

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA

I



ZAGREB 1964

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE ELEKTRIČNIH STROJEVA

I



ZAGREB 1964

*Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 09-1434/1 od 13. VI 1964.*

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu

Din 330.—

Umnoženo u Praktikumu Zavoda za kartografiju i reprodukciju karata.
Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

Broj 462

ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH STROJEVA

1. U v o d

1.1 Predmet i svrha ispitivanja

Kod gradnje električkih strojeva svojstva izvedenog stroja često odstupaju od onoga što je u projektu predviđeno. Kod projektiranja treba se djelomično služiti aproksimacijama, i oslanjati se na podatke iz iskustva. Električki proračun može se provesti prilično tačno, magnetski nešto manje tačno, a proračun ventilacije i hladjenja, ako nema iskustava kod sličnih izvedbi, tek prilično grubo. Proračun stroja zasniva se na određenim svojstvima materijala - bakra, magnetskih materijala, izolacionih materijala i konstruktivnih dijelova - koja ovise o mnogim, djelomično vrlo osjetljivim, tehnološkim postupcima, i može se lako dogoditi, da svojstva upotrijebljenih materijala odstupaju od pretpostavki. Napokon, pri samoj izvedbi može doći do malih odstupanja, zbog nesavršenosti bilo čovjeka, bilo strojeva i alata. Neprestana kontrola, počev od kontrole projekta, pa preko kontrole materijala kad ulaze u tvornicu, sve do kontrole tehnoloških postupaka i pojedinih dijelova u toku izvedbe, može zadržati navedena odstupanja u određenim granicama. Ako otpadne mogućnost grube greške u projektu, materijalu ili izvedbi, ipak se može dogoditi, da zajedničkim djelovanjem više faktora dodje do znatnijeg odstupanja svojstava i karakteristika gotovog stroja, pa je potrebno gotov stroj detaljno ispitati.

Pri ispitivanju električkih strojeva treba provjeriti:

a) električku sigurnost konstrukcije, tj. sposobnost izolacije da izdrži sva naprezanja u normalnom pogonu, i povećana naprezanja do kojih povremeno dolazi kod pogonskih smetnji;

b) mehaničku sigurnost konstrukcije, i to kako pri normalnim pogonskim uslovima, tako i u najnepovoljnijem slučaju, do kojega u pogonu može doći;

c) termičku sigurnost i preopteretivost, tj. temperature, koje mogu u pogonu nastupiti u neposrednoj blizini materijala, osjetljivih na povišenu temperaturu;

d) karakteristike, tj. ponašanje stroja u pogonu obzirom na svrhu, kojoj treba da služi, njegovo reagiranje na promijenjene pogonske uslove, mogućnosti i mjere za prilagođavanje različitim uslovima u pogonu i sve ostale podatke od važnosti za upotrebu stroja i za nabavku njegove opreme;

e) ekonomičnost u pogonu, koja ne obuhvaća samo podatke o gubicima u samom stroju pri različitim pogonskim uslovima, već i o svojstvima stroja, koja mogu utjecati na ekonomičnost rada drugih postrojenja, ili čitavog sistema, kao npr. o faktoru snage $\cos \varphi$ asinhronih motora;

f) mogućnost korekcije karakteristika, ukoliko ove odstupaju. U većini slučajeva vrši se konačno udešavanje stroja pri ispitivanju.

Vrlo je važna zadaća ispitivanja, da prikuplja iskustvene podatke za buduće slične konstrukcije. Zato ispitni protokoli izvedenih strojeva predstavljaju važna pomagala i vrijedne dokumente za konstrukcione urede.

Razlikujemo slijedeće vrste ispitivanja:

1) Ispitivanje prototipa, ili ispitivanje modela, koje služi u prvom redu za prikupljanje podataka i podloga, te eventualno korigiranje konstrukcije. Ovo ispitivanje se vrši detaljno, i često se proširuje na specijalna mjerenja i ispitivanja, koja treba da dadu odgovor konstrukteru na određena pitanja.

2) Ispitivanje kod preuzimanja. Ono treba da pokaže, da li stroj odgovara zahtjevima, koje postavljaju propisi po kojima se stroj isporučuje, ili pak zahtjevima ugovora, koji je sklopljen između proizvođača i naručioca.

3) Ispitivanje u serijskoj fabrikaciji ne vrši se tako detaljno. Nakon što su na prototipu detaljno ispitane sve karakteristike, potrebno je samo povremeno kontrolirati, da li su te karakteristike ostale iste, tj. da li fabrikacija teče nepromijenjeno. Ipak se na svakom primjerku vrše neki osnovni pokusi i ispitivanja, kojima je svrha, da na vrijeme otkriju eventualne grube greške u materijalu ili u fabrikaciji. Često se ovo ispitivanje naziva komadnim ispitivanjem, za razliku od tipnog ispitivanja, koje se vrši samo na jednom ili na manjem broju primjeraka kao predstavnicima određene tipe, u smislu tačke 2).

4) Ispitivanje nakon popravka obično se ograničava na popravljeni dio stroja, pa može biti uže ili šire, prema opsegu izvršenog popravka.

5) Ispitivanje sumnjivog ponašanja u pogonu treba da na vrijeme otkrije eventualnu grešku, koja je nastala tokom rada, i njezine uzroke, te da ukaže na mogućnost njenog uklanjanja i predusretanja.

1.2 Pravila, propisi i standardi

Osnovni pojmovi, koji su potrebni za sporazumijevanje pri narudžbi i isporuci strojeva, zatim općeniti zahtjevi u pogledu svojstava stroja, način na koji se ispituje, da li je stroj zadovoljio te zahtjeve, i način označavanja strojeva obzirom na njihovu namjenu i svojstva, definirani su u pravilima, propisima i standardima, koji služe kao pomagalo i proizvođaču i naručitelju. Gdje god se razvila gradnja električkih strojeva, razrađeni su takvi propisi, koji su se djelomično oslanjali na već postojeće propise drugih zemalja, a djelomično su odražavali vlastite specifične prilike. Tako je nastao čitav niz nacionalnih propisa, pravila i standarda, kao što su VDE u Njemačkoj, BSS u Engleskoj, AIEE u SAD, GOST u SSSR-u, zatim francuska, švicarska, austrijska, češka, talijanska i druga pravila. Osim toga postoji još čitav niz propisa pojedinih tvornica, osiguravajućih društava i organizacija. Kod nas su dobrim dijelom već razrađeni standardi u okviru tvornica električkih strojeva. Važnost za čitavu zemlju dobivaju standardi tek onda, kada ih prihvati Savezna komisija za standardizaciju (SKS), i izda kao "Jugoslevenski standard" (JUS). U našoj zemlji standard JUS je službeni akt, i pridržavanje odredaba iz standarda predstavlja obavezu za svakoga.

Djelovanje Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC) usmjereno je na davanje preporuka, kojima bi se što je više moguće koordinirali različiti nacionalni propisi i standardi prilikom njihovih izmjena i proširenja.

Osim standarda koji se odnose na električke strojeve, od najveće su važnosti standardi, koji postoje kao interni tvornički, i kao jugoslavenski standardi (JUS), a odnose se ne samo na sirovine i polufabrikate, već i na tehnološke postupke.

1.3 Organizacija ispitivanja

Ispitivanje strojeva vrši se (izuzev slučajeve pod 1.1, 5) kod proizvođača. Samo iznimno mogu se ispitivanja vršiti na drugom mjestu, ako postoje svi preduvjeti za vršenje ispravnih mjerenja. Za provedbu ispitivanja različitih strojeva potreban je ne samo obilan izbor instrumenata, već i brojni uređaji i pribor, pa se ispitivanje u tvornici vrši u posebno uređenim ispitnim stanicama. Obično su ispitne stanice podijeljene prema vrsti proizvoda, koji se ispituju, a koji zahtijevaju različitu opremu. Tako npr. mogu biti odvojene ispitne stanice za male strojeve, srednje strojeve, velike strojeve, velike transformatore i transformatore serijske fabrikacije. Obično se ispitne stanice približavaju mjestu proizvodnje, tako da se ispitivanja u toku proizvodnje vrše u pogonu, bez potrebe transporta u ispitnu stanicu.

Od zahtjeva, koji se općenito postavljaju na ispitnu stanicu, treba spomenuti slijedeće:

a) priključak na mrežu mora biti dovoljno jak, po mogućnosti direktno na visoki napon, kako bi varijacije napona zbog promjena u mreži bile što manje;

b) potrebni su pretvarači za različite vrste struje, i različite napone i frekvencije u dovoljnom broju i dovoljne snage. Za tačna mjerenja istosmjernom strujom potrebne su akumulatorske baterije;

c) svaki izvor napona mora imati mogućnost regulacije, po mogućnosti kontinuirane, ili u dovoljno finim stepenima;

d) na svakom mjestu mjerenja mora postojati mogućnost, da se dovede napon iz različitih raspoloživih izvora, i da ga se daljinski regulira;

e) treba omogućiti brzu montažu ispitivanih strojeva i eventualno spajanje s drugim strojevima za pogon ili opterećenje. U tu svrhu potrebne su prikladne pritezne ploče ili postolja, spojke i remenice različitih dimenzija, pričvrtni materijal i slično. Kao strojevi za pogon i opterećenje najbolji su poredni istosmjerni strojevi, po mogućnosti s vaganjem momenta na kućištu statora (dinamo vage) različitih veličina i brzina vrtnje, a istog nominalnog napona;

f) dovoljan broj specijalnih uređaja i opreme, kao što su otpornici za opterećenje i regulaciju, sklopke i rastavljači, kočnice za manje strojeve, uputnici, kablovi, žice, itd.

g) dovoljan izbor pouzdanih i tačnih instrumenata, pod neprestanom kontrolom baždarnice, i potrebni specijalni instrumenti i aparature;

h) pregledno i sigurno rasklopno postrojenje, koje omogućuje elastično i brzo korištenje raspoloživih izvora struje pri ispitivanju;

i) prostorije odvojene i zatvorene za nepozvane, s mogućnosti jednostavne dopreme i otpreme ispitivanih strojeva;

j) dovoljno stručno i dobro uvježbano osoblje u dovoljnom broju.

Povrh toga, u pojedinim ispitnim stanicama, prema njihovoj namjeni, postavlja se niz specijalnih zahtjeva.

Ispitne stanice nisu pogonske prostorije u smislu postojećih propisa. Po prirodi posla ne može se zahtijevati u ispitnim stanicama poduzimanje svih onih zaštitnih mjera, koje su inače propisane kod električkih postrojenja, jer se tu agregati i spojevi ne postavljaju definitivno, već privremeno, i za kratko vrijeme ih treba mijenjati. Osim toga, u većoj ispitnoj stanici vrši se istovremeno po nekoliko radova, pa svatko od osoblja ne može biti tačno upoznat sa svime što se događa. Iz svih tih razloga potrebno je, da rad bude dobro organiziran, kako bi se sačuvala sigurnost osoblja i kako bi se omogućio brz i solidan rad.

Jedno je od osnovnih pravila ispitivanja, da instrumente treba složiti i spojiti uredno i pregledno, i spojeve još jedanput pregledati prije uključivanja. Drugo je važno pravilo, da se ni u kojem slučaju ne uzima instrument, aparat, kabel ili žica iz tuđeg složenog mjernog rasporeda bez njegova znanja. Takav postupak može dovesti do oštećenja instrumenata i uređajaja, i do ugrožavanja osoblja.

Uklapanje i regulacija pojedinog izvora ne smije biti provediva s nekoliko mjesta istovremeno. Ako se vrši daljinski s nekoliko mjernih mjesta, onda mora biti vezano uz jedan jedini ključ, koji se po potrebi prenosi, ali koji omogućuje upravljanje samo s jednog mjesta, na kojemu se nalazi. Sa svakim preklapanjem i promjenom u centralnom rasklopnom uređaju mora biti upoznat svatko tko u to vrijeme vrši ispitivanja.

Otvoreni dijelovi pod naponom moraju biti označeni odgovarajućom pločicom, a isto tako i sve ostalo, što predstavlja opasnost - npr. jaki elektromagneti pod uzbudom, rotirajući dijelovi opasni za okolinu i slično. Kod ispitivanja visokim naponom potrebno je ograditi odgovarajući prostor provizornom ogradom s odgovarajućim oznakama i svjetlosnim signalima, koja se može izvesti tako, da svako otvaranje ograde isklapa, odnosno onemogućuje uklapanje visokog napona.

Rad na ispitivanju vrši se u manjim ili većim ekipama, prema vrsti ispitivanja. Često dolazi za vrijeme mjerenja do malenih promjena u pogonskom stanju, uslijed čega otkloni instrumenata s vremenom nešto variraju. U takvom slučaju potrebno je sve instrumente očitati istovremeno, na određeni znak, pa je potrebno dovoljno osoblja. Ispitivanjem rukovodi jedno lice, koje se brine, da ništa ne izostane po predviđenom programu, i koje organizira rad.

Rezultati mjerenja odmah se bilježe u pripravljene formule ili dnevnik ispitivanja, te se još za trajanja ispitivanja razrađuju, tj. izračunavaju se podaci na osnovu snimljenih očitavanja, i unose u tabele ili u dijagrame. Svrha je toga, da se eventualne greške kod ispitivanja na vrijeme uoče, i da se pojedina očitavanja, ili čitavo mjerenje, u slučaju potrebe ponove. Osobito je prikladno u tu svrhu grafičko prikazivanje, jer se grube greške kod mjerenja ili računa odmah pokazuju kao odstupanje dotične tačke od krivulje određene ostalim mjerenjima. Na osnovu mjerenja i razrade rezultata sastavlja se ispitni protokol, kao dokument o izvršenom ispitivanju, koji osim bilježaka o mjerenju i rezultata sadrži i eventualne zaključke.

1.4 Tačnost mjerenja i izbor instrumenata

Kod svakog mjerenje vrijedi općenito pravilo:

$$\text{mjerena vrijednost} = \text{stvarna vrijednost} + \text{pogreška} \quad (1)$$

što znači, da pozitivnom pogreškom smatramo, ako je mjerenje da-
lo veću vrijednost od stvarne. Relativna pogreška definira se
kao

$$p = \frac{\text{mjerena vrijednost} - \text{stvarna vrijednost}}{\text{stvarna vrijednost}} \quad (2)$$

Ako želimo provesti korekciju rezultata, onda pišemo obrnuto:

$$\text{stvarna vrijednost} = \text{mjerena vrijednost} + \text{korekcija} \quad (3)$$

iz čega proizlazi odnos:

$$\text{korekcija} = - \text{pogreška} \quad (4)$$

Klasa instrumenta predstavlja najveću dopuštenu pogrešku
izraženu u postocima mjernog opsega instrumenta:

$$kl. = \frac{\Delta \alpha_{\max}}{\alpha_{\max}} \cdot 100 \quad (5)$$

Isto odstupanje $\Delta \alpha_{\max}$ pri bilo kojem manjem otklonu
predstavlja relativnu pogrešku:

$$p = \frac{\Delta \alpha_{\max}}{\alpha} = \frac{\Delta \alpha_{\max}}{\alpha_{\max}} \cdot \frac{\alpha_{\max}}{\alpha} = \frac{kl.}{100} \cdot \frac{\alpha_{\max}}{\alpha} \quad (6)$$

tj. toliko puta veću pogrešku, koliko puta je očitavanje manje od
mjernog opsega. Nije dakle dovoljno da imamo instrumente dobre kla-
se, već je važno da njihov opseg odgovara onome što treba izmjeri-
ti. Instrumente treba odabrati tako, da očitavanja budu što bliže mjer-
nom opsegu. Ako očitavanja tokom mjerenja padnu ispod $1/3$ mjernog
opsega, treba promijeniti mjerni opseg, ili instrument.

Kod mjerenja, gdje se rezultat dobiva kao umnožak više
faktora, od kojih svaki sadrži neku pogrešku, dobivamo ukupnu po-
grešku zbrajanjem pojedinih relativnih pogrešaka. Npr. kod mjere-
nja napona voltmetrom bit će pogreška:

$$p_v = \frac{U_{\text{mjer}} - U}{U}$$

odnosno mjereni napon i stvarna vrijednost U su vezani izrazom:

$$U_{\text{mjer}} = U(1 + p_v)$$

Ako napon mjerimo preko naponskog transformatora prijenosnog omje-
ra:

$$k_v = \frac{U_1}{U_2} \cdot (1 + p_v)$$

koji odstupa od nazivne vrijednosti $\frac{U_1}{U_2}$, računat ćemo napon U_1 na
osnovu mjerenja kao:

$$U_{1\text{mjer}} = U_{2\text{mjer}} \cdot k_v = U_2 \cdot (1+p_v) \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot (1+p_v) = \\ = U_1 \cdot (1+p_v) \cdot (1+p_v) = U_1 \cdot (1+p)$$

umjesto stvarne vrijednosti U_1 . Budući da su relativne pogreške vrlo male veličine prema jedinici, možemo njihov umnožak zanemariti, i pisati:

$$1 + p = (1+p_v)(1+p_v) \cong 1 + p_v + p_v$$

$$p = p_v + p_v \quad (7)$$

Isto tako se zbrajaju relativne (ili postotne) pogreške kod mjerenja struje uz upotrebu ampermetra i strujnog transformatora:

$$p = p_a + p_a \quad (8)$$

Sličan je slučaj kod mjerenja otpora metodom napona i struje. Izmjerene vrijednosti iznose:

$$U_{\text{mjer}} = U \cdot (1+p_v)$$

$$I_{\text{mjer}} = I \cdot (1+p_a)$$

$$R_{\text{mjer}} = \frac{U_{\text{mjer}}}{I_{\text{mjer}}} = \frac{U}{I} \cdot \frac{1+p_v}{1+p_a}$$

dok je stvarna vrijednost $R = \frac{U}{I}$. Ukupna pogreška mjerenja može se izraziti kao:

$$1+p = \frac{1+p_v}{1+p_a} = \frac{(1+p_v) \cdot (1-p_a)}{1 - p_a^2} \cong 1+p_v-p_a$$

$$p = p_v - p_a \quad (9)$$

Vidimo i opet, da se pogreške zbrajaju, samo pogreška onog mjerenja, koje ulazi u nazivnik pri izračunavanju rezultata, mijenja predznak.

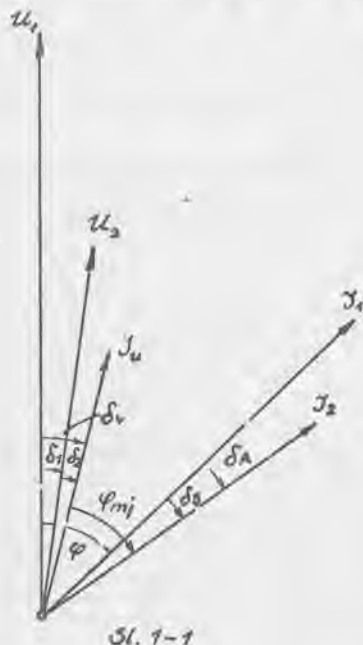
Poseban slučaj predstavlja mjerenje snage vatmetrom. Ako računamo u najopćenitijem slučaju s upotrebom naponskog i strujnog transformatora, koji imaju pogreške prijenosa p_v i p_a , te ako računamo s pogreškom pokazivanja samog instrumenta p_w , onda još uvijek nisu iscrpeni svi izvori pogreške. U samoj naponskoj grani vatmetra dolazi do zakreta mjerne struje u fazi uslijed induktiviteta, a isto tako naponski transformator uzrokuje zakret sekundarnog napona, a strujni transformator zakret sekundarne struje u fazi prema primarnim vrijednostima. Označimo prema sl. 1-1 napon i struju sa U_1 i I_1 , napon i struju na sekundarnoj strani mjernih transformatora sa U_2 i I_2 , a struju u naponskoj grani vatmetra sa I_u . Kut zaostajanja struje za naponom u mreži označimo sa φ , a u instrumentu sa φ_{mj} . Ako zbog preglednosti pripišemo pozitivan

predznak kutu zaostajanja, bit će općenito:

$$\varphi_{mj} = \varphi - \sigma'_1 - \sigma'_2 + \sigma'_3 = \varphi - \sigma' \quad (10)$$

gdje je

$$\sigma' = \sigma'_1 + \sigma'_2 - \sigma'_3 = \sigma'_v - \sigma'_A = \text{ukupna kutna greška} \quad (11)$$



Ova kutna greška izražena je u radijanima, i izračunava se iz vrijednosti u minutama :

$$\sigma' = \frac{\pi}{10800} \cdot \sigma'' \quad (12)$$

Ako je zaokret u fazi na bilo kojem mjestu suprotnog smisla, t. j. u smislu prethodjenja, treba odgovarajuću kutnu grešku σ' uvrstiti s obrnutim predznakom.

Napišimo izraz za snagu koju će pokazati vatmetar:

$$P_{mj} = U \cdot (1+p_v) \cdot I \cdot (1+p_A) \cdot (1+p_w) \cdot \cos(\varphi - \sigma')$$

i prikazimo ga tako, da odvojimo ukupnu pogrešku zbog pogrešnih prijenosa i pokazivanja, i pogrešku zbog kutnih grešaka

$$P_{mjer} = P \cdot (1+p_p) \cdot (1+p_\sigma)$$

Stvarna vrijednost snage u mreži je:

$$P = UI \cos \varphi$$

Mjerena vrijednost iznosi:

$$\begin{aligned} P_{mjer} &= UI \cdot (1+p_v+p_A+p_w) \cdot (\cos \varphi \cos \sigma' + \sin \varphi \sin \sigma') = \\ &= UI \cos \varphi \cdot (1+p_v+p_A+p_w) \cdot (\cos \sigma' + \sin \sigma' \operatorname{tg} \varphi) \end{aligned}$$

Budući da je δ vrlo malen kut, može se s dovoljno tačnosti uzeti:

$$\begin{aligned}\cos \delta &\approx 1 \\ \sin \delta &\approx \delta\end{aligned}$$

pa izraz za mjerenu snagu konačno glasi:

$$\begin{aligned}P_{mjer} &= UI \cos \varphi (1+p_V + p_A + p_W)(1+\delta \operatorname{tg} \varphi) = \\ &= P \cdot (1+p_p)(1+p_\delta)\end{aligned}\quad (13)$$

Ako je p_δ maleno, može se pisati:

$$P_{mjer} = P \cdot (1+p_p + p_\delta) \quad (14)$$

gdje se pogreška pokazivanja i prijenosa računa:

$$p_p = p_V + p_A + p_W \quad (15)$$

a pogreška zbog kutne greške:

$$p_\delta = \delta \operatorname{tg} \varphi \quad (16)$$

Iz ovog izraza se vidi, da će kutna greška uzrokovati to veću pogrešku mjerenja, što bliže je kut φ vrijednosti $\frac{\pi}{2}$, tj. što bliže smo vrijednosti $\cos \varphi = 0$. Budući da je stvarna snaga u tom slučaju:

$$P = UI \cos \varphi \approx 0$$

to je relativna pogreška vrlo velika:

$$p_\delta = \frac{P_{mjer} - P}{P} \rightarrow \infty$$

Apsolutna vrijednost pogreške ostaje međjutim ipak mala veličina, te iznosi:

$$\Delta P_\delta = p_\delta \cdot P = \delta \operatorname{tg} \varphi \cdot UI \cos \varphi = \delta UI \sin \varphi \quad (17)$$

U slučaju da su pogreške poznate iz dijagrama baždarenja, možemo provesti odgovarajuće korekcije. Ako pogreške nisu poznate, već su poznate samo klase pojedinih upotrijebljenih instrumenata, onda možemo odrediti samo granice unutar kojih se nalazi tačan rezultat. Pri tome nije poznat niti predznak pogreške, pa treba računati s najnepovoljnijim slučajem, gdje se apsolutne vrijednosti pogrešaka zbrajaju:

$$p = |p_1| + |p_2| + |p_3| + \dots$$

Uzmimo kao primjer mjerenje otpora U-I metodom. Voltmetar neka je klase 0,2, očitavanje 40% mjernog opsega, a ampermetar klase 0,5, očitavanje 50% mjernog opsega. Pogreška mjerenja napona u tom slučaju nije veća od:

$$p_V = \frac{0,2}{100} \cdot \frac{100}{40} = \pm 0,005$$

Pogreška mjerenja struje nije veća od:

$$p_a = \frac{0,5}{100} \cdot \frac{100}{50} = \pm 0,010$$

Ukupna je pogreška:

$$p = p_v - p_a$$

Medjutim, pošto ne znamo stvarnu veličinu niti predznak pogrešaka, možemo samo utvrditi, da se u najnepovoljnijem slučaju maksimalni iznosi pogrešaka zbrajaju. Ako je $p_v = 0,005$, $p_a = -0,010$, to daje $p = +0,015$, a ako je $p_v = -0,005$, $p_a = 0,010$, to daje $p = -0,015$. Mjerena vrijednost otpora mora se dakle nalaziti u granicama $\pm 0,015$ ili $\pm 1,5\%$ oko stvarne vrijednosti. Kažemo u tom slučaju da je ukupna tačnost mjerenja $1,5\%$.

Iz ovih razmatranja mogu se izvući slijedeći zaključci u pogledu izbora instrumenata:

- 1) instrumente odabrati uvijek tako, da očitavanja vršimo što bliže mjernom opsegu.
- 2) klasu instrumenata odabrati tako, da ukupna tačnost bude u zahtijevanim granicama, pri čemu treba računati, da se relativne pogreške kod složenih mjerenja zbrajaju.
- 3) kod mjerenja snage pri malim vrijednostima $\cos \varphi$ treba izbjegavati upotrebu mjernih transformatora.

1.5 Grafičko prikazivanje

Grafičke prikaze najbolje je crtati još za vrijeme samog mjerenja, kako bi se mogla pojedina očitavanja ponoviti, ako se покаže, da je učinjena greška.

Mjerilo se odabire tako, da čitav dijagram stane na format kojim raspolažemo. U tu svrhu treba unaprijed procijeniti, ili jednim kratkim pokusnim mjerenjem utvrditi maksimalne iznose pojedinih mjerenih veličina na apscisnoj osi i na ordinatnoj osi. Nema svrhe odabirati tako veliko mjerilo, da tačnost crtanja bude mnogo veća od tačnosti mjerenja. Pošto se tačnost mjerenja normalno kreće od $0,2\%$ do 1% , to treba, ako uzmemo $\pm 0,5$ mm kao tačnost crtanja, koja treba da odgovara tačnosti mjerenja, format dijagrama da bude takav, da maksimalni mjereni iznosi zapreme cca:

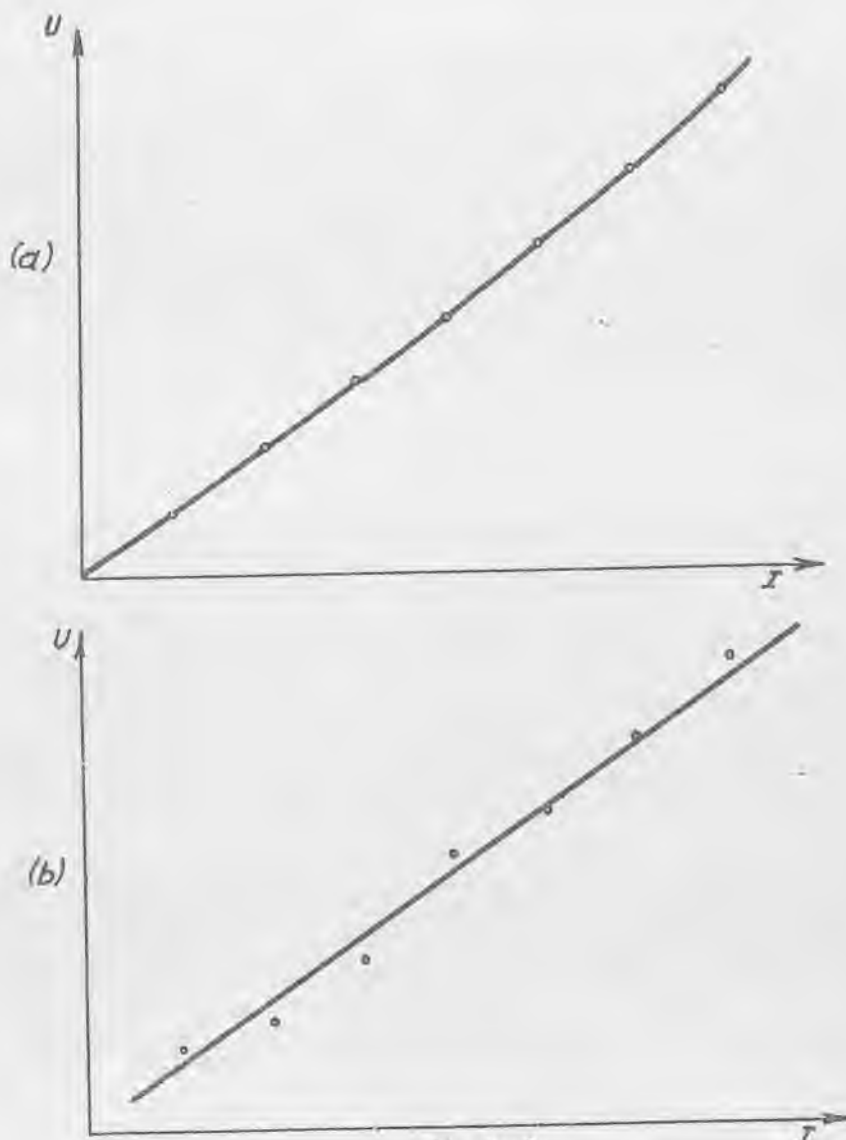
$$0,5 \cdot \frac{100}{0,2} = 250 \text{ mm kod tačnosti } 0,2\%$$

odn.

$$0,5 \cdot \frac{100}{1} = 50 \text{ mm kod tačnosti } 1\%$$

Odabiranje pretjerano velikih formata navodi s jedne strane na pogrešku, da se vrijednosti s dijagrama očitavaju tačnije nego što su u stvari mjerene, a s druge strane rasipanja tačaka zbog netačnosti mjerenja otežavaju uvid u zakonitost, koja vlada među mjerenim veličinama.

Ako snimljene tačke unatoč pažljivo izvedenim mjerenjima jako rasipaju - npr. zbog nestalnog napona ili frekvencije mreže ili drugih razloga, koje ne možemo otkloniti, onda se krivulja povlači između snimljenih tačaka tako, kako odgovara poznatoj zakonitosti između mjerenih veličina. Nipošto se tačke ne spajaju slomljenom linijom, osim u iznimnim slučajevima, gdje želimo prikazati njihovu povezanost, a ne zakonitost neke pojave. Npr. ako mjerimo pad napona na omskom otporu kod nekoliko stru-



Sl. 1-2

ja, i to prikažemo grafički, onda će tačno mjerenje (sl. 1-2a) pokazati eventualni utjecaj zagrijavanja kod većih struja. Manje tačno mjerenje (sl. 1-2b) daje tačke, koje rasipaju oko pravca. Između tih tačaka možemo povući pravac, koji im se najviše približava, dok detalji, kao što je utjecaj zagrijavanja, možda neće biti vidljivi. Tačke koje grubo odstupaju od krivulje određene ostalim tačkama treba nanovo snimiti, a ako to više nije moguće, onda ih ne treba uzeti u obzir kod povlačenja krivulje.

Pravilo je, da se u svakom grafičkom prikazu vidljivo označe sve snimljene tačke, bez obzira na njihovo eventualno odstupanje od izvučene krivulje.

Kod pojava, koje ovise o kvadratu veličine na apscisnoj osi, može se na apscisnoj osi nanijeti kvadratna skala, pa kva-

dratna krivulja prelazi u pravac. Slično kod eksponencijalne ovisnosti krivulja prelazi u pravac, ako upotrijebimo logaritamsko mjerilo. Takvim postupcima ne samo da možemo lakše ucrtati krivulje na osnovu mjerenih tačaka, već možemo lako uočiti odstupanja, a možemo također mnogo sigurnije izvršiti eventualne interpolacije i ekstrapolacije.

Zbog bolje preglednosti i upotrebljivosti grafičkih prikaza, oni treba uvijek da sadrže na ordinatnoj i na apscisnoj osi nanesenu skalu s oznakom veličine na koju se skala odnosi i jedinica u kojima je izražena. Nije dovoljno navesti samo mjerila. Ako je na jednom dijagramu prikazano više veličina, onda treba za svaku od njih navesti posebnu skalu, a krivulje moraju biti jasno označene, da se vidi na što se koja odnosi. Svaki grafički prikaz treba da nosi natpis, koji jasno kaže što je prikazano i na kojem stroju su podaci snimljeni. Prema potrebi navode se i nominalni podaci stroja, i shema mjerenja.

2. Ispitivanje transformatora

2.1 Program ispitivanja

Nakon kontrole materijala iz kojih će se graditi transformator, ispitujemo dijelove transformatora i sam transformator još u toku izrade. Nakon dovršene montaže ispitujemo gotove transformatore. Neka ispitivanja vrše se, ili se ponavljaju, pri isporuci odnosno otpremi transformatora, a isto tako ispituje se transformator prilikom puštanja u pogon, i nakon remonta i popravaka.

Koja će se ispitivanja izvršiti u svakom od navedenih slučajeva, ovisi o vrsti transformatora i njegovoj namjeni, o veličini transformatora, o tome da li se radi o serijskoj proizvodnji ili pojedinačnoj izvedbi, te o eventualno posebnim zahtjevima i dogovoru proizvođača s naručiteljem. U svakom pojedinom slučaju postavlja se program ispitivanja, koji utvrđuje koja će se ispitivanja provesti, i kojim redoslijedom. Taj program može, ali ne mora uzeti u obzir rezultate ispitivanja, koja su već ranije izvršena.

Glavna ispitivanja, koja vršimo na transformatorima snage, možemo podijeliti u slijedeće grupe:

- a) kontrola dimenzija svitaka i brojeva zavoja
- b) ispitivanje ispravnosti i dimenzija jezgre
- c) ispitivanje ulja
- d) ispitivanje mehaničke izvedbe - učvršćenja, nepropusnosti kotla itd.
- e) mjerenje otpora namota
- f) mjerenje prijenosnog omjera
- g) mjerenje grupe spoja
- h) mjerenje gubitaka u praznom hodu i struje magnetiziranja
- i) mjerenja u kratkom spoju
- j) mjerenje zagrijavanja
- k) ispitivanje izolacione sposobnosti
- l) kontrola funkcioniranja pomoćnih uređaja - preklopki, ventilatora itd.
- m) mjerenja kapaciteta, mjerenje šuma i druga specijalna mjerenja.

2.2 Propisi za transformatore

U okviru JEK-a (Jugoslavenskog elektrotehničkog komiteta) razradjen je prijedlog naših nacionalnih standarda za transformatore. Pri tome su uzete u obzir naše specifične okolnosti, kao i potreba međunarodne koordinacije. Od najveće pomoći bile su "Preporuke Internacionalne elektrotehničke komisije za transformatore snage", kao i vrlo detaljno razradjeni njemački propisi VDE, koji su ranije služili kao oslonac našoj elektrotehničkoj praksi. Postupak za usvajanje gornjeg prijedloga kao "Jugoslavenskog standarda" (JUS) upravo je u toku.

Općenito se u propisima definira slijedeće: 1) osnovni pojmovi i termini u vezi s transformatorima - npr. kako se nazivaju pojedine vrste i dijelovi transformatora, kako se definiraju podaci o nominalnim veličinama, vrstama pogona, hlađenju itd., 2) koja svojstva treba da ima transformator, tj. kako treba da je zaštićen prema utjecajima okoline, kakva preopterećenja i abnormalna pogonska stanja treba da podnese, koliko se smije u pogonu zagrijavati itd., 3) kako se ispituju svojstva transformatora i njegova kvaliteta - npr. izolaciona sposobnost, gubici, zagrijavanje i ostalo, te kolika smiju biti odstupanja od ugovorenih ili označenih vrijednosti, i 4) kakve treba da budu oznake na transformatoru.

Osim općih standarda, mogu postojati detaljni proizvodni propisi ili tvornički standardi, koji određuju tehnološki postupak i metode kontrole u toku proizvodnje (tzv. "medjufazna kontrola", između pojedinih većih radova u toku proizvodnje), kako bi transformatori imali kvalitetu i svojstva, koja od njih zahtijevamo. Takodjer su standardizirani različiti materijali, koji služe za gradnju transformatora. Svi ti podaci sadržani su u standardima, koji su djelomično interna stvar tvornice, koja transformatore gradi, no dobrim dijelom su izdani kao jugoslavenski standardi (JUS). Tendencija je, da se što većem broju standarda dađe važnost u cijeloj Jugoslaviji, kao što se nastoji s druge strane sve važnije standarde što više uskladiti s preporukama Internacionalne elektrotehničke komisije.

2.3 Ispitivanja u toku fabrikacije

U toku fabrikacije vrši se ispitivanje željezne jezgre bez namota, ispitivanje pojedinih svitaka, te ispitivanje namotane jezgre prije spajanja svitaka, i poslije spajanja, prije stavljanja u kotao i punjenja uljem. Eventualne greške u fabrikaciji mogu se na taj način otkriti i otkloniti mnogo ranije i uz mnogo manje troškova, nego što bi to bilo u slučaju da se pokažu na dovršenom transformatoru.

2.3.1 Ispitivanje jezgre bez namota. Najčešća greška na jezgri je oštećenje izolacije svornika za pritezanje jezgre, pa zatim spoj među limovima zbog oštećenja izolacije ili zbog drugih uzroka. Uslijed toga stvaraju se zatvorene petlje, koje obuhvaćaju dio magnetskog toka, i u kojima teku struje kratkog spoja. Uslijed tih struja magnetski tok je djelomično potisnut iz presjeka obuhvaćenog kratkim spojem, pa se njegova gustoća na drugim presjecima povećava, mjestimično do visokog zasićenja. Odatle karakteristično brujanje defektne jezgre. Mnogo je opasnija Joule-ova toplina u kratkospojnom krugu. Općenito će biti:

$$P = \frac{E^2}{R} \quad (1)$$

gdje je E inducirani napon u kratkospojnom krugu

R otpor u kratkospojnom krugu

Ako zamislimo kratkospojni krug određene ekvivalentne dužine l presjeka q , koji obuhvaća magnetski tok u presjeku S (sl. 2-1), bit će:

$$E = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot \omega = \text{konst.} \cdot S$$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{q} = \text{konst.} \cdot \frac{l}{q}$$

Kod druge jezgre potpuno geometrijski slične prvoj, ali sa linearnim dimenzijama x - puta povećanima bit će očito:

$$E_x = \text{konst.} \cdot S \cdot x^2 = E \cdot x^2 \quad (2)$$

$$R_x = \text{konst.} \cdot \frac{l \cdot x}{q \cdot x^2} = \frac{R}{x} \quad (3)$$

tako da su napokon gubici kod x - puta povećanih dimenzija:

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{E_x^2}{R_x} = \frac{E^2 \cdot x^4}{R/x} = \\ &= \frac{E^2}{R} \cdot x^5 = P \cdot x^5 \end{aligned} \quad (4)$$

Vidi se, da kod posve sličnog defekta Joule-ova toplina raste proporcionalno sa 5-tom potencijom linearnih dimenzija, dok se površine, kroz koje se toplina odvodi, povećavaju samo sa x^2 , ali se zato i udaljenosti za odvod topline povećavaju x - puta. Za odvod topline vrijedi:

$$P = \Delta \vartheta \cdot \Lambda \quad (5)$$

gdje je $\Delta \vartheta$ = temperaturna razlika

$$\Lambda = k \cdot \frac{S \cdot \Lambda}{L} = \text{toplinska vodljivost}$$

k = ukupni koeficijent odvoda topline

S = ekvivalentni presjek za odvod topline

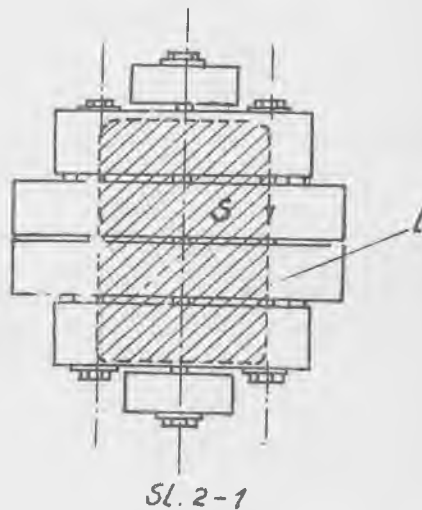
L = ekvivalentna dužina za odvod topline

Ako u prvoj aproksimaciji uzmemo da je k konstanta, možemo pisati kod x - puta povećanih dimenzija:

$$\Lambda_x = k \cdot \frac{S \cdot \Lambda \cdot x^2}{L \cdot x} = \Lambda \cdot x$$

Iz dviju jednačbi

$$\begin{aligned} P_x &= P \cdot x^5 = \Delta \vartheta_x \cdot \Lambda_x \\ P &= \Delta \vartheta \cdot \Lambda \end{aligned}$$



slijedi

$$P_x = \Delta \vartheta \cdot \Lambda \cdot x^5 = \Delta \vartheta_x \cdot \Lambda \cdot x$$

$$\Delta \vartheta_x = \Delta \vartheta \cdot x^4 \quad (6)$$

tj. zagrijanje na mjestu defekta porast će sa x^4 . Odatle se vidi, da su posljedice loše izolacije svornika ili spoja među limovima to teže, što veća je jezgra. Visoko zagrijavanje u jezgri dovodi do daljnjeg uništenja izolacije među limovima, i defekt se naglo širi, te dovodi neminovno do ispada iz pogona, i zahtijeva vrlo opsežne radove da se jezgra ponovno osposobi za rad.

Kod velikih jezgra ne samo da su posljedice teže, već je i veća mogućnost da dodje do oštećenja, jer se barata s većim i težim komadima pri sastavljanju jezgre. Zato se svaka veća jezgra sastavi prije montaže namota, i ispita pod uslovima, koji su daleko oštrij od pogonskih uslova.

Izolacija svornika za pritezanje jezgre prema željeznom paketu ispita se ispitnim naponom od 2500 V, koji se narine između jezgre i svakog pojedinog svornika za redom.

