega kompleksa se res sklepa.

## POSNETEK

Veliki električni stroji so že prekoračili močnosť 100.000 kVA, in nezadržni naporu iznajdljivih graditeljev jih potiskajo še više. Zakaj gradimo prav za prav velike, še večje in največje stroje, in kje je meja, ki bo vstavila to stremljenje?

Zožena v okvir transformatorske panoge, očitujejo ta vprašanja svojstveno ostrino: podoba je namreč, da smo ravno v transformatorski panogi zelo blizu največji še dosegljivi močnosti. Veletransformatorski problemi so pač že vsi odprli svoje cvete in zdi se, da moramo začeti sestavljati zaključne račune o njih. Tem računom velja ta razprava.

Ideja velikega transformatorja je preprosta: če povečaš enakomerno vse mere nekega dobro zgrajenega transformatorja in mu pustiš elektromagnetni gostoti, dobiš večji, zmogljivejši transformator, ki po vsem videzu ne more biti slabo zgrajen. Ker pa obeta povečevalno načelo  $x$ -kratnemu povečanju vseh mer  $x^4$ -kratno močnosť, toda samo  $x^3$ -kratno težo, je vsako večanje nedvomno koristno: ideja velikega in še večjega transformatorja ima ostro gospodarsko vsebino.

Čeprav smemo trditi, da se vleče ideja velikega transformatorja kakor rdeča nit skozi zgodovino transformatorske panoge, moramo vendarle naknadno brez predsodkov preiskati vse njene svetle in temne točke, preden obračunamo veletransformatorski problemski kompleks: gospodarski vzgon povečevalne ideje je sicer nedvomno silen, toda zaprek, ki mu zapirajo pot, je dovolj.

Naivno bi bilo pred vsem pričakovati, da se večata transformatorju samo močnosť in teža po ločenih poteh, med tem ko se mu oblika in elektromagnetni gostoti ne spreminjajo. Močnosť in teža sta dve obratni lastnosti, toda transformator ima teh več.

Obratna napetost in hladilna površina sta na pr. drugi dve obratni lastnosti, ki se zelo nevšečno razvijata, če se ideja velikega transformatorja ne meni za njune potrebe. Grozeči napetostni preboji in nevarne obratne temperature zapirajo preprosto pot, ki si jo je povečevalna ideja izbrala. Prvotno preveč preprosto idejo je torej treba poglobiti.

Res je mogoče brez gospodarskih žrtev premagati napestostne in temperaturne zapreke: povečevalna ideja se mora le odreči poseganju v notranjost navitja. Zunanja oblika navitja ostane lahko stanovitna, toda razkosavanje navitja v tuljavice in ovoje se mora prilagodovati napetostnim in temperaturnim pritiskom. Tako poglobljena ideja velikega transformatorja je še neoslabljena in ima še ves gospodarski vzgon nepoglobljene. V ustroj transformatorja pa vidno ne posega več, umaknila se je na njegovo površino.

Kaj kmalu so opravljene ostale obratne lastnosti transformatorja: vzbujalni tok, napestostne izgube, kratkostični mehanski in temperaturni pritiski. Vsem je poglobljena povečevalna ideja kos, vse očitujejo dokaj ugodno spreminjanje ob naraščajoči močnosti.

Najzamotanejši del veletransformatorskih problemov je seveda povezan s teorijo transformacijskih stroškov. Ideja velikega transformatorja služi tako očitno gospodarskim stremljenjem, da je nemogoče poleg nje pozabiti na splošna gospodarska stremljenja transformatorske panoge, ki se izživljajo v iskanju najugodnejših transformatorskih osnutkov. Neizbežno je tedaj usodno vprašanje: imajo li res vsi transformatorji, veliki in majhni, enake osnutke, to se pravi, en sam osnutek, kateremu je treba samo spreminjati merilo?

V tej razpravi je avtor z novimi sredstvi načel teorijo najugodnejšega transformatorskega osnutka. Uporabil je idejo, ki jo je sam pred dolgimi leti vnesel v gospodarsko teorijo transformatorske panoge, ne da bi jo bil takrat dodobra izkoristil. Sedaj pa mu je le odprla ugodno pot.

Najprej zanimajo osnutki s predpisanimi elektromagnetnimi gostotami. Že dolgo smo vajeni vzbujalnemu toku na ljubo omejevati magnetno gostoto z nekako 14.000 G. Desetletne borbe s hlajenjem navitij pa so nam zapustile prepričanje, da moramo električno gostoto prikrojiti hladilnemu aparatu. Zato smo le preradi pripravljene vsiljevati osnutkom v naprej določene elektromagnetne gostote.

Teorija nesvobodnih osnutkov je dokaj preprosta, toda previdno mora prebroditi kalne vode tako imenovanih polnilnih faktorjev. Avtor je uvedel nov način za obračunavanje polnilnega faktorja navitij. S pomočjo zgoraj omenjene nove raziskovalne ideje je tudi uspešno ločil vpliv dosegljive močnosti od vpliva gradbenih stroškov. Izsledki so lepo skladni z izkušnjami, ki jih je nakopičila transformatorska panoga.

V svojem drugem delu odvrže teorija transformacijskih stroškov okove, ki so ji jih nekoč nadele hladilne naprave in vzbujalni tok. V svobodnih osnutkih posegata neovirani

elektromagnetni gostoti s svoje strani v račune. Zanimivi gospodarski zakoni, ki jih je avtor že pred dolgimi leti našel, nastopajo v tej študiji v novih oblekah. Zaključni izsledki tega drugega dela transformatorske gospodarske teorije so v marsičem presenetljivi. Pred vsem pa usmerjajo najugodnejše elektromagnetne gostote docela drugače kot jih je usmerjala borba z obratno toploto.

Nehoté zaide razprava v preteklost transformatorske panoge. Pot skozi desetletja, ki jo je prehodil transformator, je poznemu opazovalcu polna zanimivih zapletljajev in poučnih doživljajev. Spomini na dozdevno gospodarsko enakopravnost železa in bakra se oglašajo. Prestane krize stopajo v novo svetlobo: prehod iz zraka v olje, umetno hlajenje, uporaba boljše pločevine.

Toda oziri na vzbujalni tok leže pred vsem kot težka mōra na vsi zgodovini transformatorske panoge. Skozi desetletja so zadržavali magnetno gostoto in tudi danes jo še zadržujejo. Teorija transformacijskih stroškov jih mora nazadnje vendarle posebej upoštevati. Zato stopa v svoj tretji, zaključni del, ko začenja obravnavati osnutke zadržano magnetno, toda svobodno električno gostoto.

Moramo li res zadrževati magnetne gostote, ko gradimo velike, zelo velike transformatorje? Ali nam velika močnost ne obeta težko pričakovanega lajšanja neznosnega vzbujalnega pritiska? Teorija odgovarja, da navadna legirana pločevina ne zahteva doslej nedoseženih magnetnih gostot, da pa je močno legirana mnogo zahtevnejša.

Ostra kritika ne prizanaša teoriji, ki si dovoljuje v svojih temeljnih predpostavkah udobnosti. Naraščanje energijskih izgub v železu s kvadratom magnetne gostote je dvomljivo. Predpostavljamo ga, ker radi udobno računamo. Toda kritika vidi, da se je treba odreči udobnosti, ki je nevarna.