Nakon toga namota se na jezgru provizorni namot, obično tako da se okos vakog stupa omota jednaki broj zavoja savitljivim kabelom. Na takav provizorni namot narine se toliki napon, da indukcija u željezu bude onolika, koliko je projektom predviđjena za normalni pogon, tj.

$$E = 4,44 \cdot B \cdot S \cdot f \cdot w \quad (7)$$

gdje je B = projektom predviđjena indukcija u jezgri

S = presjek jezgre

f = frekvencija narinutog napona

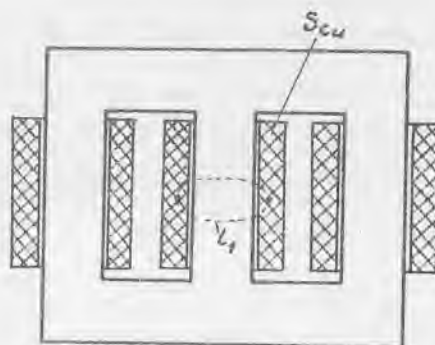
w = broj zavoja po stupu

E = narinuti napon po stupu

Broj zavoja po stupu w treba odabrati tako, da napon E bude u području u kojemu ga možemo lako dobiti i regulirati u ispitnoj stanici. U tu svrhu nisu zgodni odviše mali naponi, a niti naponi veći od 1000-1500 V. U drugu ruku, provizorni namot treba da sadrži što više bakra, kako bi potrebni amperzavoji za magnetiziranje jezgre proizveli što manje gubitke u provizornom namotu.

Gubici u bakru mogu se izraziti kao:

$$P_{Cu} = I^2 \cdot R = \left(\frac{Q}{w}\right)^2 \cdot \rho \cdot \frac{w \cdot l_1}{q_1} = \rho \cdot \frac{l_1}{S_{Cu}} \cdot Q^2 \quad (8)$$



Sl 2-2

gdje je $\Theta = I \cdot w$ = ukupno protjecanje za jedan stup

l_1 = srednja dužina jednog zavoja

q_1 = presjek jednog vodiča

$S_{Cu} = w \cdot q_1$ = ukupni presjek bakra na jednom stupu

ρ = specifični otpor

w = broj zavoja na jednom stupu

Za magnetiziranje jezgre potrebno je određeno protjecanje Θ . Srednja dužina zavoja l_1 ne može se mnogo mijenjati uz određene dimenzije željezne jezgre. Ukupni presjek bakra S_{Cu} bitno utječe na gubitke u bakru pri pokusima s provizornim namotom, jer su ovi obrnuto proporcionalni sa S_{Cu} . Kod namatanja provizornog namota na stup zbog jeftinijeg i jednostavnijeg postupka redovito je upotrijebljen ukupni presjek bakra daleko manji od presjeka definitivnog namota. Normalno je struja praznog hoda tako malena, da se kod mjerenja u praznom hodu zanemaruje i pad napona, i gubici strujne topline u namotu. No kod mjerenja s provizornim namotom treba ocijeniti veličinu gubitaka, i provesti odgovarajuće korekcije, ako se pokaže potrebnim.

Kad je provizorni namot priključen na takav napon, da dobijemo indukciju u željezu kao u nominalnom pogonu, kontroliramo slijedeće:

a) brujanje i vibracije, što može biti uzrokovano defektom u jezgri, ali može biti razlog i nedovoljno stegnuta jezgra, pa to odmah ispravimo;

b) zagrijavanje jezgre, koje se pokazuje u slučaju defekta na pojedinim mjestima znatno višim od prosječnog zagrijavanja jezgre. Kontrola se vrši polaganjem ruke na različita mjesta jezgre, i, po potrebi, termometrom;

c) gubitke u jezgri, koji se moraju približno podudarati s vrijednostima prema projektu. Pri tome treba uvažiti, da je $\cos \varphi$ vrlo nizak, i da mjerenja treba provesti sa sinusnim naponom.

Treba mjeriti sa 3 vatmetra za mali $\cos \varphi$, i provesti čitavo mjerenje onako, kako će to biti detaljnije izneseno kod izlaganja o mjerenjima u praznom hodu. Za razliku od mjerenja u praznom hodu na gotovom transformatoru, ovdje treba često od izmjerene snage odbiti gubitke u provizornom namotu:

$$P_{Fe} = P_{mj} - 1,5 \cdot R_{prov} \cdot I_0^2 \quad (9)$$

gdje je R_{prov} = otpor provizornog namota mjeren između stezaljki.

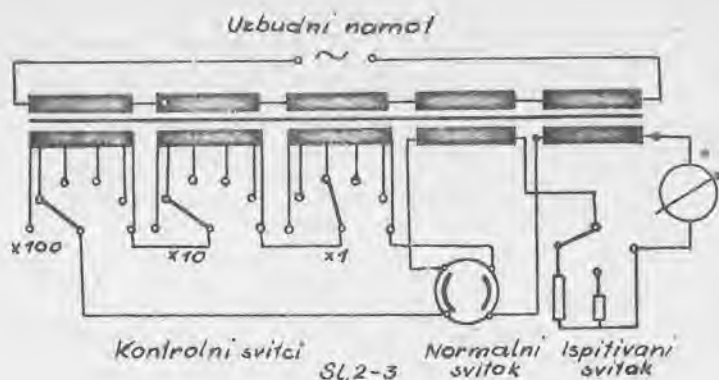
Ako su sve ove kontrole dale zadovoljavajuće rezultate, onda podignemo napon tako, da magnetska indukcija poraste za cca 10%, i pustimo jezgru tako kroz 15 minuta. Gubici su pri tome veći za preko 20%. Ako u jezgri postoji skriveni defekt, koji se još nije pokazao, ovakvo povećano naprezanje će ga prije izazvati, nego normalne pogonske prilike.

Kod specijalnih jezgri, koje su opremljene namotima za kompenzaciju viših harmoničnih članova, stavimo sada provizorno na jezgru i te kompenzacione namote, pa s pomoću oscilografa sni-

mamo struje magnetiziranja, i promatramo djelovanje kompenzacionih namota.

2.3.2 Ispitivanje svitaka. Još prije montaže na jezgru potrebno je ispitati pojedine svitke. Kontroliramo dimenzije svitaka i broj zavoja pojedinog svitka. Tačne dimenzije svitaka nužne su zbog toga, jer o njima ovisi uspješna montaža i učvršćenje namota. Mala odstupanja u dimenzijama pojedinih svitaka mogu ukupno iznositi toliko, da se učvršćenje namota ne može izvesti na način koji je predviđen konstrukcijom. To uzrokuje velike neprilike, pogotovo u serijskoj fabrikaciji, pa zbog toga zahtijevamo još pri nabavci materijala, da dimenzije bakra budu održane unutar nekih tolerancija, isto tako i prirast zbog izolacije, a takodjer zahtijevamo da upotrijebljeni izolacioni i konstrukcioni materijali s vremenom ne mijenjaju dimenzije preko dozvoljenih tolerancija uslijed sušenja, starenja i drugih utjecaja. Posljednja kontrola prije montaže svitaka odnosi se na dimenzije gotovih svitaka, koje ne smiju odstupati više od tolerancija određenih tvorničkim propisima.

Broj zavoja pojedinih svitaka može se kontrolirati usporedbom sa svitkom poznatog broja zavoja, ako se oba stave na istu jezgru, uzbudjenu izmjeničnim magnetskim tokom. Naponi na oba svitka odnose se onda kao brojevi zavoja. Mjerenje je tačnije, ako se oba svitka spoje u protuspoj, pa se mjeri razlika njihovih napona odgovarajućim voltmetrom nižeg mjernog područja. U krajnjem slučaju, ako "normalni" svitak, poznatog broja zavoja, ima isti broj zavoja kao ispitivani svitak, može se razlika napona vrlo tačno kontrolirati osjetljivim nul-instrumentom. Jedina greška može u takvom slučaju potjecati od rasipanja magnetskog toka van jezgre ispitnog uređaja. Ovo rasipanje može se smanjiti na minimum, ako se jezgra izvede pažljivo, sa što manjim rasporima na rastavnim mjestima - npr. kao dvodjelna prstenasta jezgra s dobrim dosjedima - i ako se uzbudni namot razdjeli jednoliko po čitavoj dužini jezgre. Princip rada jednog takvog uređaja za kontrolu broja zavoja svitaka vidi se na sl. 2-3.



Uzbudni namot podijeli se po čitavoj dužini jezgre, s time, da se na sastavima može otvoriti, kad se otvara jezgra, da bi se umetnuo ispitivani svitak. Na jezgri se nalaze kontrolni svitci po sistemu dekada, tj. s odvojcima svakih 100, svakih 10 i svakih 1 zavoja. Postavljanjem ručica "x 100", "x 10" i "x 1" u takve položaje, da nul-instrument pokaže razliku napona $\emptyset$ između ispi-

vanog svitka i dekadskih kontrolnih svitaka, možemo direktno očitati broj zavoja ispitivanog svitka do nekoliko stotina zavoja. Kod još većeg broja zavoja dodaje se na jezgru još jedan "normalni" svitak tačno poznatog broja zavoja, kojemu se mogu naponi dekadskih kontrolnih svitaka s pomoću dvostruke preklopke bilo pribrojiti, bilo oduzeti. Na taj način može se i opet ustanoviti razlika ispitivanog svitka prema normalnom svitku na 1 zavoj tačno. Da se zaštiti nul-instrument uključuje se u seriju odgovarajući predotpor, dok nije postavljen na dekadskim ručicama približno tačan broj zavoja, pa se onda konačno tačno udešavanje vrši s povećanom osjetljivošću nul-instrumenta.

Kontrola broja zavoja svitaka omogućuje takodjer da se otkrije event. kratki spoj medju zavojima, jer će u jednu ruku napon na svitku biti manji, a u drugu ruku struja uzbude povećana. Osim toga, na uređaju se istovremeno vrši i kontrola smisla namatanja, tj. tačnih oznaka početka i svršetka svitka, jer se u slučaju pogrešnih oznaka na nul-instrumentu ne može dobiti nula. U tom slučaju mjeri se, naime, zbroj umjesto razlike napona ispitivanog svitka i normalnog odnosno kontrolnih svitaka.

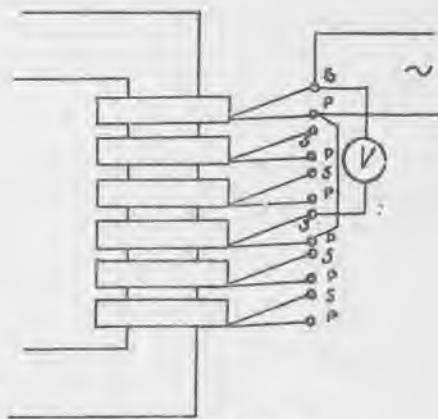
2.3.3 Ispitivanje namotane jezgre. Kad su svitci ispitani i montirani na jezgru, ispitujemo još jednom ispravan smisao namatanja prije spajanja svitaka. Može se naime dogoditi, da se kod montaže izgube ili poremete oznake početaka i krajeva svitaka. Zbog toga narinemo na jedan od svitaka niski izmjenični napon. Ako sada spojimo početak tog svitka s početkom bilo kojeg od svitaka, onda voltmetar izmedju svršetaka istih svitaka mora pokazati napon $\emptyset$, ako su brojevi zavoja jednaki, odnosno razliku napona, ako su naponi obaju svitaka različiti (sl. 2-4).

Osobitu pažnju treba posvetiti paralelnim granama, ukoliko su u namotu predviđene. Kontrola se vrši tako, da jezgru uzbudimo izmjeničnim naponom, spojimo početke obiju paralelnih grana, a izmedju svršetaka mjerimo razliku napona. Ako je ova jednaka nuli, možemo izvršiti paralelno spajanje.

Kod ovih kontrola treba paziti, da narinuti napon ne bude veći od cca 50% V/zavoju koji su predviđeni u normalnom pogonu, jer izolacija transformatora bez ulja nema još svoju punu vrijednost.

Kad je transformator spojen, vrše se obično još prije stavljanja u kotao i punjenja uljem orijentaciona mjerenja otpora, prijenosnog omjera, grupe spoja, a zatim se vrši pokus kratkog spoja, i naponski pokus stranim naponom sa svega 50% vrijednosti nominalnog napona. Ova mjerenja se vrše, kako bi se otkrile event. grube greške prije definitivnog dovršenja.

Pokus kratkog spoja bez kotla omogućuje nam, da kasnije, nakon mjerenja gotovog transformatora u kotlu, ocijenimo utjecaj kotla na rasipne tokove i dodatne gubitke. Pošto je hladjenje transformatora bez ulja relativno slabo, treba taj pokus provesti brzo, tako da se nakon cca 2 min transformator ponovno isklupi.



Sl. 2-4

Naponski pokus sa 50% nominalnog napona nipošto ne predstavlja ispitivanje kvalitete izolacije, već treba samo da na vrijeme otkrije event. grube greške nastale kod spajanja i montaže.

Provedba svih gore navedenih mjerenja bit će dalje detaljnije opisana.

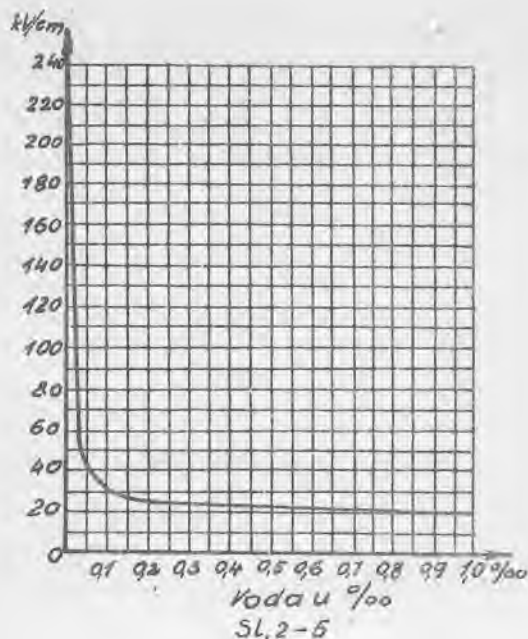
Prije stavljanja u kotao kontrolira se mehanička izvedba jezgre i namota, osobito učvršćenja namota, jer nedovoljna učvršćenja mogu biti uzrokom, da kod kratkih spojeva u pogonu dodje do mehaničkog oštećenja namota. To je osobito opasno kod pogona s čestim udarcima opterećenja (veliki motori s intermitiranim pogonom i sl.), gdje treba i naknadno u pogonu povremeno pregledati i pri-tegnuti učvršćenja namota.

Kontrola nepropusnosti kotla vrši se najbolje uljem, jer ulje prodire kroz vrlo sitne pore materijala, pa je takva kontrola najsigurnija.

2.3.4 Ispitivanje ulja. Od transformatorskog ulja zahtijevamo određena fizikalna i kemijska svojstva, koja se utvrđuju laboratorijskim pretragama. Probojna čvrstoća novog ulja treba da bude bar 125 kV/cm, a ulja u pogonu bar 80 kV/cm. Mjerenje probojne čvrstoće vrši se prema propisima u aparatu s elektrodama oblika polukugle razmaknutim 2,5 mm. Potrebno je poduzeti sve mjere, da se ulje prilikom uzimanja probe ne onečisti, i da izidju event. mjehurići zraka. Od izvršenih 6 mjerenja uzima se kao rezultat prosjek zadnjih 5 mjerenja. Kontrolu probojne čvrstoće treba provesti i u pogonu, svake 2-3 godine. Vlažno ulje može se lako prepoznati i bez mjerenja probojne čvrstoće, ako se zagrije u epruveti do cca 150°C, pri čemu se pojavi pucketanje.

Niska probojna čvrstoća ne znači još da je ulje loše kvalitete, već samo da ga treba osušiti (sl. 2-5). Isto tako visoka

probojna čvrstoća još ne znači dobro ulje, jer se ona može u pogonu vrlo brzo pokvariti. Laboratorijska pretraga treba da provjeri slijedeća svojstva ulja: a) specifičnu težinu (oko 0,9 kod 20°C); b) plamšje treba da bude iznad 145°C; c) viskozitet treba da bude manji od 500 E kod -30°C, a manji od 6 E kod 20°C; d) kiselinaski broj ne treba da predje 0,05; e) broj osapunjenja treba da je najviše 0,15; f) pepela smije biti do 0,005%; g) prirast volumena sumporne kiseline kod miješanja s uljem 1:1 ne smije prijeći 8%. Svi ovi podaci odnose se na novo ulje.



Sva ova ispitivanja još ne daju pravu sliku o kvaliteti ulja, dok se ne izvrši umjetno starenje. To se radi standardiziranim postupkom, pri temperaturi 95°C, uz bakar kao katalizator, koji se opetovano uranja i vadi, i

na taj način unosi zrak u ulje. Kroz 48 sati izvrši se 72000 uranjanja. Nakon toga se kontrolira starenje ulja mjerenjem kiselinškog broja, broja osapunjenja, određivanjem količine taloga, količine apsorbiranog kisika, probojne čvrstoće itd.

Na probojnu čvrstoću ulja u velikoj mjeri utječe vlaga i strane čestice, kao niti pamuka, papira i sl., te nečistoća. Lakiranjem svih dijelova izolacije transformatora sprečava se da niti dospiju u ulje. Kontrola čistoće rada i mjera poduzetih da vlaga ne dospije u ulje (konzervator, dehidrator) jednako je važna kao i kontrola kvalitete samog ulja.

2.4 Mjerenje otpora namota

Mjerenje otpora namota treba izvršiti na dovršenom transformatoru, uz istovremeno mjerenje temperature okoline odnosno ulja. Važno je da se ovo mjerenje izvrši pri poznatoj temperaturi bakra, jer je ono osnova za kasnije određivanje zagrijanja iz pri-rasta otpora.

Ovo mjerenje vrši se redovito metodom struje i napona. Glavnu poteškoću predstavlja visoki induktivitet namota transformatora, koji može dovesti do posve pogrešnih rezultata, ako zaboravimo na njegov utjecaj.

2.4.1 Utjecaj predotpora. Priključak mjernog napona znači tek početak porasta mjerne struje, koja raste od nule do konačne vrijednosti $I = \frac{U}{R}$ po eksponencijalnom zakonu:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

U tom izrazu je: $T = \frac{L}{R} =$ vremenska konstanta

$L =$ ukupni induktivitet kruga

$R = R_m + R_p =$ ukupni otpor kruga, koji se sastoji od mjerenog otpora R_m i predotpora R_p .

Ako vršimo mjerenje U-I metodom prije nego što je struja dosegla konačnu vrijednost, istovremenim očitavanjem struje i i napona u na otporu R_m , onda u stvari mjerimo

$$u = i \cdot R_m + L \cdot \frac{di}{dt}$$

umjesto pada napona na otporu R_m :

$$u_R = i \cdot R_m$$

Odstupanje iznosi:

$$\Delta u = u - u_R = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} = U \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (2)$$

Kad ne bi bilo predotpora R_p , bila bi vremenska konstanta:

$$T_m = \frac{L}{R_m} = \frac{R}{R_m} \cdot T = k \cdot T \quad (3)$$

a potrebiti napon za istu mjernu struju bio bi

$$U_m = \frac{R_m}{R} \cdot U = \frac{U}{k} \quad (4)$$

gdje je

$$k = \frac{R_m + R_p}{R_m} > 1 \quad (5)$$

Ako želimo, da odstupanje bude manje od 0,5% konačne vrijednosti napona na mjerenom otporu U_m :

$$\frac{\Delta u}{U_m} \leq 0,005$$

onda mora biti:

$$\frac{U}{U_m} \cdot e^{-\frac{t}{T}} \leq 0,005$$

$$\frac{t}{T} \geq \ln 200 \frac{U}{U_m}$$

odnosno

$$t \geq T \cdot (5,3 + \ln \frac{U}{U_m}) = \frac{T_m}{k} \cdot (5,3 + \ln k) \quad (6)$$

Kod mjerenja bez predotpora R_p , kada je $U = U_m$, trebalo bi čekati $5,3 \cdot T_m$ sekundi, da postignemo tu tačnost. S predotporom R_p vremenska konstanta je k puta manja, a izraz u zagradi se povećava za član $\ln k$, pa se vidi, da produkt pada, tj. da će se znatno brže postići ista tačnost, ako je uključen predotpor R_p .

Promotrimo odnos odstupanja Δu bez predotpora i sa predotporom. Bez predotpora ono iznosi:

$$\Delta u_m = U_m \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (7)$$

a sa predotporom

$$\Delta u = U \cdot e^{-\frac{t}{T}} = k \cdot U_m \cdot e^{-k \cdot \frac{t}{T_m}} \quad (8)$$

Kod uključenog predotpora, koji povisuje ukupni otpor k puta, početna vrijednost odstupanja je k -puta veća, ali je zato vremenska konstanta k -puta manja, tj. odstupanje mnogo brže pada s vremenom. Ako tražimo utjecaj faktora k na odstupanje Δu , dobivamo derivaciju

$$\frac{d(\Delta u)}{dk} = U_m \cdot e^{-k \cdot \frac{t}{T_m}} \cdot (1 - k \cdot \frac{t}{T_m})$$

koja je očigledno negativna, ako je $k \cdot \frac{t}{T_m} > 1$, odnosno:

$$t > \frac{T_m}{k} = T \quad (9)$$

Negativna derivacija po k znači, da se odstupanje smanjuje, kad se k povećava.

Ako dakle s očitanjem pričekamo najmanje toliko dok prođe vrijeme $t = T$ onda će pogreška biti to manja, što je veći predot-

por R_p . Pošto i onako moramo čekati bar $t = (5,3 + \ln \frac{U}{U_m}) \cdot T$ ako želimo da pogreška bude manja od $0,005 \cdot U_m$ (tj. od $0,5\%$ mjerenog napona), jasno je, da je pogodno uzeti što veći napon mjerenja i što veći predotpor.

Kod velikih transformatora vremenska konstanta može biti vanredno velika. Nije npr. ništa neobično, da uz otpor cca $0,01 \Omega$ induktivitet iznosi cca 3 H , tako da je

$T = \frac{3}{0,01} = 300 \text{ sek}$ ili 5 min . Ako mjerenje vršimo sa 200 A , i direktno narinemo napon 2 V , treba čekati cca 30 min , da odstupanje mjerenog napona bude manje od $0,5\%$. Ako, međutim, upotrijebimo napon 110 V , s predotporom $0,55 \Omega$, bit će vremenska konstanta

$T = \frac{3}{0,55 + 0,01} \approx 5,4 \text{ sek}$. Mjereni napon uz 200 A bit će i opet 2 V ; odstupanje od $0,5\%$ iznosi $0,01 \text{ V}$, a to je od ukupnog napona 110 V :

$$\Delta u \% = \frac{0,01}{110} \cdot 100 = 0,01\% \text{ odnosno}$$

mora biti:

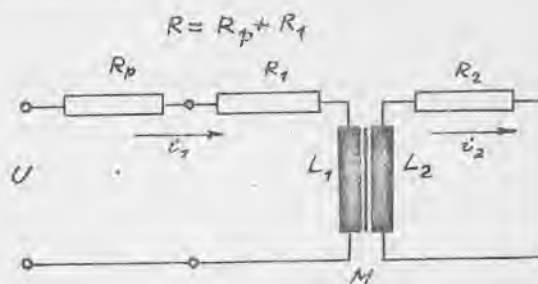
$$e^{-\frac{t}{T}} = 0,0001$$

$$t/T = 9,2$$

$$t = 9,2 \cdot 5,4 = 50 \text{ sek}$$

Umjesto 30 min bez predotpora treba dakle čekati cca 1 min sa predotporom, što je znatno poboljšanje, ma da je još uvijek dugo vrijeme, ako se otpor mjeri zbog određivanja temperature namota, gdje se u roku od nekoliko minuta temperatura bakra praktički izjednači s temperaturom ulja, čim isključimo opterećenje. Ako za mjerenje upotrijebimo dovoljno osjetljiv milivoltmetar, tako da nam bude dovoljno mjesto 2 V svega 20 mV na mjerenom otporu, možemo smanjiti mjernu struju na 2 A , pa uzeti predotpor 55Ω . U tom slučaju račun pokazuje, da je za postizavanje iste tačnosti potrebno čekati svega cca 1 sek .

2.4.2 Utjecaj kratkog spoja drugih namota. Pri razmatranju poteškoća koje stvara induktivitet pri mjerenju otpora namota, nameće se pitanje, nije li pogodnije kod mjerenja na jednom namotu drugi namot kratko spojiti. Prema sl. 2-6 mogu se za taj slučaj postaviti jednačbe po Laplace-u u transformiranom području



$$i_1 R + i_1 p L_1 - i_2 p M = \frac{U}{p} \quad (1)$$

$$-i_1 p M + i_2 R_2 + i_2 p L_2 = 0 \quad (2)$$

Ako uredimo te jednačbe i uvedemo vremenske konstante jednog i drugog namota:

$$T_1 = \frac{L_1}{R} \quad (3)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2} \quad (4)$$

dobivamo:

$$i_1 R(1+pT_1) - i_2 pM = \frac{U}{p}$$

$$-i_1 pM + i_2 R_2(1+pT_2) = 0$$

a odatle slijedi:

$$\begin{aligned} i_1 &= \frac{U}{p} \cdot \frac{R_2(1+pT_2)}{RR_2(1+pT_1)(1+pT_2) - p^2 M^2} = \\ &= \frac{U}{p} \cdot \frac{R_2(1+pT_2)}{RR_2(1+pT_1+pT_2+p^2 T_1 T_2 - p^2 \cdot \frac{M^2}{RR_2})} \end{aligned}$$

Ako zanemarimo male rasipne tokove prema glavnim tokovima ϕ , onda će biti $L_1 = w_1^2 \cdot \phi \cdot k$, $L_2 = w_2^2 \cdot \phi \cdot k$, $M = w_1 \cdot w_2 \cdot \phi \cdot k$, pa je očito $M^2 = L_1 L_2$, odnosno zadnji član u nazivniku:

$$p^2 \cdot \frac{M^2}{RR_2} = p^2 \cdot T_1 T_2$$

tako da napokon dobivamo izraz za struju u transformiranom području:

$$i = \frac{U}{R} \frac{1+pT_2}{p[1+p(T_1+T_2)]} = I_1 \frac{1+pT_2}{p(1+pT_k)} \quad (5)$$

gdje je I_1 = konačna vrijednost mjerne struje = $\frac{U}{R}$

$$T_k = \text{vremenska konstanta} = T_1 + T_2$$

Prebacivanjem ovog izraza u originalno područje $i = f(t)$ dobivamo:

$$i_1 = I_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \right) \quad (6)$$

Mjereni napon bit će, zbog induktiviteta:

$$\begin{aligned} u_m &= U - i_1 R_p = U - U \cdot \frac{R_p}{R} \cdot \left(1 - \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \right) = \\ &= U \cdot \frac{R_1}{R} + U \cdot \frac{R_1}{R} \cdot \frac{R_p}{R_1} \cdot \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} = \end{aligned}$$

$$= U_m \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}}\right) \quad (7)$$

gdje je

$$U_m = U \cdot \frac{R_1}{R} = \text{mjereni napon kod stacionarne struje.}$$

Kad bi mogli mjeriti pad napona na omskom otporu namota R_1 , koji bi bio odvojen od induktiviteta L , mjereni napon pri istoj struji i_1 bi bio:

$$u_R = i_1 \cdot R_1 = U_m \left(1 - \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}}\right) \quad (8)$$

pa odstupanje mjenog napona iznosi:

$$\Delta u = u_m - u_R = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \quad (9)$$

Ako se ograničimo na promatranje utjecaja drugog namota, tj. vremenske konstante T_2 , možemo zaključiti slijedeće:

- a) kad bi bilo $R_2 = \infty$, što znači otvoren krug, bilo bi $T_2 = \infty$, $T_k = T_1$, te bi dobili već poznati slučaj

bez kratkog spoja:

$$\Delta u = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}}$$

b) kad bi bilo $R_2 = 0$, što znači savršen kratki spoj bez otpora, bilo bi $T_2 = 0$, $T_k = \infty$, $\Delta u = 0$; mjerenje bi bilo tačno od prvog momenta, jer ne bi bilo promjene toka u jezgri, a struja i_1 bi odmah skočila na vrijednost I_1 , kao da induktiviteta nema.

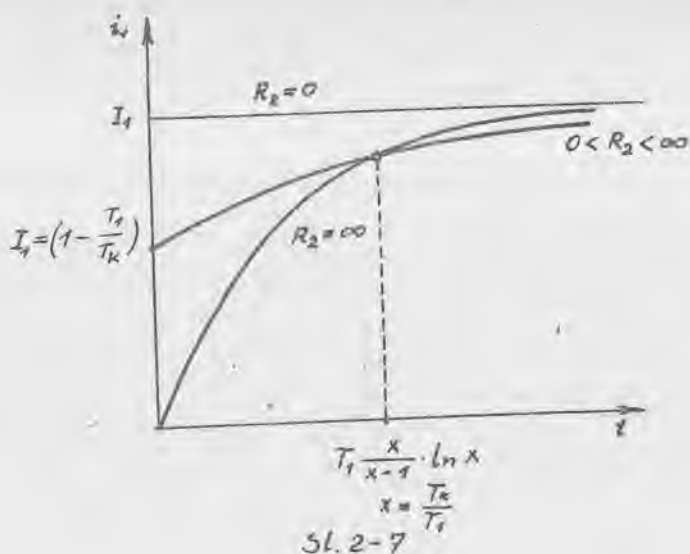
c) kad bi nastupio stvarni slučaj $0 < R_2 < \infty$, struja ne bi skočila na vrijednost I_1 , već na vrijednost $I_1 \left(1 - \frac{T_1}{T_k}\right)$ (sl.2-7).

Nakon toga ona bi rasla prema vrijednosti I_1 s vremenskom konstantom $T_k > T_1$. Ako označimo sa Δu_0 odstupanje napona pri otvorenom sekundarnom namotu bit će:

$$\Delta u_0 = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot 1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (10)$$

$$\Delta u = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-\frac{t}{T_k}} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_0} = \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{-t \left(\frac{1}{T_k} - \frac{1}{T_1}\right)} = \frac{T_1}{T_k} \cdot e^{t \cdot \frac{T_2}{T_1 T_k}} \quad (12)$$



Kratko spojen namot bit će povoljniji tako dugo dok bude:

$$\frac{\Delta u}{\Delta u_0} < 1$$

odnosno

$$t \cdot \frac{T_2}{T_1 T_k} < \frac{T_k}{T_1}$$

$$t < \frac{T_1 T_k}{T_2} \cdot \ln \frac{T_k}{T_1} = \frac{T_1 T_k}{T_k - T_1} \cdot \ln \frac{T_k}{T_1} = T_1 \cdot \frac{x}{x - 1} \cdot \ln x$$

gdje je $x = T_k/T_1$ = omjer povećanja vremenske konstante zbog kratkog spoja u sekundarnom namotu.

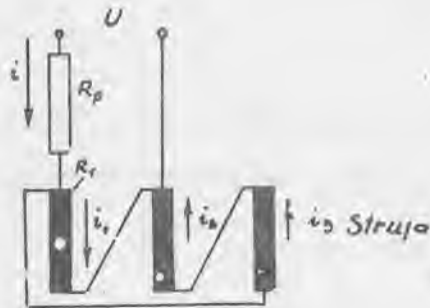
Uz vrlo veliki predotpor R_p bit će $T_k \approx T_1$, odnosno $x = 1$, a bez predotpора bit će $T_2 \approx T_1$, odnosno $T_k \approx 2 T_1$, tj. $x = 2$, što znači, da bi se tačnost mjerenja povećala pri kratko-spojenom namotu u prvom slučaju uz $t < T_1$, a u drugom slučaju uz $t < 1,4 \cdot T_1$. U stvari treba pričekati najmanje $t =$

$$= T_k \cdot (5,3 + \ln \frac{U}{U_m} \cdot \frac{T_1}{T_k}), \text{ da bi postigli tačnost od } 0,5\%, \text{ dakle u}$$

svakom slučaju više od vremena, kod kojega kratkospojeni namot daje tačnije mjerenje. Očito je, da za mjerenje otpora bilo kojeg namota kratko spajanje drugih namota ne može biti ni u kojem slučaju pogodno.

2.4.3 Utjecaj spoja transformatora. Kod mjerenja na transformatoru s jednim od glavnih namota, ili s pomoćnim namotom spojenim u trokut, obično se ne može otvoriti spoj, pa se mjerenje vrši pri zatvorenom namotu. Kako će ovaj utjecati na prelaznu pojavu kod uključivanja, ovisi o spoju transformatora i provedbi mjerenja. U

nastavku je razmotreno nekoliko karakterističnih slučajeva, uz zanemarenje rasipnih reaktancija. Svagdje je označen otpor po fazi sa R_1 , induktivitet sa L_1 , induktivitet među fazama sa M i predotpor sa R_p . Gubici u željezu su zanemareni.



$$i = i_1 + i_2$$

$$\phi_1 = 2\phi_2 = 2\phi_3$$

$$L_1 = \frac{\omega\phi_1}{i_1} = L_2 = L_3$$

$$M_{12} = M_{23} = M_{31} = \frac{\omega\phi_2}{i_1} = \frac{L_1}{2}$$



Tok

Sl. 2-8

Sl. 2-8. a) Spoj trokut-zvijezda, ili trokut-cikcak, mjerenje prema
Jednadžbe glase:

$$i_1 R_1 + i_1 p L_1 + (i_1 + i_2) R_p + i_2^2 p M = \frac{U}{p} \quad (1)$$

$$i_1^2 p M = (i_1 + i_2) R_p + i_2^2 p L_1 + i_2^2 p M = \frac{U}{p} \quad (2)$$

$$i_1 (R_1 + R_p + p L_1) + i_2 (R_p + p L_1) = \frac{U}{p}$$

$$i_1 (R_p + p L_1) + i_2 (2 R_1 + R_p + p L_1) = \frac{U}{p}$$

Ako se izračuna i_1 i i_2 , nakon uređjivanja izraza izlazi:

$$i_1 = \frac{U}{p} \cdot \frac{2}{2 R_1 + 3 R_p + 3 p L_1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)} \quad (3)$$

$$i_2 = \frac{U}{p} \cdot \frac{1}{2 R_1 + 3 R_p + 3 p L_1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)} \quad (4)$$

$$i = i_1 + i_2 = \frac{U}{R} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)} \quad (5)$$

gdje su uvedene oznake:

$$R = \frac{2}{3} R_1 + R_p$$

$$T = \frac{L_1}{R}$$

U originalnom području izrazi za struje glase:

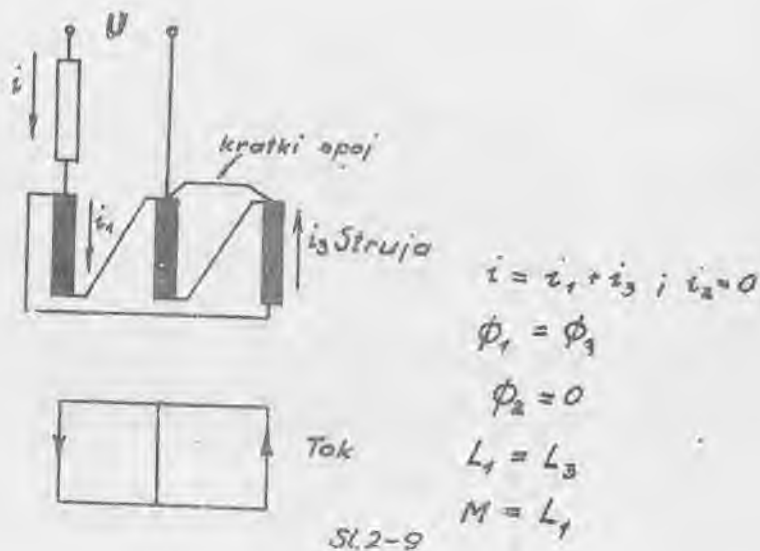
$$i_1 = \frac{2}{3} \cdot \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (6)$$

$$i_2 = \frac{1}{3} \cdot \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (7)$$

$$i = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (8)$$

Ukupna struja raste po eksponencijalnoj funkciji s istom vremenskom konstantom T kao i struje pojedinih grana. Vremenska konstanta računa se iz induktiviteta L_1 i otpora $R = \frac{2}{3}R_1 + R_p$, to je neznatno povećana prema vremenskoj konstanti namota na jednom stupu. Dodavanjem predotpora R_p može se vremenska konstanta po volji smanjiti.

b) Spoj trokut-zvijezda, ili trokut-cikcak, ali napajanje prema sl. 2-9. Jednačbe glase:



$$i_1 R_1 + i_1 p L_1 + (i_1 + i_3) R_p + i_3 p M = \frac{U}{p} \quad (13)$$

$$i_1 p M + (i_1 + i_3) R_p + i_3 R_1 + i_3 p L_1 = \frac{U}{p} \quad (14)$$

$$i_1 (R_1 + R_p + p L_1) + i_3 (R_p + p L_1) = \frac{U}{p}$$

$$i_1 (R_p + p L_1) + i_3 (R_1 + R_p + p L_1) = \frac{U}{p}$$

$$i_1 = i_3 = \frac{U}{p} \cdot \frac{R_1}{R_1^2 + 2R_1(R_p + p L_1)} =$$

$$= \frac{U}{R_1 + 2R_p} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)}$$

$$i = \frac{U}{\frac{R_1}{2} + R_p} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)} \quad (16)$$

gdje znači:

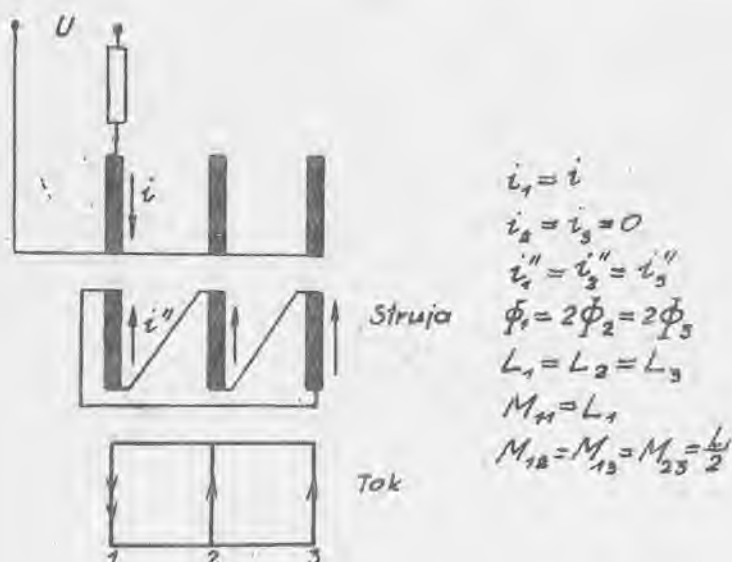
$$T = \frac{L_1}{R_1/2 + R_p} \quad (17)$$

Struja i raste po jednostavnoj eksponencijalnoj funkciji:

$$i = \frac{U}{R_1/2 + R_p} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (18)$$

a isto tako i struje i_1 i i_3 . Vremenska konstanta T daće se po volji smanjiti povećanjem predotpora R_p .

c) Spoj zvijezda-trokut, mjerenje otpora jedne faze prema sl.2-10. Jednadžbe glase:



Sl.2-10

$$i(R_1 + R_p) + i p L_1 - i''_1 p M_{11} + i''_2 p M_{12} + i''_3 p M_{13} = \frac{U}{p} \quad (19)$$

$$-i p M_{11} + 2i p M_{12} + i''_3 R_2 + i''_3 p L_2 - 2i''_3 p M_{12} = 0 \quad (20)$$

$$i(R_1 + R_p + pL_1) + i''(pL_1 - pL_1) = \frac{U}{p}$$

$$-i(pL_1 - pL_1) + i''(3R_2 + 3pL_2 - 3pL_2) = 0$$

$$i(R_1 + R_p + pL_1) = \frac{U}{p}$$

$$i''3R_2 = 0$$

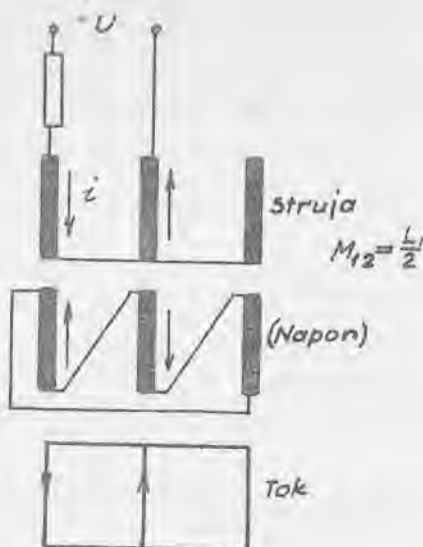
$$i'' = 0$$

$$i = \frac{U}{R_1 + R_p} \cdot \frac{\frac{R_1 + R_p}{L_1}}{p(p + \frac{R_1 + R_p}{L_1})} = \frac{U}{R_1 + R_p} \cdot \frac{1/T}{p(p + 1/T)}$$

$$i = \frac{U}{R_1 + R_p} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (21)$$

gdje je $T = \frac{L_1}{R_1 + R_p}$, tj. ako zanemarimo rasipanja, prilike su tačno jednake, kao da je u trokut spojeni namot otvoren. Do istog zaključka moglo bi se odmah doći promatranjem tokova, jer kolika god bila momentana vrijednost struje i , tokovi u namotu, koji je spojen u trokut, inducirat će napon, koji se međusobno poništavaju.

d) Spoj zvijezda-trokut, mjerenje otpora dviju faza prema sl. 2-11. Razmatranjem tokova odmah se vidi, da se ukupni tok mora zatvoriti kroz 2 stupe transformatora, i kako god se taj tok mijenja, naponi inducirani u namotu spojenom u trokut ukidaju se. Zbog toga taj namot ne utječe na prelaznu pojavu, pa se može odmah pisati:



Sl. 2-11

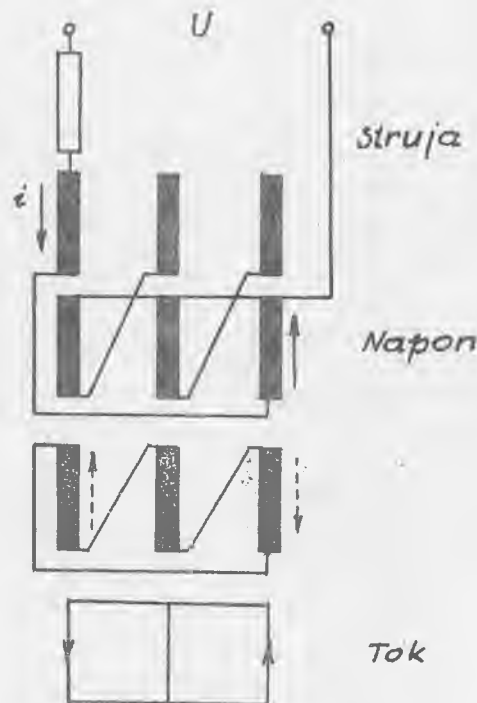
$$1(2R_1 + R_p) + 1(pL_1 + pL_1 + pM_{12} + pM_{12}) = \frac{U}{p} \quad (22)$$

$$i = \frac{U}{R_p + 2R_1} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (23)$$

gdje je:

$$T = \frac{3L_1}{R_p + 2R_1}$$

e) Spoj cikcak-trokut, mjerenje otpora jedne faze prema sl.2-12. I ovdje se može odmah zaključiti, da se naponi u trokutnom namotu u svakom slučaju poništavaju, pa se može odmah pisati:



Sl. 2-12

$$i = \frac{U}{R_p + R_1} (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (25)$$

gdje je

$$T_1 = \frac{L_1}{R_p + R_1} \quad (26)$$

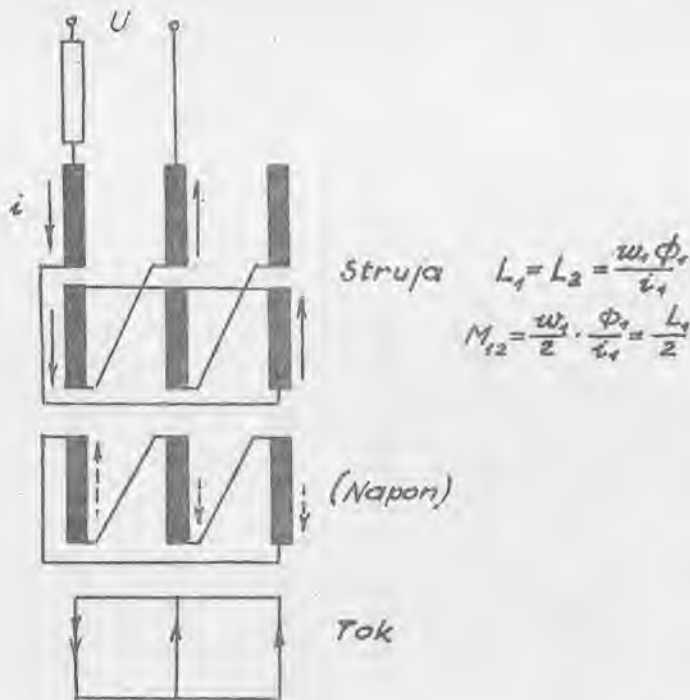
f) Spoj cikcak-trokut, mjerenje otpora dviju faza prema sl.2-13. Naponi u trokutnom namotu se poništavaju. U krugu mjerenja vrijedi:

$$1(R_p + 2R_1) + 1(2pL_1 + 2pM_{12}) = \frac{U}{p}$$

$$1(R_p + 2R_1) + 13pL_1 = \frac{U}{p}$$

$$1 = \frac{U}{R_p + 2R_1} \cdot (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (27)$$

$$T = \frac{3L_1}{R_p + 2R_1} \quad (28)$$



Sl. 2-13

2.4.4 Utjecaj rasipanja. Svi dosadašnji slučajevi razmatrani su uz zanemarena rasipanja. Razmotrimo utjecaj rasipanja na slučaju c) (sl.2-10). Treba sada uzeti u obzir, da se dio toka zatvara mimo jezgre, pa će općenito medjuinduktiviteti biti:

$$M_{11} = G L_1 \quad (1)$$

$$M_{12} = M_{23} = G' \cdot \frac{L_1}{2} \quad (2)$$

$$M_{13} = G'' \cdot \frac{L_1}{2} \quad (3)$$

gdje su G , G' i G'' faktori manji od 1, i to općenito:

$$\sigma'' < \sigma' < \sigma < 1 \quad (4)$$

Jednadžbe sada tačnije glase:

$$i(R_1 + R_p) + ipL_1 - i''p\sigma L_1 + i''p\sigma' \frac{L_1}{2} + i''p\sigma'' \frac{L_1}{2} = \frac{U}{p} \quad (5)$$

$$-ip\sigma L_1 + ip(\sigma' + \sigma'') \frac{L_1}{2} + i''3R_2 + i''p3L_1 - i''p4\sigma' \frac{L_1}{2} - i''p2\sigma'' \frac{L_1}{2} = 0 \quad (6)$$

$$i(R_1 + R_p + pL_1) - i''pL_1k' = \frac{U}{p}$$

$$-ipL_1k' + i''(3R_2 + pL_1k'') = 0$$

gdje su uvedene oznake:

$$k' = \sigma - \frac{\sigma' + \sigma''}{2} \quad (7)$$

$$k'' = 3 - 2\sigma' - \sigma'' \quad (8)$$

Uvedimo još oznake:

$$r_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_p} \quad (9)$$

$$T = \frac{L_1}{R_1 + R_p} \quad (10)$$

pa gornje jednadžbe daju za struju i izraz:

$$i = \frac{U}{R_1 + R_p} \cdot \frac{3r_2 + pk''T}{T^2(k'' - k',^2)} \cdot \frac{1}{p \left[p^2 + \frac{3r_2 + k''}{T(k'' - k',^2)} p + \frac{3r_2}{T^2(k'' - k',^2)} \right]} \quad (11)$$

Korijeni kvadratne jednadžbe u nazivniku, koji određuju vremenske konstante bit će:

$$\alpha_{1,2} = \frac{-3r_2 - k'' \pm \sqrt{(3r_2 - k'')^2 + 12r_2k',^2}}{2T(k'' - k',^2)} \quad (12)$$

Rješenje za struju i dobivamo u obliku:

$$i = A + Be^{-\frac{t}{T_1}} + Ce^{-\frac{t}{T_2}} \quad (13)$$

gdje je

$$\frac{1}{T_1} = -\alpha_1, \quad \frac{1}{T_2} = -\alpha_2$$

Za granične vrijednosti $r_2 = 0$ i $r_2 = \infty$ (veliki predtpor R_p , odnosno otvoren trokut) vremenske konstante poprimaju slijedeće vrijednosti:

$$\begin{array}{ccc}
 T' & & T'' \\
 r_2 \rightarrow \emptyset & \emptyset & \frac{L_1}{3R_2} k'' \\
 r_2 \rightarrow \infty & T & \emptyset
 \end{array}$$

Za slučaj otvorenog trokuta dobivamo jednostavnu eksponencijalnu funkciju za struju i , kao što je to bio slučaj kad smo zanemari-
li rasipanja. Vremensku konstantu možemo u tom slučaju po volji
smanjiti, ako povećavamo predotpor R_2 . No ako je trokut zatvoren,
onda uslijed rasipanja dobivamo dvije eksponencijalne funkcije.
Od dviju vremenskih konstanta jedna odgovara mjerenoj namotu s
predotporom, a druga odgovara trokutnom namotu promatranom za sebe,
tj. omjeru njegovog rasipnog induktiviteta i omskog otpora. Pove-
ćanjem predotpora smanjujemo jednu vremensku konstantu, ali ne mo-
žemo utjecati na drugu, pa se vidi, da nije moguće po volji skra-
titi prelaznu pojavu dodavanjem vanjskog otpora.

Slične poteškoće mogu se očekivati i kod drugih spojeva
sa zatvorenim trokutom. Zato je rajsigurnije, da se kod mjerenja
otpora otvore zatvoreni namoti, gdje god je to moguće.

2.4.5 Provedba mjerenja. Prekidanje istosmjerne struje kojom mjeri-
mo otpor inducira u namotu vrlo visoki napon. Zato treba prije pre-
kida struje premestiti namot transformatora. Osim štetnog djelo-



Sl. 2-14

vanja na namot, prekid struje može uni-
štiti osjetljivi voltmetar, kojim mjerimo
pad napona na namotu. Da se origuramo
protiv toga, pogodno je izraditi priključ-
ne šiljke sa dvostrukim kontaktom prema
sl. 2-14. Unutarnji kontakt služi za do-
vod struje, a vanjski za mjerenje napona.
Tek kad smo strujni kontakt pritisluli
čvrsto na priključak transformatora, i
time stisnuli pero koje ga izbacuje, us-
postavlja se vanjski, naponski kontakt.
Isto tako nakon završenog mjerenja pr-
vo se otvara vanjski, naponski kontakt,
pa tek onda unutarnji, strujni.

2.5 Mjerenje prijenosnog omjera

Prijenosni omjer je omjer nazivnih
(nominalnih) napona, izražen njihovim
punim iznosima, bez kraćenja razlomka.
Po definiciji je izlazni nazivni napon
onaj napon, koji dobivamo na stezaljka-
ma neopterećenog transformatora, koji

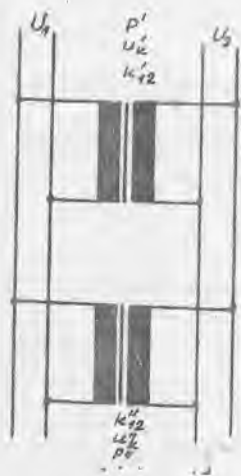
je ulaznim stezaljkama priključen na nazivni napon i frekvenciju.
Tolerancija, tj. dopušteno odstupanje stvarne vrijednosti od vri-
jednosti navedene na natpisnoj pločici, iznosi $\pm \frac{1}{10}$ kratkospojnog
napona izraženog u postocima, ali najviše 0,5%.

2.5.1 Prijenosni omjer i struja izjednačenja. Ako dva transforma-
tora rade paralelno, a prijenosni omjeri im nisu potpuno jednaki,
bit će razlika napona na otvorenim izlaznim namotima:

$$\Delta U_2 = \frac{U_1}{k'_{12}} - \frac{U_1}{k''_{12}} = \frac{U_1}{k'_{12}} \left(1 - \frac{k'_{12}}{k''_{12}}\right) = U_2 \left(1 - \frac{k'_{12}}{k''_{12}}\right) \quad (1)$$

gdje se oznake sa crticom (') odnose na veći, a sa dvije crtice (") na manji transformator, prema sl. 2-15. Prijenosni omjeri k'_{12} i k''_{12} trebali bi biti jednaki.

Član u zagradi bio bi u tom slučaju 0. Kod odstupanja bit će



$$k_{12} = \frac{k'_{12}}{k''_{12}} \neq 1 \quad (2)$$

$$\Delta U_2 = U_2 \cdot |1 - k| \quad (3)$$

Član $|1-k|$ uzet je u apsolutnom iznosu, jer predznak razlike napona nije važan.

Kako su transformatori na izlazu spojeni na istu sabirnicu, napon im je na stezaljkama jednak. Između transformatora mora poteći tolika struja izjednačenja, da pad napona u transformatorima bude jednak razlici ΔU_2 .

Sl. 2-15

$$I_{12} j_2 \cdot |\dot{Z}_2' + \dot{Z}_2''| = \Delta U_2 \quad (4)$$

U ovom izrazu impedancije transformatora $\dot{Z}_2'$ i $\dot{Z}_2''$ su reducirane na izlaznu stranu, a struja izjednačenja se tekodjer odnosi na tu stranu. Izrazimo impedancije s pomoću relativnog napona kratkog spoja po definiciji:

$$u_k = \frac{Z \cdot I_n}{U_n}$$

$$Z = \frac{u_k U_n}{I_n}$$

Obe impedancije trebalo bi zbrojiti vektorski, no uz pretpostavku da se $\cos \varphi_k'$ i $\cos \varphi_k''$ ne razlikuju odviše, tj. da je omjer rasipnog i omskog otpora sličan kod oba transformatora, može se približno uzeti:

$$|\dot{Z}_2' + \dot{Z}_2''| \approx Z_2' + Z_2'' = \frac{u_k' \cdot U_2}{I_{2n}'} + \frac{u_k'' \cdot U_2}{I_{2n}''}$$

Uvedimo još slijedeće oznake:

$$p = \frac{P'}{P''} = \frac{I_{2n}'}{I_{2n}''} = \text{omjer snage većeg i manjeg transformatora} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{u_k'}{u_k''} = \text{omjer relativnih kratkospojnih napona} \quad (6)$$

S ovim oznakama dobivamo struju izjednačenja:

$$I_{izj2} = \frac{\Delta U_2}{|Z_2' + Z_2''|} \approx \frac{U_2 \cdot |1-k|}{\frac{u_k' U_2}{I_{2n}} + \frac{u_k'' U_2}{I_{2n}}} = I_{2n} \cdot \frac{|1-k|}{\frac{u_k'}{p} + u_k''}$$

ili izraženu u odnosu prema manjoj nazivnoj struji:

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = \frac{p}{(p+\varepsilon) \cdot u_k''} \cdot |1-k| \quad (7)$$

Kao ilustraciju ovog izraza razmotrimo 3 slučaja:

a) jednaki transformatori ($p = 1$), 1 jednaki relativni kratkospojni omjeri ($\varepsilon = 1$): $I_{izj}/I_n = \frac{|1-k|}{2u_k}$

Ako računamo s tolerancijom prijenosnog omjera $\pm \frac{u_k}{10}$, pa ako je za jedan transformator $+\frac{u_k}{10}$, a za drugi $-\frac{u_k}{10}$, bit će:

$$|1-k| \approx \left| 1 - \frac{k_{12}(1 \pm 0,1u_k)}{k_{12}(1 \pm 0,1u_k)} \right| \approx 0,2u_k$$

Struja izjednačenja bi u najnepovoljnijem slučaju bila

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = \frac{0,2u_k}{2u_k} = 0,1 \text{ odnosno } 10\% \text{ nazivne struje.}$$

b) najnepovoljniji dopušteni slučaj za rad na zajedničku sabirnicu, tj. omjer snaga 3:1 ($p = 3$), i razlika relativnih kratkospojnih napona od 10% ($\varepsilon = 0,9$):

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = \frac{3}{3+0,9} \cdot \frac{|1-k|}{u_k''}$$

U najnepovoljnijem slučaju $|1-k| = 0,2u_k$ bit će sada:

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = \frac{3 \cdot 0,2}{3,9} = 0,154 \text{ odnosno } 15,5\% \text{ nazivne struje}$$

manjeg transformatora.

c) slučaj transformatora, koji radi na vrlo jake sabirnice čvrstog napona, tj. $p = \infty$

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = \frac{|1-k|}{u_k''}$$

Ako je i opet $|1-k| \approx 0,2 u_k$ bit će:

$$\frac{I_{izj}}{I_n} = 0,2 \text{ odnosno } 20\% \text{ nazivne struje transformatora.}$$

utvrditi ni za jedan slučaj, da li se nalazi u granicama tolerancija.

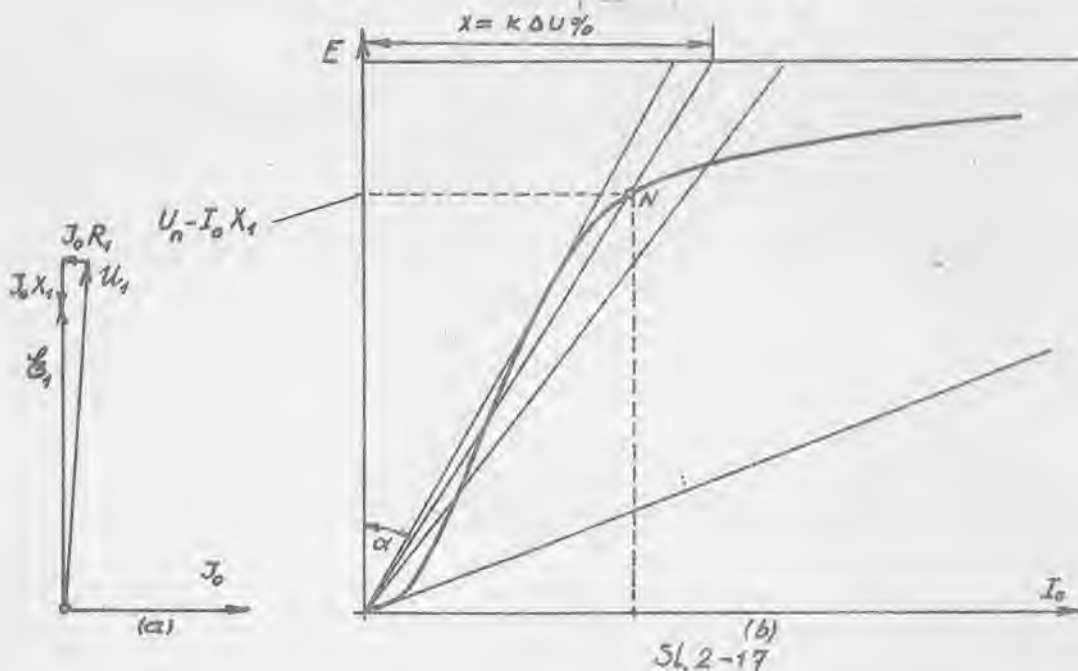
Uobičajeno je, da se kod tačne kontrole bilo koje veličine, koja mora biti unutar granica određenih tolerancijom u %, upotrijebi tako tačna mjerna metoda, da moguća pogreška samog mjerenja u % bude bar 5 do 10 puta manja od tolerancija, koje treba provjeriti. U tom slučaju može se zanemariti greška mjerenja, i promatrati samo da li je rezultat pao unutar propisanih granica. No u slučaju kad ne raspolažemo mjernom metodom dovoljne tačnosti, potrebno je uzeti u obzir i pogrešku mjerenja, kako je to gore izloženo.

2.5.3 Utjecaj napona mjerenja. Kraj velike tačnosti, koja je potrebna pri određivanju prijenosnog omjera, ne smije se zanemariti niti relativno mali pad napona zbog struje praznog hoda. Po definiciji, prijenosni omjer se računa tako, da se za izlazni napon uvrsti vrijednost pri otvorenom izlaznom namotu, i nazivnom naponu i frekvenciji na ulaznoj strani. Uzima se dakle u obzir pad napona od struje magnetiziranja pri nazivnom naponu.

Kod ispitivanja često nije moguće raditi s nazivnim naponom, pogotovo kod transformatora za visoke napone, jer bi upotreba mjernih transformatora smanjila tačnost mjerenja. Pošto u praznom hodu imamo gotovo čisto induktivnu struju, može se prema sl.2-17a pisati:

$$U_1 \approx E_1 + I_0 X_1 \quad (1)$$

$$\frac{\Delta U}{E_1} \cdot 100 = \frac{U_1 - E_1}{E_1} \cdot 100 = X_1 \cdot \frac{I_0}{E_1} \cdot 100\% \quad (2)$$



Karakteristika praznog hoda u stvari je karakteristika magnetskog kruga transformatora, jer je $E \propto B$, i $I_0 \propto \theta$. Na slici 2-17 vidi se, da je relativni pad napona zbog struje magnetiziranja

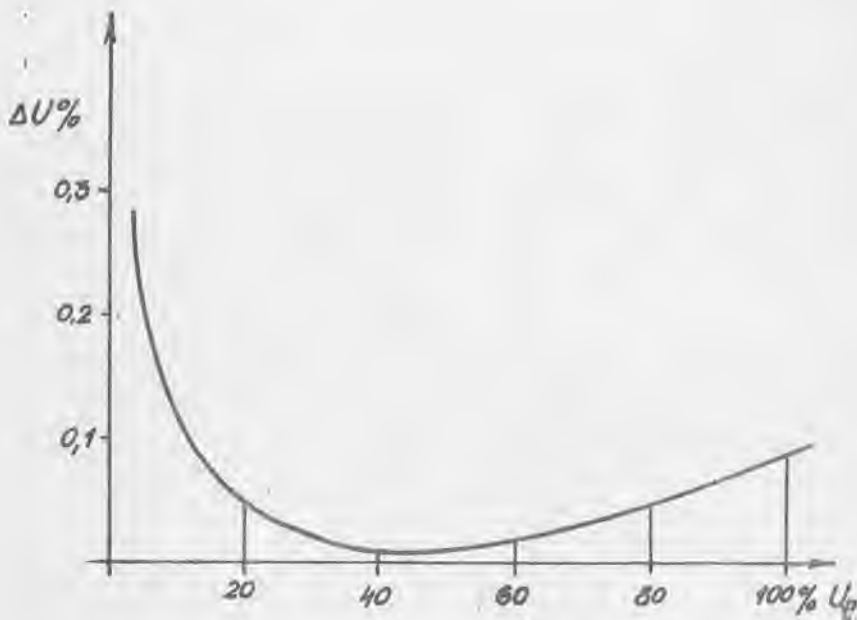
$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{E_1} \cdot 100\%$ proporcionalan sa:

$$\frac{I_0}{E_1} = \operatorname{tg} \alpha \quad (3)$$

Za nazivni napon (tačka N na karakteristici) dobivamo na horizontali u određenoj visini nad apscisom odsječak

$$x = K_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha = K \cdot \Delta U\% \quad (4)$$

Ako povisujemo napon, odsječak raste, tj. relativni pad napona se povećava. Ako napon smanjujemo, pad napona se prvo nešto smanjuje, da bi poslije opet rastao. Sve te vrijednosti ne odstupaju mnogo od one kod nazivnog napona, dok ne dodjemo do vrlo niskih zasićenja (cca 0,01 T) u željezu, gdje relativni pad napona vrlo jako poraste. Kako se mijenja pad napona u ovisnosti o visini narinutog napona pokazuje na jednom primjeru sl.2-18.



S.2-18

Očito je, da smanjeni napon sve do cca 5-10% nazivnoga ne uzrokuje grešku kod mjerenja, koju bi trebalo uzeti u obzir, pa čak se može sniziti napon i do cca 1% nazivnoga, a da pogreška ne prekorači cca 0,3%. Kod još manjeg napona pogreška naglo raste.

2.5.4 Utjecaj nesimetrije tokova kod trofaznih transformatora. U trofaznoj jezgri čak i kod trofazne uzbude tokovi sva 3 stupa ne će uvijek biti potpuno iste veličine. Kod jednofazne uzbude bit će razlike među tokovima pojedinih stupova još veće. Kad bi dakle mjerili na jednoj strani napon induciran tokom jednog stupa, a na drugoj napon u namotu drugog stupa, prijenosni omjer izračunat iz tako izmjerenih napona ovisio bi u velikoj mjeri o nesimetriji

tokova, a ta može biti mnogo veća od zahtijevane tačnosti odredjivanja prijenosnog omjera.

Da bi prijenosni omjer mogli tačno odrediti, bez obzira na nesimetrije tokova, mjerimo po 3 napona jedne, i 3 napona druge strane, pa uspoređujemo svaki od napona jedne strane s onim naponom druge strane, koji se inducira od istog toka. Ako je s jedne strane npr. spoj zvijezda, a s druge trokut, onda će to biti s jedne strane fazni napon, a s druge linijski, pa treba izmjeriti fazni napon množiti sa $\sqrt{3}$, da dobijemo s obe strane linijske napone.

Na sl.2-19 označeno je kako treba mjeriti za različite spojeve grupe 0,6,5 i 11, da se izbjegne utjecaj nesimetrije tokova.

U slučaju spoja zvijezda-zvijezda jednako je ispravno mjeriti s obje strane fazne napone na istom stupu, ili linijske napone na ista 2 stupa. Ako računamo simboličkom metodom, toku kao vektoru pripada napon:

$$\mathcal{E} = -w \cdot \frac{d\dot{\phi}}{dt} = +w_1 j \omega \dot{\phi} \quad (1)$$

Promatramo li npr. spoj Yy0, i mjerimo linijske napone, bit će prema sl.2-19:

$$U' = U_{AF} = |w_1 j \omega \dot{\phi}_1 - w_1 j \omega \dot{\phi}_2| = w_1 \omega j (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) \quad (2)$$

$$U'' = U_{ab} = |w_2 j \omega \dot{\phi}_1 - w_2 j \omega \dot{\phi}_2| = w_2 \omega j (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2) \quad (3)$$

Bez obzira na razlike tokova $\dot{\phi}_1$ i $\dot{\phi}_2$, naponi U' i U'' se sastavljaju na isti način od dijelova, koje induciraju isti tokovi. Ako postavimo omjer:

$$k_{12} = \frac{U'}{U''} = \frac{w_1 \omega j (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)}{w_2 \omega j (\dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2)} = \frac{w_1}{w_2} \quad (4)$$

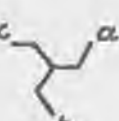
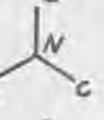
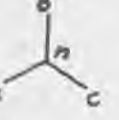
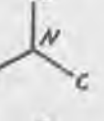
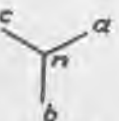
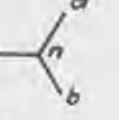
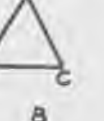
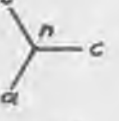
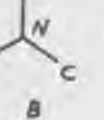
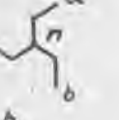
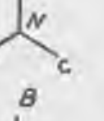
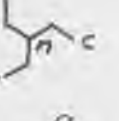
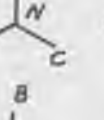
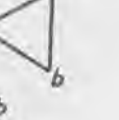
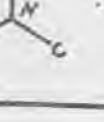
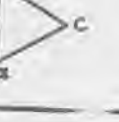
tokovi uopće ispadaju iz računa, dakle ne utječu na rezultat.

Sasvim analogno sastavlja se kod spoja Yz5 ili Yz11 fazni napon namota u cikcak spoju od dijelova, koji se induciraju od istih tokova i koji se sastavljaju na isti način kao linijski napon namota spojenog u zvijezdu. Potrebno je samo još fazni napon u cikcak spoju množiti sa $\sqrt{3}$.

Na prvi pogled izgleda, da kod spoja Dz0 odnosno Dz6 nije moguće mjeriti u cikcaku napon induciran od istih tokova i sastavljen na isti način kao bilo koji od napona u trokutu, jer pojedini dijelovi namota unutar jedne faze cikcak spoja nisu pristupačni mjerenju. Ako tačnije pogledamo linijski napon uv u cikcak spoju, vidimo da se on sastavlja kako slijedi:

$$\begin{aligned} U'' &= \left| \frac{w_2}{2} \cdot j \omega \dot{\phi}_1 - \frac{w_2}{2} \cdot j \omega \dot{\phi}_3 + \frac{w_2}{2} \cdot j \omega \dot{\phi}_1 - \frac{w_2}{2} \cdot j \omega \dot{\phi}_2 \right| = \\ &= \frac{w_2}{2} \cdot |j \omega 2 \dot{\phi}_1 - \dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3| \end{aligned}$$

Kakve god bile nesimetrije tokova, jedan uslov će uvijek biti s priličnom tačnošću ispunjen, tj. tokovi će se u magnetskom zvijezdištu poništavati.

		Dd0	I	Mjere se naponi : $U' \longrightarrow U''$ $A-B \longrightarrow a-b$ $B-C \longrightarrow b-c$ $C-A \longrightarrow c-a$ $k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U'}{U''}$
		Dd6		
		Dz0		
		Dz6		
		Yy0	II	Kao (I) ili $U' \longrightarrow U''$ $A-N \longrightarrow a-n$ $B-N \longrightarrow b-n$ $C-N \longrightarrow c-n$ $k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U'}{U''}$
		Yy6		
		Dy5	III	$U' \longrightarrow U''$ $A-B \longrightarrow a-n$ $B-C \longrightarrow b-n$ $C-A \longrightarrow c-n$ $k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U'}{\sqrt{3}U''}$
		Dy11		
		Yz5	IV	Kao (III) ili $U' \longrightarrow U''$ $A-N \longrightarrow c-a$ $B-N \longrightarrow a-b$ $C-N \longrightarrow b-c$ $k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}U'}{U''}$
		Yz11		
		Yd5	V	Kao (IV)
		Yd11		

$$\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 = 0 \quad (5)$$

Oдавде slijedi:

$$-\dot{\phi}_2 - \dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_1$$

$$U'' = \frac{w_2}{2} \cdot |j\omega 3\dot{\phi}_1| = \frac{3}{2}w_2 \cdot |j\omega\dot{\phi}_1| \quad (6)$$

Primarni linijski napon U_{A-B} inducira se isto tako od toka $\dot{\phi}_1$:

$$U' = w_1 |j\omega\dot{\phi}_1| \quad (7)$$

pa se vidi i ovdje, da tok ispada iz računa, ako prijenosni omjer mjerimo kako je označeno na sl. 2-19.

Sva ova mjerenja mogu se vršiti bilo tako, da se transformator trofazno uzbudi, i onda redom uspoređuju naponi, ili da se narine jednofazni napon redom na one stezaljke, na kojima želimo mjeriti. Za oba slučaja vrijedi shema prema sl. 2-19. Kod uzbude jedne faze (A-N) u spoju zvijezda bit će struja praznog hoda nešto veća, što se može izbjeći tako, da se narine dvostruki napon na stezaljke A-B.

Ako kod spoja zvijezda ili cikcak nije pristupačno zvjezdaste, može se mjeriti jednofazno prema sl. 2-20. Pri tome se može primijeniti metoda A, kod koje se treća stezaljka ulaza ostavlja slobodna, a treća stezaljka izlaza kratko spaja s drugom, ili metoda B, kod koje se treća stezaljka ulaza kratko spaja s drugom, a treća stezaljka izlaza ostavlja otvorena. Tok se zatvara kroz 2 stupa, ili kroz 1 stup i 2 grane električki i magnetski paralelno spojene. Nesimetrija tokova je pri tome isključena, a struja magnetiziranja u prvom slučaju posve ista, a u drugom vrlo slična kao kod trofazne uzbude istim naponom po fazi. Tačnost metode ne ostaje dakle za onom kod trofazne uzbude, a može se primijeniti i tamo, gdje nije izvedeno zvjezdaste.

2.5.5 Voltmetarska metoda. Najjednostavnije je mjeriti prijenosni omjer tako, da s pomoću voltmetra očitamo istovremeno napon jedne, i odgovarajući napon druge strane. Ako je tačnost prvog mjerenja određena najvećom pogreškom p_1 , a drugog p_2 (što obuhvaća i grešku event. upotrijebljenog naponskog transformatora), bit će stvarne vrijednosti U' i U'' za razliku od mjerenih vrijednosti U'_m i U''_m :

$$U' = U'_m (1 \pm p_1)$$

$$U'' = U''_m (1 \pm p_2)$$

tako da je stvarna vrijednost omjera:

$$\frac{U'}{U''} = \frac{U'_m}{U''_m} \cdot \frac{1 \pm p_1}{1 \pm p_2} \approx \frac{U'_m}{U''_m} (1 \pm p_1 \pm p_2) \quad (1)$$

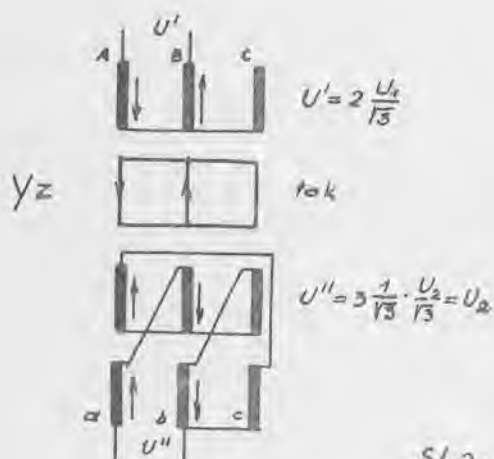
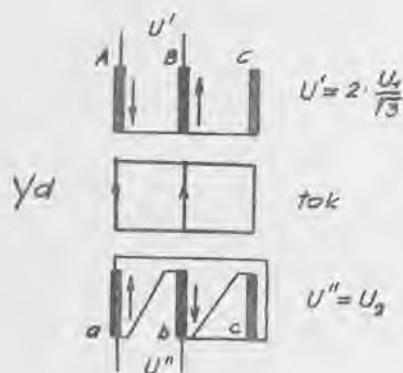
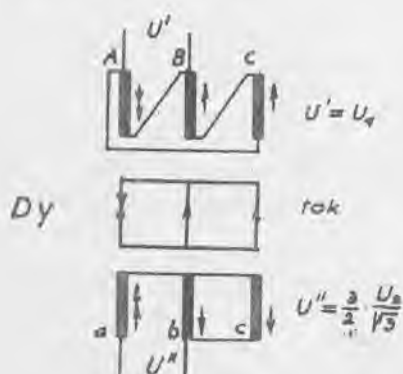
Kad bi dakle mjerili instrumentima klase 0,1, koji bi pokazivali pune otklone, uz upotrebu jednog mjernog transformatora klase 0,1, onda bi tačnost mjerenja bila:

$$1 \pm 0,002 \pm 0,001 = 1 \pm 0,003$$

Metoda A

U'	U''
A — B	bc — a
B — C	ca — b
C — A	ab — c

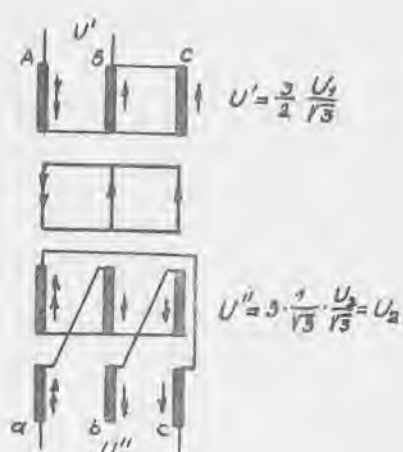
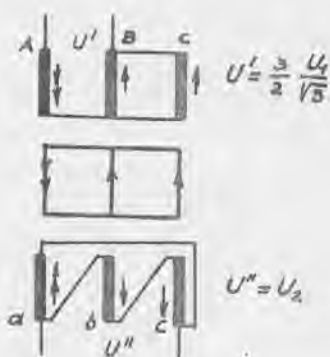
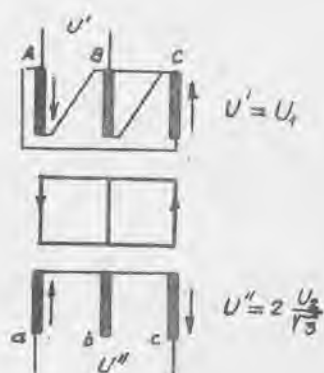
$$k_{12} = \frac{U_2}{U_3} = \frac{U'}{U''} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$



Metoda B

U'	U''
A — BC	c — a
B — CA	a — b
C — AB	b — c

$$k_{12} = \frac{U_2}{U_3} = \frac{U'}{U''} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}}$$



tj. $\pm 0,3\%$. Budući da se klasa instrumenata odnosi na puni otklon, to se kod djelomičnog otklona moguća pogreška povećava u omjeru punog otklona prema stvarnom očitavanju.

Ako se mjerenje vrši pri jako sniženom naponu, može nastati dodatna pogreška zbog pada napona u otvorenom namotu, koji je opterećen strujom potroška voltmetra. Ako mjerenje vršimo instrumentom potroška P_1 (VA), bit će struja koju on uzima:

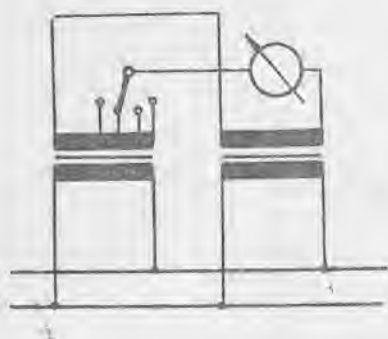
$$I_V = \frac{U''}{R_V} = \frac{P_1}{U''} \quad (2)$$

a pad napona u %:

$$\Delta U = \frac{I_V \cdot R_2}{U''} \cdot 100 = \frac{P_1 R_2}{U''^2} \cdot 100 (\%) \quad (3)$$

Vidi se da će taj pad napona biti toliko veći, koliko je U''^2 manji, uz isti potrošak upotrijebljenog instrumenta. Što manji je napon kojim mjerimo, to više treba paziti, da se odabere instrument malog potroška. Po mogućnosti treba mjeriti naponom, koji je što bliži nazivnome.

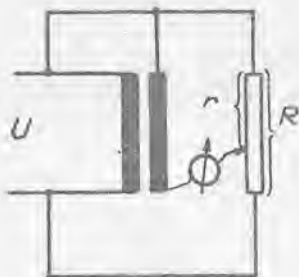
2.5.6 Metoda standardnog transformatora. Kod ispitivanja velikih serija najjednostavnije je uzeti jedan transformator tačno poznatog prijenosnog omjera, a iste grupe spoja kao ispitivani transformatori.



Sl.2-21

Na izlaznom namotu standardnog transformatora predviđi se nekoliko zavoja više, i izvede se na preklopu nekoliko otečepa po 1 zavoj iznad i ispod nominalnog napona. Oba transformatora spoje se na isti napon, a na izlazu se odgovarajući namoti jednom stezaljkom povežu, a druga stezaljka jednog i drugog transformatora dovede se na osjetljivi voltmetar (sl.2-21). Na taj način može se brzo kontrolirati prijenosni omjer, a udešavanjem nule s pomoću preklopke može se odmah očitati koliko je zavoja previše na ispitanom transformatoru.

2.5.7 Potenciometarska metoda. Kod transformatora gdje su oba napona sličnog reda veličine, može se prijenosni omjer odrediti tako, da se paralelno s gornjonaponskim namotom priključi otpornički potencijometar. Jedna stezaljka donjonaponskog namota spoji se s odgovarajućom stezaljkom gn-namota, druga preko osjetljivog voltmetra na klizni kontakt potencijometra (sl.2-22). Kad nadjemo položaj u kojem je otklon voltmetra nula, onda je omjer napona gn-namota i dn-namota:



Sl.2-22

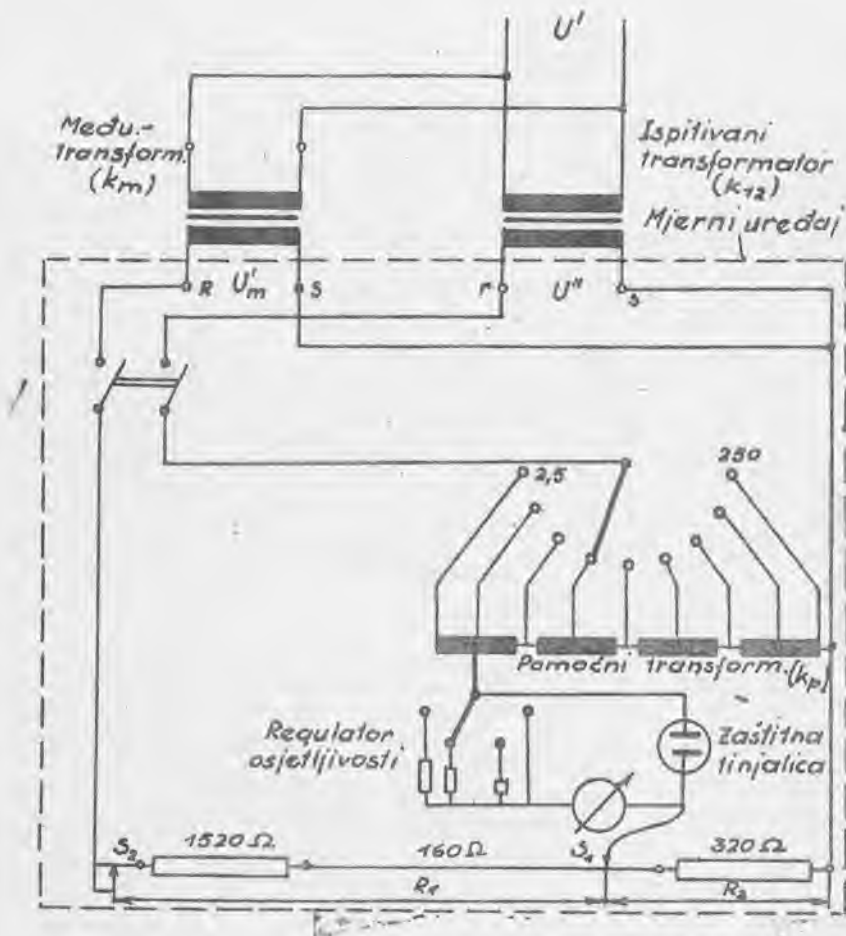
$$\frac{U'}{U''} = \frac{R}{r} \quad (1)$$

Preduslov je, da su naponi, koje uspoređujemo, međusobno u fazi. To će uvijek biti ispunjeno, ako se pridržavamo pravila sadržanih u sl.2-19 ili sl. 2-20. Zbog pada napona u omskom otporu gn-namota kroz koji teče struja praznog hoda, nastaje mali fazni pomak između

narinutog napona i induciranog napona, pa se na instrumentu ne može uvijek postići nula, već samo minimalni otklon. Potencijometar je obično opremljen skalom, koja pokazuje omjer $\frac{U'}{U''}$.

2.5.8 Uredjaji za mjerenje prijenosnog omjera. Primjenom ranije izloženih metoda ili njihovom kombinacijom mogu se izraditi specijalni uredjaji za mjerenje prijenosnog omjera, koji omogućuju brzo i jednostavno mjerenje. S pomoću standardnog transformatora, koji ima na namotima izvedene odgovarajuće odvojke na preklopu, može se postići udešavanje prijenosnog omjera u vrlo širokom opsegu, a u vrlo finim stupnjevima po dekadskom sistemu. Takav uredjaj može onda poslužiti ne samo za kontrolu jednog prijenosnog omjera, već za različite prijenosne omjere.