EkspONENT  $u = 2$  v zakonu o naraščanju energijskih izgub v železu odmika idealne magnetne gostote res čez 20.000 G. če uporabljamo najboljšo pločevino, toda močnejši eksponenti jo potiskajo navzdol. Kam? Dokler ne poznamo natančnega zakona o energijskih izgubah v železu, je odgovor težak.

Torej je vendarle treba osnutkom zadržano magnetno gostoto pripraviti teorijo. Izsledki te teorije so izredno zanimivi. Očitujejo pa presenetljivo neodvisnost električne gostote od magnetne. Hkratu opozarjajo na pereče probleme, ki se odpirajo veletransformatorju.

Kakšen je po vsem tem odnos teorije transformacijskih stroškov do ideje velikega transformatorja? Ali se naj transformator res oklepa neke izbrane oblike in nekih elektro-

magnetnih gostot, ko raste? Teorija transformacijskih stroškov odgovarja: ne!

Veliki transformatorji naj dobe relativno debelejše in krajše stebre. Rastoča močnost naj dviga magnetno in tlačí električno gostoto. Teorija transformacijskih stroškov krivi premočrtno idejo velikega transformatorja!

Zakaj? Samó zato, ker rastočemu transformatorju polnilni faktor navitja raste. Oblika in elektromagnetni gostoti bi ostale stanovitne, če bi se polnilni faktor ne spreminjal. Polnilni faktor navitja je torej resnični oblikovalec osnutkov.

Kaj lahko pa je uvideti, da prinaša rastoči polnilni faktor navitij dodatne gospodarske koristi, ki jih prvotna premočrtna ideja velikega transformatorja nima v svojih načrtih. Nespametno bi bilo torej, ne upoštevati nasvetov, ki jih prišepetava teorija transformacijskih stroškov. Saj so ugotovljivo koristni.

Iz dragocene teorije transformacijskih stroškov se dviga pojrn konstruktivne invariante, ki meri osnutke, kroji železnemu jedru obliko, gosti flukse in toke, ki pa posega tudi v važne načelne probleme transformatorske panoge. Z njegovo pomočjo reši razprava nazadnje tudi pereče vprašanje: navadna ali močno legirana pločevina?

Odgovor potrjujejo izkušnje transformatorske panoge: dokler pločevini cena ne raste hitreje kot ji padajo specifične izgube, je treba uporabljati najboljšo pločevino. S tem odgovorom pa postaja dviganje dosedanjih magnetnih gostot resen problem.

Je li na videz potrebno nižanje dosedanjih električnih gostot tudi problem? Odgovor zahteva, da najprej razčistimo pojrn transformatorske močnosti. Dopustna močnost je nekaj drugega kot gospodarska močnost. Tablica, ki jo nosi vsak transformator, govori o dopustni močnosti, o močnosti, ki mu je hladilna naprava ravno še kos. Gospodarska močnost pa mora ležati pod dopustno in obratovatelj ima dolžnost, da si jo sam poišče. Najugodnejša električna gostota ustreza gospodarski močnosti, ki jo graditelj ne pozna, ker ne pozna obrata, v katerem bo transformator delal. Zato so električne gostote vseh idealnih osnutkov znatno nižje od znanih dopustnih.

Do kraja razščiščena teorija transformacijskih stroškov ustreza vsem dosedanjim izkušnjam transformatorske panoge, nazadnje pa zagleda vendarle problem, ki ji greni življenje. Obratna varnost zahteva rezervne transformatorje, ki seveda občutno vplivajo na transformacijske stroške. Pred vsem je rezervni veletransformator resen problem.

Sodobna tehnika je iznašla potujoči veletransformator, ki naj temeljito odpravi problem obratne varnosti. S potujočim veletransformatorjem pa je veletransformatorska panoga zašla v nepričakovano zagato: železniški profil ji predpisuje nedrobljiv okvir, v katerega se mora stisniti največji še možni veletransformator.

Iz zagate ni vidnega izhoda. Železniški profil bo po vsem videzu ideji velikega transformatorja zaključil napore. V stiski se vzbuja plaho upanje, da bo veletransformator v okviru železniškega profila vendarle prodril do močnosti, ki jo električno gospodarstvo sploh še more zahtevati.

Razprava opisuje borbo z železniškim profilom, ki se je začela, ko so bile močnosti še zelo skromne. Utemeljuje zahteve, ki nas gonijo pod trdi jarem železniškega profila in omenja prve obrambne ukrepe veletransformatorske panoge.

Nato se loteva borbe na notranji bojni črti: oblika železnega jedra stopa v boj. Peterostebrni transformator se pojavi v veletransformatorski panogi kot plod transportnega problema in izvojuje sijajno zmago. Močnost mu skoči od 30.000 na 120.000 kVA, 220.000 V.

Zadnji napori transportnega problema se sučejo okoli še nedoseženih, toda priporočljivih magnetnih gostot. Treba je izločiti višefrekvenčne vzbujalne toke iz prenosnih prog, da nam bo očiščeni vzbujalni tok dovolil poslednji vzpon. Peterostebrno jedro dovoljuje reševanje načetega, izredno zanimivega problema.

Toda že se začenjajo oglašati spomini na staro tempeljsko tipo, ki je imela vse prednosti peterostebrnega jedra, ki pa je bila simetrična, kar peterostebrno jedro ni. Ali bomo res posegli daleč nazaj, tja, kjer smo začeli? Se li transformatorskim problemom življenski krog res že sklepa?



## RIASSUNTO

Le grandi macchine elettriche hanno già superato la potenza di 100.000 kVA e gli indomiti sforzi degli ingegnosi costruttori le spingono più oltre ancora. Ma perchè si costruiscono veramente le grandi, le più grandi e le massime macchine, e dov'è il limite che arresterà questa corsa orgogliosa?

Limitate al campo dei trasformatori, le questioni in parola mostrano un loro singolare aspetto: sembra, infatti, che proprio qui si sia prossimi alla massima potenza raggiungibile. I problemi dei trasformatori massimi sono già aperti al vaglio e sembra che dobbiamo, quanto a loro, concludere i nostri calcoli. E proprio a questi calcoli è dedicato il presente trattato.

L'idea del grande trasformatore è semplice: aumentando in modo uniforme tutte le misure di un trasformatore ben costruito — lasciandogli le densità elettromagnetiche, ne risulta un trasformatore più grande, di maggiore potenza, che all'apparenza non è malamente costruito. E poichè il principio dell'ingrandimento promette all'aumento di tutte le misure per  $x$  volte una potenza di  $x^4$  volte, con un peso di sole  $x^3$  volte, non vi è alcun dubbio che ogni ingrandimento sia utile: l'idea del grande trasformatore e del trasformatore massimo ha quindi un contenuto spiccatamente economico.

Sebbene si possa affermare che l'idea del grande trasformatore sia visibile come un filo rosso attraverso tutta la storia del ramo trasformatori, prima di concludere il complesso delle questioni sul trasformatore massimo, ne dobbiamo pur esaminare senza pregiudizi i pregi e i difetti: il fattore economico dell'idea d'ingrandimento, certo, è rilevante, ma non sono pochi neppur gli ostacoli che le sbarrano la strada.

Sarebbe, anzitutto, ingenuo aspettarsi che il trasformatore possa accrescere soltanto di potenza e di peso per vie diverse, mentre la forma e le densità elettromagnetiche non dovrebbero cambiare. La potenza e il peso sono due qualità di esercizio, ma il trasformatore ne ha pure delle altre.

La tensione di esercizio e la superficie di raffreddamento sono, per esempio, due altre qualità di esercizio, che subiscono uno sviluppo assai sgradevole, se l'idea del trasformatore massimo non si prende cura dei loro bisogni. Scariche della tensione

minacciose e temperature di esercizio pericolose ostacolano la semplice via, scelta dall'idea di ingrandimento. È dunque necessario di approfondire la troppo semplice idea primitiva.

È vero che gli ostacoli di tensione e di temperatura sono superabili senza sacrifici economici: l'idea di ingrandimento deve rinunciare solamente di intromettersi nell'interno dell'avvolgimento. La forma esterna dell'avvolgimento può rimanere stabile, ma l'avvolgimento deve smembrarsi nelle bobine e nelle spire adattandosi alle pressioni delle tensioni e delle temperature. L'idea del trasformatore massimo, approfondita in questa maniera, non è affatto ancora indebolita e conserva sempre ancora tutto l'impulso economico di quella non approfondita. Non si intromette però più visibilmente nell'ordinamento del trasformatore, ma si ritira sulla sua superficie.

Ben rapidamente si sbrigliano le rimanenti qualità del trasformatore: la corrente di eccitazione, le perdite di tensione, le pressioni del corto circuito, quelle meccaniche e quelle termiche. L'idea approfondita di ingrandimento può superarle tutte, tutte palesano un cambiamento abbastanza favorevole alla potenza crescente.

Il lato più complicato delle questioni del trasformatore massimo è, naturalmente, connesso con la teoria delle spese di trasformazione. L'idea del trasformatore massimo serve in modo sì evidente alle mire economiche che, in questo rapporto, non si possono ignorare le mete economiche generali del ramo trasformatori, che tendono alla ricerca di progetti di trasformatori più vantaggiosi. Non possiamo dunque evitare la questione fatale: allora tutti i trasformatori, i piccoli come i grandi, hanno dei progetti uguali, cioè un progetto solo, di cui basta cambiare soltanto le misure?

Nel trattato presente, l'autore ha preso di mira, con nuovi mezzi, la teoria del progetto trasformatorio più vantaggioso. Egli si servì dell'idea, da lui stesso introdotta molti anni or sono, nella teoria economica del ramo trasformatori, senza averla sfruttata allora a fondo. Ora, invece, le apre un cammino comodo.

Interessano in primo luogo i progetti a densità elettromagnetiche prescritte. Già da tempo siamo abituati di restringere la densità magnetica a favore della corrente di eccitazione con ca 14.000 G. Lotte col raffreddamento degli avvolgimenti, durate per decenni, ci hanno lasciato la convinzione di dover adattare la densità elettrica all'apparecchio di raffreddamento. Perciò troppo volentieri siamo disposti a imporre ai progetti densità elettromagnetiche anticipatamente determinate.

La teoria dei progetti privi di libertà è ben semplice, ma deve passare cautamente le acque torbide dei cosiddetti fattori del riempimento. L'autore presenta un nuovo modo di calcolare il fattore del riempimento degli avvolgimenti. Con l'aiuto della nuova idea di ricerche sopra menzionata, egli ha separato con successo l'influenza della potenza raggiungibile dall'influenza delle spese di fabbricazione. I risultati armonizzano benissimo con le esperienze accumulate dal ramo trasformatori.

Nella sua seconda parte, la teoria delle spese di trasformazione spezza i vincoli imposti ad essa, tempo addietro, dai dispositivi di raffreddamento e dalla corrente di eccitazione. Nei progetti liberi, le densità elettromagnetiche, da parte loro, entrano liberamente nei calcoli. Leggi economiche interessanti, scoperte dall'autore già da molto tempo, fanno, in questo trattato, la loro apparizione sotto veste nuova. I risultati conclusivi di questa seconda parte della teoria economica trasformatoria sorprendono per vari fatti. Per essi, le densità elettromagnetiche più vantaggiose sono dirette del tutto altrimenti come le aveva dirette la lotta col calore di esercizio.

Il trattato poi svia involontariamente nel passato del ramo trasformatori. La strada, che il trasformatore aveva percorso per decenni, è piena di complicazioni interessanti e di vicende istruttive per l'osservatore ritardato. Si destano ricordi alla equiparazione economica del ferro e del rame. Crisi superate si illuminano ad una luce nuova: la transizione dall'aria all'olio, il raffreddamento artificiale, l'applicazione di latta migliore.

Ma anzitutto i riguardi alla corrente di eccitazione sono quelli che gravano come un'incubo sull'intera storia del ramo trasformatori. Per decenni, essi ritenevano la densità magnetica e la ritengono ancora oggi. La teoria delle spese trasformatorie non può trascurarli. Perciò essa entra nella sua terza e ultima parte, quando comincia a occuparsi dei progetti con densità magnetica ritenuta, ma con libera densità elettrica.

È dunque assolutamente indispensabile di ritenere le densità magnetiche per poter costruire i grandi, i massimi trasformatori? Forse la grande potenza non ci permette l'alleggerimento così anelato della insopportabile pressione di eccitazione? La teoria risponde che la latta di semplice lega non pretende delle densità magnetiche finora non ancora raggiunte, che però quella di lega superiore ha delle pretese maggiori.

La critica rigorosa non può perdonare alla teoria di permettersi delle comodità quanto ai suoi presupposti fondamentali. L'accrescimento delle perdite di energia nel ferro col

quadrato della densità magnetica lascia addito a dubbi. Lo supponiamo, perché ci piace il calcolo comodo. Ma la critica ritiene necessario di rinunciare alla comodità, perché è pericolosa.

L'esponente  $u = 2$  nella legge sull'accrescimento delle perdite di energia nel ferro spinge le densità magnetiche ideali oltre i 20.000 G, ciò è vero, qualora si adopera la latta migliore, ma esponenti più forti le fanno discudere. Dove? Finché non conosciamo la legge esatta delle perdite di energia nel ferro, la risposta è ben difficile.

È dunque necessario di preparare, ciò non ostante, la teoria per i progetti a densità magnetica ritenuta. Interessantissimi i risultati di questa teoria. Mostrano però una sorprendente indipendenza della densità elettrica da quella magnetica. Nel medesimo tempo essi segnalano le questioni di massima urgenza che si aprono al grande trasformatore.

Qual'è, dopo tutto, il rapporto tra la teoria delle spese trasformatorie e l'idea del grande trasformatore? Il trasformatore dovrebbe, crescendo, aggrapparsi a una certa forma determinata e a certe densità elettromagnetiche? La teoria delle spese trasformatorie risponde di no!

I grandi trasformatori hanno bisogno, relativamente, di colonne più grosse e più corte. La potenza crescente sollevi la densità magnetica e abbassi quella elettrica. La teoria delle spese trasformatorie lancia la sua accusa contro l'idea rettilinea del grande trasformatore!

Perché? Soltanto perché il trasformatore crescente migliora il suo fattore del riempimento dell'avvolgimento. La forma e le densità elettromagnetiche resterebbero stabili, se il fattore del riempimento non cambiasse. Il fattore del riempimento dell'avvolgimento è dunque determinante nei progetti.