Sl.2-23 prikazuje uredjaj po Keller-u firme Hartmann & Braun, koji predstavlja kombinaciju metode standardnog transformatora i potencijometarske metode. Donjonaponski namot ispitivanog



Sl. 2-23

transformatora priključi se na stezaljke r-s, a gornjonaponski na R-S. Uredjaj radi s naponom 220 V. Ako treba ispitati transformatore mnogo višeg napona, kod kojega nije uputno mjeriti sa 220 V, priključimo ga na visoki napon, a na stezaljke R-S uredjaja napon

dovodimo preko međutransformatora prijenosnog omjera k_m . Napon dn-namota U'' povećava se preko standardnog autotransformatora 3 odvojcima, pa se ovako povećana vrijednost $\frac{U''}{k_p}$ uspoređuje s transformiranim naponom gn-namota $U'_m = \frac{U'}{k_m}$ na potencijometru. Ovaj se sastoji od 2 precizna otpornika, između kojih je klizna žica s klizačem S_1 . Kao nul-instrument služi osjetljivi voltmetar, kojemu se može preklopkom dodati odgovarajući predotpor, dok još nije približno postignuta razlika napona nula. Osim toga instrument je zaštićen paralelno spojenom tinjalicom. Kad je postignuta ravnoteža, onda vrijedi:

$$\begin{aligned} \frac{U'}{k_m} : \frac{U''}{k_p} &= (R_2 + R_1) : R_2 \\ \frac{U'}{U''} &= \frac{k_m}{k_p} \cdot \frac{R_2 + R_1}{R_2} \end{aligned} \quad (1)$$

S pomoću preklopke udesi se prvo k_p , i time grubo ravnoteža. Zatim se klizačem S_1 udesi ravnoteža do tačnosti prijenosnog omjera cca 1%. U granicama između +1% i -1% udesi se napokon fino ravnoteža klizačem S_2 , koji mijenja ukupni otpor potencijometra $R_2 + R_1$ za $\pm 1\%$.

2.6 Mjerenje grupe spoja

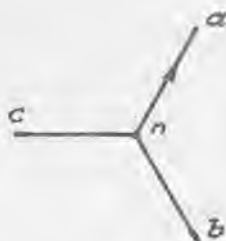
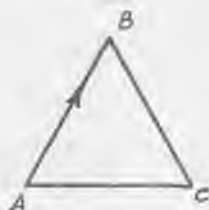
Za vrijeme spajanja namota, a i kasnije, kod priključivanja izvoda, može lako doći do greške. Zato se ne zadovoljavamo time, da se rad vrši prema provjerenoj shemi, nego još i naknadno kontroliramo grupu spoja, i to ne samo na spojenom transformatoru prije stavljanja u kotao s uljem, već i na dovršenom transformatoru.

2.6.1 Kontrola pri mjerenju prijenosnog omjera. Ako se kod kontrole prijenosnog omjera držimo uputa sadržanih u sl.2-19 i 2-20, onda uspoređujemo svaki puta dva napona koji su u fazi. Potrebno je samo još pripaziti na priključak stezaljki takav, da naponi koje uspoređujemo budu u fazi, a ne u protufazi. Uzmimo kao primjer spojeve Dy5 i Dy11 prema sl.2-24. U oba slučaja s gornjim naponom između stezaljki A-B uspoređujemo donji napon između stezaljki a-n, kako je označeno na sl.2-19. Međutim, dok kod spoja Dy5 vektoru napona A-B odgovara vektor n-a, kod spoja Dy11 vektoru A-B odgovara vektor a-n. Priključak na stezaljke uredjaja za mjerenje prijenosnog omjera, bilo da se radi o metodi standardnog transformatora, bilo o potencijometerskoj metodi, treba izvršiti prema tabeli uz sl. 2-24(a), ako se transformator napaja trofazno. Promatranjem vektorskih dijagrama na sl.2-19 lako je zaključiti, kojim redoslijedom treba priključiti stezaljke sekundara obzirom na primar. Cijeno se može reći: kod grupa 0 i 11 treba istim slovom označene stezaljke obaju namota spojiti na istim slovom označene stezaljke uredjaja, i obratno, kod grupa 6 i 5 treba istim slovom označene stezaljke obaju namota priključiti na različito označene stezaljke uredjaja.

Na sl 2-24(b) nacrtani su vektorski dijagrami za primjer spoja Dy5 i Dy11, pri jednofaznom napajanju mjerenog transformatora, za slučaj prvog od ukupno tri mjerenja. U tabeli je prikazan ispravan spoj za sva 3 mjerenja. Slično razmatranje za sve ostale

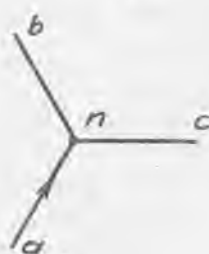
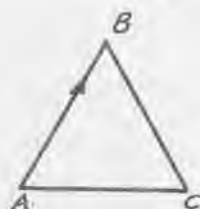
a) 3-fazni priključak

Dy5



$R-S$	$r-s$
$A-B$	$n-a$
$B-C$	$n-b$
$C-A$	$n-c$

Dy11



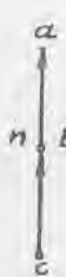
$A-B$	$a-n$
$B-C$	$b-n$
$C-A$	$c-n$

b) 1-fazni priključak

Metoda A

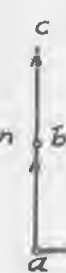
Metoda B

Dy5



A		B	
$R-S$	$r-s$	$R-S$	$r-s$
$A-B$	$bc-a$	$A-BC$	$c-a$
$B-C$	$ca-b$	$B-CA$	$a-b$
$C-A$	$ab-c$	$C-AB$	$b-c$

Dy11



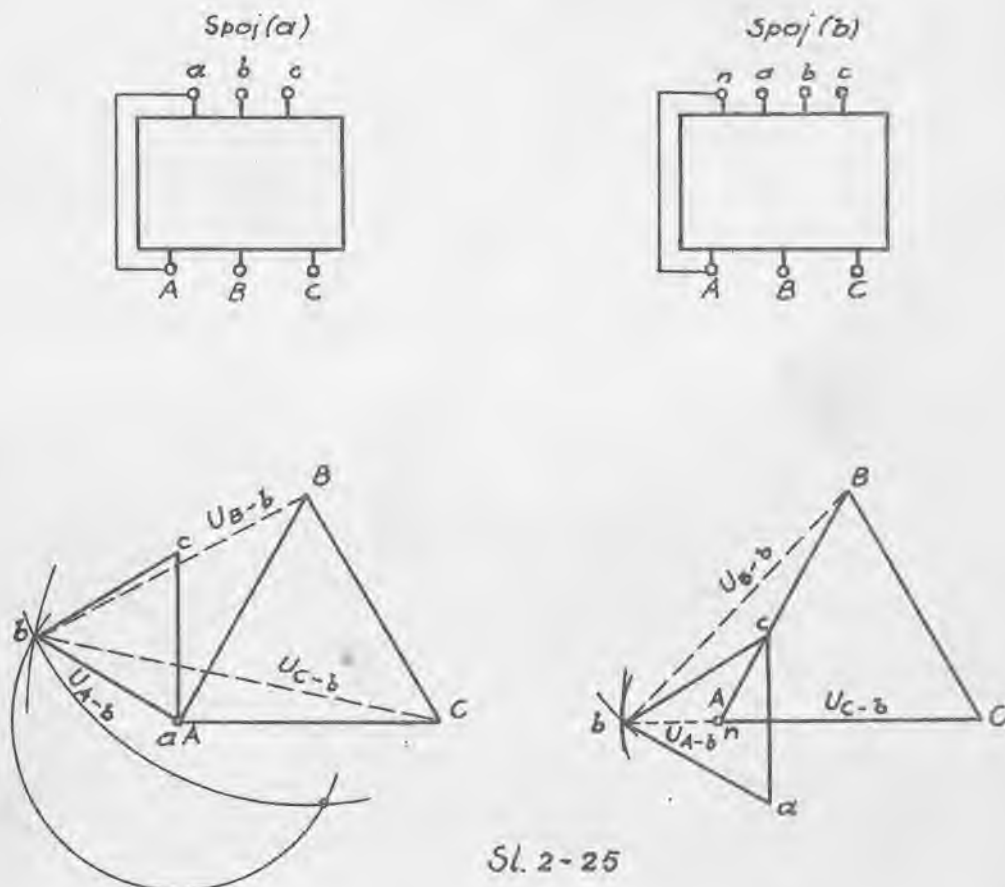
$A-B$	$a-bc$	$A-BC$	$a-c$
$B-C$	$b-ca$	$B-CA$	$b-a$
$C-A$	$c-ab$	$C-AB$	$c-b$

SL.2-24

slučajeve kod jednofaznog priključka pokazuje, da i ovdje vrijedi gore navedeno pravilo, tj. kod grupe 11 se isto označene stezaljke obaju namota priključuju na isto označene stezaljke uređaja, a kod grupe 5 na različito označene stezaljke uređaja.

Ako se držimo ovog pravila, naponi koje uspoređujemo bit će u fazi, i na uređaju za mjerenje prijenosnog omjera moći ćemo postići nulu na kontrolnom voltmetru. Ako ne možemo postići nulu, to znači da naponi nisu u fazi, tj. da grupa spoja nije ona, koju smo pretpostavili, i za koju smo izvršili priključak na mjerne uređaje. Na taj način provjerava se grupa spoja već pri mjerenju prijenosnog omjera.

2.6.2 Kontrola grupe spoja voltmetrom. U slučaju da nemamo pri ruci uređaje za mjerenje prijenosnog omjera, kontrola grupe spoja se može vrlo jednostavno izvršiti pomoću voltmetra. U tu svrhu međusobno povežemo po jednu stezaljku jednog i drugog namota, te ih na taj način dovedemo na isti potencijal. Obično povežemo stezaljke A-a (spoj a prema sl.2-25), ili stezaljke A-n (spoj b prema sl. 2-25). Nacrtamo li trokut napona jednog namota A-B-C, onda se po-



Sl. 2-25

tencijal stezaljke drugog namota, koju smo spojili sa A, nalazi u vektorskom dijagramu na istom mjestu gdje i tačka A. Svaka od ostalih tačaka trokuta napona a-b-c može se jednoznačno odrediti sa 3 mjerenja: prema A, prema B i prema C. Izmjerene napone nanesemo iz A, B odnosno C, s pomoću šestara. U sjecištu se nalazi tražena tačka. Na taj način možemo odrediti grupu spoja u najopćenitijem slučaju.

Specijalno, ako imamo provjeriti jednu od 4 najčešće upotrebljavane grupe spoja, tj. 0, 6, 5 i 11, možemo si prištediti crtanje vektorskih dijagrama. Prema sl. 2-26 u spoju (a) kod 0 i 6 dva mjerenja daju isti rezultat, tj. $U_{B-b} = U_{C-c}$, a $U_{B-c} = U_{C-b}$. Ako je veći od ta dva napona jednak zbroju linijskih napona $U_1 + U_2$, onda se radi o grupi 6, a ako je manji jednak razlici linijskih napona $U_1 - U_2$, radi se o grupi 0. Kod grupe 5 i 11, tri mjerenja daju isti rezultat, a četvrto mjerenje drugačiji, tj. $\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$. Ako su preostala tri mjerenja dala napon veći od četvrtoga, onda se radi o grupi 5, a ako je napon u prva tri mjerenja manji od četvrtoga, radi se o grupi 11.

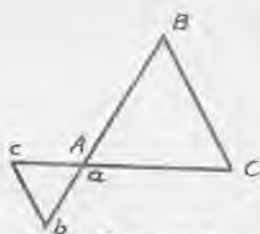
Grupa 5 i 11 može se lako kontrolirati i u spoju (b), ali je opisan postupak pregledniji.



Grupa 0

$$U_{B-b} = U_{C-c} = U_1 - U_2$$

$$U_{B-c} = U_{C-b}$$



Grupa 6

$$U_{B-b} = U_{C-c} = U_1 + U_2$$

$$U_{B-c} = U_{C-b}$$

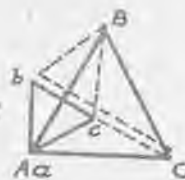
Spoj (a)



Grupa 5

$$U_{B-b} = U_{B-c} = U_{C-c} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_1 U_2 \sqrt{3}}$$

$$U_{C-b} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

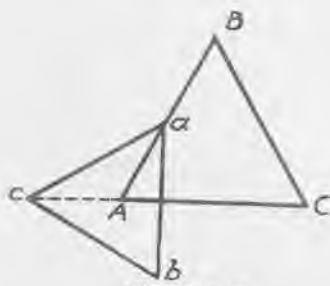


Grupa 11

$$U_{B-b} = U_{B-c} = U_{C-c} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 - U_1 U_2 \sqrt{3}}$$

$$U_{C-b} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$$

Spoj (b)



Grupa 5

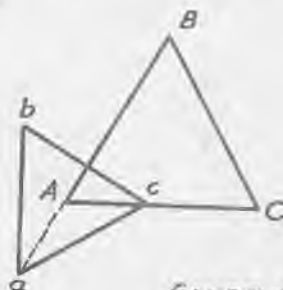
$$U_{B-b} = U_{B-c}$$

$$U_{C-a} = U_{C-b}$$

$$U_{B-a} = U_1 - \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

$$U_{C-c} = U_1 + \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

Sl. 2-26



Grupa 11

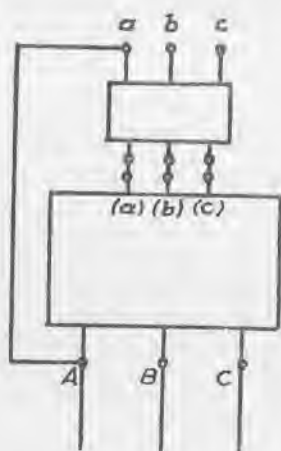
$$U_{B-b} = U_{B-c} \quad U_{B-a} = U_1 + \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

$$U_{C-a} = U_{C-b} \quad U_{C-c} = U_1 - \frac{U_2}{\sqrt{3}}$$

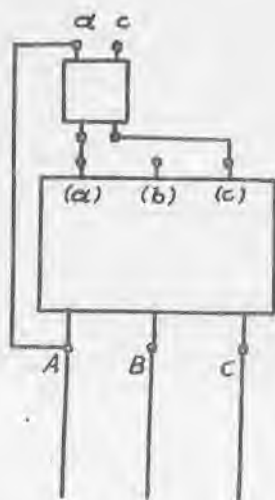
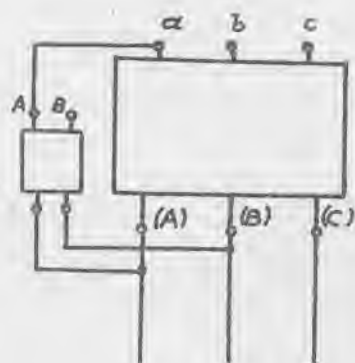
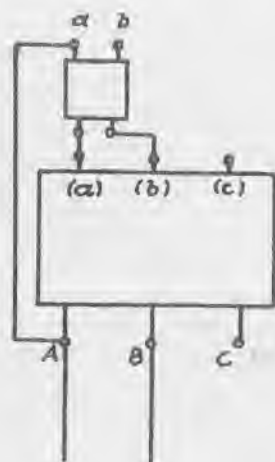
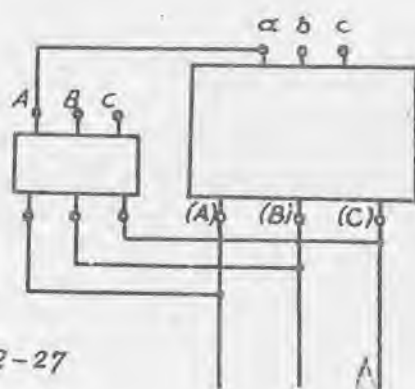
2.6.3 Mjerenje uz upotrebu mjernog transformatora. Ako je prijenosni omjer ispitivenog transformatora oko 25 : 1, ili je veći, onda kontrola grupe spoja opisanom metodom s pomoću voltmetra postaje neprovediva, jer je trokut donjeg napona toliko malen prema trokutu gornjeg napona, da su greške pri mjerenju i crtanju veličine sličnog reda kao čitav manji trokut napona. Zbog toga se ne može sigurno odrediti međusobni položaj trokuta napona. Kako bi ipak i u ovom slučaju mogli provjeriti grupu spoja, povećavamo manji trokut napona, ili pak smanjujemo veći, s pomoću naponskog transformatora ili transformatora snage, tako da oba napona budu slične veličine. Taj međutransformator mora biti grupe 0, tj. mora prenositi napone bez zakretanja u fazi. Otvorenim stezaljkama ovog međutransformatora nadomještamo pri mjerenju stezaljke na koje je međutransformator s druge strane priključen (sl.2-27), i čitav daljnji postupak ostaje isti kao što je prije opisan.

Često ne raspolažemo trofaznim transformatorom odgovarajućeg prijenosa, ali zato imamo jednofazni transformator. Jednofaznim transformatorom pretvorimo prvo jedan linijski napon, npr. a-b (sl.2-28a), izvršimo odgovarajuća mjerenja (B-b, C-b), pa zatim prespojimo međutransformator na stezaljke a-c, i izvršimo mjerenja koja zahtijevaju linijski napon a-c (B-c, C-c). Analogno može se jednofaznim transformatorom umjesto povećanja sekundarnih napona izvršiti smanjivanje primarnih napona (sl.2-28b).

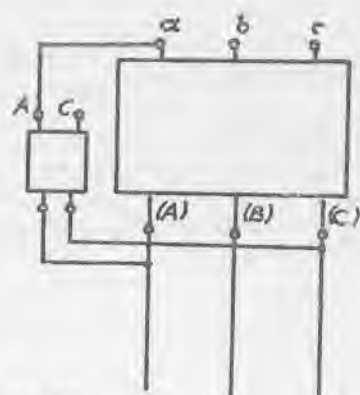
Kao kod upotrebe trofaznog međutransformatora, tako i ovdje mora međutransformator prenositi napon bez zakreta faze.



Sl. 2-27



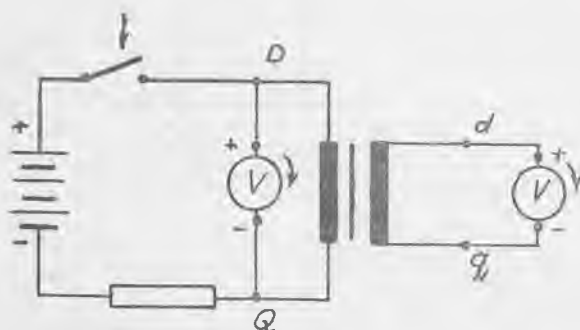
Sl. 2-28



Dok je kod trofaznog transformatora moguć zakret za različite kutove, kod jednofaznog transformatora može sekundarni napon biti jedino u fazi ili u protufazi s primarnim.

2.6.4 Kontrola medjutransformatora. Trofazni medjutransformator mora biti grupe 0. Kako je prijenosni omjer velik, ne možemo njegovu grupu kontrolirati jednostavno voltmetrom, već je potrebno raditi metodom standardnog transformatora, ili potencijometra, tj. pomoću uređaja za određivanje prijenosnog omjera, kao što je to opisano u 2.6.1. Kao trofazni medjutransformator možemo dakle upotrijebiti samo ovako provjereni transformator, koji nije uvijek pri ruci, pa je zato mnogo praktičnije raditi s jednofaznim medjutransformatorom, koji se može jednostavno kontrolirati na mjestu upotrebe.

Ako jedan te isti tok inducira između stezaljki D-Q odnosno d-q (sl.2-29) napone, koji su u fazi, to znači da će u času



Sl. 2-29

kad je stezaljka D (+) polariteta, a Q (-) polariteta, biti i na drugoj strani stezaljka d (+) polariteta, a stezaljka q (-) polariteta. To će biti ispunjeno, ako namot polazeći od D prema Q obilazi jezgru u istom smislu, kao i drugi namot od d prema q, no rijetko kada će biti moguće to ustanoviti jednostavnim pregledom. Isto tako nije jednostavno ustanoviti, da li su polariteti na D i d u istom času jednaki, ako se tok mijenja sa 50 perioda

u sekundi. Mi možemo, međutim, proizvesti jednokratnu promjenu toka u jezgri, i pri tome promatrati polaritete induciranih napona u oba namota. U tu svrhu treba voltmetar za istosmjerni napon (sa zakretnim svitkom) priključiti (+) stezaljkom na D a (-) stezaljkom na Q, i sklopkom priključiti akumulatorsku bateriju na stezaljke D-Q. U jezgri će tok rasti, i inducirati u oba namota napon. Ako su namoti jednako motani oko jezgre, i ako je voltmetar sa (+) na D i (-) na Q dao pozitivni otklon, onda mora i voltmetar na drugom namotu sa (+) na d i (-) na q kod uključivanja struje istog smjera na D-Q dati takodjer pozitivni otklon. Ako se dogodi, da su otkloni suprotnog smisla, onda je transformator pogrešno označen, pa treba oznake d i q zamijeniti. Ova metoda kontrole smisla namatanja često se upotrebljava, i naziva se "metodom indukcije".

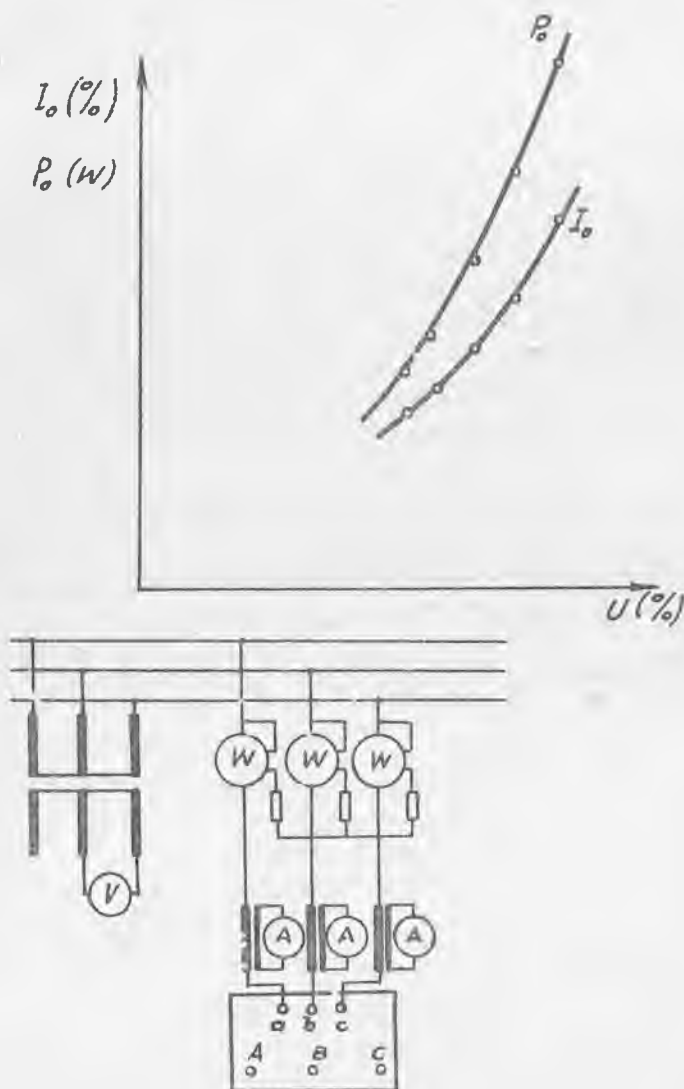
2.7 Mjerenja u praznom hodu

Ako transformator s jedne strane priključimo na napon, a s druge ostavimo stezaljke otvorene, on će uzimati iz mreže samo struju praznog hoda, koja se sastoji od komponente za magnetiziranje jezgre, i od vrlo male komponente u fazi s naponom, koja služi za pokrivanje gubitaka, te od male kapacitivne struje nabijanja namota. Komponenta za magnetiziranje daleko je veća, pa se može unutar granica tačnosti mjerenja uzeti, da je struja praznog hoda jednaka struji magnetiziranja. Da bi dobili pravu sliku o prilikama zasićenja u jezgri, nije dovoljno snimiti samo struju praznog hoda za nazivni napon, već je poželjno snimiti nekoliko tačaka,

obično u intervalu od 70% do 110% nazivnog napona, te nacrtati karakteristiku zasićenja. Struja se mjeri u sva 3 dovoda, te se uzima srednja vrijednost. Ta vrijednost, izražena u postocima nazivne struje, crta se u ovisnosti o naponu. Kod višenamotnih transformatora, gdje postoji više nazivnih struja, navodi se često, umjesto postotne struje magnetiziranja, jalova snaga za magnetiziranje $P_m = \sqrt{3} U_n \cdot I_0$. Gubici u praznom hodu nastaju:

- u jezgri zbog histereze i vrtložnih struja
- u konstruktivnim dijelovima i kotlu zbog vrtložnih struja, ako tok djelomično izlazi iz jezgre
- u bakru namota priključenog na mrežu zbog struje praznog hoda
- u bakru namota spojenih u trokut zbog induciranih struja
- u izolaciji zbog dielektričkih gubitaka u izmjeničnom električkom polju.

Od svih tih gubitaka daleko su najveći gubici pod a), pa se izmjereni gubici u praznom hodu mogu smatrati gubicima u željeznoj jezgri. Oni se također crteju u dijagramu praznog hoda u ovisnosti o naponu (sl.2-30).



Sl. 2-30

Što se tiče ostalih gubitaka od b) do e), valja spomenuti slijedeće. Gubici u konstruktivnim dijelovima mogu nastati, npr., ako magnetski tok sadrži treći harmonički član, koji se zatvara kroz zrak. Treći harmonički član toka svih triju stupova ne poništava se u magnetskom zvjezdištu, nego se zbraja, pa ako transformator nema pet stupova, onda se mora zatvoriti kroz zrak odnosno kotao i konstruktivne dijelove. Ako transformator ima električki nul-vod, ili ako ima jedan od namota u spoju trokut, neće biti trećeg harmoničkog člana u toku, već će se u struji magnetiziranja pojaviti treći harmonički član, ili, ako nema nul-voda, u namotu koji je spojen u trokut, i koji u neku ruku preuzima magnetiziranje trostruke frekvencije. U tom slučaju pojavljuju se gubici pod d), no ovi su zanemarljivo maleni, jer se radi samo o malom dijelu ukupne struje magnetiziranja, koja čitava iznosi vrlo mali postotak nominalne struje. Uslijed toga su zanemarljivi gubici pod c) u bakru primarnog namota uslijed struje praznog hoda, a pogotovo oni pod d), koji su još mnogo puta manji. Daljnji uzrok za zatvaranje magnetskog toka kroz zrak je nesimetrija magnetskih otpora pojedinih stupova, u slučaju gdje nema električkog nul-voda, pa se struje moraju poništavati u zvjezdištu (vidi izvod u 2.7.2 b).

Gubici pod b) mogu se ocijeniti, ako se vrlo tačno izmjeru gubici u praznom hodu prije stavljanja jezgre u kotao, i zatim na gotovom transformatoru s kotlom. Razlika otpada na dodatne gubitke praznog hoda zbog zatvaranja toka van jezgre. Pošto su ovi mali, potrebno je ne samo tačno mjerenje, već i upotreba iste mjerne metode, i istih instrumenata kod oba mjerenja.

Gubici pod e) potpuno su zanemarljivi u energetske bilanci, te ih se u praznom hodu uz ostale gubitke ne može mjeriti. Njih treba spomenuti jedino zato, što mogu proizvesti lokalna zagrijavanja u samoj izolaciji, ako su koncentrirani na pojedinim mjestima, i na taj način dovesti do tzv. termičkog proboja.

Gubici pod c) mogu se redovito zanemariti. Treba ih uzeti u obzir jedino tamo, gdje je presjek namota jako reduciran, kao npr. kod mjerenja sa provizornim namotom na jezgri.

2.7.1 Mjerenje snage u praznom hodu. Zbog nesimetrije među fazama potrebno je uvijek mjeriti snagu pomoću 3 vatmetra, ili 2 vatmetra u Aronovom spoju. Ispitivani transformator priključimo redovito sa strane nižeg napona, jer je to obično jednostavnije i u pogledu priključka, i u pogledu mjerenja.

Pri mjerenju gubitaka praznog hoda treba voditi računa o tome, da je faktor snage vrlo nizak. Pogreška kod mjerenja snage računa se:

$$p = p_p + p_g \quad (1)$$

gdje je p_p = pogreška pokazivanja uvjetovana pogreškom prijenosa naponskog i strujnog transformatora i odstupanjem konstante samog vatmetra

$p_g = \delta \tan \varphi$ = pogreška uzrokovana kutnom greškom naponskog i strujnog transformatora i sistema samog vatmetra

$\delta = \delta_V - \delta_A = \frac{\pi}{10 \cdot 800} \cdot \delta' =$ razlika kutne greške u naponskoj i strujnoj grani (koja predstavlja fazno zaostajanje struje u naponskoj grani za naponom mreže, odnosno struje u strujnoj grani za strujom mreže, dakle obuhvaća mjerne transformatore i namote samog vatmetra). Izražena je u lučnoj mjeri.

$\varphi =$ fazno zaostajanje struje prema naponu.

Pogreška p_p može se očitati s krivulja baždarenja upotrijebljenih instrumenata, ili se mogu, prema njihovoj klasi, ocijeniti granice, u kojima se ta pogreška kreće. Općenito se može reći, da uz određenu tačnost, koja je zagarantirana kod mjernog opsega instrumenta, dobivamo to veću procentualnu pogrešku. Što je otklon manji, jer dopuštena pogreška od npr. 0,2% mjernog opsega predstavlja već 2% kod 1/10 mjernog opsega. Kod malog $\cos \varphi$ bit će, uz upotrebu normalnih vatmetara, procentualna pogreška već zbog toga velika, što su otkloni relativno mali. To se daće znatno popraviti, ako upotrijebimo vatmetre za mali $\cos \varphi$, koji daju puni otklon uz nazivni napon i struju, i $\cos \varphi$ naveden na instrumentu - obično 0,5, ili 0,2, ili 0,1. To znači, da vatmetar daje puni otklon skale onda, kada bi normalni vatmetar dao otklon od 50% ili 20% ili 10% cijele skale. Pri tome je tačnost određene klase instrumenta toliko veća, koliko je povećan otklon.

Kutna pogreška δ uzrokuje pogrešku mjerenja $p_\delta = \delta \tan \varphi$ koja naglo raste, kad se kut φ približava 90° , tj. $\cos \varphi \rightarrow 0$. Na prvi pogled se čini, da bi kod malih $\cos \varphi$ bilo povoljnije mjeriti metodom dvaju vatmetara, pri čemu je kut između struje i napona u svakom vatmetru manji, nego kod tri vatmetra. Ne treba, međjutim, zaboraviti, da u Aronovom spoju pri malom $\cos \varphi$ snagu dobivamo kao malu razliku dviju velikih očitanih snaga. Ako prema sl. 2-31 razmotrimo mjerenje sa 3 vatmetra (a), i mjerenje sa 2 vatmetra (b), dobivamo slijedeću sliku:

a) Mjerenje sa 3 vatmetra. Kut između struje i napona za svaki vatmetar trebao bi biti φ , pa je prava snaga:

$$P = 3U_f I \cos \varphi = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

Zbog kutne greške δ bit će mjerena snaga svakog vatmetra:

$$P_{mj1} = U_f I (1 + p_\delta) \cos \varphi$$

a za sva 3 vatmetra:

$$P_{mj} = 3U_f I (1 + p_\delta) \cos \varphi = P(1 + p_\delta)$$

tako da ukupna pogreška mjerenja iznosi:

$$p = \frac{P_{mj} - P}{P} = p_\delta = \delta \tan \varphi \quad (2)$$

te je jednaka relativnoj pogrešci pojedinog vatmetra.

b) Mjerenje sa 2 vatmetra. Kut između struje i napona iznosi

$$\text{za sistem 1:} \quad \varphi_1 = \varphi - 30$$

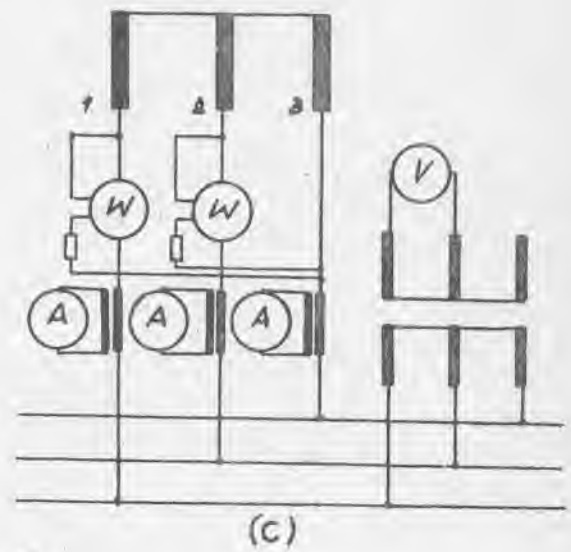
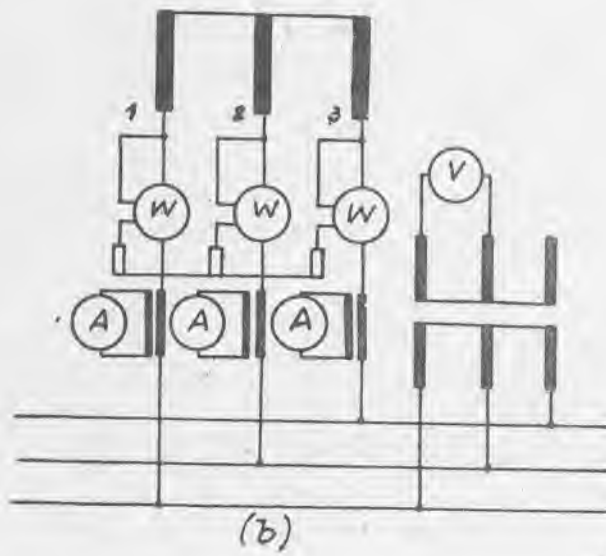
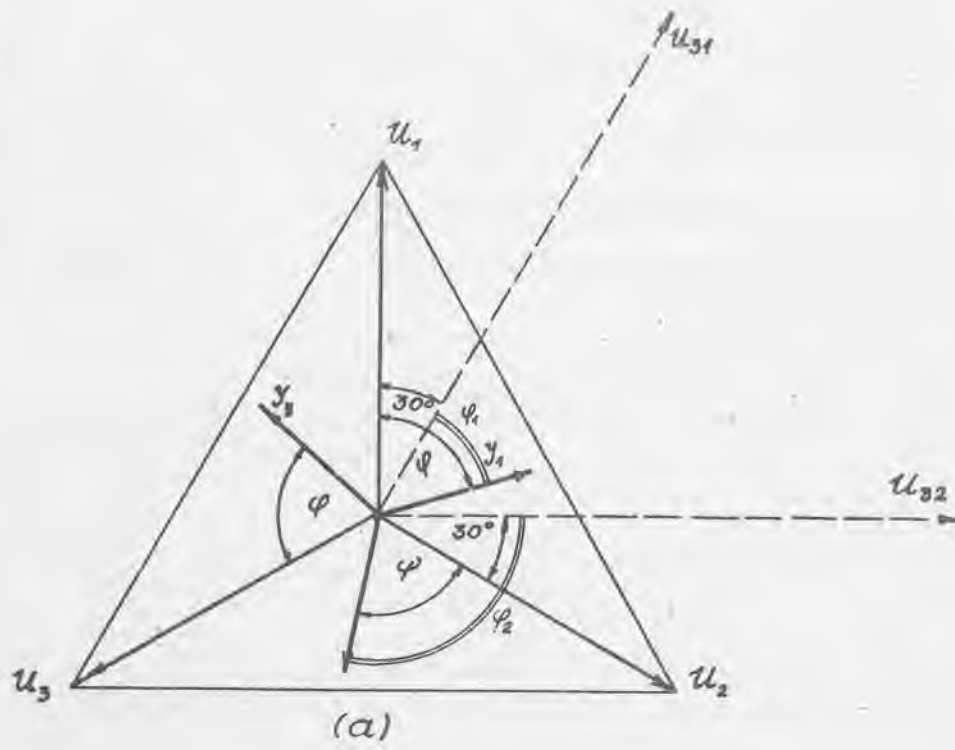
$$\text{za sistem 2:} \quad \varphi_2 = \varphi + 30$$

$$\text{pa vatmetri treba da pokažu:} \quad P_1 = UI \cos(\varphi - 30) \quad (3)$$

$$P_2 = UI \cos(\varphi + 30) \quad (4)$$

$$P = P_1 + P_2 \quad (5)$$

Zbog kutne greške oni će stvarno pokazati:



Sl. 2-31

$$P_{1mj} = P_1 [1 + \delta \cdot \operatorname{tg}(\varphi - 30^\circ)]$$

$$P_{2mj} = P_2 [1 + \delta \cdot \operatorname{tg}(\varphi + 30^\circ)]$$

$$P_{mj} = P_{1mj} + P_{2mj} = P_1 + P_2 + P_1 \delta \operatorname{tg}(\varphi - 30^\circ) + P_2 \delta \operatorname{tg}(\varphi + 30^\circ)$$

Ako računamo pogrešku kod ovog mjerenja, izlazi:

$$\begin{aligned} p &= \frac{P_{mj} - P}{P} = \left[\frac{P_1}{P} \cdot \operatorname{tg}(\varphi - 30^\circ) + \frac{P_2}{P} \cdot \operatorname{tg}(\varphi + 30^\circ) \right] \delta = \\ &= \frac{UI}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} \cdot [\sin(\varphi - 30^\circ) + \sin(\varphi + 30^\circ)] \cdot \delta = \\ &= \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi \end{aligned} \quad (6)$$

tj. ukupna relativna pogreška je potpuno ista kao kod mjerenja sa 3 vatmetra. Povoljno djelovanje manjeg faznog kuta unutar svakog vatmetra upravo se poništava nepovoljnim djelovanjem mjerenja većih snaga i njihovog odbijanja. Što se tiče kutne pogreške, nema dakle prednosti niti jedna od spomenutih metoda.

Ako je faktor snage npr. oko 0,1, onda možemo upotrijebiti kod metode triju vatmetara instrumente za $\cos \varphi = 0,1$, i iskoristiti maksimalnu tačnost mjerenja njihove klase. Ako se služimo u istom slučaju metodom dvaju vatmetara, faktor snage u jednome iznosi oko 0,6, a u drugome 0,4, pa ne možemo upotrijebiti vatmetre za $\cos \varphi = 0,1$, već u najboljem slučaju za $\cos \varphi = 0,5$, odnosno normalne vatmetre za $\cos \varphi = 1$. U tom slučaju imamo 60% odnosno 40% punog odklona, ali se pogreška mjerenja odnosi na ukupnu snagu, koja je određena razlikom oba očitavanja, tj. na $60-40 = 20\%$ punog odklona, pa je uz istu klesu cca 5 puta veća. Upravo mogućnost upotrebe vatmetra za mali $\cos \varphi$ razlog je, što se za mjerenja u praznom hodu radije primjenjuje metoda triju vatmetara.

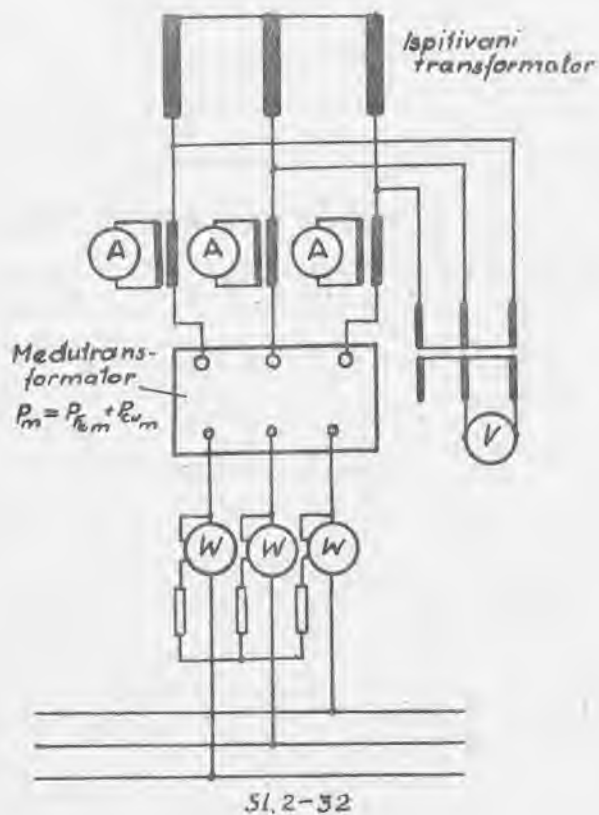
U svakom slučaju potrebno je upotrijebiti vrlo tačne instrumente, i po mogućnosti provesti korekcije zbog kutnih grešaka. Koliko je to važno, vidi se iz slijedećeg pregleda: za svakih lo' kutne greške iznosi pogreška mjerenja

pri $\cos \varphi$	= 0,5	0,2	0,1	0,05
p	= 0,005	0,014	0,029	0,058

tj. penje se od 0,5% kod $\cos \varphi = 0,5$, do skoro 6% kod $\cos \varphi = 0,05$. Kutna greška kod mjernih transformatora može se popeti i do nekoliko desetaka minuta, pa mjerenja u takvom slučaju daju sasvim krive rezultate, ako se ne provedu korekcije.

Najpogodnije je provesti mjerenje snage u praznom hodu bez mjernih transformatora, ako je to ikako moguće. Postoje vatmetri za direktno mjerenje pri struji do 400 A, i naponu do 10000 V (uz upotrebu odgovarajućih predotpora. Kod još viših napona upotrebljavamo međjutransformatore, kojemu su gubici kod određenog napona i struje tačno poznati i prikazani u dijagramima baždarenja. Ispitivani transformator priključimo na mrežu preko međjutransformatora, pa mjerimo snagu, koju međjutransformatore uzima iz mreže. Gubici mjerenog transformatora su onda:

$$P_0 = P_{mj} - P_m \quad (7)$$



prema sl. 2-32. Napon i struja mjere se direktno na ispitivanom transformatoru preko mjernih transformatora.