È ben facile comprendere che il crescente fattore di riempimento dell'avvolgimento offre dei vantaggi economici, che l'idea rettilinea originale del grande trasformatore non includeva nei suoi progetti. Sarebbe allora imprudente non aderire ai consigli suggeriti dalla teoria delle spese trasformatorie, essendone provato il vantaggio.

Dalla preziosa teoria delle spese trasformatorie spunta il concetto della invariante costruttiva che misura i progetti, plasma la forma del nucleo ferreo, addensa il flusso e la corrente e si intromette anche nelle questioni fondamentali del ramo trasformatorio. Col suo aiuto, il presente trattato risolve inline anche la questione più importante: latta semplice o di lega superiore?

La risposta sarà confermata dalle esperienze del ramo trasformatorio: finchè il prezzo della latta non aumenta con maggiore velocità di quanto diminuiscano le perdite specifiche, si deve adoperare la latta migliore. Con questa risposta, l'aumento delle densità magnetiche finora esistenti diventa una questione seria.

O che il ribasso apparentemente necessario delle densità elettriche finora esistenti sia pur esso un problema? La risposta richiede anzitutto un chiarimento del concetto delle potenze trasformatorie. La tabella applicata ad ogni trasformatore indica la potenza ammissibile, la potenza che l'apparecchio di raffreddamento massimamente può sostenere. La potenza economica invece deve aggirarsi al disotto e l'esercite ha il dovere di trovarsela da sè. La densità elettrica più favorevole corrisponde alla potenza economica, sconosciuta al costruttore, non conoscendo egli l'esercizio, nel quale il trasformatore sarà piantato. Perciò le densità elettriche in tutti i progetti ideali sono molto inferiori a quelle ritenute ammissibili.

La teoria delle spese trasformatorie, chiarita esaurientemente, corrisponde a tutte le esperienze finora eseguite nel ramo trasformatori, ma alla fine ci si accorge — ciò non ostante — di una questione che ci amareggia la vita. La sicurezza dell'esercizio richiede dei trasformatori di riserva che naturalmente influiscono sensibilmente sulle spese trasformatorie. Il trasformatore di riserva è una questione oltremodo seria.

La tecnica moderna ha scoperto il grande trasformatore ambulante, che dovrebbe risolvere radicalmente la questione della sicurezza dell'esercizio. Col grande trasformatore ambulante il ramo dei grandi trasformatori è però deviato inaspettatamente in un vicolo cieco: il profilo ferroviario gli impone una cornice infrangibile, alla quale il più grande trasformatore possibile deve adattarsi.

Non si vede la via di uscita da questo impaccio. Il profilo ferroviario porrà evidentemente fine agli sforzi dell'idea del grande trasformatore. In questa angustia si desta la timida speranza, che il grande trasformatore raggiungerà nella cornice del profilo ferroviario pur quella potenza che l'economia elettrica può esigere al massimo.

Il trattato descrive la lotta contro il profilo ferroviario, cominciata quando le pretese erano ancora ben modeste. Vi sono argomentate le esigenze che ci mettono sotto il duro giogo del profilo ferroviario, con la menzione dei primi provvedimenti difensivi da parte del ramo trasformatori.

Quindi la lotta si inizia sul fronte interno: la forma del nucleo ferreo entra nella battaglia. Come frutto della questione del trasporto appare nel ramo trasformatori il trasformatore a cinque colonne e consegue una splendida vittoria. La potenza, in esso, scatta dai 30.000 ai 120.000 kVA, 220.000 V.

I più recenti sforzi del problema di trasporto si aggirano intorno alle densità magnetiche non ancora raggiunte, ma raccomandabili. Le correnti di eccitazione di frequenze superiori si devono eliminare dalle linee di trasmissione, affinché la corrente di eccitazione purificata ci permetta l'ultima salita. Il nucleo a cinque colonne permette una soluzione della interessantissima questione esaminata.

Si destano però i ricordi al vecchio tipo di tempio, che aveva tutti i vantaggi del nucleo a cinque colonne, ma che era simmetrico, quale non è il tipo a cinque colonne. Ritourneremo forse molto indietro, là dove abbiamo cominciato? Il circolo vizioso vitale dei problemi relativi ai trasformatori forse già si chiude?

## ZUSAMMENFASSUNG

Große elektrische Maschinen haben die Scheinleistung von 100.000 kVA bereits überschritten, und unaufhaltbare Anstrengungen erfinderischer Konstrukteure treiben sie immer noch höher. Warum bauen wir eigentlich große, noch größere und größte Maschinen, und wo ist die Grenze, die diesem Streben ein Ende bereiten wird?

Engt man diese Fragen in den Rahmen des Transformatorbaus ein, so bekommen sie eine eigenartige Schärfe: es hat nämlich den Anschein, als wären wir gerade im Transformatorbau der höchsten noch erreichbaren Scheinleistung schon recht nahe. Die Großtransformatorprobleme haben eben schon alle ihre Blüten geöffnet, und es sieht ganz danach aus, als müßten wir mit dem Aufstellen der Schlußabrechnung über sie beginnen. Dieser Schlußabrechnung dient nun die vorliegende Studie.

Die Idee des großen Transformators ist einfach: vergrößert man gleichmäßig alle Abmessungen eines gut gebauten Transformators und beläßt man ihm seine elektromagnetischen Dichten, so bekommt man einen größeren, leistungsfähigeren Transformator, der allem Anschein nach nicht schlecht gebaut sein kann. Weil aber die Vergrößerungsanweisung dem  $x$ -fachen Vergrößern aller Abmessungen die  $x^4$ -fache Scheinleistung, dagegen nur das  $x^3$ -fache Gewicht verspricht, ist jede Vergrößerung unzweifelhaft nützlich: die Idee des großen und des noch größeren Transformators hat einen scharfen wirtschaftlichen Inhalt.

Wir dürfen wohl behaupten, daß die Idee des großen Transformators einen roten Faden durch die Geschichte des Transformatorbaus zieht, gleichwohl müssen wir nachträglich vorurteilslos ihre dunklen und hellen Punkte überprüfen, bevor wir den Problemkomplex des Großtransformators abrechnen: der wirtschaftliche Auftrieb der Vergrößerungsidee ist zwar ohne Zweifel sehr stark, doch an Hindernissen, die ihm den Weg verrammeln, ist kein Mangel.

Vor allem wäre es einfältig zu erwarten, daß dem Transformator nur die Leistung und das Gewicht auf getrennten Wegen wachsen, während seine Gestalt und seine elektromagnetischen Dichten unverändert bleiben. Die Leistung und das

Gewicht sind zwei Betriebseigenschaften, doch der Transformator hat deren mehr.

Die Betriebsspannung und die kühlende Oberfläche sind z. B. zwei weitere Betriebseigenschaften, die sich sehr unangenehm entwickeln, wenn sich die Idee des großen Transformators um ihre Forderungen nicht kümmert. Die drohenden Spannungsdurchschläge und gefährliche Betriebstemperaturen verlegen den einfachen Weg, den die Vergrößerungsidee zunächst eingeschlagen hat. Man muß also die ursprüngliche, zu einfache Idee vertiefen.