2.7.2 Utjecaj nesimetrija. Magnetski otpor nije isti za sva tri stupe transformatora. Obično će biti otpor nešto manji za srednji stup, gdje je put silnica kraći za dužinu jarma. Ako računamo s magnetskim vodljivim vrijednostima $\Lambda = \phi/I$ može se pisati:

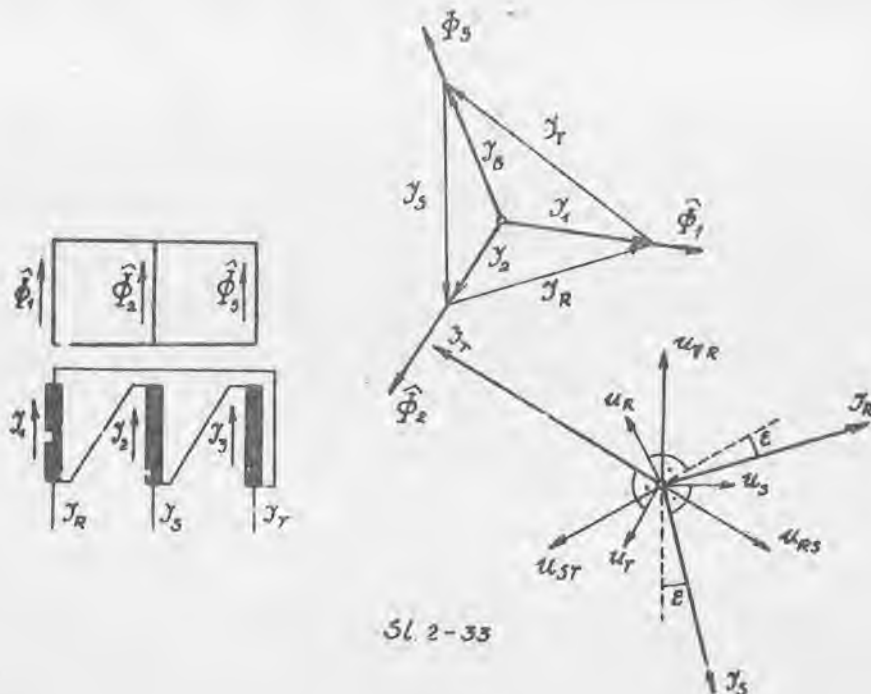
$$\Lambda_1 \cong \Lambda_3 \quad (1)$$

$$\Lambda_2 = k \Lambda_1 \quad (k > 1) \quad (2)$$

a) Spoj u trokut. Sva tri fazna namota spojena su direktno na krute linijske napone, pa su i magnetski tokovi određeni po veličini i po fazi (sl.2-33).

Ako se služimo simboličkim pisanjem preuzetim iz računa sa simetričkim komponentama, bit će

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 &= \phi \\ \dot{\phi}_2 &= \alpha \phi \\ \dot{\phi}_3 &= \alpha^2 \phi \end{aligned} \quad (3)$$



Sl. 2-33

gdje znači:

$$\alpha = e^{-j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (4)$$

tj. α predstavlja zaokret za električki kut od 120° prema natrag. Za struje magnetiziranja u faznim namotima vrijedi:

$$I_1 = \frac{\dot{\Phi}_1}{\Lambda_1} = \frac{\dot{\Phi}}{\Lambda} \quad (5)$$

$$I_2 = \frac{\dot{\Phi}_2}{\Lambda_2} = \frac{\alpha \dot{\Phi}}{k \Lambda} \quad (6)$$

$$I_3 = \frac{\dot{\Phi}_3}{\Lambda_3} = \frac{\alpha^2 \dot{\Phi}}{\Lambda} \quad (7)$$

tj. sve struje su međusobno za 120° razmaknute, ali je struja I_2 po iznosu manja:

$$I_1 = I_3 = \frac{\dot{\Phi}}{\Lambda} \quad (8)$$

$$I_2 = I_1/k \quad (9)$$

$$I_1 = I_3 > I_2 \quad (10)$$

Linijske struje, koje teku u dovodima, jednake su:

$$I_L = I_1 - I_2 = I_1 \left(1 - \frac{\alpha}{k}\right) \quad (11)$$

$$I_S = I_2 - I_3 = I_1 \left(\frac{\alpha}{k} - \alpha^2\right) \quad (12)$$

(13)

$$I_R = I_S < I_T$$

Grafička konstrukcija ovih struja vidi se na sl.2-33. Ako promatramo čiste struje magnetiziranja, bez gubitaka, bit će struja I_R prema naponu U_R pomaknuta u fazi za kut $90^\circ + \varepsilon$, a struja I_S prema naponu U_S za kut $90^\circ - \varepsilon$ dok će fazni pomak između I_T i U_T biti tačno 90° . Kut ε može se iz gornjih izraza za linijske struje izračunati kao:

$$\varepsilon = 30^\circ - \arctan \frac{\sqrt{3}}{1+2k} \quad (15)$$

On postaje jednak 0 , ako nema nesimetrije, tj. uz $k = 1$. Kod mjerenja gubitaka metodom triju vatmetara pokazivat će vatmetar u fazi R, pored odgovarajućeg dijela gubitaka, još i negativnu snagu $UI \sin \varepsilon$ a vatmetar u fazi S pozitivnu snagu $UI \sin \varepsilon$, dok vatmetar u fazi T neće pokazivati ništa osim stvarnih gubitaka te faze. Čisto je, da će zbroj snaga svih triju vatmetara biti ispravan, pa ne smeta, što otklon pojedinog vatmetra može biti čak i negativan.

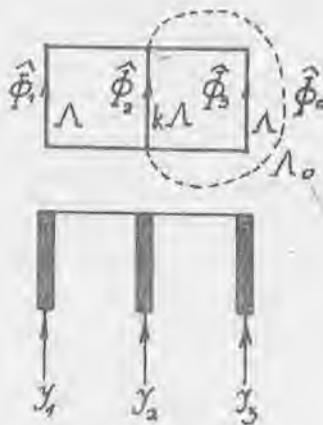
b) Spoj u zvijezdu. U ovom slučaju linijske struje su jednake faznim strujama. Srednji stup treba manju struju magnetiziranja. Pošto zbroj struja u zvjezdlištu mora biti nula, to struje mogu biti različite jedino tako, da njihove fazne razlike odstupaju od 120° . Budući da mora biti

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (16)$$

a magnetske vodljivosti su različite, bilo bi:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 &= \Lambda I_1 + k\Lambda I_2 + \Lambda I_3 = \\ &= \Lambda (I_1 + kI_2 + I_3) \neq 0 \end{aligned} \quad (17)$$

tj. tokovi se ne mogu poništavati u zvjezdlištu, već se mora neki tok zatvarati kroz zrak odnosno kotao. Jednadžbe treba u tom slučaju pisati prema sl.2-34:



Sl. 2-34

$$\frac{\dot{\phi}_1}{\Lambda} + \frac{\dot{\phi}_2}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_1 \quad (18)$$

$$\frac{\dot{\phi}_2}{k\Lambda} + \frac{\dot{\phi}_2}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_2 \quad (19)$$

$$\frac{\dot{\phi}_3}{\Lambda} + \frac{\dot{\phi}_3}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_3 \quad (20)$$

$$\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3 = \dot{\phi}_0 \quad (21)$$

Odatle izlazi:

$$\dot{\phi}_0 = \frac{\mathcal{I}_1 + k\mathcal{I}_2 + \mathcal{I}_3}{1 + \frac{\Lambda}{\Lambda_0}(2+k)} \cdot \Lambda = \lambda (\mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_3 + k\mathcal{I}_2) \quad (22)$$

$$\lambda = \frac{\Lambda}{1 + \frac{\Lambda}{\Lambda_0}(2+k)} \quad (23)$$

što daje, uz $\mathcal{I}_1 + \mathcal{I}_2 + \mathcal{I}_3 = 0$

$$\dot{\phi}_0 = \lambda (k-1) \mathcal{I}_2 \quad (24)$$

tj. tok u kotlu u fazi je sa strujom srednjega stupa.

Uzmemo li nadalje u obzir, da inducirani protunaponi moraju biti jednaki narinutim linijskim naponima:

$$j\omega \dot{\phi}_1 - j\omega \dot{\phi}_2 = K \cdot u_{21} = \frac{\alpha^2}{j} U \sqrt{3} K \quad (K = \frac{\sqrt{2}}{w} = \text{konst.}) \quad (25)$$

$$j\omega \dot{\phi}_3 - j\omega \dot{\phi}_1 = K \cdot u_{13} = \frac{\alpha}{j} U \sqrt{3} K \quad (26)$$

i uvedemo li simetrične komponente $\mathcal{I}_d$ i $\mathcal{I}_i$ tako da je:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_1 &= \mathcal{I}_d + \mathcal{I}_i \\ \mathcal{I}_2 &= \alpha \mathcal{I}_d + \alpha^2 \mathcal{I}_i \\ \mathcal{I}_3 &= \alpha^2 \mathcal{I}_d + \alpha \mathcal{I}_i \end{aligned} \quad (27)$$

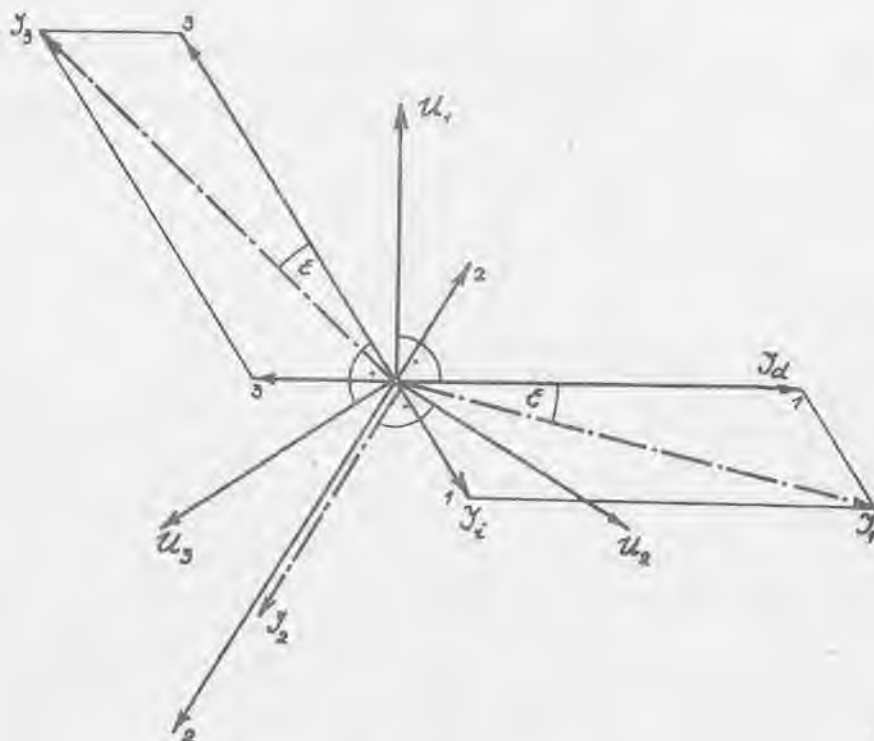
te riješimo gornje jednačbe po $\mathcal{I}_d$ i $\mathcal{I}_i$, uz ranije navedene odnose tokova i struja, dobivamo:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_d &= \frac{KU}{\sqrt{3}\Lambda} \cdot \frac{-j[2+k-\Lambda \frac{(k-1)^2}{(2+k)\Lambda + \Lambda_0}]}{1+2k-2\Lambda \frac{(k-1)^2}{(2+k)\Lambda + \Lambda_0}} \approx \\ &\approx \frac{KU}{\sqrt{3}\Lambda} \cdot \frac{-j(2+k)}{1+2k} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_i &= \frac{KU}{\sqrt{3}\Lambda} \cdot \frac{k-1-\Lambda \frac{(k-1)^2}{(2+k)\Lambda + \Lambda_0}}{1+2k-2\Lambda \frac{(k-1)^2}{(2+k)\Lambda + \Lambda_0}} \cdot \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right) \approx \\ &\approx \frac{KU}{\sqrt{3}\Lambda} \cdot \frac{k-1}{1+2k} \cdot j\alpha^2 \end{aligned} \quad (29)$$

Pošto je $k \cong 1$, bit će inverzna komponenta malena. Na sl. 2-35 nacrtan je direktni i inverzni sistem, i rezultirajuće struje. Vidi se prije svega da je

$$I_2 = I_d - I_1 < I_1 = I_3$$



Sl. 2-35

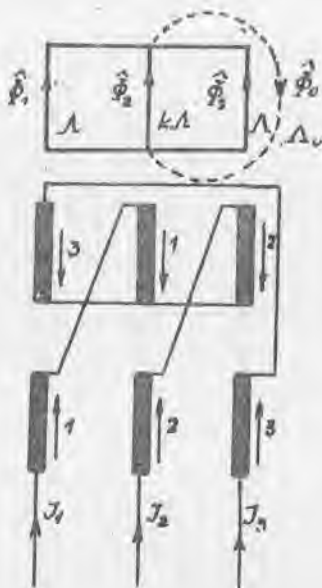
Osim toga se vidi, da struja magnetiziranja srednjeg stupa zaostaje za faznim naponom tačno 90° , dok je kut zaostajanja struje I_1 veći od 90° za ϵ , a kut zaostajanja struje I_3 manji od 90° za

isti kut ϵ . I ovdje će kod mjerenja sa 3 vatmetra, jedan pokazivati gubitke povećane za neki fiktivni iznos, drugi gubitke smanjene za taj isti iznos, dok će treći pokazivati odgovarajući dio gubitaka u pravom iznosu.

c) Spoj cikcak. Na svakom stupu teku dvije uzbudne struje. Slično kao kod spoja zvijezda, ne može biti ispunjen uvjet da se struje poništavaju u zvjezdištu, i da se tokovi zatvaraju samo unutar jezgre. Uz oznake prema sl.2-36 vrijedi

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (31)$$

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0 \quad (32)$$



Sl. 2-36

Jednadžbe za magnetski krug glase:

$$\frac{\dot{\Phi}_1}{\Lambda} + \frac{\dot{\Phi}_0}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_1 - \mathcal{I}_3 \quad (33)$$

$$\frac{\dot{\Phi}_2}{k\Lambda} + \frac{\dot{\Phi}_0}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_1 \quad (34)$$

$$\frac{\dot{\Phi}_3}{\Lambda} + \frac{\dot{\Phi}_0}{\Lambda_0} = \mathcal{I}_3 - \mathcal{I}_2 \quad (35)$$

Ako iz tih jednadžbi izrazimo tokove, i uvrstimo ih u gornju jednadžbu za tok $\dot{\Phi}_0$, izlazi nakon uredjenja

$$\dot{\Phi}_0 = \frac{\Lambda(k-1)}{1 + \frac{\Lambda}{\Lambda_0}(2+k)} \cdot (\mathcal{I}_2 - \mathcal{I}_1) \quad (36)$$

tj. i ovdje je tok koji se zatvara van jezgre proporcionalan i u fazi sa uzbuđom srednjega stupa.

Postavimo još jednadžbe za linijske napone:

$$j\omega(\dot{\Phi}_1 - 2\dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) = ku_{21} = KU\sqrt{3} \cdot \frac{\alpha^2}{j} \quad (37)$$

$$j\omega(-2\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}_2 + \dot{\Phi}_3) = ku_{13} = KU\sqrt{3} \cdot \frac{\alpha}{j} \quad (38)$$

i uvrstimo u te jednadžbe tokove izražene s pomoću struja. Struje $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2, \mathcal{I}_3$ izrazimo s pomoću simetričnih komponenata, kao što je to bilo učinjeno pod b). Rješavanjem ovih dviju jednadžbi po $\mathcal{I}_d$ i $\mathcal{I}_1$ uz zanemarenje onih članova u zbroju, koji su relativno

mali, izlazi nakon uređenja:

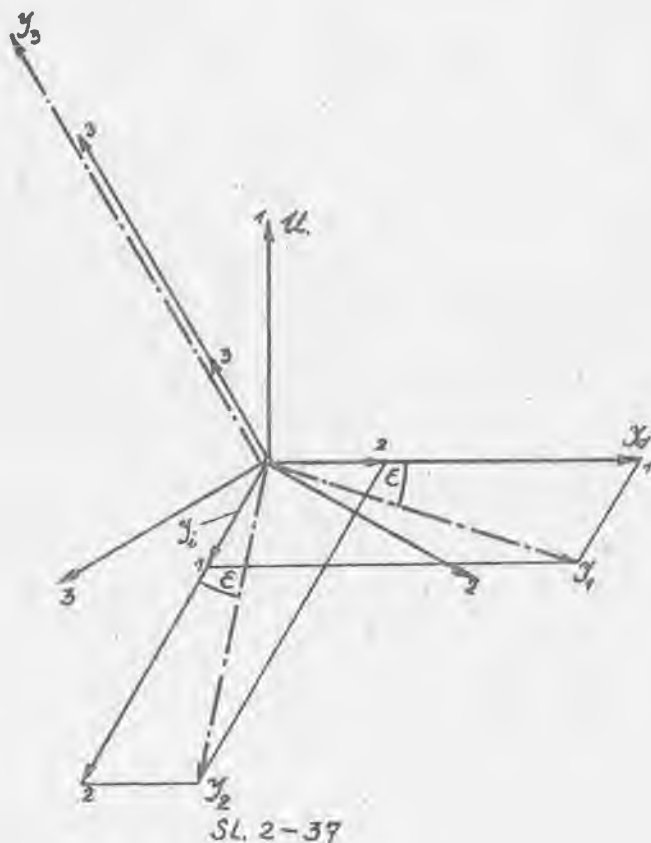
$$I_d = -j \frac{UK}{\omega L} \cdot \frac{k+2}{3(2k+1)} \quad (39)$$

$$I_1 = -j \alpha \frac{UK}{\omega L} \cdot \frac{k-1}{3(2k+1)} \quad (40)$$

Na sl.2-37 nacrtan je direktni i inverzni sistem, i rezultirajuće struje. I ovdje su dvije struje magnetiziranja pomaknute u fazi za $+\varepsilon$ odnosno $-\varepsilon$ prema normalnom kutu od 90° zaostajanja, pa će jedan od tri vatmetra pokazivati nešto veću, a drugi isto toliko manju snagu. Struja u trećoj fazi veća je od ove dvije, tako da je:

$$I_3 > I_2 = I_1 \quad (41)$$

Nastale nesimetrije sličnog su dakle karaktera kao kod spoja u trokut.

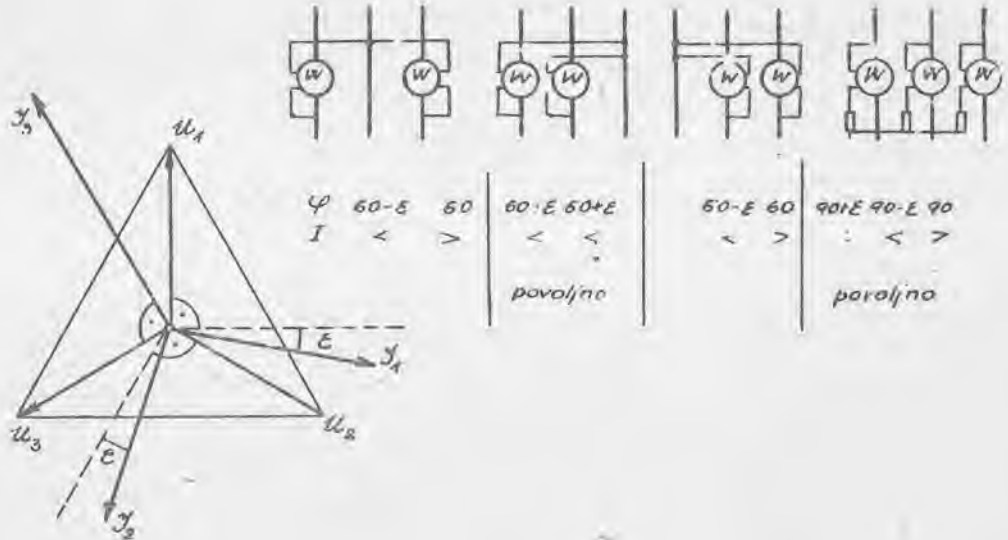


Kod mjerenja metodom dvaju vatmetara bit će mjerenje tačnije, ako odbijamo jedno od drugoga što manja očitavanja. Poželjno je dakle mjeriti tako, da otkloni vatmetara budu što manji, jer ćemo onda njihovu razliku odrediti tačnije. Otklon će biti manji, ako je struja u strujnoj grani manja, i ako je fazni kut između napona i struje u vatmetru što bliži 90° . Na sl.2-38 rekapitulirani su rezultati analize pod a), b) i c) u vektorskim dijagramima, iz kojih se može vidjeti veličine struja i fazne kutove za četiri raz-

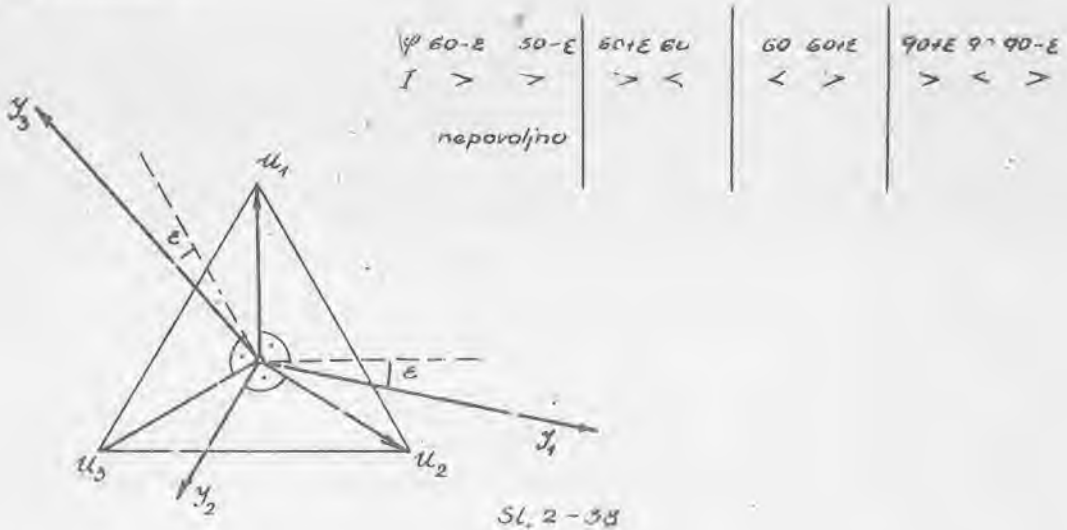
ličita spoja - 3 moguća spoja sa 2 vatmetra, i spoj sa 3 vatmetra. Ispod toga je označen fazni kut za svaki vatmetar, uzevši u obzir samo struje magnetiziranja, i označeno je, da li je struja kojom se mjeri veća ili manja. Odmah je viči, koji su spojevi povoljniji, a koji manje povoljni.

Spoj trokut (a)

Spoj cikcak (c)



Spoj zvijezda (b)



Iz svega naprijed izvedenoga može se, u pogledu utjecaja nesimetrija, izvući slijedeće zaključke:

1) u praznom hođu nipošto ne dolazi u obzir mjerenje jednim vatmetrom u jednoj fazi

2) mjerenje metodom triju vatmetara pogodno je

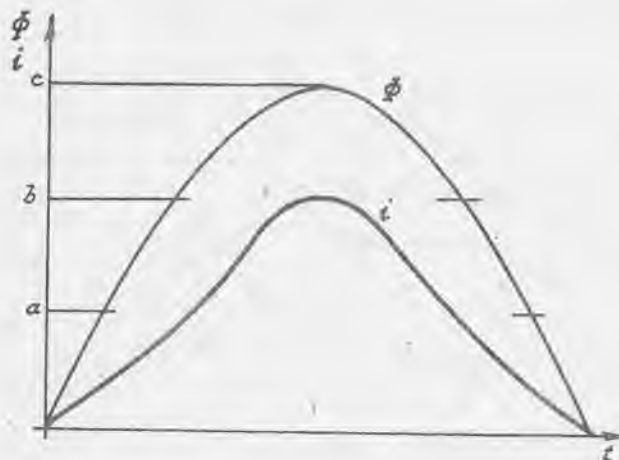
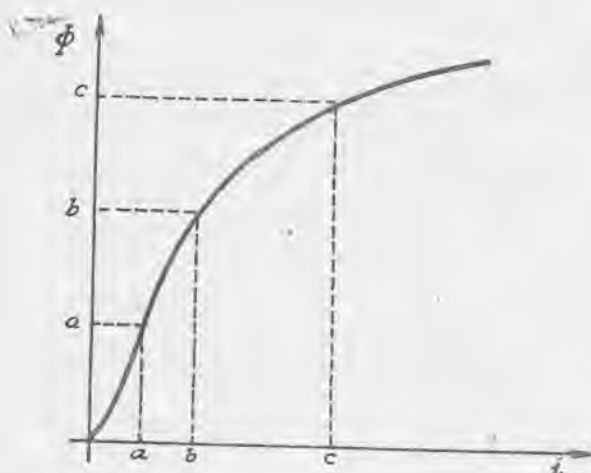
3) kod mjerenja metodom dvaju vatmetara pogodno je spojiti vatmetre tako, da nijedna strujna grana ne bude uključena u fazu s povećanom strujom (kod spojeva trokut i cikcak), odnosno da ne budu obe strujne grane uključene u faze s povećanom strujom (kod spoja zvijezda).

Pošto su struje u pojedinim fazama različite, uzima se kao struja praznog hoda njihova srednja vrijednost

$$I_0 = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \quad (42)$$

$$I_0(\%) = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 \quad (43)$$

2.7.3 Utjecaj nesinusnog napona. Struja magnetiziranja vezana je s magnetskim tokom, kako to pokazuje karakteristika magnetskog kruga (sl.2-39) pri čemu nije uzeta u obzir histereza. Po toj karakteristici vidi se, da odnos nije linearan, već kod većih momentanih vrijednosti toka struja naglije raste. Što dalje se magnetski krug zasićuje, to strmije raste struja s tokom. Ako se tok mi-



Sl. 2-39

jenja po sinusnom zakonu, struja mora sadržati više harmoničke članove neparnoga reda, koji podižu amplitudu. Takvi bi bili 3-ći, 5-ti, 7-mi itd.

Struja magnetiziranja prolazi kroz reaktancije generatora, transformatora, i eventualno međutransformatora za samo ispitivanje, prije nego što dodje do stezaljki ispitivanog transformatora. Padove napona u tim reaktancijama treba odbiti od prvotnog sinusnog napona:

$$u_1 = U_{1m} \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

Struja magnetiziranja zaostaje za $\frac{\pi}{2}$ u fazi:

$$i_{\mu} = I_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) - I_{3m} \sin(3\omega t - \frac{\pi}{2}) - I_{5m} \sin(5\omega t - \frac{\pi}{2}) - \dots$$

Viši harmonički članovi u struji magnetiziranja uzeti su ovdje namjerno svi negativnog predznaka, kako bi dobili u krivulji napona na stezaljkama pozitivne predznake. Ako ta krivulja napona sadrži i negativne više harmoničke članove, mijenja se predznak takvih članova u svim izrazima, što ne utječe na ova razmatranja i na izvedene zaključke.

Pošto je reaktancija u stvari $X = \omega L = 2\pi fL$, bit će za ν -struku frekvenciju i reaktancije ν -struke, tako da pad napona iznosi

$$\begin{aligned} \Delta u &= L \cdot \frac{di_{\mu}}{dt} = \omega L I_{1m} \sin \omega t - 3\omega L I_{3m} \sin 3\omega t - 5\omega L I_{5m} \sin 5\omega t - \dots = \\ &= X I_{1m} \sin \omega t - 3X I_{3m} \sin 3\omega t - 5X I_{5m} \sin 5\omega t - \dots \end{aligned} \quad (2)$$

Napon na stezaljkama transformatora bit će:

$$u = u_1 - \Delta u = (U_{1m} - X I_{1m}) \sin \omega t + \sum \nu X I_{\nu m} \sin \nu \omega t \dots \quad (3)$$

Osim narinutog napona i pada napona uslijed struje magnetiziranja osnovne frekvencije ovdje se pojavljuju još padovi napona više frekvencije, tako da i napon na stezaljkama sadrži više harmoničke članove. Isto takav mora biti i inducirani protunapon, pa je magnetski tok očito jednak:

$$\begin{aligned} \phi_t &= \frac{1}{\omega} \int u dt = (U_{1m} - X I_{1m}) \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2})}{\omega} + \sum \nu X I_{\nu m} \frac{\sin(\nu \omega t - \frac{\pi}{2})}{\nu \omega} = \\ &= \frac{1}{\omega} (U_{1m} - X I_{1m}) \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{\omega} X \sum I_{\nu m} \sin(\nu \omega t - \frac{\pi}{2}) \end{aligned} \quad (4)$$

Maksimalni iznos bit će za napon pri $\omega t = \frac{\pi}{2}$:

$$U_m = U_{1m} - X I_{1m} - 3X I_{3m} + 5X I_{5m} - 7X I_{7m} + \dots \quad (5)$$

a za tok pri $\omega t - \frac{\pi}{2} = \frac{\pi}{2}$ odnosno $\omega t = \pi$:

$$\phi_m = \frac{1}{\omega} (U_{1m} - X I_{1m} + X I_{3m} + X I_{5m} + X I_{7m} + \dots) = \frac{1}{\omega} (U_{1m} - X I_{1m} + \sum X I_{\nu m}) \quad (6)$$

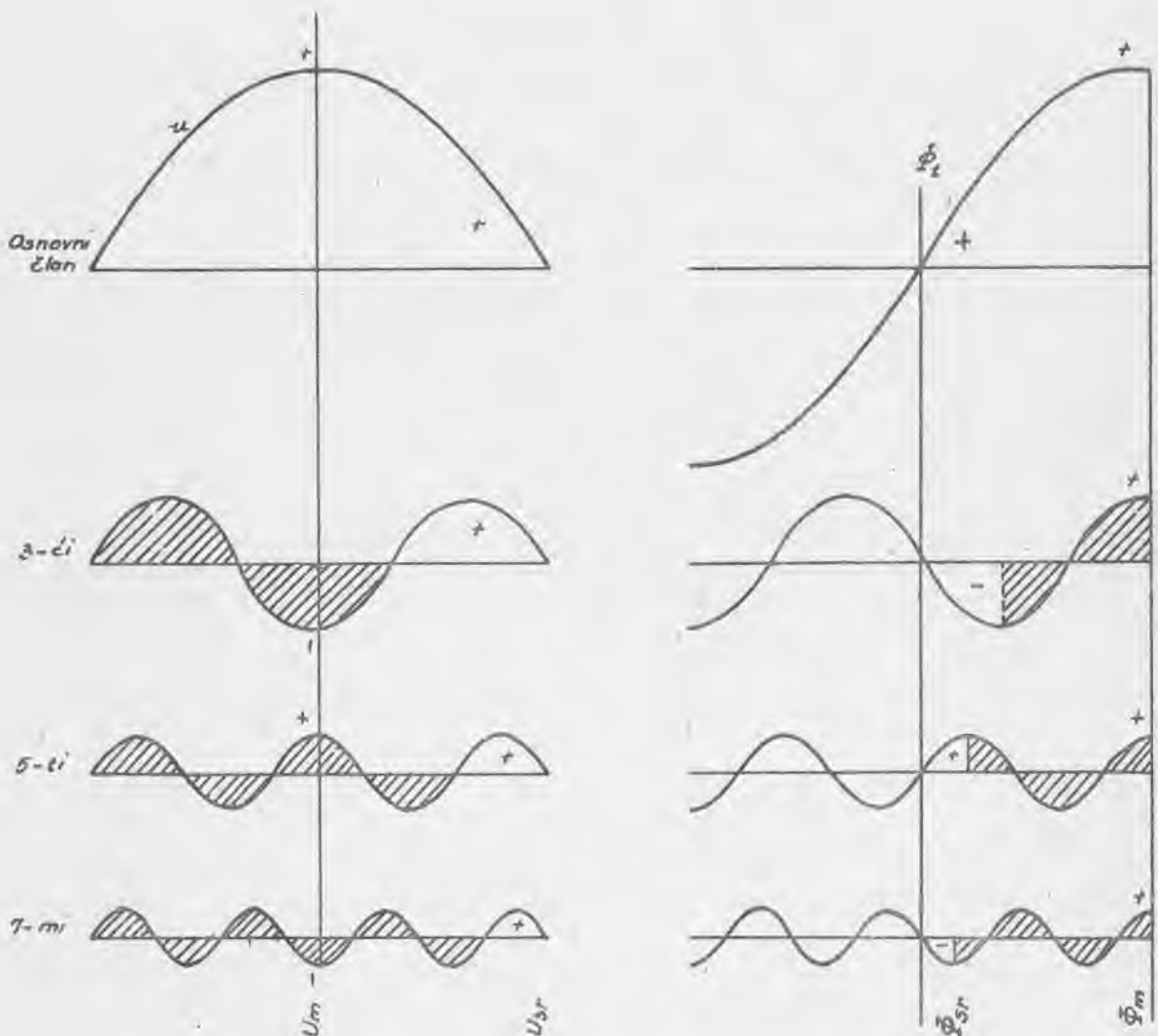
Viši harmonički član ν -tog reda iznosi dakle u amplitudi napona procentualno ν puta više, nego u amplitudi toka, ali se u amplitudi napona predznak 3-ćeg, 7-og itd. člana mijenja, dok se u

amplitudi toka svi članovi pojavljuju s nepromijenjenim predznakom (vidi sl.2-40).

Ako promatramo srednje vrijednosti, prema sl.2-40 treba ukupnoj površini osnovnog harmoničnog člana dodati površinu samo po jednog poluvala trećeg, petog i sedmoga itd. harmoničkog člana, jer se ostale pozitivne i negativne površine izjednačuju. Površina svakog takvog poluvala $\frac{1}{y}$ puta je manja od površine koju bi imao član osnovne frekvencije, a iste amplitude. Zbog toga se može odmah napisati izraz za srednju vrijednost:

$$U_{sr} = \frac{2}{\pi} (U_{im} - XI_{im} + \sum \frac{1}{y} XI_{im}) = \frac{2}{\pi} (U_{im} - XI_{im} + \sum XI_{im}) \quad (7)$$

Vidi se, da viši harmonički članovi u struji magnetiziranja mijenjaju amplitudu magnetskog toka u istoj mjeri, u kojoj mijenjaju srednju vrijednost napona. Srednja vrijednost napona je proporcionalna amplitudi toka, bez obzira na oblik krivulje napona:



Sl. 2-40

$$\frac{U_{sr}}{\phi_m} = \frac{2\omega w}{\pi} \quad (8)$$

Gubici u željezu sastoje se od gubitaka histereze i gubitaka vrtložnih struja. Gubici histereze ovise o površini petlje histereze i o frekvenciji, a ta površina približno ovisi o kvadratu tjemene vrijednosti indukcije, dakle kvadratu amplitude magnetskog toka. Kako je gore pokazano, amplituda magnetskog toka mijenja se proporcionalno srednjoj vrijednosti napona, što znači da će se gubici histereze promijeniti zbog padova napona sa kvadratom omjera u kojemu se promijenila srednja vrijednost napona. U drugu ruku, gubici vrtložnih struja svakog časa ovise o kvadratu induciranog napona, pa se njihov prosječni iznos mijenja proporcionalno s efektivnom vrijednosti napona. Ako označimo sa P_h gubitke histereze, a sa P_w gubitke vrtložnih struja kod posve sinusnog napona U , onda će kod nekog drugog napona U' , koji je deformiran zbog nesinusne struje magnetiziranja, biti gubici:

$$P'_{Fe} = P_h \left(\frac{U'_{sr}}{U_{sr}} \right)^2 + P_w \left(\frac{U'}{U} \right)^2 = P_h \left(\frac{U'_{sr}}{U/1,11} \right)^2 + P_w \left(\frac{U'}{U} \right)^2 \quad (9)$$

Ako uspoređujemo gubitke u željezu kod nesinusnog napona U' i kod sinusnog napona iste srednje vrijednosti, bit će:

$$U_{sr} = U'_{sr}, \quad U_{sr} = U/1,11, \quad U'_{sr} = U'/\xi$$

$$U'/U = \xi/1,11 \quad (10)$$

gdje je ξ = faktor oblika napona U' , tj. $\xi = \frac{U'}{U_{sr}}$

1,11 = faktor oblika sinusoide.

Gubici u željezu mogu se sada izraziti kao:

$$P'_{Fe} = P_h + P_w \left(\frac{\xi}{1,11} \right)^2 \quad (11)$$

Obično je poznat dio gubitaka, koji otpada na histerezu, i koji otpada na vrtložne struje u ukupnim gubicima kod sinusnog napona:

$$p_h = P_h/P_{Fe}$$

$$p_w = P_w/P_{Fe}$$

Te podatke daje nam ispitivanje limova, a približno iznose

$$p_h = 0,75$$

$$p_w = 0,25$$

Uz poznate ove vrijednosti može se iz mjerenih gubitaka kod bilo kojeg napona U' , kojemu je faktor oblika ξ , izračunati gubitke kod sinusnog napona iste srednje vrijednosti.

Ako podijelimo izraz (2.7.3-11) s ukupnim gubicima kod sinusnog napona P_{Fe} , dobivamo

$$\frac{P_{Fe}'}{P_{Fe}} = \frac{P_h}{P_{Fe}} + \frac{P_w}{P_{Fe}} \left(\frac{\xi}{I, II} \right)^2 = p_h + p_w \left(\frac{\xi}{I, II} \right)^2$$

što daje:

$$P_{Fe}' = \frac{P_{Fe}'}{p_h + p_w \left(\frac{\xi}{I, II} \right)^2} \quad (12)$$

Na taj način može se izvršiti korekcija tamo, gdje nije moguće osigurati sinusni napon kod mjerenja gubitaka. Potrebno je poznavati faktor oblika napona, a to znači ili mjeriti efektivnu vrijednost i srednju vrijednost napona (npr. elektrodinamskim voltmetrom i voltmetrom sa zakretnim svitkom i ispravljačem, ili oscillografski snimiti i analizirati krivulju napona.

U slučaju da ne želimo provoditi ovakvu detaljnu analizu, može se postupiti jednostavnije, da se kod pokusa praznog hoda mjeri napon instrumentom koji pokazuje srednje vrijednosti, i da se računa kao da je napon sinusan. Time su izmjereni gubici histereze u pravom iznosu, a oni iznose 75-80% ukupnih gubitaka, dok je propuštena korekcija na 20-25% ukupnih gubitaka, tj. na gubicima zbog vrtloženih struja. Taj postupak predviđen je i prijedlogom naših propisa za sve slučajeve, gdje nema 3-ćeg harmoničkog člana u magnetskom toku, a to je kod svih transformatora, koji imaju jedan namot spojen u trokut, kao i kod jednofaznih transformatora.

Kod transformatora bez trokutnog namota nema mogućnosti da se zatvori 3-ći harmonički član uzbudne struje, potreban za postizanje sinusnog toka. Posljedica je, da magnetski tok sadrži treći harmonički član, koji se također pojavljuje u faznim naponima - ali ne u linijskom. Gubici uslijed trećeg harmoničkog člana u toku prilični su, i nema svrhe uz njih provoditi korekciju mnogo manjih gubitaka članova višeg reda, ako ovi nisu odviše visoki. Gubici uslijed trećeg člana postoje pak i onda, ako je narinut posve sinusni napon, mjerimo ih u okviru ukupnih gubitaka praznog hoda, i nisu potrebne nikakve korekcije. U smislu propisa, kod transformatora bez namota spojenih u trokut mjerimo efektivnu vrijednost narinutog napona, ali zbroj 5-tog i 7-og harmoničkog člana u tom naponu ne smije prijeći 5% ukupnog napona.

Mjerenje će biti najsigurnije i najjednostavnije, bez korekcije, ako uzmognemo osigurati u svakom slučaju sinusan napon na stezaljkama. Zbog toga se za ispitne stanice grade generatori sa specijalno niskim reaktancijama i dovoljno velike snage, kako bi padovi napona zbog nesinusnih struja magnetiziranja bili što manji.

Zbog nesimetrija i različitih padova napona bit će struje u pojedinim fazama različite i po veličini, i po faktoru oblika. Njihove efektivne vrijednosti, a isto tako i njihovi osnovni, 5-ti i 7-mi harmonički članovi međusobno se razlikuju za 10-15% dok se 3-ći harmonički članovi razlikuju i do 50%. Analiza struje praznog hoda može se izvršiti oscillografskim snimanjem njene krivulje, ili posebnim analizatorom, koji omogućuje direktno očitavanje amplitude svake pojedine frekvencije. Navodi se obično veličina 3-ćeg, 5-tog i 7-og harmoničkog člana, u postocima nazivne struje.

Preračunavanje struje praznog hoda, snimljene kod izobličene krivulje napona, na vrijednosti, koje bi dobili kod sinusnog napona, vezano je uz poznavanje karakteristike magnetskog kruga. Analizom krivulje napona može se odrediti oblik krivulje magnetskog toka i pripadne struje magnetiziranja. Ako se po istoj ka-

rakteristici magnetskog kruga odredi struja magnetiziranja za sinusni tok, koji ima istu tjemenu vrijednost, mogu se usporediti obe struje, i na osnovu toga korigirati struje mjerene kod nesinusnog napona. Karakteristiku magnetskog kruga potrebnu za taj postupak možemo dobiti snimanjem struje pomoću ampermetra, koji mjeri tjemenu vrijednost, za nekoliko različitih napona. Nešto je jednostavniji aproksimativni postupak, kod kojega snimamo struju praznog hoda dva puta, pri istoj srednjoj vrijednosti napona, ali različitim faktorima oblika. To možemo postići npr. namjernim dodavanjem reaktancija i dovode. Ako ucrtamo snimljene struje iznad faktora oblika kao apscise, i izvršimo ekstrapolaciju do $\xi = 1,11$, dobit ćemo struju praznog hoda za sinusni napon. Faktor oblika određujemo istovremenim mjerenjem napona instrumentom, koji pokazuje srednje vrijednosti, i instrumentom, koji pokazuje efektivne vrijednosti. Korigiranje struje praznog hoda na sinusni oblik napona ima opravdanja jedino kod jako deformirane krivulje napona.