Man kann in der Tat um die Spannungs- und Betriebstemperaturhindernisse ohne wirtschaftliche Opfer herumkommen: die Vergrößerungsidee muß nur einfach auf das Eingreifen ins Wicklungsinere verzichten. Die äußere Gestalt der Wicklung kann beständig bleiben, das Zerlegen der Wicklung in Spulen und Windungen muß den Spannungs- und den Temperaturdrücken nachgeben. So vertieft, bleibt die Idee des großen Transformators ungeschwächt, sie behält den noch vollen wirtschaftlichen Auftrieb der unvertieften Vergrößerungsidee. In den inneren Aufbau greift sie allerdings sichtlich nicht mehr ein, sie zieht sich auf die Oberfläche des Transformators zurück.

Leicht sind nun die übrigen Betriebseigenschaften des Transformators erledigt: der Erregerstrom, die Spannungsabfälle, die mechanischen und thermischen Kurzschlußdrücke. Sie alle bereiten der vertieften Vergrößerungsidee keine Schwierigkeiten, sie ändern sich sogar sehr angenehm, wenn die Leistung wächst.

Der schwierigste Teil der Großtransformatorenprobleme hängt selbstverständlich mit der Theorie der Transformationskosten zusammen. Die Idee des großen Transformators dient so offenkundig wirtschaftlichen Bestrebungen, daß es unmöglich ist, neben ihr die allgemeinen wirtschaftlichen Anstrengungen des Transformatorenbaus, die sich im Suchen der günstigen Transformatorenentwürfe ausleben, zu vergessen. Man kann der folgenschweren Frage nicht entgehen: Gibt es denn wirklich gleiche Entwürfe für große und kleine Transformatoren, in Wirklichkeit also nur einen einzigen Entwurf, dem man nur den Ausführungsmaßstab zu ändern hätte?

In der vorliegende Studie griff der Verfasser die Theorie des günstigsten Transformatorenentwurfs mit neuen Werkzeugen an. Er verwertete eine Idee, die er vor Jahren selbst in die Transformatorentheorie einführte, ohne sie damals gründlich ausgenützt zu haben. Jetzt bahnte sie ihm endlich einen bequemen Weg.

Vor allem interessieren Entwürfe mit vorgeschriebenen elektromagnetischen Dichten. Seit langer Zeit sind wir ja gewohnt, aus Rücksicht auf den Erregerstrom die magnetische Dichte mit ungefähr 14.000 G zu begrenzen. Andererseits hinterließen uns jahrzehntelange Kämpfe mit der Wicklungswärmeabfuhr die Überzeugung, daß man die elektrische Dichte der Kühleinrichtung anpassen müsse. Deshalb sind wir nur allzu gerne bereit, den Entwürfen im voraus bestimmte elektromagnetische Dichten aufzuzwingen.

Die Theorie unfreier Entwürfe ist ziemlich einfach, doch muß sie sehr vorsichtig das trübe Wasser der sogenannten Füllfaktoren durchwaten. Der Verfasser führte eine neue Bestimmungswiese für den Kupferfüllfaktor ein. Ausserdem gelang es ihm mit Hilfe der oben erwähnte Untersuchungsidee den Einfluß der erreichbaren Leistung vom Einfluß der Baukosten zu trennen. Die Ergebnisse der so durchgeführten Untersuchungen entsprechen sehr gut den Erfahrungen, die der Transformatorbau aufgehäuft hat.

In ihrem zweiten Teil wirft die Theorie der Transformationskosten die Fesseln, die ihr seinerzeit die Kühleinrichtungen und die Erregerströme angelegt haben, ab. Freie Entwürfen lassen natürlich auch die elektromagnetischen Dichten in die Rechnung eingreifen. In der vorlingenden Studie tauchen wirtschaftliche Gesetze, die der Verfasser vor vielen Jahren aufstellte, in neuem Gewande auf. Die Schlussergebnisse dieses zweiten Teils der wirtschaftlichen Theorie des Transformators sind in mehreren Hinsichten überraschend. Vor allem jedoch lenken sie die günstigsten elektromagnetischen Dichten gründlich anders als der seinerzeitige Kampf mit der Betriebswärmeabfuhr.

Unversehens gerät die Studie in die Vergangenheit des Transformatorbaus. Der Weg durch die Jahrzehnte, den der Transformator zurücklegte, erscheint dem späten Beobachter voll von interessanten Verwicklungen und von belehrenden Erlebnissen. Erinnerungen an die angebliche wirtschaftliche Gleichberechtigung des Eisens und des Kupfers werden wach. Überstandene Krisen erscheinen in neuem Licht: der Übertritt aus der Luft ins Öl, die künstliche Kühlung, die Verwendung besseren Blechs.

Die Rücksicht auf den Erregerstrom liegt jedoch vor allem wie ein unerträglicher Alpdruck auf der Geschichte des Transformatorbaus. Durch Jahrzehnte hielt sie die magnetische Dichte zurück und auch heute ist ihr Druck noch fast unverändert. Die Theorie der Transformationskosten kann ihr nicht ausweichen. Deshalb tritt sie in ihren abschließenden

dritten Teil ein, wenn sie sich Entwürfen mit zurückgehaltener magnetischer, doch freier elektrischer Dichte zuwendet.

Müssen wir die magnetische Dichte auch dann noch zurückhalten, wenn wir große und sehr große Transformatoren bauen? Verspricht uns denn nicht die große Leistung die sehnüchtig erwartete Lockerung des Erregerstromgriffes? Die Theorie antwortet, daß das gewöhnliche legierte Blech keine bisher unerreichbar scheinenden magnetischen Dichten fordert, daß dagegen das hochlegierte Blech weit anspruchvoller ist.

Von einer scharfen Kritik kann man es nicht erwarten, daß sie mit Theorien, die sich Bequemlichkeiten gestatten, nachsichtig verfahren wird. Das Zunehmen der Energieverluste im Eisen mit dem Quadrat der Liniendichte ist fraglich. Wir setzen es gerne voraus, weil wir gerne bequem rechnen. Die Kritik sieht jedoch, daß man auf gefährliche Bequemlichkeiten verzichten muß.

Der Exponent  $u = 2$  des angeblichen Eisenenergieverlustgesetzes schiebt die idealen magnetischen Dichten über 20.000 G hinaus, wenn hochlegiertes Blech verwendet werden soll, kräftigere Exponenten drücken sie dagegen herunter. Wohin? Solange uns das genaue Energieverlustgesetz unbekannt bleibt, fällt die Antwort schwer.

Es bleibt also doch nichts übrig: Man muß auch eine Entwurfstheorie für zurückgehaltene magnetische Dichten aufstellen. Die Ergebnisse dieser Theorie sind interessant genug. Sie weisen auf eine auffällige Unabhängigkeit der elektrischen Dichte von der magnetischen hin. Sie machen ausserdem auf wichtige Probleme aufmerksam, die der Großtransformator anschneidet.

Wie verhält sich nach all dem die Theorie der Transformationskosten zur Idee des großen Transformators? Soll sich der Transformator, während er wächst, wirklich an einer bestimmten günstigen Gestalt und an bestimmten elektromagnetischen Dichten anklammern? Die Theorie der Transformationskosten antwortet: nein!

Große Transformatoren sollen relativ dickere und kürzere Säulen bekommen. Die zunehmende Leistung soll die magnetische Dichte heben, die elektrische dagegen drücken. Die Theorie der Transformationskosten verdirbt demnach der Idee des großen Transformators ihre Geradlinigkeit.

Warum? Einzig und allein deshalb, weil im größer werdenden Transformator der Kupferfüllfaktor zunimmt. Die Gestalt des Transformators und seine elektromagnetischen Dichten

würden nur dann starr bleiben, wenn sich der Kupferfüllfaktor nicht änderte.

Es ist nun leicht einzusehen, daß der wachsende Kupferfüllfaktor zusätzliche wirtschaftliche Vorteile in Aussicht stellt, Vorteile, die die ursprüngliche geradlinige Idee des großen Transformators nicht voraussieht. Es wäre also unklug, die Ratschläge der Theorie der Transformationskosten nicht anzuhören. Sie sind doch unzweifelhaft nützlich.

Aus der Theorie der Transformationskosten taucht der Begriff der Konstruktionsinvariante auf, die die Entwürfe bewertet, die elektromagnetischen Dichten zurechtlegt, die aber darüber hinaus auch in die grundlegenden Fragen des Transformatorenbaus eingreift. Mit ihrer Hilfe beantwortet die vorliegende Studie schließlich auch noch die Frage: gewöhnliches oder hochlegiertes Blech?

Die Antwort bestätigt die Erfahrungen des Transformatorenbaus: solange der Blechpreis nicht schneller zunimmt als die spezifischen Energieverluste abnehmen, soll das jeweils beste Blech verwendet werden. Diese Antwort macht nun das Hinauftreiben der bisherigen Kraftliniendichten zu einem ersten Problem.

Ist das anscheinend notwendig gewordene Herunterdrücken der bisherigen elektrischen Dichten auch ein Problem? Die Antwort setzt die Klärung des Leistungsbegriffes, wenigstens innerhalb des Rahmens des Transformatorenbaus, voraus. Die zuläßige Leistung ist zweifellos etwas anderes als die wirtschaftliche Leistung. Die Leistungstafel des Transformators spricht von der zuläßigen Leistung, der die vorhandene Kühleinrichtung gerade noch gewachsen ist. Die wirtschaftliche Leistung desselben Transformators muß dagegen kleiner sein als die zuläßige und der Betriebsingenieur hat die Pflicht, sie zu finden und zur Geltung zu bringen. Die ideale elektrische Dichte entspricht der wirtschaftlichen Leistung, die der Entwurf nur ungefähr berücksichtigen kann, weil er den Betrieb nicht kennt, in den der zu bauende Transformator hineingeraten wird. Es ist nur natürlich, daß die elektrischen Dichten aller idealen Entwürfe wesentlich kleiner bleiben als es die bekannten zuläßigen sind.

Die voll ausgebaute Theorie der Transformationskosten entspricht wohl allen bisherigen Erfahrungen des Transformatorenbaus, doch schließlich begegnet sie einem Problem, das ihr das Leben sauer macht. Die Betriebsicherheit verlangt Reservetransformatoren, die selbstverständlich empfindlich auf die Transformationskosten einwirken. Vor allem ist der Reservegroßtransformator ein sehr ernstes Problem.

Die neuzeitige Technik erfand den Wandergroßtransformator, der dem Problem der Betriebssicherheit gründlich auf den Leib rückt. Mit dem Wandergroßtransformator geriet indessen der Großtransformatorenbau in eine unerwartete Klemme: das Bahnprofil schreibt ihm einen unverbiegbaren Rahmen vor, in den sich der größte noch mögliche Transformator hineinzwängen muß.

Es gibt keinen ersichtlichen Ausweg aus dieser Klemme. Das Bahnprofil wird allem Anschein nach den Anstrengungen der Idee des großen Transformators ein Ende bereiten. In der schweren Not glimmt nur die eine schwache Hoffnung, daß der Großtransformator im Rahmen des Bahnprofils doch jene Leistung erreichen wird, die die Elektrizitätswirtschaft praktisch überhaupt noch verlangen kann.

Die vorliegende Studie schildert den Kampf mit dem Bahnprofil, der schon anfangs, als die Leistungen noch verhältnismäßig bescheiden waren. Sie rechtfertigt die Forderungen, die uns unter das lästige Joch des Bahnprofils treiben, und beschreibt die ersten Abwehrmaßnahmen des Großtransformatorenbaus.

Sie wendet sich dann dem Kampf auf der inneren Verteidigungslinie zu: Die Gestalt des Eisenkernes wird in den Streit hineingezogen. Der fünfschenkliche Eisenkern erscheint im Großtransformatorenbau als Frucht des Transportproblems und erringt einen glänzenden Sieg. Er wirft die Leistung von etwa 50.000 kVA auf ungefähr 120.000 kVA, 220.000 V hinauf.

Die letzten Anstrengungen des Transportproblems gelten den noch unerreichten, doch anscheinend empfehlenswerten magnetischen Dichten. Es gilt, die Erregerstromoberwellen aus der Energieübertragungsbahn abzusondern, damit der oberwellenfreie Erregerstrom den letzten Aufstieg gestatten kann. Der fünfschenkliche Eisenkern gestattet Lösungen dieses ungemein interessanten Problems.

Doch schon melden sich Erinnerungen an die uralte Tempeltype, die doch mit allen Vorzügen des fünfschenklichen Kerns ausgestattet und dabei symmetrisch gebaut war, was der fünfschenkliche Kern nicht ist. Werden wir wirklich weit rückwärts greifen müssen, dorthin, wo wir angefangen haben? Schließt sich am Ende den Transformatorenproblemen der Daseinskreis?

## SLOVARČEK

aluminij	alluminio	Aluminium
amperni ovoji = pretok	ampere-spire, ampere-giri	Amperwindungen = Durchflutung
baker	rame	Kupfer
breme	carico	Belastung
bremenski diagram	diagramma del ca- rico	Belastungsdiagramm
bremensko gorovje	montagna del cari- co	Belastungsgebirge
cena	prezzo	Preis
— enotna	— unico	Einheits —
— gradbena	— di costruzione	Herstellungs —
časovnica	linea di tempo	Zeitlinie
diagram	diagramma	Schaubild (Dia- gramm)
— bremenski	— del carico	Belastungs —
— časovni	— dei tempi	Zeit —
— kazalčni	— vettoriale	Zeiger —
dolžina	lunghezza	Länge
elektrarna	centrale, officina	Elektrizitätswerk
— kalorična	— calorica	Wärme —
— vodna	— idraulica	Wasser —
energija	energia	Energie
energijska izguba	perdita di energia	Energieverlust
faza	fase	Phase
fazno navitje	avvolgimento a fasi	Phasenwicklung
faktor	fattore	Faktor
— gospodarski	del rendimento	Wirkungsgrad
— polnilni	fattore del riempi- mento	Füllfaktor
fluks	flusso (di forza)	(Kraft-) Fluss
— dodatni	— addizionale	Zusatz —
— istosmerni	— continuo	Gleich —
— izmenični	— alternato	Wechsel —
— magnetni	— magnetico	Magnet —
— obratni	— di esercizio	Betriebs —
— stresni	— di dispersione	Streu —
— sinusni	— sinusoidale	Sinus —
— trofazni	— trifase	— dreiphasiger