2.8. Mjerenja u kratkom spoju

U kratkom spoju mjerimo impedanciju i reaktanciju transformatora, koji podaci su važni za određivanje padova napona u pogonu pri različitim opterećenjima, te za ocjenu ponašanja transformatora u paralelnom radu. Osim toga mjerimo gubitke uzrokovane strujom opterećenja u transformatoru, a to su

- a) gubici strujne topline u omskim otporima R_1 i R_2 ,
- b) dodatni gubici zbog potiskivanja struje i vrtložnih struja u bakru, i
- c) gubici koje uzrokuju rasipni tokovi u metalnim dijelovima. Poseban problem predstavlja provjeravanje otpornosti transformatora protiv kratkog spoja. Ono se iznimno vrši, i to samo na modelu, odnosno kao tipno ispitivanje. Otpornost protiv kratkog spoja obuhvaća dinamičku čvrstoću i termičku čvrstoću.

2.8.1 Provedba uobičajenih mjerenja. Mjerenje se obično vrši pri nazivnoj struji. Da bi u kratkom spoju postigli nazivnu struju u namotima, potrebno je 3-10% nazivnog napona onog namota, koji napajamo. Kod namota niskog napona bit će to vrlo mali napon, pa je zgodnije izvršiti napajanje sa strane gornjeg napona, a namot nižeg napona kratko spojiti. Ako npr. transformator za 10000/400 V treba 1% napona za nominalnu struju, onda bi pri napajanju sa strane donjeg napona trebali 16 V, a sa strane gornjeg napona 400 V, što je lakše dobiti i regulirati u ispitnoj stanici. Međutim, ništa ne stoji na putu, da se, pogotovo kod viših napona, kratki spoj izvede na strani gornjeg, a napajanje na strani donjeg napona.

Otpor kratkospojnih veznika pribraja se otporu namota kratkospojene strane. Što niži je napon s te strane, i što veći je transformator, to manje su impedancije, pa treba to više paziti, da izvedba kratkog spoja bude što bolja, i da predstavlja što manji otpor. Otpori ampermetara i strujnih grana vatmetara mogu biti znatni u usporedbi s impedancijama na strani niskog napona, pa mogu pokvariti mjerenja. Zato se instrumenti uključuju samo sa strane napajanja, prema sl.2-41. Kratki spoj se izvodi što kraćim i što debljim kabelom ili plosnatim bakrom.

Što je veći transformator, to manji su omski otpori u usporedbi s reaktancijama rasipanja. To znači, da će i $\cos \varphi$ u kratkom spoju biti to manji, što je veći transformator, pa se s time u vezi pojavljuju iste poteškoće, o kojima je bilo govora

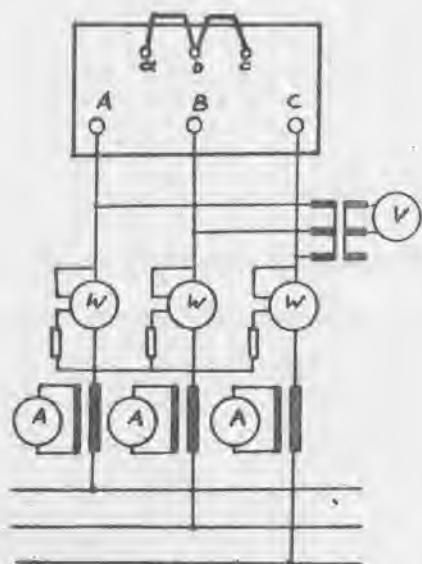
kod mjerenja u praznom hodu (vidi 2.7.1.)

I ovdje treba strujne i naponske grane vatmetara po mogućnosti direktno uključivati, bez mjernih transformatora, dok se struja i napon mogu mjeriti pomoću mjernih transformatora.

Nakon svakog mjerenja u kratkom spoju treba odmah izmjeriti otpor namota, kako bi se moglo odrediti zagrijavanje namota, i izvršiti preračunavanje na temperaturu 75°C.

2.8.2 Impedancija transformatora. Iz mjerenja linijskog napona i linijske struje dobivamo vrijednost impedancije po fazi zvijezde u omima:

$$Z = \frac{U_{mj}}{\sqrt{3} I_{mj}} \quad (1)$$



Sl. 2-41

Ovako određena impedancija istovetna je s impedancijom jedne faze, ako je namot spojen u zvijezdu. Ako je namot spojen u trokut, stvarna impedancija po fazi je 3 puta veća. Budući da nas zanimaju struje i naponi na stezaljkama, a ne unutar transformatora, zgodno je računati impedancije, otpore i reaktancije kao da je namot spojen u zvijezdu, pri čemu ne treba ulaziti u to, kako je transformator stvarno spojen.

Kao mjerenu struju uzimamo srednju vrijednost struje u sve 3 faze. Iz mjerenja snage dobiva se:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_{Kmj}}{\sqrt{3} U_{mj} I_{mj}} \quad (2)$$

a odatle slijede otpor i reaktancija po fazi zvijezde:

$$R = Z \cos \varphi_K = \frac{P_{Kmj}}{3 I_{mj}^2} \quad (3)$$

$$X = Z \sin \varphi_K = \sqrt{Z^2 - R^2} \quad (4)$$

Ovako izmjeren omski otpor predstavlja nadomjesnu vrijednost, koja odgovara ukupnim gubicima transformatora uslijed struje opterećenja, te je veći od otpora mjerenog istosmjernom strujom R_{Σ} .

Impedancija, djelatni otpor i reaktancija izmjereni na ovaj način predstavljaju ukupne vrijednosti, za oba namota zajedno, reducirane na broj zavoja one strane, na kojoj smo izvršili mjerenja.

Obično te vrijednosti izračunavamo kao tzv. relativne naponne kratkog spoja ili u postocima kao $u_k\%$, $u_r\%$ i $u_s\%$. To su u stvari padovi napona u ukupnoj impedanciji Z , omskom otporu R odnosno reaktanciji X transformatora pri nominalnoj struji, izraženi

u postocima nominalnog napona računajući i impedancije i napon po fazi zvijezde:

$$u_k\% = \frac{Z I_n}{U/\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (5)$$

$$u_r\% = \frac{R I_n}{U/\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$u_s\% = \frac{X I_n}{U/\sqrt{3}} \cdot 100 \quad (7)$$

Veličina $Z I_n \sqrt{3} = U_k$ nije ništa drugo, već onaj trofazni napon na stezaljkama transformatora, koji je potreban, da bi u kratkom spoju postigli nazivnu struju. Ako dakle u kratkom spoju reguliramo napon tako, da postignemo nazivnu struju I_n , onda iz očitano napona U_k i snage P_k odmah dobivamo:

$$u_k\% = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 \quad (8)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_k I_n} \quad (9)$$

$$u_r\% = u_k\% \cdot \cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_n I_n} \cdot 100 = \frac{P_k}{P_n} \cdot 100 \quad (10)$$

$$u_s\% = u_k\% \cdot \sin \varphi_k = \sqrt{u_k\%^2 - u_r\%^2} \quad (11)$$

Ovaj način računanja najradije se upotrebljava i onda, kad nije moguće provesti mjerenje pri nazivnoj struji. Ako je npr. zbog nedovoljne mogućnosti regulacije mjerenje dalo struju I_{mjer} i snagu P_{mjer} kod napona U_{mjer} , onda je očito, da bi kod struje I_n bio napon:

$$U_k = U_{mjer} \cdot \frac{I_n}{I_{mjer}} \quad (12)$$

i snaga:

$$P_k = P_{mjer} \cdot \left(\frac{I_n}{I_{mjer}}\right)^2 \quad (13)$$

S ovim vrijednostima se dalje računa, kao da je mjerenje provedeno kod nazivne struje.

2.8.3 Gubici uzrokovani strujom opterećenja. Kod struje I_n bili bi gubici u bakru namota pri istosmjernoj struji:

$$P_{R=} = 1,5 \cdot (I_{1n}^2 R_{1=} + I_{2n}^2 R_{2=}) \quad (1)$$

gdje su $R_{1=}$ i $R_{2=}$ linijski otpori namota mjereni istosmjernom strujom, a I_{1n} i I_{2n} pripadne nazivne struje. Pod "linijskim otporom" razumijevamo vrijednosti mjerene između stezaljki transformatora. Kod spoja u zvijezdu vrijedi:

$$R = 2 R_f \quad (2)$$

$$P_{Cu} = 3 I_f^2 R_f = 3 I^2 \frac{R}{2} = 1,5 I^2 R$$

Kod spoja u trokut dobivamo na isti način:

$$R = \frac{2R_f \cdot R_f}{2R_f + R_f} = \frac{2}{3} R_f$$

$$P_{Cu} = 3 I_f^2 R_f = 3 \left(\frac{I}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{3}{2} R = 1,5 I^2 R$$

Bez obzira na stvarni spoj unutar transformatora, s linijskim otporom možemo dakle računati gubitke uvijek na isti način.

Ako izvršimo redukciju otpora obaju namota na isti broj zavoja, bit će

$$P_{R=} = 1,5 I_n^2 R_{=} \quad (4)$$

gdje je I_n = nazivna struja na strani mjerenja

$$R_{=} = R_{1=} + \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right)^2 R_{2=} \text{ ako mjerimo na ulaznoj strani}$$

$$\text{odnosno } R_{=} = R_{1=} \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right)^2 + R_{2=} \text{ ako mjerimo na izlaznoj strani.}$$

Kad u namotima teče izmjenična struja, gubici se povećavaju, jer nastaju vrtložne struje i potiskivanje struje u vodičima, te gubici uslijed vrtložnih struja, koje induciraju rasipni tokovi u metalnim dijelovima - kotlu, učvršćenjima i željeznom paketu.

U slučaju da je otpor kratko spojenog namota malen - kod niskog nazivnog napona i velike snage - gubici i pad napona u kratkospojnim veznicima bit će, u usporedbi s gubicima u samom namotu, toliko veliki, da ih nećemo smjeti zanemariti. Uz struju I i otpor $R = \rho \frac{l}{q}$ bit će gubici u veznicima:

$$P_v = I^2 R = \frac{I^2}{q} \cdot \rho l$$

Ako uvrstimo $I/q = \Gamma \text{ (A/mm}^2\text{)} = \text{gustoća struje}$

$$G = \frac{\rho \text{ (m)} q \text{ (mm}^2\text{)}}{1000 \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{dm}} \frac{\text{m}}{\text{dm}} \right)} \cdot 8,9 \frac{\text{(kp)}}{\text{dm}^3} = \text{težina kratkospojnog veznika (kp)}$$

$$\rho = 0,018 \cdot \frac{235+75}{235+20} = 0,022 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = \text{specifični otpor bakra kod } 75^\circ\text{C}$$

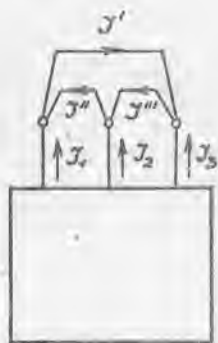
dobivamo izraz za gubitke u kratkospojnom vezniku:

$$P_v = 2,5 G \Gamma^2 \quad (\text{W}) \quad (5)$$

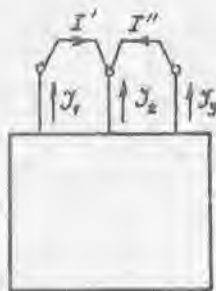
Za određivanje specifičnog strujnog opterećenja I' treba prema sl.2-42 računati sa strujom:

$I' = I$ ako je kratki spoj izveden sa 2 veznika (sl.b)

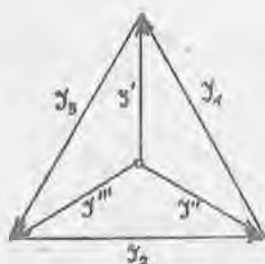
$I' = \frac{I}{\sqrt{3}}$ ako je kratki spoj izveden sa 3 veznika (sl.a)



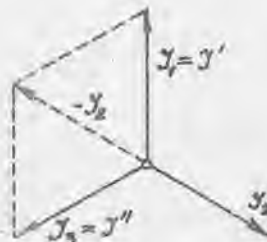
(a)



(b)



$$I' = I'' = I''' = \frac{I}{\sqrt{3}}$$



$$I' = I'' = I$$

Sl. 2-42

Ukupna mjerena snaga u kratkom spoju iznosi:

$$P_{ku} = P_{R=} + P_{dod} + P_v \quad (6)$$

Gubici u transformatoru iznose

$$P_k = P_{ku} - P_v = P_{R=} + P_{dod} \quad (7)$$

Dodatne gubitke možemo odrediti mjerenjem otpora istosmjernom strujom i izračunavanjem $P_{R=}$, te odbijanjem od P_k :

$$P_{dod} = P_k - P_{R=} = P_{ku} - P_v - P_{R=} \quad (8)$$

Sve ove gubitke treba odrediti kod nazivne struje I_n . Ako je mjerenje izvršeno kod neke druge struje I_{mjer} , onda se preračunavanje ukupnih, kao i svakih pojedinačnih gubitaka na nazivnu struju vrši množenjem sa $(I_n/I_{mjer})^2$

$$P = P_{mjer} \cdot \left(\frac{I_n}{I_{mjer}} \right)^2 \quad (9)$$

2.8.4. Preračunavanje na toplo stanje. Podaci o otporu i impedanciji, relativnom naponu kratkog spoja i gubicima treba da se odnose na toplo stanje. Kao toplo stanje uzima se obično temperatura od 75°C. Izborom ove temperature nastojalo se približiti prosječnoj vrijednosti u pogonu, što je kod određivanja gubitaka ispravnije, nego da se računa s maksimalnim mjerenim temperaturama, koje nastupaju tek povremeno. Iznimno se može, po dogovoru, računati toplo stanje drugačije.

Kako bi mogli izvršiti preračunavanja, potrebno je mjeriti temperaturu namota t kod koje je izvršeno mjerenje u kratkom spoju. Otpori će kod temperature 75°C biti veći u omjeru:

$$\frac{R_{75}}{R_t} = \frac{235+75}{235+t} \quad (1)$$

Gubici $I_n^2 R$ povećavaju se u istom omjeru u kojem se povećava otpor, tj.

$$P_{R(75)} = P_{R(t)} \cdot \frac{235+75}{235+t} \quad (2)$$

Medjutim, dodatni gubici nastaju induciranjem vrtložnih struja rasipnim poljima konstantne veličine, koja induciraju iste napone i kod 75°C, i kod temperature t . Kod povećanog otpora bit će ovi gubici u istom omjeru smanjeni, tj.:

$$P_{dod(75)} = \frac{U^2}{R} = P_{dod(t)} \cdot \frac{235+t}{235+75} \quad (3)$$

Ukupni gubici kod 75°C bit će:

$$P_k(75) = P_{R(t)} \cdot \frac{235+75}{235+t} + P_{dod(t)} \cdot \frac{235+t}{235+75} \quad (4)$$

Korekcija se može izvršiti, ako je unaprijed poznata temperatura t , kod koje će se izvršiti mjerenja u kratkom spoju, takodjer i tako, da se frekvencija za vrijeme mjerenja smanji na:

$$f_k = f_n \cdot \frac{235+t}{235+75} \quad (5)$$

Pri istom rasipnom polju bit će inducirani naponi, koji uzrokuju dodatne gubitke, smanjeni u omjeru frekvencija f_k/f_n , a dodatni gubici u omjeru njihovog kvadrata:

$$P_{dod}^* = P_{dod(t)} \cdot \left(\frac{f_k}{f_n} \right)^2 = P_{dod(t)} \cdot \left(\frac{235+t}{235+75} \right)^2 \quad (6)$$

Ukupni ovako izmjereni gubici iznose:

$$P_k^* = P_{R(t)} + P_{dod(t)} \cdot \left(\frac{235+t}{235+75} \right)^2 \quad (7)$$

Gubitke pri 75°C dobijemo tako, da gubitke pri frekvenciji f_k i temperaturi t pomnožimo faktorom $\frac{235+75}{235+t}$:

$$P_k(75) = P_k^* \cdot \frac{235+75}{235+t} = P_{R(t)} \cdot \frac{235+75}{235+t} + P_{dod(t)} \cdot \frac{235+t}{235+75} \quad (8)$$

Na taj način možemo provesti korekciju na toplo stanje i bez razdvajanja dodatnih gubitaka od ukupnih gubitaka kratkog spoja.

Na osnovu korigiranih gubitaka kod 75°C, može se izračunati i nadomjesni otpor po fazi zvijezde kod 75°C kao:

$$R_{(75)} = \frac{P_{k(75)}}{3 I_n^2} = R_{(t)} \cdot \frac{P_{k(75)}}{P_{k(t)}} \quad (9)$$

Rasipna reaktancija x je ostala nepromijenjena, pa se impedancija može izračunati kao:

$$Z_{(75)} = \sqrt{R_{(75)}^2 + x^2} \quad (10)$$

Na sličan način može se korigirati i vrijednosti relativnog napona kratkog spoja:

$$u_{r\%}(75) = \frac{P_{k(75)}}{P_n} \cdot 100 = u_{r\%}(t) \cdot \frac{P_{k(75)}}{P_{k(t)}} \quad (11)$$

$$u_{s\%}(75) = u_{s\%}(t) \quad (12)$$

$$u_{k\%}(75) = \sqrt{u_{r\%}^2(75) + u_{s\%}^2(75)} \quad (13)$$

2.6.5 Mjerenje nulreaktancije. Poznavanje nulreaktancije od važnosti je samo, gdje se može očekivati u sve tri faze istofazna struja opterećenja, ili istofazna komponenta te struje. To će biti slučaj npr. kod transformatora sa zvjezdištem uzemljenim preko prigušnice, ako dodje do doznog spoja, kod transformatora sa nulvodom kod jako nesimetričnih opterećenja i slično.

Nulreaktancija je ona reaktancija, koju faza transformatora suprotstavlja istofaznoj struji, koja teče istovremeno u sve tri faze. Mjerenje nulreaktancije vršimo tako, da narinemo napn između zvjezdišta i svih triju stezaljki spojenih zajedno. Dobivena impedancija se odnosi na sve tri faze spojene paralelno. Za samu jednu fazu vrijednost je trostruko veća. Prema tome iz mjerene struje i snage računamo:

$$Z_o = 3 \frac{U_{ko}}{I_{ko}} \quad (1)$$

$$\cos \phi_{ko} = \frac{P_{ko}}{U_{ko} I_{ko}} \quad (2)$$

$$X_o = Z_o \cdot \sin \phi_{ko} \quad (3)$$

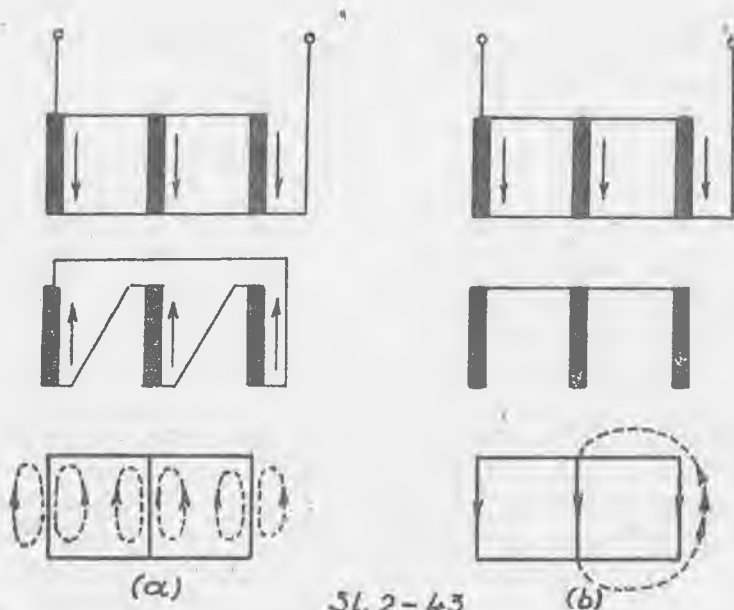
Obično se i ova reaktancija izražava kao pad napona kod nominalne struje u postocima nominalnog napona:

$$u_{o\%} = \frac{X_o I_n}{U_n} \cdot 100 \quad (4)$$

Ako je drugi namot transformatora spojen u trokut, istofazni tokovi u sva tri stupa inducirat će u tom namotu struje, koje se zatvaraju u trokut, i koje djeluju nasuprot toku. Uslijed toga će se tok ograničiti na manje presjeke, tj. bit će uglavnom optisnut iz jezgre u prostor između jednog i drugog namota. Ako

je drugi namot spojen u zvijezdu, tj. otvoren, takvog djelovanja nema, i sva tri toka se zatvaraju kroz stupove do jarmova, i onda natrag kroz zrak odnosno kotao, pri čemu su na raspolaganju znatno veći presjeci. Zbog manjeg toka bit će reaktancija kod spoja u trokut (sl.2-43a) znatno manja, nego kod spoja u zvijezdu (sl. 2-43b) tako, da se vrijednosti kreću oko:

$$\begin{aligned} u_0\% &= 2,5\%, & \text{kod spoja u trokut,} \\ u_0\% &= 25-35\% & \text{kod spoja u zvijezdu.} \end{aligned}$$



Pošto se rasipni tokovi dobrim dijelom zatvaraju kroz kotao, važno je da se nulreaktancija mjeri na gotovom transformatoru u kotlu, s montiranim i spojenim svim namotima.

2.8.6 Transformator u štednom spoju. Ispitivanje transformatora u štednom spoju vrši se jednako kao i kod transformatora s odvojenim namotima. Jedino kod mjerenja u kratkom spoju mogu se pojaviti poteškoće, ako je prijenosni omjer blizu vrijednosti 1. U tom slučaju naime napon kratkog spoja postaje vrlo nizak (za prijenosni omjer 1:1 postaje čak $U_k = 0$), jer se kratki spoj transformatora sve više približava kratkom spoju mreže. Zbog toga se mjerenje često vrši tako, da se napon narine na veći broj zavoja w_1 , kojemu odgovara napon U_1 , a da se kratko spoji manji broj zavoja w_d , kojemu odgovara dodatni napon U_d , prema sl.2-44a.

Označimo sa Z_1 impedanciju dijela namota s većim brojem zavoja, a sa Z_d onu za manji dio namota sa w_d zavoja. U spoju prema sl. 2-44 a impedancija, koja su suprotstavlja narinutom naponu U bit će:

$$\dot{Z}_a = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_d' = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_d \left(\frac{U_1}{U_d} \right)^2 \quad (1)$$

Usporedimo to s normalnim pogonskim spojem za spuštanje napona

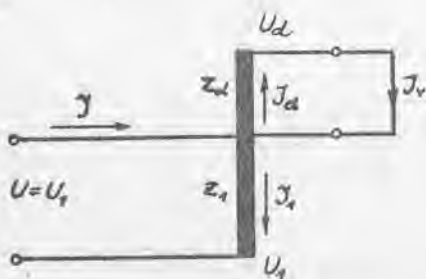
prema sl.2-44 b, gdje je ukupna impedancija:

$$\dot{Z}_b = \dot{Z}_d + \dot{Z}_1'' = \dot{Z}_d + \dot{Z}_1 \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2 \quad (2)$$

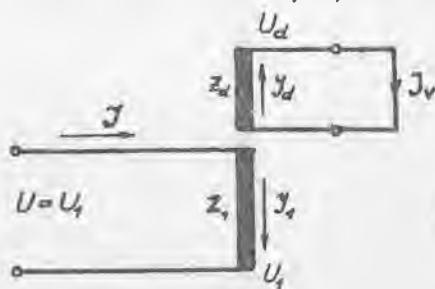
ili s pogonskim spojem za podizanje napona prema sl. 2-44 c kod kojega, prema ekvivalentnom spoju, ukupnu struju daje zbroj struje kratkog spoja kroz dodatne zavoje, na koje djeluje uz narinuti napon U još i napon koji se inducira u tim zavojima:

$$J_d = \frac{U + U \cdot \frac{U_d}{U_1}}{Z_d + Z_1''} = \frac{U}{Z_d + Z_1''} \cdot \frac{U_1 + U_d}{U_1}$$

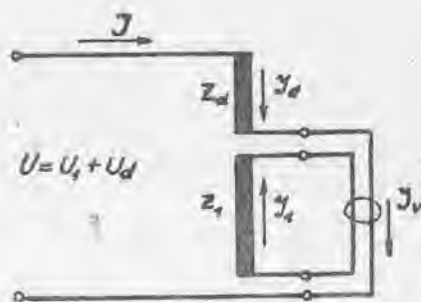
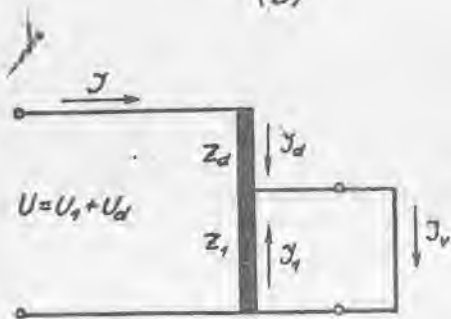
Spoj (a)



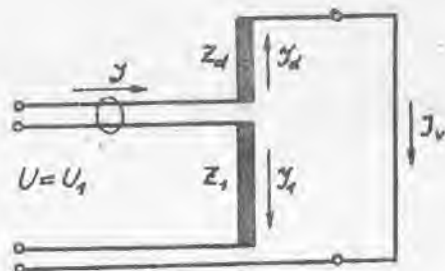
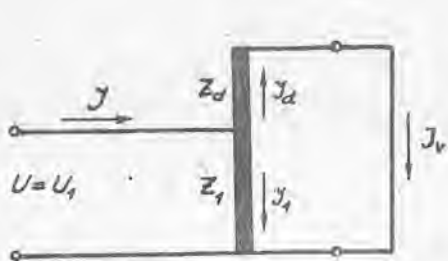
Ekvivalentni spoj



(b)



(c)



i struje $\mathcal{I}_1$ u primarnim zavojima:

$$\mathcal{I}_1 = \mathcal{I}_d \cdot \frac{U_d}{U_1}$$

tako da je ukupna struja:

$$\mathcal{I} = \mathcal{I}_d + \mathcal{I}_1 = \frac{U}{Z_d + Z_1''} \cdot \left(\frac{U_1 + U_d}{U_1} \right)^2 \quad (3)$$

Odavle izlazi ukupna impedancija:

$$\dot{Z}_c = \frac{U}{\mathcal{I}} = (\dot{Z}_d + \dot{Z}_1'') \left(\frac{U_1 + U_d}{U_1} \right)^2 = \left[\dot{Z}_d + \dot{Z}_1'' \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2 \right] \left(\frac{U_1 + U_d}{U_1} \right)^2 \quad (4)$$

Pošto je $U_d \ll U_1$, bit će i ukupna impedancija, reducirana na broj zavoja w_d , tj. $Z_d + Z_1''$, mnogo manja od one reducirane na broj zavoja w_1 , koja iznosi $Z_1 + Z_d'$, pa ćemo u spoju (a) mjeriti daleko veću impedanciju nego u spoju (b) i (c). To znači, da se mjerenje može provesti s većim naponima i manjim strujama, što je mnogo zgodnije.

Na sl. 2-44 prikazana su 3 spoja (a), (b) i (c) i njihovi ekvivalentni spojevi, koji svode štedni spoj na obični transformator s odvojenim namotima. Narinuti napon uzet je u sva tri slučaja takav, da napon po zavoju bude isti. Ukupna struja označena je sa $\mathcal{I}$, struja u kratkospojnom vezniku sa $\mathcal{I}_v$, a u namotu sa $\mathcal{I}_1$ odnosno $\mathcal{I}_d$. Sa sheme se mogu lako odrediti odnosi među naponima i strujama. U sva tri slučaja snaga koju uzima transformator računa se kao:

$$P = I_1^2 R_1 + I_d^2 R_d \quad (5)$$

Sve veličine od interesa izračunate za slučajeve (a), (b) i (c) vide se iz slijedećeg pregleda, u kojemu je radi lakše usporedbe kao jedinica za struju uzeta veličina ukupne struje kod spoja (a), u kojemu se obično vrši mjerenje, dok je napon po zavoju uzet za sva 3 slučaja isti.

Spoj	U	Z_k	$\mathcal{I}/\mathcal{I}_a$	$\mathcal{I}_1/\mathcal{I}_a$	$\mathcal{I}_d/\mathcal{I}_a$	$\mathcal{I}_v/\mathcal{I}_a$	P
a	U_1	$(Z_d + Z_1'') \left(\frac{U_1}{U_d} \right)^2$	1	1	$\frac{U_1}{U_d}$	$\frac{U_1}{U_d}$	$R_1 + R_d'$
b	$U_1 + U_d$	$Z_d + Z_1''$	$\frac{U_1(U_1 + U_d)}{U_d^2}$	$\frac{U_1 + U_d}{U_d}$	$\frac{U_1(U_1 + U_d)}{U_d^2}$	$\frac{(U_1 + U_d)^2}{U_d^2}$	$(R_1 + R_d') \left(\frac{U_1 + U_d}{U_d} \right)^2$
c	U_1	$(Z_d + Z_1'') \left(\frac{U_1}{U_1 + U_d} \right)^2$	$\frac{(U_1 + U_d)^2}{U_d^2}$	$\frac{(U_1 + U_d)}{U_d}$	$\frac{U_1(U_1 + U_d)}{U_d^2}$	$\frac{U_1(U_1 + U_d)}{U_d^2}$	$(R_1 + R_d') \left(\frac{U_1 + U_d}{U_d} \right)^2$

Tabela 2.8.6-1

Da bi odredili relativni kratkospojni napon u_k , treba odrediti napon U_k , kod kojega bi u pravom spoju, npr. (b) - tekla nazivna struja I_n iz mreže. Struje u namotima bile bi u tom slučaju:

$$I_1 = I_n \cdot \frac{U_d}{U_1}$$

$$I_d = I_n$$

Mjerenje vršimo u spoju (a). Uz zahtijevane struje u namotima, struja iz mreže u spoju (a) bit će:

$$I = I_1 = I_n \cdot \frac{U_d}{U_1} \quad (6)$$

Tu struju udesimo pri mjerenju, pa očitamo pripadni narinuti napon $U_{(a)}$.

Impedancija u spoju (a) iznosi:

$$Z_a = \frac{U_{(a)}}{I} = \left| \dot{Z}_d + \dot{Z}_1 \right| \cdot \left(\frac{U_1}{U_d} \right)^2$$

Prema tabeli 2.8.6-1 bit će impedancija u spoju (b):

$$Z_b = Z_a \cdot \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2$$

tako da je napon kratkog spoja:

$$U_k = I_n Z_b = I_n \cdot Z_a \cdot \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2 = I_n \cdot \frac{U_{(a)}}{I_n \cdot \left(\frac{U_d}{U_1} \right)} \cdot \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2 = U_{(a)} \cdot \frac{U_d}{U_1} \quad (7)$$

Odavle se izračuna relativni kratkospojni napon:

$$u_k \% = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100$$

te njegove komponente u_r i u_s na isti način kao kod transformatora s odvojenim namotima, na osnovu izmjerene snage.

Kod transformatora u spoju (c) treba izvršiti pokus u spoju (a) sa strujom

$$I = I_1 = I_n \cdot \frac{U_d}{U_1 + U_d} \quad (8)$$

kojoj odgovaraju nominalne struje u namotima. Impedancija iz mjerenja u spoju (a) bit će:

$$Z_a = \frac{U_{(a)}}{I} = \frac{U_{(a)}}{I_n} \cdot \frac{U_1 + U_d}{U_d}$$

Za spoj (c) impedancija iznosi, prema naprijed navedenoj tabeli:

$$Z_c = Z_a \cdot \left(\frac{U_d}{U_1} \right)^2 \cdot \left(\frac{U_1}{U_1 + U_d} \right)^2 = \frac{U_{(a)}}{I_n} \cdot \frac{U_d}{U_1 + U_d}$$

Odavle odmah slijedi napon U_k :

$$U_k = Z_c I_n = U_{(a)} \cdot \frac{U_d}{U_1 + U_d} \quad (9)$$

Struje mjerenja i izračunavanje napona U_k za transformatore u štednom spoju, pri mjerenju u spoju (a), vide se iz slijedećeg pregleda:

	Struja u spoju (a) koja odgovara nominalnoj struji	Izmjereni napon u spoju (a)	Kratkospojni napon u pogonskom spoju
	I	U	U_k
Spoj (b)	$I_n \cdot \frac{U_d}{U_1}$	$U_{(a)}$	$U_{(a)} \cdot \frac{U_d}{U_1}$
Spoj (c)	$I_n \cdot \frac{U_d}{U_1 + U_d}$	$U_{(a)}$	$U_{(a)} \cdot \frac{U_d}{U_1 + U_d}$

Tabela 2.8.6-2

2.8.9 Otpornost protiv kratkog spoja. Transformator mora izdržati djelovanje sila kod udarne struje kratkog spoja. Praktički se ne može ispitivanje provesti tako, da bi postigli upravo punu udarnu struju kratkog spoja. Može se, međutim, opetovanim uklapanjem na kratki spoj eventualno naći mehanički slaba mjesta, i na osnovu toga poboljšati dinamičku čvrstoću transformatora. Ovakvo ispitivanje postavlja velike zahtjeve na ispitnu stanicu, a rezultati su dosta nepouzdana, pa se ono provodi samo u slučaju iznimne potrebe, dok u standardima nije definirano.

Termička čvrstoća transformatora može se utvrditi računski, ako pretpostavimo, da se za vrijeme kratkog spoja toplina akumulira u namotu, a odvod zanemarimo. U tom slučaju bit će:

$$\vartheta_k = \vartheta_m + 0,008 \cdot \Gamma^2 \cdot t_k$$

gdje je ϑ_k = srednja temperatura bakra u kratkom spoju nakon t_k sekundi

ϑ_m = maksimalna temperatura bakra u trajnom pogonu

Γ = gustoća struje u vodiču za vrijeme kratkog spoja u A/mm^2

koja se određuje na osnovu u_k , ako je transformator određen za rad na mreži krutog napona, a na osnovu stvarne struje kratkog spoja na odgovarajućem mjestu u mreži, ako ona nije kruta.

Prema standardu dopuštena je maksimalna temperatura nakon kratkog spoja 220°C. Odavle se izračunava dopušteno trajanje krat-

kog spoja t_k , koje se navodi na natpisnoj pločici.

2.9. Mjerenje zagrijavanja

Prema novom prijedlogu propisa za transformatore pri uobičajenoj izvedbi izolacije od organskih materijala (papir, pamuk) i uz maksimalnu temperaturu okoline 40°C dozvoljeno zagrijavanje iznosi 65° za transformatore s prisilnom cirkulacijom ulja, 60° za uljne transformatore s prirodnim hlađenjem, a 55° za suhe transformatore. Koliko je važna tačna kontrola stvarnog zagrijavanja pri nominalnom opterećenju, pokazuje slijedeći račun. Ako je omjer gubitaka npr. 3:1, onda će gubici u željezu, koji kod različitih opterećenja ostaju nepromijenjeni, iznositi 25% ukupnih gubitaka. Preostalih 75% mijenja se sa kvadratom struje, tj. sa kvadratom opterećenja. Ako uzmemo u prvom približenju, da je nadtemperatura proporcionalna s ukupnim gubicima, onda možemo pisati:

$$\frac{65+1}{65} = \frac{0,25 \cdot P_g + 0,75 \cdot P_g \cdot x^2}{P_g}$$

gdje su P_g = gubici kod nadtemperature 65°

x = omjer povećanja snage kod povišenja nadtemperature za 1

Iz gornje jednačbe slijedi:

$$0,75(x^2 - 1) = \frac{1}{65}$$

$$x = 1,01$$

tj. u blizini propisima dopuštenog zagrijavanja od 65° za svaki 1% za koji dopustimo da se transformator više grije dobivamo cca 1% više snage. U drugu ruku, po Montsingerovom pravilu svakih 8% povećanja temperature znači skraćivanje životne dobi izolacije na polovicu. Da bi transformator mogli dobro iskoristiti, a da mu ne skraćujemo životnu dob ispod uobičajene mjere i ne ugrožavamo pogonsku sigurnost, potrebno je što tačnije poznavati zagrijanje transformatora pri nazivnom opterećenju.

Transformator treba mnogo sati da dosegne svoju stacionarnu temperaturu pri odredjenom opterećenju. Kod ispitivanja zagrijavanja potrebno je dakle, da teret bude kroz više sati konstantan. Ako transformator uključimo u normalni pogon, njegov napon i opterećenje određeni su pogonskim prilikama u mreži, i mogli bi se kroz duže vremena održavati konstantnima jedino kad bi se neprestano vršili zahvati u čitavoj mreži. To se teško može činiti zbog ispitivanja pojedinog transformatora, pa je zato poželjno, da se ispitivanje izvrši još u ispitnoj stanici. Za opterećenje transformatora mogu pri tome poslužiti različite metode, kao npr.:

a) opterećenje na otpornike, koje dolazi u obzir samo kod malih snaga, jer traži glomazne otpornike i velike uredjaje za održanje nominalnih pogonskih uslova, i predstavlja veliki gubitak energije,

b) opterećenje na mrežu, kod kojega isto tako ispitna stanica treba da raspolaže s velikim jedinicama za terećenje i regulaciju, pa se rijetko upotrebljava,

c) opterećenje u umjetnim spojevima, koje dolazi u obzir samo kod transformatora, kod kojih se mogu izvršiti presapanja unutar samih namota u svrhu ispitivanja,

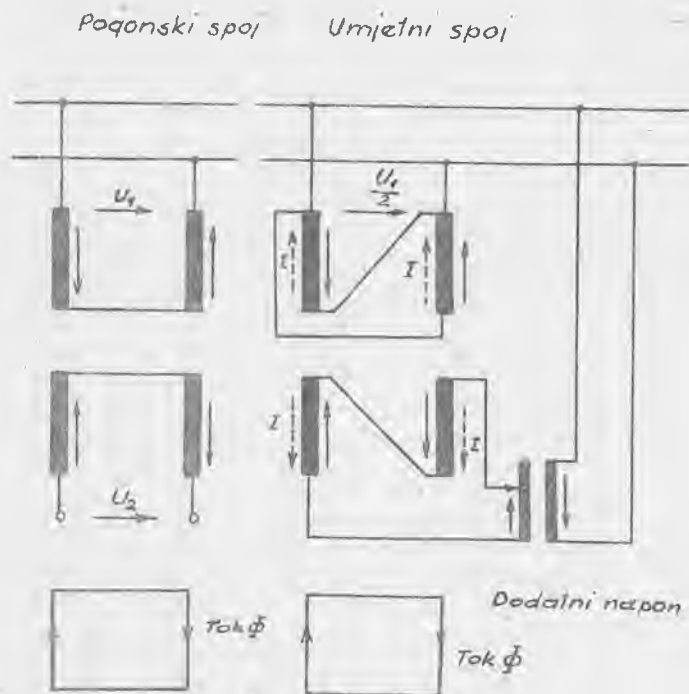
d) opterećenja u povratnom radu, kod kojega su potrebna dva jednaka transformatora, te je pogodno kod transformatora serijske proizvodnje do cca 1000 kVA,

e) opterećenje u kratkom spoju, koje se redovito upotrebljava kod velikih jedinica iznad 1000 kVA.

Prednost je svih metoda od c) do e), što je kod ispitivanja potrebna snaga u jednostrukom ili dvostrukom iznosu gubitaka transformatora, a ne u iznosu čitave nazivne snage transformatora.

2.9.1 Opterećenje u umjetnim spojevima. Kod umjetnih spojeva namot se prespoji tako, da uzbudi normalni tok i normalne gubitke u željezu kao i u normalnom spoju. Iz posebnog izvora dodaje se na prikladnom mjestu dodatni napon, koji tjera kroz namote struju opterećenja, i pokriva gubitke zbog struje opterećenja. Zbog izvršenog prespajanja ta struja se zatvara samo unutar namota transformatora, a ne teče iz mreže, koja transformator uzbuđuje. Ukupno utrošena snaga jednaka je gubicima transformatora, a ne punoj snazi. Rijetko je moguće vršiti prespajanja namota na gotovom transformatoru, pa se umjetni spojevi rijetko upotrebljavaju.