— višefrekvenčni	armonica superiore del —	Oberwellen —
generator	generatore	Generator
— enofazni	alternatore mono- fase	Einphasen —
— trofazni	alternatore trifase	Dreiphasen —
gorovje bremensko	montagna del carico	Belastungsgebirge
gospodarstvo	economia	Wirtschaft
— električno	— elettrica	Elektrizitäts —
gostota	densità	Dichte
— dopustna	— ammissibile	— zulässige
— efektivna	— effettiva	— effektive
— električna	— elettrica	— elektrische
— elektromagnetna	— elettromagnetica	— elektromagnetische
— gospodarska	— economica	— wirtschaftliche
— idealna	— ideale	— ideale
— magnetna	— magnetica	— magnetische
— zadržana	— ritenuta	— zurückgehaltene
hladilna naprava	dispositivi di raffreddamento	Kühlapparat
hlajenje	raffreddamento	Kühlung
— naravno	— naturale	— natürliche
— umetno	— artificiale	— künstliche
induktiven	induttivo	induktiv
induktivnost	induttività	Induktivität
invariantna konstrukтивna	invariante di costruzione	Konstruktionsinvariante
izolacijski presledek	intervallo d'isolamento	Isolationszwischenraum
izolacijska snov	materiale isolante	Isolierstoff
izolator	isolatore	Isolator
— prevodni	— passante	Durchführungs —
jakost	intensità	Stärke
jalov	reattivo	blind, wattlos
jarm	giogo	Joch
jedro	nucleo	Kern
— enofazno	— monofase	— einphasiger
— peterostebrno	— a cinque colonne	— fünfschenkli- ger
— trofazno	— trifase	— dreiphasiger
— trostebrno	— a tre colonne	— dreischenkli- ger
kapacitiven	capacitivo	kapazitiv
kapacitivnost	capacità	Kapazität
kazalec	vettore	Zeiger (Vektor)
konservator	conservatore d'olio	Öldehnungsgefäß
kotel	cassa d'olio	Ölkessel

kožni pojav	effeto pellicolare	Hautwirkung (Skineffekt)
močnosť	potenza	Leistung
— dopustna	— ammissibile	— zulässige
— gospodarska	— economica	— wirtschaftliche
— navidezna	— apparente	Schein —
napetost	tensione	Spannung
— efektivna	— effettiva	Effektiv —
— fazna	— di fase	Phasen —
— inducirana	— indotta	— induzierte
— istosmerna	— continua	Gleich —
— kratkostična	— di corto — — circuito	Kurzschluss —
— nizka	— bassa	Nieder —
— obratna	— di esercizio	Betriebs —
— primarna	— primaria	Primär —
— sekundarna	— secondaria	Sekundär —
— sinusna	— sinusoidale	Sinus —
— spodnja	— inferiore	Unter —
— visoka	— alta	Hoch —
— zgornja	— superiore	Ober —
napetostna izguba	perdita di tensione	Spannungsverlust
napetostni padec	caduta di tensione	Spannungsabfall
navitje	avvolgimento	Wicklung
— fazno	— a fasi	Phasen —
— primarno	— primario	Primär —
— sekundarno	— secondario	Sekundär —
— trofazno	— trifase	Dreiphasen —
obrat	esercizio	Betrieb
obratne ure	ore di funzionamento	Betriebsstunden
olje	olio	Öl
omrežje	rete	Netz
— prenosno	— di trasmissione	Übertragungs —
— razdeljevalno	— di distribuzione	Verteilungs —
ovoj	spira	Wicklung
ovojna dolžina	lunghezza di una spira	— slänge
permeabilnost = = magnetna pre- pustnost	permeabilità	Permeabilität
pločevina	lamiera, latta	Blech
— navadna	— ordinaria	— gewöhnliches
— legirana	— allegata	— legiertes
— najboljša	— la migliore	— bestes (hoch- legiertes)

polje	campo	Feld
— električno	— elettrico	— elektrisches
— magnetno	— magnetico	— magnetisches
— temperaturno	— delle temperature	Temperatur —
ploščina	superficie, area	Flächeninhalt
preboj	scarica	Durchschlag
prenos	trasmissione	Übertragung
— energijski	— di energia	Energie —
prenosna proga	conduttura di trasmissione	Übertragungsleitung
prenosno omrežje	rete di trasmissione	— netz
premer	diametro	Durchmesser
presledek	intervallo	Zwischenraum
— izolacijski	— d'isolamento	Isolations —
pretok = celokupni tok navitja = amperni ovoji	ampere-giri, ampere-spire	Durchflutung
prerez	sezione	Querschnitt
— bakreni	— del rame	Kupfer —
— železni	— del ferro	Eisen —
prostornina	volume	Rauminhalt
ravnotežje	equilibrio	Gleichgewicht
— električno	— elettrico	— elektrisches
— magnetno	— magnetico	— magnetisches
rega zračna	intraferro	Luftspalt
rezonanca	risonanza	Resonanz
silnica = smernica	linea di forza	Kraftlinie
specifična teža	peso specifico	spezifisches Gewicht
sponka	morsetto	Klemme
steber	colonna	Säule
stik	collegamento	Schaltung
— kratki	— a corto-circuito	Kurzschluss —
— lomljeni (cik-cak)	— a zig-zag	Zick-Zack —
— trikotni	— a triangolo	Dreieck —
— vzporedni	— in parallelo	Parallel —
— zaporedni	— in serie	Reihen —
— zvezdni	— a stella	Stern —
stikalo	interruttore, commutatore	Schalter
stroški	spese	Unkosten
— gradbeni	— di fabbricazione	Bau —
— investicijski	— d'impianto	Investions —
— transformacijski	— di trasformazione	Transformations —
širina	larghezza	Breite
tok	corrente	Strom
— bremenski	— di carico	Belastungs —

— istosmerni	— continua	Gleich —
— izmenični	— alternata	Wechsel —
— jalovi	— reattiva	Blind —
— sinusni	— sinusoidale	Sinus —
— višeharmonični	armonica superiore della corrente	Oberwellen —
— vrtilni	corrente trifase	Dreh —
— vzbujalni	— d'eccitazione	Erreger —
— žlahtni	— attiva	Wirk —
transformator	trasformatore	Transformator
— enofazni	— monofase	Einphasen —
— peterostebni	— a cinque colonne	Fünfschenkel —
— potujoči	— ambulante	Wander —
— rezervni	— di riserva	Reserve —
— suhi	— ad aria	Trocken —
— trofazni	— trifase	Dreiphasen —
— trostebni	— a tre colonne	Dreischenkel —
— v olju	— ad olio	Öl —
trikot	triangolo	Dreieck
-ni stik	collegamento a —	— schaltung
tuljava, tuljavica	bobina	Spule
učinkovitost	rendimento	Wirkungsgrad
močnostna učinkovitost		
upor	resistenza	Widerstand
— električni	— elettrica	— elektrischer
— induktivni	— induttiva	— induktiver
— kapacitivni	— di capacità	— kapazitiver
— magnetni	capacitanza	— magnetischer
— Ohmov	resistenza magnetica	— Ohmscher
vijak	— ohmica	Schraube
višina	vite	Hohe
vodna sila	altezza	Wasserkraft
vodnik	forza idraulica	Leiter
vzbujati	conduttore	erregen
vzbujalni tok	eccitare	Erregerstrom
zakovica	corrente d'eccitazione	
zračna rega	chiodo	Niete
zvezda	intraferro	Luftspalt
zvezdni stik	stella	Stern
žarnica	collegamento a stella	— schaltung
žica	lampada	Glühlampe
žlahten	filo	Draht
žlahtnost = močnostna žlahtnost	attivo	Wirk (-strom)
= $\cos \varphi$	fattore di potenza	Leistungsfaktor