Jednostavan primjer umjetnog spoja vidi se na sl.2-45 za slučaj jednofaznog transformatora. Obe polovice namota, koje su normalno spojene u seriju, spoje se jedna nasuprot drugoj. Isto se učini i na drugom namotu, samo se u seriju doda mali napon iz regulacionog transformatora. Na prvi namot se narine polovica napona. Tok se zatvara normalno, u punoj veličini. Inducirani naponi

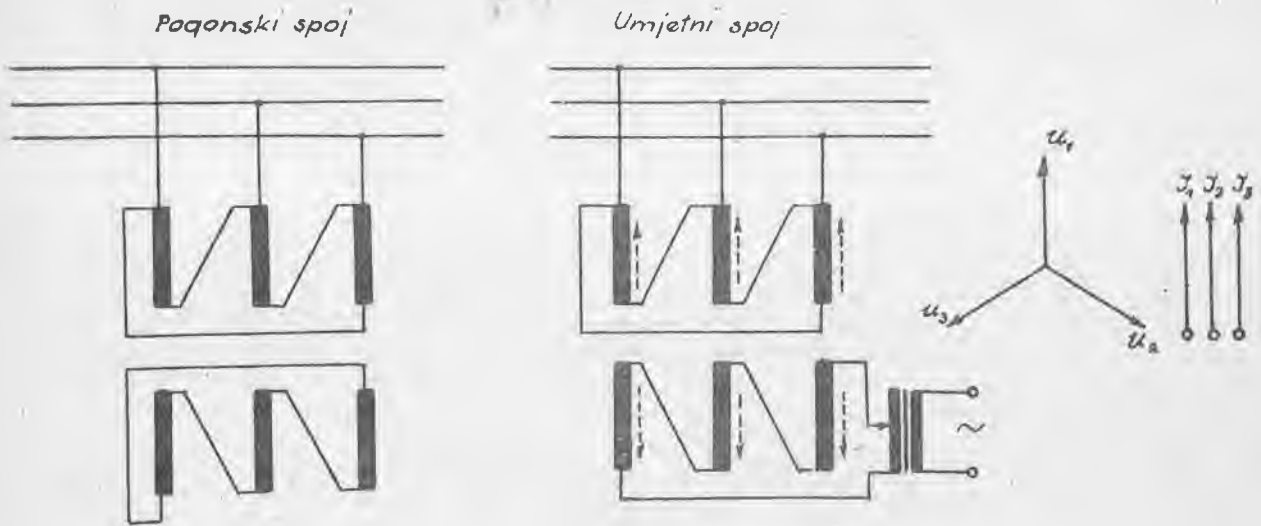


Sl. 2-45

u drugom namotu drže si ravnotežu, pa se dodatnim naponom može po volji regulirati struja. Lako je vidjeti, da se na strani mreže struja zatvara unutar obiju polovica namota, a iz mreže teče jedino

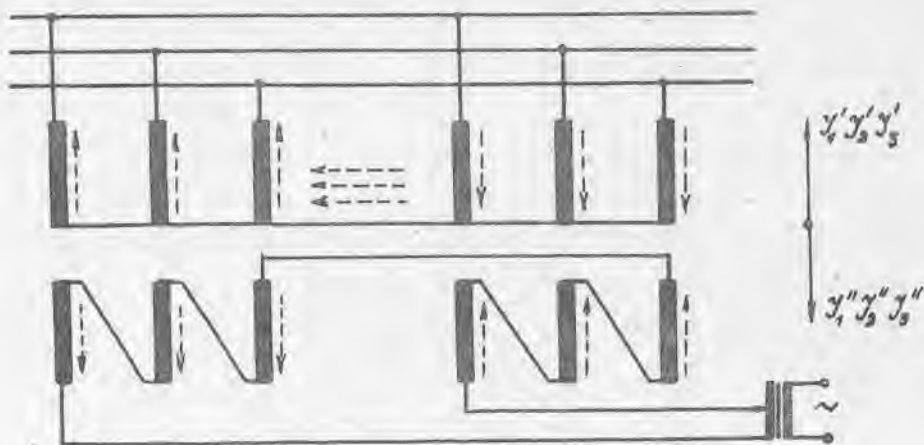
struja magnetiziranja, i struja za pokrivanje gubitaka u željezu. Isto tako dodatni transformator pri malom naponu pokriva samo gubitke kratkog spoja.

Na sl.2-46 prikazan je umjetni spoj za slučaj trofaznog transformatora, koji je s obe strane spojen u trokut. Transformator se uzbuđuje trofazno iz mreže nazivnog napona. Inducirani naponi u sekundarnom trokutu su u ravnoteži. Dodatnim transformatorom dodaje se u sekundarni trokut - koji u tu svrhu treba otvoriti - toliki napon, da bi tekla potrebna struja. Protustruje, u namotu, koji je priključen na mrežu, zatvaraju se unutar samog trokuta, bez sudjelovanja mreže.



Sl. 2-46

Sličan umjetni spoj može se izvesti i kod spoja zvijezda-trokut, ako imamo dva transformatora, prema sl.2-47. Kod umjetnog spoja kao na sl.2-46 ne bi u ovom slučaju struja u namotu spojenom u zvijezdu, koja je istofazna na sva 3 stupa, imala mogućnosti da



Sl.2-47

se zatvori, jer se sve 3 struje u zvjezdištu zbrajaju. Zato je dodan još jedan jednaki transformator, čiji otvoreni trokut je tako spojen s otvorenim trokutom prvoga, da struje teku u obrnutom smislu. Trostruka struja iz jednog zvjezdišta zatvara se u drugo zvjezdište, zbog čega treba zvjezdišta povezati.

Jednofazna struja opterećenja kod umjetnih spojeva pribraja se struji magnetiziranja u svakoj fazi drugačije. Zato je bolje udesiti struju prema vatmetru tako, da gubici odgovaraju normalnim gubicima. Umjesto da udesimo nominalnu struju.

2.9.2 Opterećenje u povratnom radu. Kod opterećenja u povratnom radu potrebna su dva transformatora istih napona i iste grupe spoja. Kod ispitivanja transformatora u serijskoj proizvodnji imamo uvijek na raspolaganju po dva jednaka transformatora. Oba transformatora spojimo na mrežu nazivnog napona, koja daje struju magnetiziranja i pokriva gubitke u željezu obaju transformatora. Struju opterećenja tjera kroz oba transformatora ili razlika napona, koja se postiže različito postavljenim premještačima na oba transformatora (sl.2-48a), ili malim dodatnim transformatorom u otvorenom spoju (sl.2-48b).

Ako su transformatori jednaki, i ako im je relativni kratkospojni napon $u_k\%$, onda je potreban za svaki od dva transformatora napon

$$U_k = \frac{u_k\%}{100} \cdot U_n$$

da bi protjerao nazivnu struju. To je za oba transformatora $2u_k\%$, izraženo u postocima nazivnog napona. Ako su odvojci napravljeni tako, da se kod jednog premještača u položaju višeg, a drugog u položaju nižeg napona dobije

$$+ \Delta u\% - (-\Delta u\%) = 2 \cdot \Delta u\% \geq 2u_k\%$$

onda je moguće izvesti opterećenje nazivnom strujom. Obično se $\Delta u\%$ neće tačno podudarati s $u_k\%$, pa će struja biti veća od nazivne. Označimo

$$k = \frac{I}{I_n} = \frac{2 \cdot \Delta u\% \cdot U_n}{2 \cdot u_k\% \cdot U_n} = \frac{\Delta u\%}{u_k\%} \quad (1)$$

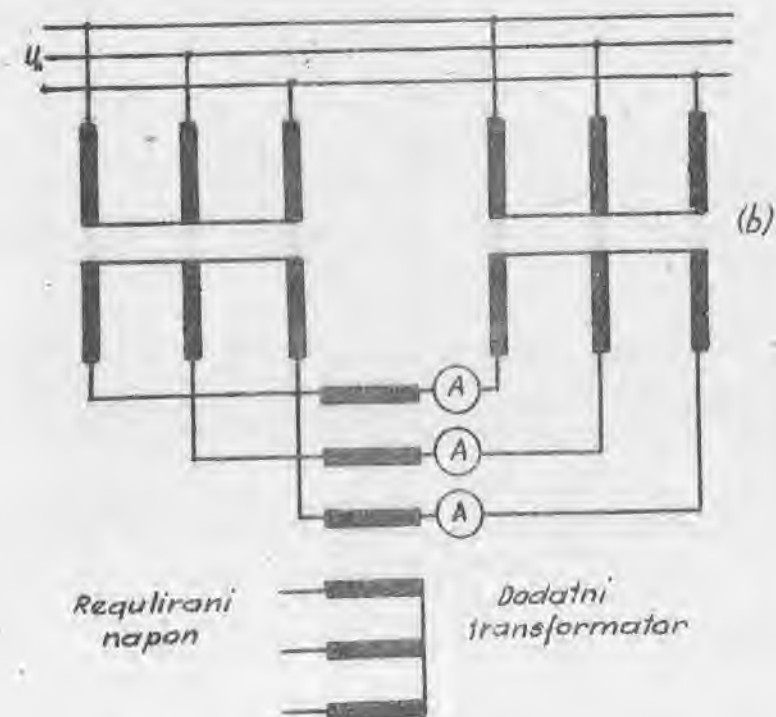
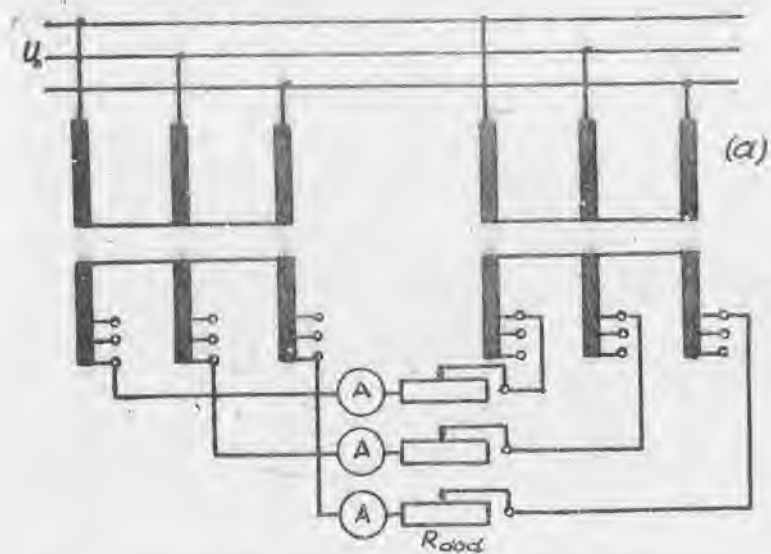
Ako želimo postići $I = I_n$, moramo povišiti u_k tako da bude:

$$u_k' = \Delta u = k u_k \quad (2)$$

Odatle slijedi:

$$\begin{aligned} u_r' &= u_r + u_{r\text{dod}} = \sqrt{k^2 u_k^2 - u_s^2} \\ u_{r\text{dod}} &= \frac{\frac{1}{2} R_{\text{dod}} \cdot I_n}{U_n / \sqrt{3}} = \sqrt{k^2 u_k^2 - u_s^2} - u_r \\ R_{\text{dod}} &= 2 \cdot \frac{U_n}{I_n \sqrt{3}} (\sqrt{k^2 u_k^2 - u_s^2} - u_r) \end{aligned} \quad (3)$$

Uz $\Delta u\% < u_k\%$ ne može se postići nazivna struja u povratnom radu različitim postavljanjem premještača, već je potreban



Sl. 2-48

mali dodatni transformator u otvorenom spoju prema sl.2-48b. Kroz transformator teče nazivna struja, a napon nam mora biti:

$$U_{dod} = 2 \frac{u_k \%}{100} \cdot U_n$$

pa je potrebna snaga dodatnog transformatora

$$P_{\text{dod}} \geq \sqrt{3} U_{\text{dod}} I_n = 2 \frac{u_k^2}{100} \cdot P_n \quad (4)$$

Dodatni transformator se priključi na napon, koji se može regulirati, i tako se udesi nazivna struja. Struje će se nešto razlikovati, jer se struja magnetiziranja različito pribraja struji tereta u svakom od transformatora. U slučaju (a) ukupne gubitke obaju transformatora pokriva direktno mreža, a u slučaju (b) mreža direktno pokriva gubitke praznog hoda, a dodatni transformator gubitke kratkog spoja.

2.9.3 Opterećenje u kratkom spoju. Kod snaga iznad 1000 kVA najčešće se upotrebljava opterećenje u kratkom spoju. Kad bi transformator u kratkom spoju priključili na takav napon, da teče nazivna struja, on bi se grijao manje nego u normalnom pogonu, jer nema gubitaka u željezu. Ako podignemo struju u kratkom spoju tako, da gubici u bakru budu jednaki nazivnim gubicima u bakru i željezu zajedno:

$$3I^2R = 3I_n^2R + P_{\text{Fe}} \quad (1)$$

onda zagrijavanje i opet neće odgovarati onome u normalnom pogonu, jer se sada čitava toplina gubitaka razvija u bakru, pa je temperaturni pad od bakra do ulja veći nego u nazivnom pogonu, gdje se jedan dio te topline razvija u željezu. Da bi dobili zagrijanje, koje odgovara prilikama u normalnom pogonu, izvodimo dva mjerenja u kratkom spoju:

1) mjerenje pri gubicima jednakima ukupnim gubicima u nazivnom pogonu, pri čemu će temperaturni pad od ulja do okoline θ_{u1} biti kao u nazivnom pogonu, i

2) mjerenje pri nazivnoj struji, pri čemu će pad temperature od bakra do ulja $\Delta\theta_{\text{Cu}2}$ biti isti kao u nazivnom pogonu. Ako struja nije tačno jednaka nazivnoj, onda treba temperaturni pad preračunati na nazivnu struju:

$$\Delta\theta_{\text{Cu}n} = \Delta\theta_{\text{Cu}} \left(\frac{I_n}{I} \right)^q \quad (2)$$

gdje je $q = 2$ kod prisilne cirkulacije ulja

$q = 1,6$ kod prirodne cirkulacije ulja, jer se s temperaturom poboljšava i cirkulacija, pa je i hlađenje bolje.

Ukupno zagrijanje pri nazivnom pogonu dobivamo kao zbroj pada temperature od ulja do zraka iz pokusa 1), i pada temperature od bakra do ulja iz pokusa 2):

$$\theta_{\text{Cu}n} = \theta_{u1} + \Delta\theta_{\text{Cu}2} \quad (3)$$

Kao temperaturu bakra treba pri tome uzeti srednju temperaturu namota, dobivenu mjerenjem povećanja otpora namota. Kao temperaturu ulja treba također uzeti srednju vrijednost. Ovu ćemo dobiti tako, da izmjerimo temperaturu na vrhu kotla u džepu za termometar, koji napunimo uljem. Od te temperature odbijemo polovinu pada temperature u rashladnom uredjaju. Ovaj pad temperature mjeri se termometrima, i to kod glatkih i rebrastih kotlova na vanjskoj površini kotla, u visini gornjeg i donjeg kraja namota; kod kotlova s radijatorima ili cijevima na njihovom gornjem i donjem pri-

ključku, što bliže stijeni kotla; kod hladjenja s prisilnom cirkulacijom ulja, na ulazu i izlazu ulja u hladnjak.

Kako bi se skratilo mjerenje, opterećenje u kratkom spoju započinjemo s povećanom strujom za 30-50% iznad nazivne, pa tek nakon 2-3 sata prelazimo na struju nazivnih gubitaka. Prvo mjerenje temperatura ulja i okoline izvršimo kad smo postigli stacionarne temperature. Zatim struju smanjimo na nazivnu. Hladjenje bakra prema ulju teče s mnogo manjom vremenskom konstantom, pa možemo već nakon cca 1 sata izvršiti drugo mjerenje temperatura ulja, okoline i namota.

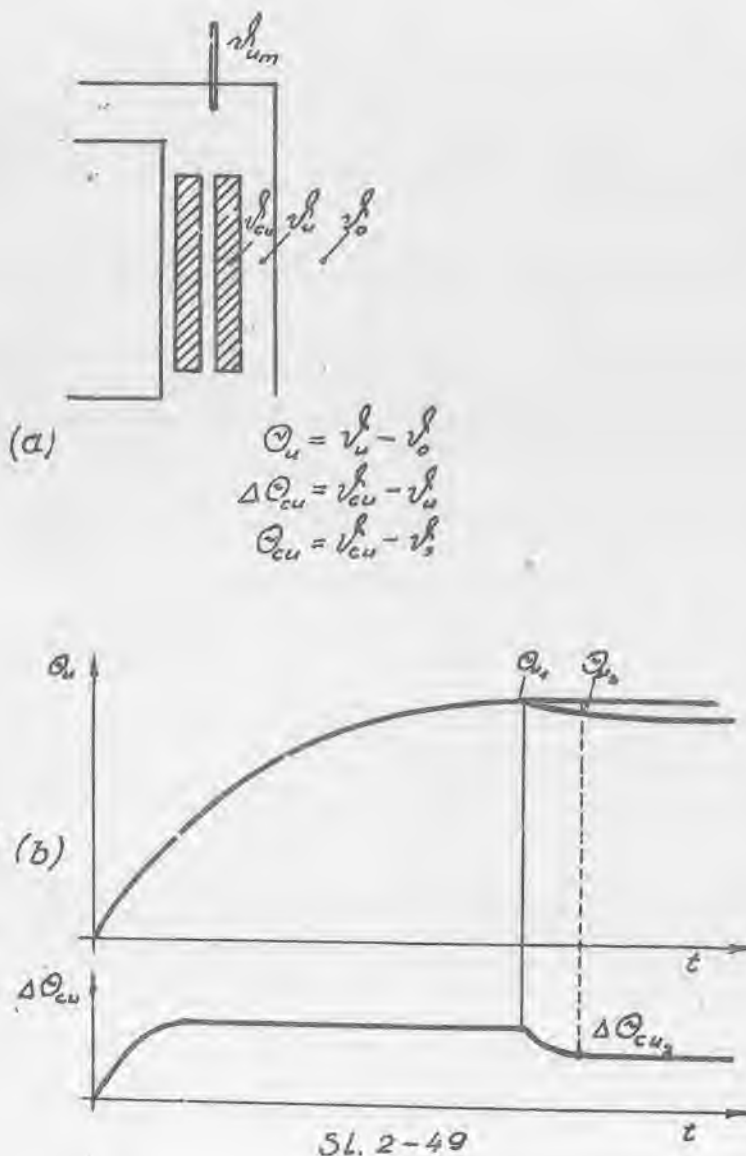
Iz prvog mjerenja odredimo

$$\Theta_{u1} = \vartheta_{u1}^h - \vartheta_{o1}^h \quad (4)$$

a iz drugog mjerenja:

$$\Delta\Theta_{cu2} = \vartheta_{cu2}^h - \vartheta_{u2}^h \quad (5)$$

uz oznake prema slici 2-49. Prema formuli (2.9.3-5) može se sada



izračunati zagrijanje bakra pri nazivnim pogonskim uslovima.

2.9.4 Mjerenje temperatura. Srednja vrijednost zagrijanja namota određuje se mjerenjem povećanja otpora po formuli:

$$\Theta = \vartheta_t - \vartheta_o = \frac{R_t - R_h}{R_h} (235 + \vartheta_h) + \vartheta_h - \vartheta_o \quad (1)$$

gdje znači

R_t = izmjereni otpor toplog namota kod temperature ϑ_t

R_h = izmjereni otpor hladnog namota kod temperature ϑ_h

ϑ_o = temperatura rashladnog sredstva pri mjerenju toplog namota

Θ = srednja vrijednost zagrijanja namota

Otpor hladnog namota R_h treba mjeriti nakon što se je temperatura namota izjednačila s temperaturom ulja, a to je praktički nakon najmanje 8 sati stajanja u beznaponskom stanju. Istovremeno mjerimo termometrom temperaturu ulja u najgornjem sloju ϑ_h .

Otpor toplog namota R_t treba mjeriti neposredno nakon isklopa. Pri isklopu transformatora treba obustaviti dotok rashladne vode ili zraka. Pošto pripreme za mjerenje ipak oduzmu nešto vremena, treba mjeriti vrijeme od časa isklopa do prvog očitavanja, i onda izvršiti bar još 2-3 očitavanja u jednakim vremenskim razmacima, te krivulju mjerenih otpora ekstrapolirati prema natrag do časa isklopa (vidi 2.9.5).

U slučaju da je otpor namota vrlo nizak, i kod suhih transformatora, mjerenje se može izvršiti termometrima. Kod transformatora razlika između prosječne temperature namota i lokalnih temperatura nije velika. Mjerenje se vrši na najtoplijem pristupačnom mjestu namota.

Temperatura željeza može se mjeriti termometrom, i to samo kod suhih transformatora. Kod uljnih transformatora, ukoliko se ne može dovoljno tačno odrediti zagrijanje iz povećanog otpora, moramo se zadovoljiti kontrolom temperature ulja u najgornjem sloju, koja ne smije prijeći 95°C , odnosno ne smije pokazati veće zagrijanje prema okolini od 55° . Kod transformatora kod kojih ulje nije zaštićeno od neposrednog dodira sa zrakom, ta temperatura smije biti samo 90°C , odnosno zagrijanje 50° . Mjerenje temperature ulja vršimo na svakom uljnom transformatoru, ne samo kod ispitivanja, nego i u pogonu, kao stalnu kontrolu funkcioniranja rashladnog uređaja.

Kao temperatura rashladnog sredstva mjeri se:

a) kod transformatora s prirodnim hladjenjem temperatura okolnog zraka, u udaljenosti 1 - 2 m od transformatora, i u polovici njegove visine,

b) kod prisilnog zračnog hladjenja temperatura dolazećeg zraka,

c) kod vodenog hladjenja temperatura rashladne vode na ulazu u hladnjak.

Kod mjerenja temperature zraka termometri treba da su zašklonjeni od strujanja i od isijavanja. Preporuča se smjestiti ih u zasebnu posudu s uljem, kako ne bi preneglo slijedili lokalne promjene u temperaturi zraka.

Propisima dopuštena zagrijanja razumijevaju se uz uvjet da okolina ne prelazi maksimalnu temperaturu 40°C , srednju dnevnu temperaturu 30°C , i srednju godišnju temperaturu 20°C , a kod vodenog hladjenja temperatura rashladne vode ne smije prelaziti 25°C . Za vrijeme ispitivanja temperatura rashladnog zraka smije biti između 10°C i 40°C , a rashladne vode ispod 25°C . U tom slučaju dovoljno je mjeriti zagrijanje, bez posebnih korekcija zbog odstupanja temperature rashladnog sredstva od maksimalnih standardom predviđenih vrijednosti.

Temperatura rashladnog sredstva mjeri se u jednakim vremenskim razmacima, pa se kao mjerodavna uzima srednja vrijednost svih očitavanja za vrijeme zadnje četvrtine trajanja pokusa zagrijavanja.

2.9.5 Odredjivanje toplog otpora ekstrapolacijom. Kad isključimo transformator da bi mjerili zagrijanje, on se počinje hladiti, i to tako, da toplina prelazi s bakra na ulje, dok se temperature ne izjednače, a sa ulja na okolinu. Pošto je hladjenje istovremeno obustavljeno, a toplinski kapacitet ulja je znatan, hladjenje ulja teče vrlo polagano. Mnogo brže teče izjednačenje temperature bakra i ulja. Za kratko vrijeme, koliko traje mjerenje, možemo uzeti da je temperatura ulja ϑ_u ostala konstantna, dok se temperatura bakra smanjuje od početne vrijednosti ϑ_t , tako da nakon vremena t iznosi ϑ .

Količina topline, koja prijedje od bakra na ulje u vremenu dt bit će:

$$dQ = \Lambda(\vartheta - \vartheta_u)dt \quad (1)$$

Istu količinu topline možemo izraziti iz toplinskog kapaciteta i pada temperature bakra:

$$dQ = -c \cdot G_{\text{Cu}} \cdot d\vartheta \quad (2)$$

gdje znači: Λ - toplinska vodljivost između namota i ulja

c - specifična toplota bakra

G_{Cu} - težina namota

Ako ta dva izraza za dQ izjednačimo:

$$\Lambda(\vartheta - \vartheta_u)dt = -c \cdot G_{\text{Cu}} \cdot d\vartheta \quad (3)$$

i riješimo po ϑ , dobivamo jednadžbu hladjenja bakra:

$$\ln(\vartheta - \vartheta_u) = -t \cdot \frac{\Lambda}{cG_{\text{Cu}}} + C$$

Uz početni uvjet:

$$t = 0, \quad \vartheta = \vartheta_t$$

i uz uvođenje vremenske konstante

$$T = \frac{c \cdot G_{\text{Cu}}}{\Lambda}$$

dobivamo konačno

$$\vartheta - \vartheta_u = (\vartheta_t - \vartheta_u) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (4)$$

Temperatura i otpor bakra vezani su linearnim zakonom:

$$\frac{235 + \vartheta}{235 + \vartheta_t} = \frac{R}{R_t} \quad (5)$$

Odatle slijedi

$$\frac{\vartheta - \vartheta_u}{\vartheta_t - \vartheta_u} = \frac{R - R_u}{R_t - R_u} \quad (6)$$

i jednažbe promjene otpora kod hladjenja bakra:

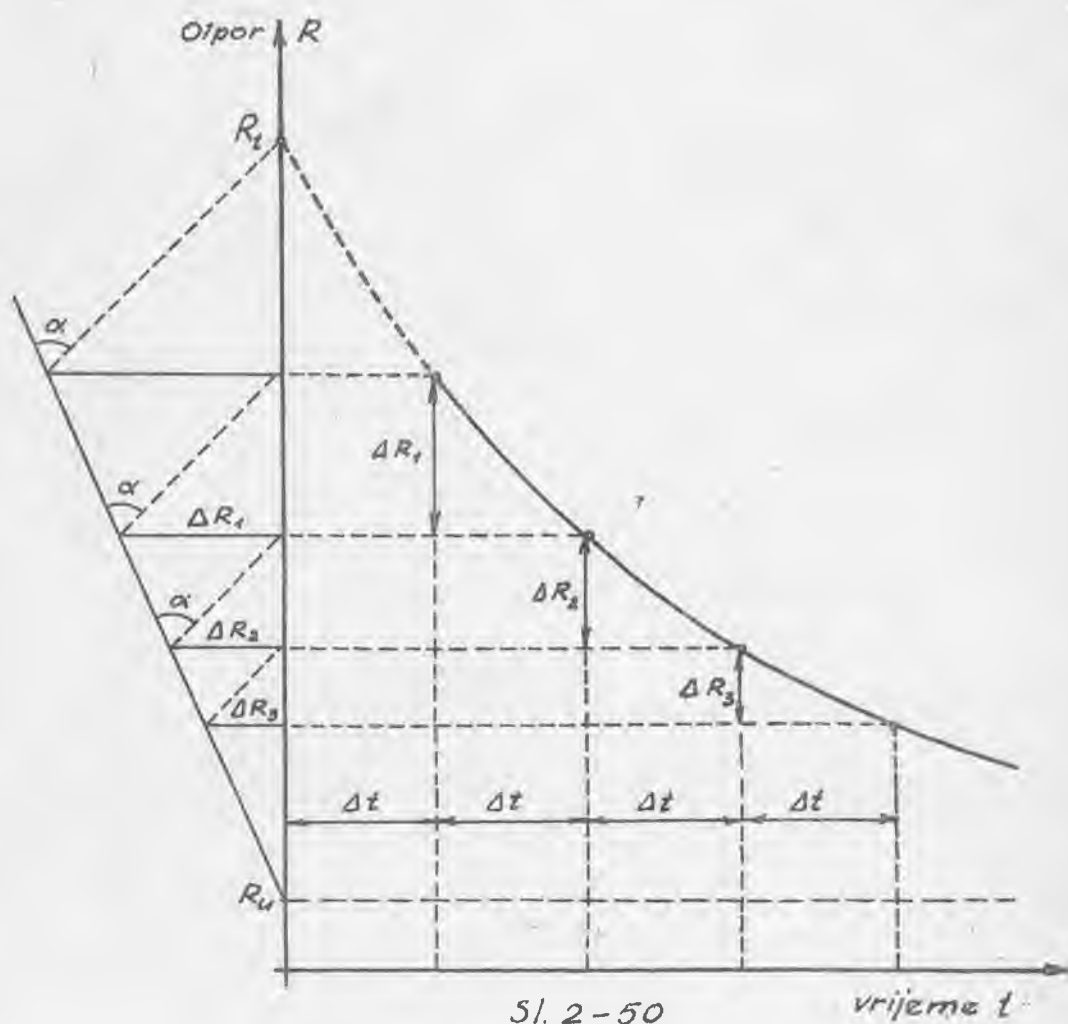
$$R - R_u = (R_t - R_u) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (7)$$

gdje je R = otpor koji odgovara temperaturi ϑ nakon vremena t

R_u = otpor namota pri temperaturi ulja ϑ_u

R_t = otpor namota pri temperaturi ϑ_t u času isklopa

Krivulju $R - R_u = f(t)$ prema gornjem zakonu dobivamo mjerenjem otpora namota u kraćim vremenskim razmacima nakon isklopa (sl. 2-50).



Osobito treba paziti, da se tačno izmjeri vrijeme od isklopa do prvog mjerenja. Ekstrapolacija se može mnogo lakše provesti, ako deriviramo jednažbu promjene otpora:

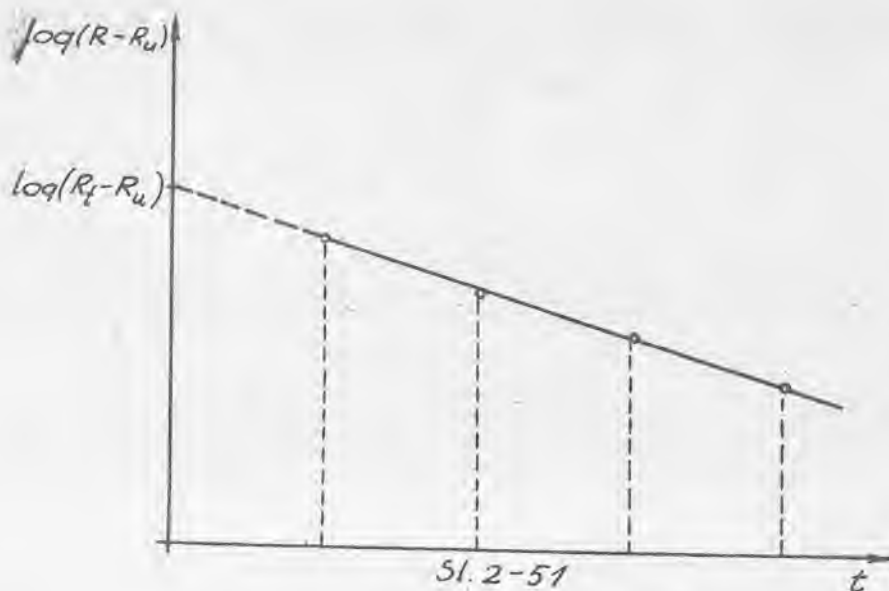
$$\frac{dR}{dt} = -\frac{1}{T} \cdot (R - R_u) \quad (8)$$

Prijelazom na konačne veličine ΔR i Δt dobivamo:

$$\Delta R = -\frac{\Delta t}{T} \cdot (R - R_u) \quad (9)$$

Postoji dakle linearni odnos izmedju prirasta ordinat ΔR i ordinat $(R - R_u)$ na sl.2-50, uz uvjet da ordinate odabiremo u jednakim vremenskim razmacima Δt , tj. da je $\frac{\Delta t}{T} = \text{konst.}$ Taj odnos prikazan je pravcem iznad $(R - R_u)$ kao apscise. Očitanjem prirasta ΔR_0 u početnom intervalu nakon isklopa - ili grafički povlačenjem paralele pod kutom α - dobivamo početnu vrijednost $(R_t - R_u)$. Za $\Delta R = 0$ dobivamo: $R = R_u$, tj. pravac siječe ordinatnu os u tački, koja određuje temperaturu ulja. Kako ovu tek sada dobivamo, to se pri crtanju dijagrama $R - R_u = f(t)$ nanose jednostavno vrijednosti R , pa se tek na kraju sjecištem pravca s ordinatnom osi dobiva pravo ishodište, tj. $R = R_u$. Ovim grafičkim postupkom može se dakle jednostavno odrediti temperatura bakra u času isklopa, i temperatura ulja.

Ekstrapolacija se može izvršiti i prema sl.2-51, nanošenjem vrijednosti $\log(R - R_u)$ u ovisnosti o vremenu t . U tu svrhu potrebno je prvo drugim postupkom, tj. termometrima, odrediti srednju temperaturu ulja, i izračunati pripadni otpor R_u , ili produžiti mjerenjem otpora, dok se temperature bakra i ulja praktički ne izjednače. Dobivene tačke praktički leže na pravcu, koji na ordinatnoj osi odsijeca vrijednost $\log(R_t - R_u)$.



2.9.6 Odredjivanje konačnog zagrijanja. Pokus zagrijavanja prekidamo, kad je transformator dostigao stacionarno stanje, tj. kad mu je temperatura tolika, da je toplota predana hlađenjem upravo jednaka razvijenoj toplini u istom vremenskom intervalu. Smatramo da je to stanje dostignuto, kad temperatura namota zadnja 2 sata ne poraste više od 1° . Ako zagrijanje tokom pokusa premaši dozvoljenu vrijednost, pokus treba prekinuti.

Ugrijavanje transformatora, ako ostavimo po strani prelazne pojave između bakra i ulja, i promatramo ga kao homogeno tijelo, u kojemu se razvija toplota, teče po eksponencijalnom zakonu:

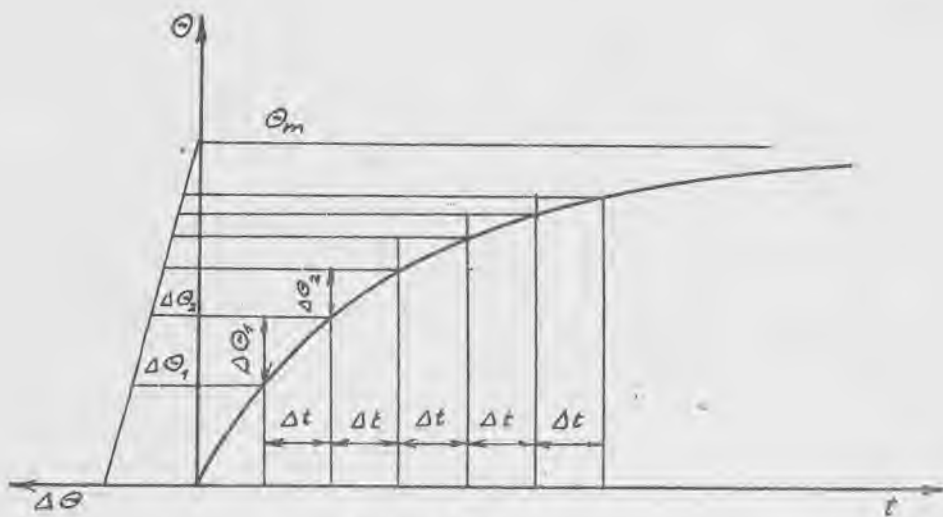
$$\theta = \theta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

gdje je θ_m = konačno zagrijanje prema okolini, koje odgovara stacionarnom stanju,

θ = zagrijanje nakon vremena t

T = vremenska konstanta zagrijavanja čitavog transformatora (kod transformatora s prirodnim hlađenjem oko 5^h , a kod prisilnog hlađenja kraća)

Mjereno zagrijanje θ tokom pokusa nanosimo u ovisnosti o vremenu, pa dobivamo krivulju prema sl.2-52. Potkraj pokusa temperatura vrlo polagano raste. Da se pokus skрати, može se konačno zagrijanje odrediti ekstrapolacijom prema sl.2-52.



Sl. 2-52

Derivacija gornjeg izraza daje

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta_m}{T} \cdot e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\theta_m - \theta}{T} \quad (2)$$

ili, ako prijedjemo na konačne veličine:

$$\Delta\theta = \frac{\Delta t}{T} (\theta_m - \theta) \quad (3)$$

Ako uzmemo jednake intervale Δt , onda je $\frac{\Delta t}{T} = \text{konst.}$, pa je prirast $\Delta\theta$ linearno ovisan o zagrijanju θ . Sa krivulje zagrijavanja

$\Theta = f(t)$ očitavamo priraste $\Delta\Theta$ za jednake vremenske intervale, i nanosimo ih iznad ordinatne osi, u ovisnosti o Θ . Tačke leže na pravcu, koji siječe ordinatnu os, kad je $\Delta\Theta = 0$, odnosno

$$\Theta = \Theta_m$$

Pravac dakle odsijeca na ordinatnoj osi konačno zagrijanje Θ_m , koje odgovara stacionarnom stanju. Ovakvim postupkom može se pokus zagrijavanja znatno skratiti.

Iz jednadžbe za prirast zagrijanja ujedno možemo ocijeniti, da je odstupanje zagrijanja od konačne vrijednosti

$$\Theta_m - \Theta = \frac{\Delta\Theta}{\Delta t} \cdot T \quad (4)$$

Pri vremenskoj konstanti $T = 5^h$ prirast od $0,5^\circ$ u 1^h znači, da je konačno zagrijanje cca $\frac{0,5}{1} \cdot 5 = 2,5^\circ$ iznad zadnje mjerene vrijednosti. Kod prisilnog hlađenja, gdje je vremenska konstanta manja, bit će i ta razlika manja.

2.9.7 Mjerenje zagrijanja u pogori. U pogoru često dolazi do povremenih preopterećenja. Ako je transformator prije toga radio pri relativno niskom opterećenju, onda zagrijanje zbog preopterećenja još uvijek ne mora prekoračiti dozvoljenu granicu. Teško je, međutim, ocijeniti zagrijanje kod promjenljivog opterećenja, kako bi se moglo s jedne strane održati pogon, a s druge strane spriječiti oštećenje transformatora. Zato je vrlo poželjna kontrola zagrijanja u pogonu, bez prekidanja rada.

Mjerenje temperature ulja nije dovoljno, jer se velika masa ulja sporo zagrijava, pa može doći do velikog zagrijanja namota, štetnog po izolaciju, prije nego se to primijeti po porastu temperature ulja.

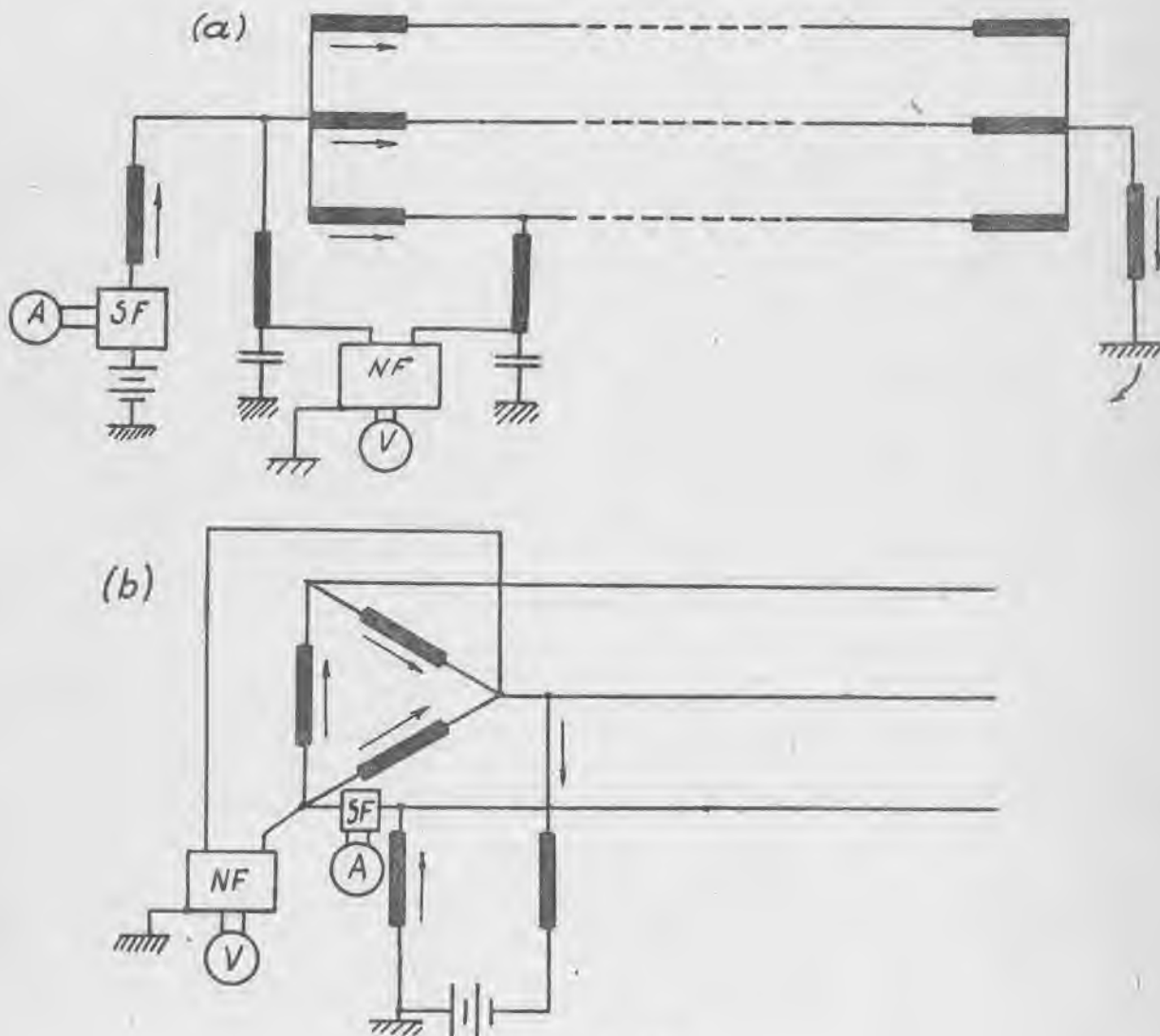
Postoji mogućnost direktnog mjerenja temperature termoelementom ili otporničkim termometrom ugrađenim u sam namot. U pogledu izolacije povoljniji je otpornički termometar, kod kojega se može mjeriti izmjeničnom strujom. U tom slučaju može se u poklopac transformatora ugraditi izolacioni transformator, preko kojega se prenosi mjerna struja, a koji se može tako izolirati, da ne bude opasnosti od visokog napona pri mjerenju. Niti jedno od tih rješenja nije se, ipak, uvelo u praksi, jer predstavlja komplikaciju u izvedbi, unosi jedan fin i osjetljiv element u inače vrlo jednostavnu i robustnu konstrukciju transformatora, i time smanjuje pogonsku sigurnost.

Drugo, pogodnije rješenje je tzv. termička slika. Struja proporcionalna struji opterećenja vodi se kroz svitak, koji je izveden tako, da njegova vremenska konstanta zagrijavanja odgovara onoj, koju ima namot prema ulju. Unutar svitka nalazi se termoelement za mjerenje temperature, a sve zajedno je smješteno u kotao, u ulje, daleko od dijelova pod naponom. Temperatura u termoelementu vjerno slijedi temperaturu namota kod svih promjena opterećenja.

Termička slika koristi se ne samo za očitavanje temperature, već i kao termički relej za zaštitu transformatora. Često se mjerni element ne smješta u ulje transformatora, već u kućište releja van transformatora, gdje se okružuje odgovarajućim toplinskim kapacitetom i izolacijom, kako bi se postigla vremenska funkcija zagrijavanja slična onoj kod transformatora.