## Z N A K I

a	višina jarma	altezza del giogo	Jochhöhe
b	enotna gradbena cena navitja	prezzo unico di costruzione del- l'avvolgimento	Baueinheitenpreis der Wicklung
B	magnetna gostota	densità magnetica	magnetische Dich- te
d	premer stebra	diametro della co- lonna	Saulendurch- messer
$\delta$	radialni izolacijski presledek	intervallo d'isola- mento radiale	radialer Isolations- zwischenraum
$\Delta$	aksialni izolacijski presledek	intervallo d'isola- mento assiale	axialer Isolations- zwischenraum
e	ovojna napetost	tensione di una spira	Windungs- spannung
f	frekvenca	frequenza	Frequenz
g	električna gostota	densità elettrica	elektrische Dichte
$G_b$ $G_{bo}$	teža bakra	peso del rame	Kupfergewicht
$G_z$ $G_{zo}$	teža železa	peso del ferro	Eisengewicht
$\gamma_b$	specifična teža ba- kra	peso specifico del rame	spezifisches Kupfergewicht
$\gamma_z$	specifična teža že- leza	peso specifico del ferro	spezifisches Eisengewicht
h	dolžina stebra	lunghezza della colonna	Säulenlänge
h	letne obratne ure	ore annuali di funzionamento	jährliche Betriebsstunden
$h_b$	obratne ure na- vitja	ore di funziona- mento dell'av- volgimento	Wicklungs- betriebsstunden
$h_z$	obratne ure želez- nega jedra	ore di funziona- mento del nu- cleo	Eisenkern- betriebsstunden
I	konstruktivna in- varianta	invariante di co- struzione	Konstruktions- invariante

$I_{\min}$	najmanjša konstruktivna invarianta	ottima invariante di costruzione	günstigste Konstruktionsinvariante
$k_b$	specifične energijske izgube v bakru	perdita specifica di energia nel rame	spezifischer Energieverlust im Kupfer
$k_z$	specifične energijske izgube v železu	perdita specifica di energia nel ferro	spezifischer Energieverlust im Eisen
$l$	dolžina jarma	lunghezza del giogo	Jochlänge
$N$ $N_c$	močnosť	potenza	Leistung
$p$	obrestna in odpisna kvota	quota d'ammortizzazione e degl'interessi	Verzinsungs- und Tilgungsquote
$p_b$	cena kilovatne ure za izgube v bakru	prezzo della kilowattora perduta nel rame	Kilowattstundenpreis für Kupferverlust
$p_z$	cena kilovatne ure za izgube v železu	prezzo della kilowattora perduta nel ferro	Kilowattstundenpreis für Eisenverlust
$s_b$	transformacijski stroški za kg bakra	spese di trasformazione per kg rame	Transformationskosten je kg Kupfer
$s_z$	transformacijski stroški za kg železa	spese di trasformazione per kg ferro	Transformationskosten je kg Eisen
$S_b$	transformacijski stroški bakra	spese di trasformazione del rame	Transformationskosten des Kupfers
$S_z$	transformacijski stroški železa	spese di trasformazione del ferro	Transformationskosten des Eisens
$S$	transformacijski stroški	spese di trasformazione	Transformationskosten
$V_b$	energijske izgube v bakru	perdita di energia nel rame	Energieverluste im Kupfer
$V_z$	energijske izgube v železu	perdita di energia nel ferro	Energieverluste im Eisen
$x$	premer stebra	diametro della colonna	Säulendurchmesser
$y$	relativni premer stebra	diametro relativo della colonna	relativer Säulendurchmesser

$y'$	relativni premer stebra	diametro relativo della colonna	relativer Säulen- durchmesser
$y'_0$	najugodnejši rela- tivni premer ste- bra	ottimo diametro relativo della collona	günstigster relati- ver Säulen- durchmesser
$\bar{q}$	fluks v stranskem stebri	flusso nella colon- na ausiliare	Fluss in der Hilfs- saule
$\bar{\Phi}_1$			
$\bar{\Phi}_2$	fazni fluksi	flussi delle fasi	Phasenflüsse
$\bar{\Phi}_3$			

# PUBLIKACIJE AKADEMIJE

## Splošne

*Letopis*. Prva knjiga. 1938—1942. Ljubljana 1943 . . . . L. 100'—

### V filozofsko-filološko-historičnem razredu

*Korespondence pomembnih Slovencev I.*: Zoisova korespondenca 1808—1909, Ljubljana 1939 . . . . L. 30'40

II.: Zoisova korespondenca 1809—1810, Ljubljana 1941 . . . . . L. 35'—

*Viri za zgodovino Slovencev*. Knjiga prva: Srednjeveški urbarji za Slovenijo. Zvezek prvi: Urbarji salzburške nadškofije. Objavil Kos Milko. Ljubljana 1939 . . . . . L. 30'40

*Euchologium Sinaiticum*. Starocerkvenoslovanski glagolski spomenik. Izdajo priredil Nahtigal Rajko. I. del: Fotografski posnetek, Ljubljana 1941 . . . . . L. 53'20  
za inozemstvo L. 76'—

*Euchologium Sinaiticum*. Starocerkvenoslovanski glagolski spomenik. Izdajo priredil Nahtigal Rajko. II. del: Tekst s komentarjem, Ljubljana 1942 . . . . . L. 166'—

Turk Josip, *Prvotna Charta caritas*, Ljubljana 1942 . . L. 27'—

Veber France, *Vprašanje stvarnosti*. Dejstva in analize. Ljubljana 1939 . . . . . L. 47'50

Grafenauer Ivan, »*Lepa Vida*« — Študija. Ljubljana 1943 . . . . . L. 100'—

*Razprave*. Prva knjiga. Ljubljana 1943 . . . . . L. 100'—

### V pravnem razredu

*Pravni spomeniki slovenskega naroda*. Knjiga prva: Dolenc Metod, »*Gorske bukve*« v izvorniku, prevodih in priredbah, Ljubljana 1940 . . . . . L. 30'40

*Razprave*. Zvezek prvi. Ljubljana 1941 . . . . . L. 30'40

*Razprave*. Zvezek drugi. Ljubljana 1943 . . . . . L. 60'—

### V matematično-prirodoslovnem razredu

*Razprave*. Knjiga prva. Ljubljana 1940 . . . . . L. 19'—

*Razprave*. Knjiga druga. Ljubljana 1942 . . . . . L. 150'—

*Prirodoslovne razprave*. Knjiga IV. Tome IV. Ljubljana 1940 (v svetovnih jezikih) . . . . . L. 19'—

Vida v Ivan, *Kleinovi teoremi v teoriji linearnih diferencialnih enačb*. Ljubljana 1941 . . . . . L. 20'—

## Cena je znižana

- a) za naročnike publikacij vseh razredov za 33,3%,
- b) za naročnike publikacij posameznega razreda za 25%,
- c) za slušatelje univerze za 20%.