Čak i tamo, gdje raspolažemo termičkom slikom u pogonu, poželjna su mjerenja, kojima bi provjerili ispravnost termičke slike. U novije vrijeme sve više se razvijaju metode za mjerenje otpora namota istosmjernom strujom, dok se namot nalazi pod izmjeničnim naponom, dakle bez prekidanja pogona. Te metode mogu poslužiti ne samo kod transformatora, već i kod sinhronih i asinhronih strojeva za kontrolu zagrijanja u pogonu. Istosmjerna struja se šalje kroz namot, koji treba mjeriti, preko strujnog filtera. Ovaj filter propušta istosmjernu struju, a zadržava izmjeničnu, i tako štiti izvor istosmjerne struje i mjerni instrument od izmjenične struje. Isto tako priključuje se milivoltmeter za mjerenje pada napona preko naponskog filtra, koji smanjuje izmjenični napon više hiljada puta, i tako zaštićuje instrument i omogućuje precizno očitavanje.

Na slici 2-53 prikazana su u principu dva mjerenja otpora namota pod naponom, i to (a) za slučaj transformatora u spoju zvijezda, bez uzemljene nultačke, ali u mreži u kojoj rade transfor-



Sl. 2-53

matori s uzemljenom nul-tačkom, ili s prigušnicom u nul-tački, te (b) za slučaj transformatora u spoju trokut. Mjerne uređjaje treba zaštititi od visokih napona odgovarajućim prigušnicama. Kao prigušnica može služiti npr. transformator za odgovarajući napon, ili mjerni transformatori. Pri tome treba računati i s naponima, koji se mogu pojaviti u slučaju dozernog spoja u mreži za vrijeme mjerenja. U neposrednoj blizini mjernog uređjaja treba izvršiti uzemljenje, i u strujnoj, i u naponskoj grani. U slučaju (a) struja se grana kroz 3 paralelne grane, i zatvara kroz prigušnice u zvjezdima drugih transformatora. Napon mjerimo na jednoj od 3 grane. Isto tako u spoju (b) struja se grana kroz 2 paralelne grane. Kod mjerenja to ne smeta, jer se tri faze podjednako zagrijavaju. Za određivanje temperature potrebno je odrediti omjer otpora u toplom i hladnom stanju, a ne iznose otpora u omima. To znači, da nije potrebno voditi računa o grananju struje, dok je ono isto kod hladnog i toplog namota, a niti o konstantama očitavanja instrumenta, koje ostaju iste. Dovoljno je odrediti kod svakog mjerenja kvocijent otklona voltmetra i ampermetra $R' = \alpha_v / \alpha_A$. Potrebno je, međjutim, izvršiti jedno očitavanje pri hladnom namotu, ili bar pri tačno poznatoj temperaturi namota. To nije teško, jer treba samo isključiti teret kroz relativno kratko vrijeme, dok se temperatura bakra izjednači s temperaturom ulja, i očitati srednju temperaturu ulja termometrima.

2.10 Ispitivanje izolacije

Da bi provjerili izdržljivost izolacije transformatora, nije dovoljno da je podvrgnemo samo normalnim pogonskim naprezanjima. Povećana ispitna naprezanja treba da otkriju sve one skrivene greške, koje bi se pri normalnom naprezanju tek s vremenom razvile, ili bi se pokazale tek u slučaju pogonskih smetnji i koje bi onda dovele do ispadanja iz pogona. U drugu ruku, ispitni naponi ne treba da budu tako visoki, da bi oštetili inače zdravu izolaciju. Na osnovu iskustava i vršenih pokusa postavljeni su odnosi između ispitnih naprezanja i normal nih pogonskih naprezanja, definirani u propisima.

Ispitivanje izolacije transformatora vrši se u 3 smjera:

- a) ispitivanje tzv. glavne izolacije, koje treba da provjeri valjanost izolacije između namota gornjeg i donjeg napona i prema tijelu; obično se vrši tako, da se strani napon narine između ispitivenog namota, i ostalih namota spojenih s tijelom;
- b) ispitivanje tzv. unutarne izolacije, tj. izolacije između zavoja i između slojeva namota, te između faza istog namota, koje se vrši induciranim naponom;
- c) ispitivanje udarnim naponom, koje provjerava izdržljivost i glavne izolacije i unutarne izolacije prema vrlo visokim, ali kratkotrajnim naponskim valovima strmoga čela, koji se u pogonu mogu pojaviti kod isklepanja u mreži i atmosferskih pražnjenja.

Posebno se ispituje tzv. vanjska izolacije, tj. provodnici na kotlu transformatora.

U slučaju tzv. postepene izolacije, gdje se izolacija od zvjezdista do krajeva faza postepeno pojačava, ne može se glavna izolacija ispitati stranim naponom, koji napreže jednako čitavu izolaciju, već se mora i glavna i unutarnja izolacija ispitati induciranim naponom. U pogledu provedbe pokusa razlikujemo dakle:

- a) ispitivanje stranim naponom (pokus na namotu)

b) ispitivanje induciranim naponom (pokus među zavojima, no katkada istovremeno i ispitivanje glavne izolacije

c) ispitivanje udarnim naponom.

Ispitivanja se redovito vrše na hladnom transformatoru.

Propisi određuju visinu ispitnog napona u ovisnosti o tzv. stupnju izolacije. Stupanj izolacije (Si) određen je ne samo najvišim dopustivim pogonskim naponom, već i najvišim naponom, koji se može pojaviti između stezaljki transformatora i zemlje u slučaju pogonskih smetnji, kao što su uklapanja, dozemni spoj i slično. U slučajevima, gdje taj napon ne može premašiti 80% linijskog napona - npr. ako je nul-tačka čvrsto uzemljena - može se primijeniti tzv. smanjeni stupanj izolacije (s). Ustvari je stupanj izolacije definiran naponom pogonske frekvencije, koji glavna izolacija mora podnijeti kroz 1 minutu, i udarnim naponom koji izolacija mora izdržati. Prema prijedlogu naših propisa te vrijednosti za pojedini stupanj izolacije treba da budu kao što je navedeno u tabeli 2.10-1.

Tabela 2.10-1

Stupanj izolacije	Najviši dopustivi pogonski napon mreže	Podnosivi napon pogonske frekvencije kroz 1 minutu				Podnosivi udarni napon punog vala 1,2/50	
		Namoti		Provodnici			
		Puni stupanj izolacije	Smanjeni st. izolacije.	Puni st. izolacije	Smanjeni st. izolac.	Puni st. izolacije	Smanjeni st. izolac.
	kV	kV(ef)	kV(ef)	kV(ef)	kV(ef)	kV _{max}	kV _{max}
Si 3,6	3,6	16	—	21	—	45	
Si 7,2	7,2	22	—	27	—	60	
Si 12	12	28	—	35	—	75	
Si 24	24	50	—	55	—	125	
Si 38	38	70	—	75	—	170	
Si 72,5	72,5	140	—	140	—	325	
Si 123	123	230	—	230	—	550	
Si 123s	123	—	185	—	185	—	450
Si 245s	245	—	395	—	395	—	900

Tabela 2.10-1

Za pogonski napon $\leq 1,1$ kV ispitivanje stranim naponom se vrši sa 2,5 kV, dok su za veće pogonske napone ispitni naponi jednaki podnosivim naponima prema gornjoj tabeli.

2.10.1 Ispitivanje stranim naponom. Ovim ispitivanjem provjeravamo izdržljivost izolacije između susjednih namota, kao i između namota i uzemljenih dijelova. U namote se pri tome ubrajaju i pripadne preklopke.

Ispitni napon prema tabeli 2.10-1 priključi se s jedne strane na namot koji ispitujemo, a s druge strane na tijelo, na koje smo priključili sve ostale namote. Frekvencija ispitnog napona iznosi 50 Hz. Kod uklapanja napon ne smije biti viši od 50% konačne vrijednosti. Podizanje do konačne vrijednosti treba izvršiti u stupnjevima od najviše 5% ispitnog napona, i to u vremenu od najmanje 10 sekundi. Nakon što je postignut puni ispitni napon, treba ga zadržati na punom iznosu kroz 1 minutu. Tjemena vrijednost ispitnog napona treba da bude $\sqrt{2}$ puta veća od u propisima navedene vrijednosti. Za vrijeme pokusa preporuča se promatrati struju, koja teče u ispitivani namot zbog njegovog kapaciteta prema tijelu i ostalim namotima. Pri konstantnom ispitnom naponu ne smije ta struja niti postepeno rasti, niti kolebat.

Smatra se da je izolacija izdržala napon, ako ne dodje do proboja niti do preskoka, a kod uljnih transformatora niti do pramenastog izbijanja. Kod suhih transformatora smiju se pojaviti pramenasta izbijanja tek iznad 80% ispitnog napona.

Izvor ispitnog napona sastoji se obično od generatora i transformatora. Opterećenje agregata za vrijeme ispitivanja određeno je ispitnim naponom i strujom nabijanja ispitivanog namota:

$$I_c = U_{isp} \cdot \omega C \quad (1)$$

$$P = U_{isp} I_c = U_{isp}^2 \cdot \omega C \quad (2)$$

Kapacitet C ispitivanog namota prema ostalim namotima i zemlji ovisi o konstrukciji namota, o visini napona za koji je gradjen, i veličini transformatora. Npr. na strani 110 kV kod transformatora veličine od 1 do 100 kVA pri dvostrukom valjkastom (trikoncentričnom) namotu, kreću se vrijednosti kapaciteta od cca 3 do cca 20 nF. Pri valjkastom bikoncentričnom namotu vrijednosti su oko 2 puta manje. Kod transformatora za 35 kV kapacitet je cca 2-struko veći, a kod 10 kV cca 3-struko veći nego kod 110 kV dvostrukog valjkastog namota. Pošto prividna snaga raste s kapacitetom linearno, a s ispitnim naponom po kvadratnoj ovisnosti, bit će kod većih napona i prividna snaga veća, pa tako npr. kod namota za 110 kV prividna snaga kod ispitivanja doseže kod velikih transformatora i do više stotina kVA.

Kapacitet koji određuje struju nabijanja pri provedbi ispitivanja možemo odrediti jednostavnim mjerenjem U-I metodom pri niskom naponu. Napon U' priključimo s jedne strane na ispitivani namot, a s druge strane na sve ostale namote spojene s tijelom, i mjerimo struju I' , pa računamo:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{U'}{I'} \quad , \quad C = \frac{1}{\omega X_c} \quad (3)$$

Pošto ispitivanje ne traje dugo, kod izbora veličine ispitnog agregata nije važno termičko opterećenje. Važniji podatak je struja kratkog spoja ispitnog agregata pri uzbuđi, koja daje ispitni napon na otvorenim stezaljkama:

$$I_k = \frac{U_1}{X_s} \quad (4)$$

Ovom strujom definirana je reaktancija ispitnog agregata $X_s = \frac{U_i}{I_k}$, a time i struja na mjestu eventualnog proboja kod ispitivanja, koja ne smije biti premalena, kako bi se mogao razviti električni luk u dovoljnoj mjeri. Usljed kapacitivnog tereta doći će u reaktanciji ispitnog agregata do povišenja napona (sl.2-54), koje se može u relativnom iznosu izraziti kao:

$$\frac{U_i}{U_0} = \frac{IX_c}{I(X_c - X_s)} = \frac{1}{1 - X_s/X_c} = \frac{1}{1 - \frac{U_i I_c}{I_k U_i}} = \frac{1}{1 - I_c/I_k} \quad (5)$$

Preporuča se, da bude struja I_k bar 3 puta veća od struje nabijanja I_c .



U tom slučaju relativno povišenje napona iznosi najviše:

$$\frac{U_i}{U_0} = \frac{1}{1 - \frac{1}{3}} = 1,5$$

tj. napon se podigne za 50% zbog kapaciteta ispitivanog namota.

Omjer $I_k : I_c = 3:1$ znači 3 puta veći kapacitivni otpor od induktivnog otpora rasipanja. Kad bi X_s bio slične veličine kao X_c , postojala bi opasnost rezonancije, pri čemu bi napon mogao pretjerano porasti, ili bi regulacija postala nemoguća. Promotrimo li utjecaj viših harmoničkih članova u krivulji napona, vidimo da za najbliži harmonički član, tj. 3-ći, induktivni otpor poraste 3 puta, a kapacitivni otpor se 3 puta smanji. Ako se za os-

novni harmonički član otpori odnose kao $X_s : X_c = 1 : 9$, onda će za 3-ći harmonički član biti:

$$X_{s_3} : X_{c_3} = 3X_s : \frac{1}{3}X_c = 1:1$$

pa će doći do rezonancije 3-ćeg harmoničkog člana. Zbog toga treba nastojati, da krivulja napona bude što čišća sinusoida, a po potrebi može se u seriju s ispitivanim transformatorom dodati omske otpore od 5 do 50 Ω /kV, ali ne više od 10% X_s , kako se ne bi odviše prigušio luk kod event. proboja. Ovaj otpor se dodaje u neuzemljeni dovod, ili se podijeli na oba dovoda, ako su oba izolirana.

Zbog gubitaka u kratkom spoju potrebna je snaga pogonskog motora za ispitni agregat od cca 10% djelatne snage u kratkom spoju. Ako je snaga motora manja, onda ga treba opremiti takvim zamšnjakom, da brzina vrtnje ne opada više od 5 %/sek kad nastupi kratki spoj.

Regulacija napona vrši se najbolje u uzbudnom krugu generatora, i treba da bude što finija. Stupnjevi regulatora trebe da odgovaraju promjeni napona od najviše 1%, a po mogućnosti ispod 0,5%. Brzina regulacije ne smije biti veća od 5% u sekundi, a iznad 75% ispitnog napona najviše 2% u sekundi.

U slučaju proboja vrši se isklapanje učinskom sklopkom ili demagnetizacijom generatora. Što je povoljnije, jer ne može doći do prenapona kod isklapanja.

Za naprezanje izolacije mjerodavna je maksimalna vrijednost ispitnog napona. U slučaju rezonancije viših harmoničkih članova može se sinusna krivulja napona izobličiti, pa tjemeni

faktor $\sigma = \frac{U_{\max}}{U}$ nije više $\sqrt{2}$, nego veći. Naprezanje izolacije je onda veće, nego što bi ga očekivali na osnovu mjerenja voltmetrom, koji pokazuje efektivne ili srednje vrijednosti. Drugu poteškoću kod mjerenja ispitnog napona predstavlja porast napona zbog kapacitivnog tereta. Uslijed toga napon treba mjeriti na strani visokog napona, direktno pri ispitivanom objektu. U tu svrhu može se upotrijebiti mjerni transformator, ili djelitelj napona na visokonaponskoj strani, do napona od cca 150 kV. Iznad toga dolazi u obzir jedino kugleno iskrište, kojim izbađdarimo voltmetar na donjonaponskoj strani ispitnog transformatora.

Kugleno iskrište oprema se predotporom, koji treba da priugušuje prelazne titraje kod regulacije napona, i da ograničava struju kod proboja iskrišta. U drugu ruku, struja nabijanja kugala ne smije u predotporu izazvati pad napona, koji bi uzrokovao grešku mjerenja veću od 1%. Kad se svi ovi zahtjevi uzmu u obzir, kod frekvencije 50 Hz predotpor treba da bude:

$$R = K U_{\max}$$

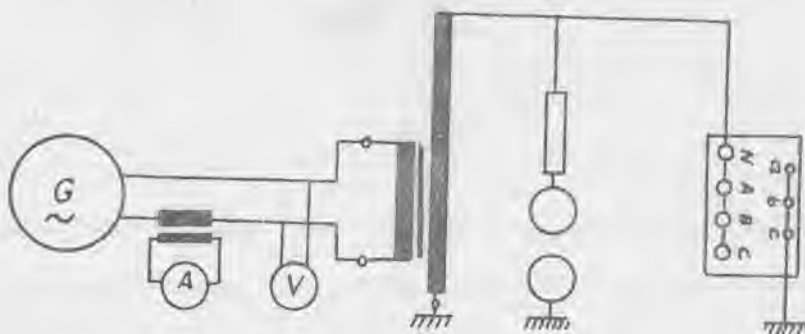
gdje je konstanta	K (Ω/V)	50	5	2	1	0,5
za promjer kugle	D (cm)	2-15	25	50-75	100-150	175-200

Otpor se stavlja u izolirani dovod, odnosno podijeli se, ako su oba dovoda prema zemlji izolirana. Za normalno stanje 20°C i 760 mmHg svakom promjeru kugala pri odredjenom probojnom razmaku odgovara odredjena tjemena vrijednost napona, koja se može naći u tabelama. Kod drugog pritiska i temperature potrebno je vrijednosti iz tabela množiti odgovarajućim korekcionim faktorom.

Kako bi izbjegli preskoke na iskrištu za vrijeme ispitivanja transformatora, izbađdarimo voltmetar na donjonaponskoj strani kod 80% ispitnog napona ili još niže vrijednosti, zatim razmaknemo kugle na udaljenost, kojoj odgovara napon za 10-20% viši od ispitnoga, i po voltmetru na donjonaponskoj strani udesimo ispitni napon. Ako je baždarenje izvršeno kod napona U' , a otklon voltmetra je bio α' , onda za ispitni napon U_i treba na voltmetru udesiti otklon:

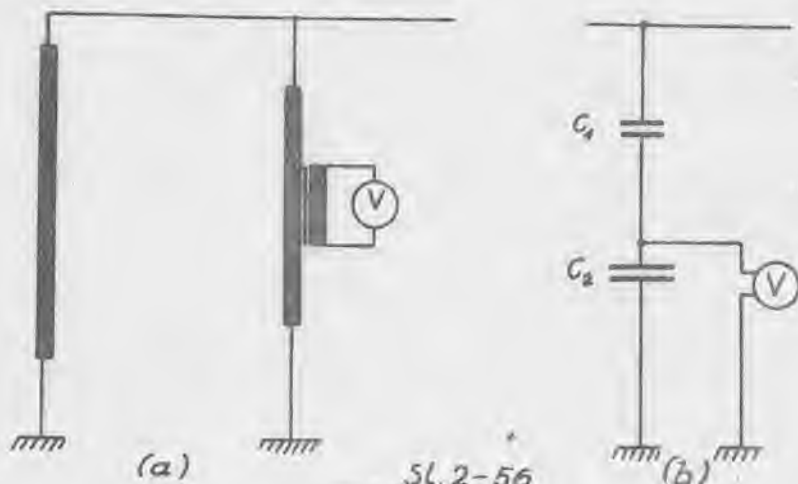
$$\alpha_i = \frac{U_i}{U'} \cdot \alpha' \quad (6)$$

Pošto relativni porast napona ovisi o induktivnim i kapacitivnim otporima, nužno je, da raspored kod baždarenja i kod ispitivanja bude isti. Baždarenje treba provesti s priključenim ispitivanim objektom, a kugleno iskrište mora ostati priključeno i kod ispitivanja, dakako uz nešto povećan razmak kugala.



Sl.2-55

Shema ispitivanja stranim naponom prikazana je na sl.2-55. Ako se mjerenje napona vrši prema sl.2-56 preko naponskog mjernog transformatora (a), ili djelitelja napona (b), treba upotrebljavati instrument, koji pokazuje tjemenu vrijednost napona.



Sl.2-56

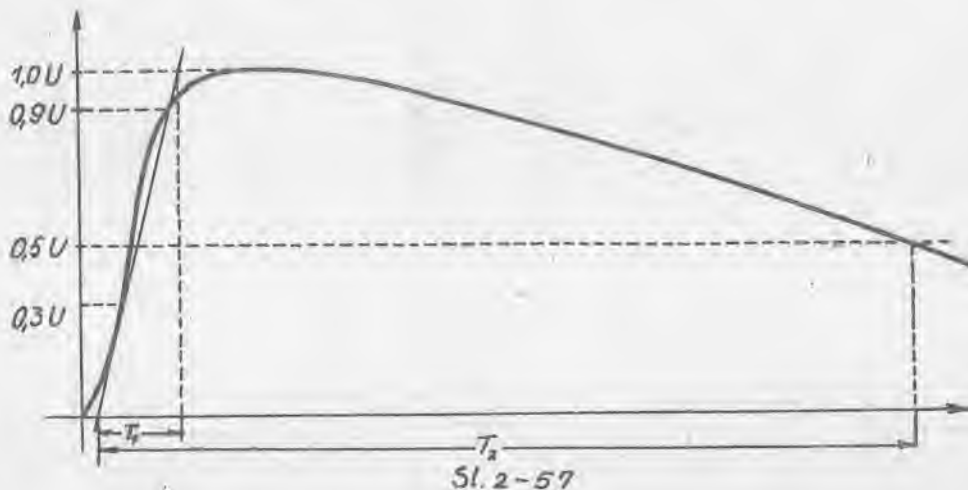
U slučaju (b) potrebno je, da instrument bude vrlo malog vlastitog potroška, pa najbolje odgovara cijevni voltmetar. Ispitni i mjereni napon odnose se kao:

$$\frac{U_i}{U_{mj}} = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (7)$$

Tačno baždarenje može se provesti kuglenim iskrištem.

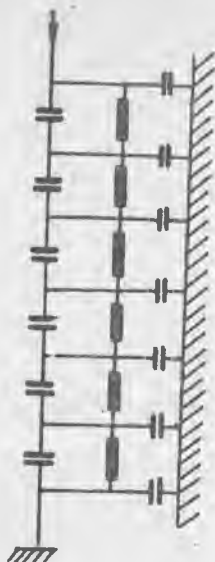
2.10.2 Ispitivanje udarnim naponom. Ispitivanje udarnim naponom treba da reproducira kratkotrajna visoka naprezanja izolacije do kojih dolazi kod pojava atmosferskih pražnjenja i isklapanja u mreži. Ovakvi prenaponi dolaze do transformatora kao putujući val strmoga čela i položitijega hrpta. Kako bi se rezultati ispitivanja mogli međusobno uspoređivati, oblik krivulje udarnog napona

je standardiziran tako, da mu trajanje čela vala T_1 (sl.2-57) iznosi $1,2 \mu s$, a polutjemeno trajanje hrpta T_2 iznosi $50 \mu s$. Takav val se kratko označava kao "1,2/50". U slučaju kad se napon na stezaljkama slomi - npr. kad proradi - dobivamo tzv. odrezani val.



Kod ispitivanja udarnim naponom postoji određena bojazan, da se ispitivanjem oštećuje izolacija, a da se oštećenje ne otkrije niti kod samog ispitivanja, niti kod naknadnih ispitivanja induciranim naponom. U tom slučaju nema nikakve koristi od ispitivanja, a izolacija može biti oslabljena. Nema sumnje, da su ispitivanja udarnim naponom vrlo korisna na modelima. Kod velikih jedinica, gdje je gotovo svaki transformator prototip, koji poslije ispitivanja treba da radi u pogonu, može se opravdati ispitivanje udarnim naponom jedino uz uvjet, da se svako eventualno oštećenje može sigurno otkriti. Metode ispitivanja punim valom već su toliko razrađene, da se ispitivanja mogu vršiti uz sigurnost, da će svako oštećenje biti zapaženo. Ispitivanje odrezanim valom nije svuda tako uznapredovalo. Zato se ispitivanje punim valom predviđa po dogovoru naručioca i proizvođača, dok se ispitivanje odrezanim valom provodi samo onda, kad za to postoje posebni razlozi. Ispitivanje punim valom vrši se tjemenom vrijednošću napona prema tabeli 2.10-1. Način ispitivanja nije u našem standardu određen. Obično se postupi tako, da se prvo izvrše 2 udara sa 50-75% udarnog napona zbog udešavanja i dobivanja referentnih oscilograma neoštećenog transformatora, a zatim 2 udara punim naponom. Ovo ispitivanje, ako je dogovoreno da se izvrši, treba izvršiti prije ostalih naponskih pokusa.

Udarni napon strmog čela može se po Fourier-u nadomjestiti zbrojem sinusnih članova, pri čemu će, zbog strmog čela, doći do izražaja članovi vrlo visokih frekvencija. Kod visokih frekvencija mali kapaciteti između pojedinih zavoja i svitaka i između zavoja i tijela predstavljaju kapacitivne otpore s kojima treba računati, pa nadomjesna shema napona izgleda kao na sl. 2-58. Kod prolaza udarnog vala kroz namot dolazi do refleksije, a i do trajnih pojava unutar pojedinih elemenata sa svojim induktivitetima i kapacitetima. Pri tome se pojavljuju kratkotrajna visoka naprezanja ne samo glavne izolacije, već i unutarnje izolacije među zavojima, a osobito među slojevima. Kod proboja bilo prema tijelu, bilo među zavojima ili među slojevima, mijenja se raspored induktiviteta i kapaciteta, i čitava prelazna pojava će se više ili manje promijeniti. Kao osnova za otkrivanje nastale greške služi oscilogram struje pri ispitivanju udarnim naponom. Uglavnom su se



afirmirale slijedeće metode:

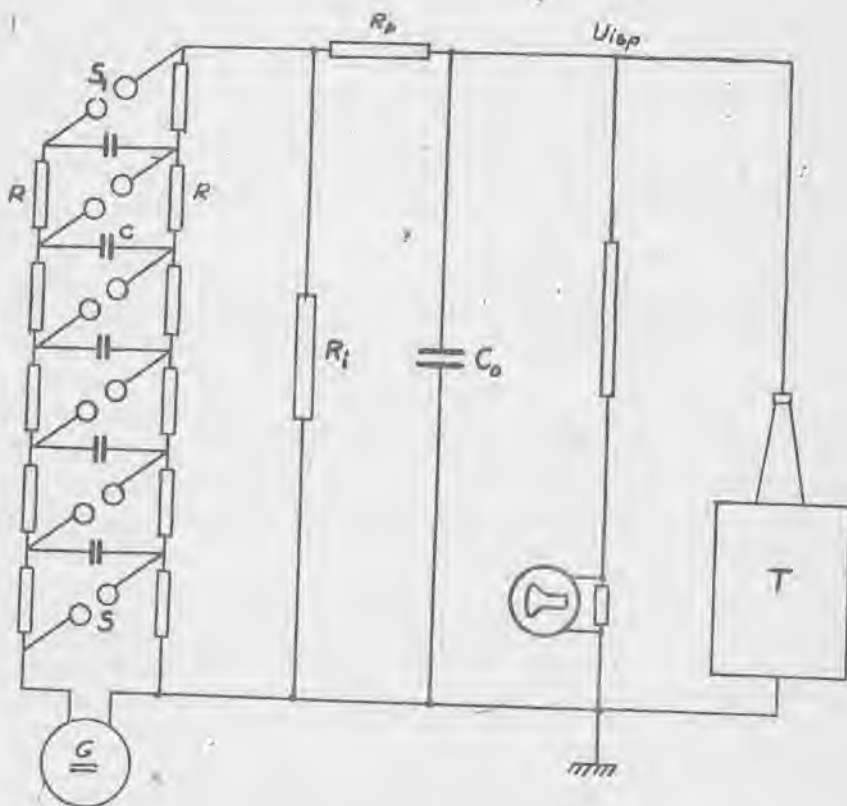
a) snimanje struje, koja teče iz zvjezdista transformatora u zemlju (po Hagenhuth-u), b) snimanje fazne struje, koja teče u namot na mjestu priključka udarnog napona (po Stenkvistu), i c) snimanje kapacitivne struje, koja teče iz gornjonaponskog namota prema kotlu, uz upotrebu donjonaponskog namota kao sonde (po Elsneru).

Da se uzmogne otkriti oštećenje, potrebna je snimka iste struje kod pokusa udarnim naponom kod kojega nije bilo oštećenja. U tu svrhu izvodi se prvo pokus sa sniženim naponom tačno istog oblika, pa tek onda punim naponom. Ako ordinate obaju oscilograma svedemo na istu mjeru, moraju se oscilogrami podudarati. U slučaju oštećenja nastaju zamjetljiva odstupanja. Kod metoda b) i c) može se s oscilogramima vidjeti i vrijeme, koje je proteklo od početka prodiranja udarnog vala u namot, pa do časa kad je nastalo oštećenje. Uz poznatu brzinu prodiranja vala u namot može se odavde prilično tačno odrediti mjesto oštećenja.

Sl.2-58

redovito

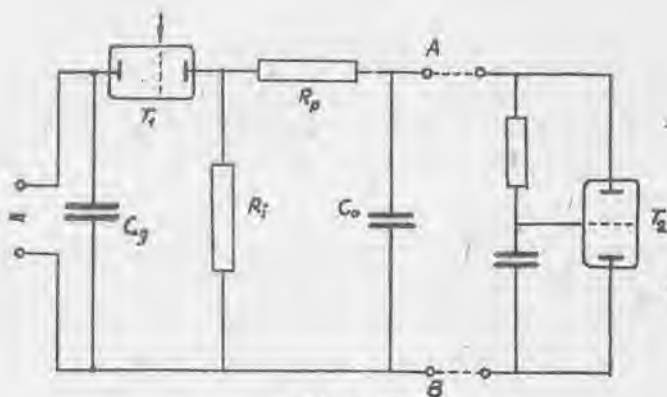
Za ispitivanje upotrebljava se negativni udarni napon, koji se proizvodi u udarnom generatoru. Spoj je u principu prikazan na sl.2-59. Visoki istosmjerni napon dobiva se paralelnim nabijanjem kondenzatora C preko otpornika R, koji se, čim dodje do pro-



Sl. 2-59

boja prvog iskrišta S , udešenog na određenu vrijednost napona, ispražnjuju preko iskrišta. Pri tome su kondenzatori spojeni u seriju. Ovakav generator u Marxovom spoju preko iskrišta S_1 nabija kondenzator C_0 i kapacitete ispitivanog objekta. Veličinom otpora R_p može se udesiti brzina nabijanja, dakle strmina čela vala, a udešavanjem otpora R_i brzina izbijanja, dakle strmina hrpta vala. Konstante samog ispitivanog objekta i njegovih dovoda utječu također na oblik vala, pa je potrebno priključiti visokonaponski oscilograf preko djelitelja napona na same stezaljke ispitivenog transformatora, i provesti udešavanje sa sniženim naponom, ali u tačno istom spoju kao kod kasnijeg ispitivanja.

Važan rezultat sve šireg uvođenja ispitivanja udarnim naponom i intenzivnog rada na tom području nije samo provjeravanje pojedinih izvedenih transformatora, ili pojedinih konstrukcija, nego sve bolji uvid u pojave, koje se odvijaju u transformatoru kod udarnih naprezanja, što omogućuje odabiranje ispravnih pretpostavki kod konstrukcije. Raspodjela napona u transformatoru kod udarnog naprezanja može se kontrolirati računski, i tim putem smanjiti naprezanja u izolaciji. Mnogo olakšava rad pri analizi pojava u transformatoru, a i pri odabiranju metoda ispitivanja i u provedbi ispitivanja udarnim naponom, upotreba repeticionog generatora.



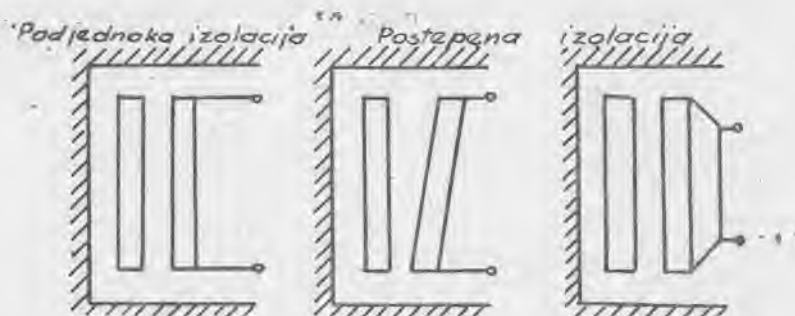
Repeticioni generator prema principnoj shemi na sl.2-60 daje između stezaljki A-B udarni napon niske tjemene vrijednosti, ali tačnog oblika, koji se daje tačno udesiti. Dovodjenjem impulsa na mrežicu tiratrona T_1 ponavlja se udarni val npr. 50 puta u sekundi, tako da na oscilografu umjesto jednokratne prelazne pojave dobijemo mirnu sliku prelazne pojave, koju možemo fotografirati, ili direktno analizirati. Dodavanjem drugog tiratrona T_2 možemo izazvati slom napona na stezaljkama A-B nakon određenog vremena, i tako reproducirati odrezani val.

Upotrebom repeticionog generatora može se pri ispitivanju u svakom konkretnom slučaju brzo odrediti najprikladniji postupak. Može se odabrati najprikladnija veličina za indicaciju greške, utjecaj spoja ostalih namota pri ispitivanju itd. No može se također analizirati utjecaj pojedinih faktora pri konstrukciji namota, kao što je vrsta namota, raspored namota na svitke itd. na raspodjelu udarnog napona unutar namota.

Metode ispitivanja udarnim naponom još se uvijek usavršavaju. Pri današnjem stanju, međjutim, već se mogu vršiti analize

rezultata s takvom sigurnošću, da je prednost otkrivanja eventualnih slučajnih greški u materijalu ili izvedbi daleko veća od opasnosti eventualnog oštećenja izolacije.

2.10.3 Ispitivanje induciranim naponom. Ovo ispitivanje treba da provjeri izdržljivost izolacije među zavojima, slojevima, svitcima i fazama istog namota pri trajnom naponskom naprezanju, za razliku od udarnog napona. Osim toga, ovo ispitivanje treba da nadomjesti ispitivanje stranim naponom kod postepeno izoliranih namota (sl. 2-61). U tom slučaju, naime, ispitni napon kod ispitivanja stranim naponom ne bi smio premašiti vrijednost određenu najslabije izoliranom tačkom, tj. izolacijom oko zvjezdišta, dok bi pojačana izolacija na drugom kraju namota ostala neispitana.



Sl. 2-61

Kod ispitivanja induciranim naponom postoji mogućnost, da se naprezanje postepeno povisuje od zvjezdišta prema krajevima namota. Ispitivanje induciranim naponom može dakle predstavljati:

- ispitivanje unutarnje izolacije (pokus među zavojima), i
- ispitivanje glavne i unutarnje izolacije (pokus među zavojima i pokus na namotu).

Ispitni napon iznosi $2U_n$ u slučaju a), dok u slučaju b) ispitni napon treba da bude jednak ispitnom naponu kod ispitivanja stranim naponom prema tabeli 2.10-1. Taj ispitni napon treba da se inducira između stezaljki gornjonaponskog namota, npr. na taj način, da se odgovarajući napon narine na stezaljke donjonaponskog namota. Budući da bi kod tako visokog napona došlo do visokog zasićenja i velikih struja magnetiziranja, treba povišiti frekvenciju bar u omjeru povišenja napona

$$\frac{f_{isp}}{f_n} \geq \frac{U_{isp}}{U_n} \quad (1)$$

Daljnje povišenje frekvencije smanjuje prividnu snagu potrebnu za ispitivanje, pa se obično upotrebljavaju frekvencije od 150 do 300 Hz. Da bi približno ocijenili potrebnu snagu za ispitivanje, treba na karakteristici praznog hoda potražiti struju magnetiziranja, koja odgovara naponu:

$$U' = U_{isp} \cdot \frac{f_n}{f_{isp}} \quad (2)$$

S tom strujom i ispitnim naponom računamo potrebnu snagu.

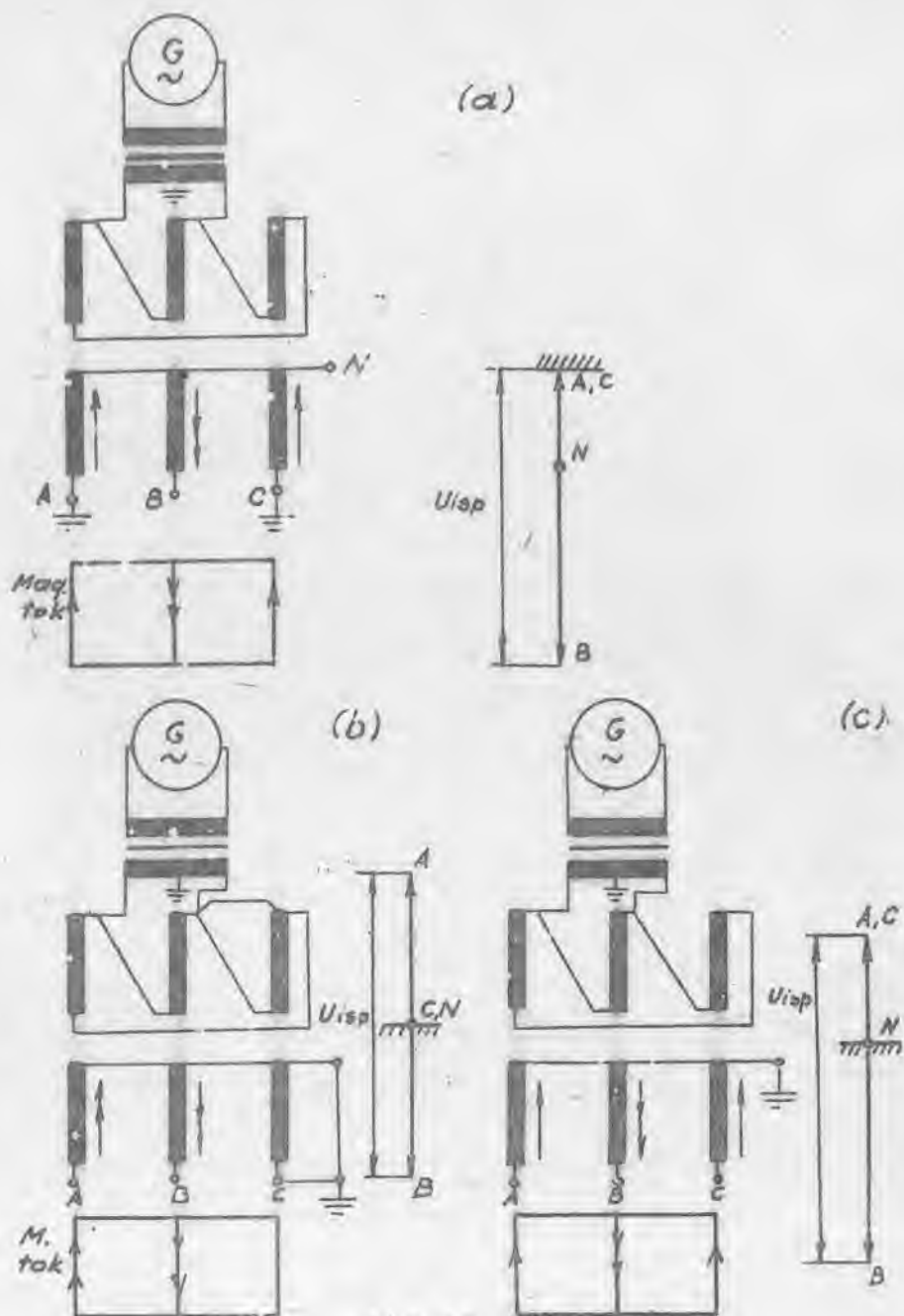
Trajanje pokusa predviđeno je, po IEC preporukama i prijedlogu naših propisa, 1 minutu pri dvostrukoj frekvenciji. Budući da naprezanje izolacije ovisi ne samo o visini i trajanju napona, već i o broju promjena smjera polja (gubici u dielektriku), pred-

viđaju propisi skraćeno ispitivanje pri povišenoj frekvenciji:

$$t = 60 \text{ sek} \cdot \frac{2 f_n}{I_{isp}} \quad (3)$$

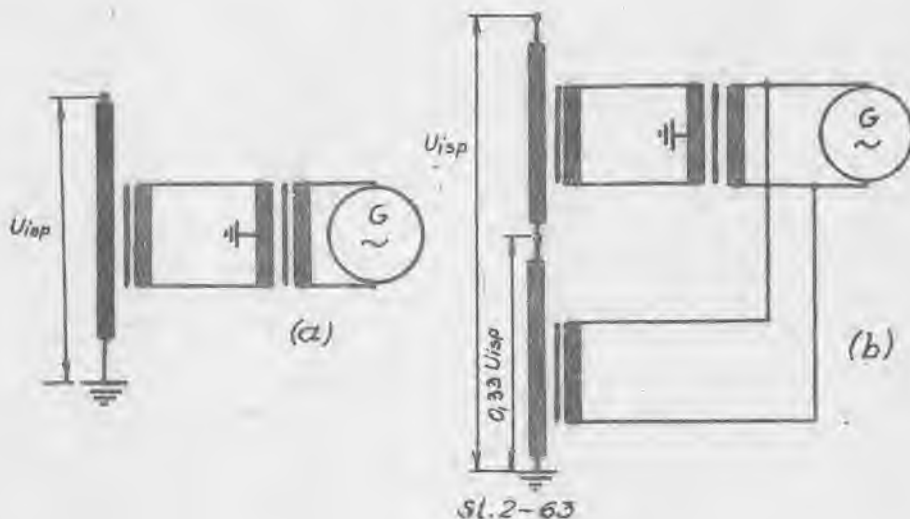
ali ni u kojem slučaju manje od 15 sekundi.

Kod trofaznih transformatora pokus pod a) može se provesti tako, da se narine trofazni napon na donjonaponski namot, i ispituju sve tri faze istovremeno, ili da se uzbudi jedna po jedna faza redom.



Kod ispitivanja pod b) treba razlikovati slučaj, gdje je nul tačka izolirana za $\frac{1}{3}$ punog napona, i slučaj gdje nul-tačka nije izolirana, tj. izolacija je postepena od nule do pune vrijednosti. U prvom slučaju ispitivanje se vrši prema shemi na sl.2-62(a). Nul-tačka prema tijelu ima pri tome napon $\frac{1}{3}U_{isp}$, dok je napon između stezaljke ispitivanog namota i ostalih dvaju namota jednak U_{isp} . Da se ispitaju preostale dvije faze, spoj treba ciklički mijenjati, i provesti još 2 ispitivanja. U drugom slučaju ispitivanje se vrši prema shemi na sl.2-62 (b) ili (c). U oba slučaja nul-tačka je uzemljena, a između priključnih stezaljki dobivamo ispitni napon. Razlika je jedino u naponu prema tijelu, koji iznosi kod spoja (a) 100%, kod spoja (b) 50% i kod spoja (c) 67% ispitnog napona.

Kod jednofaznih jedinica za trofazne grupe može se ispitivati prema sl.2-63 (a) ili (b), prema tome, da li je zvjezdište predviđeno za čvrsto uzemljenje, ili je izolirano za 33% punog napona. U ovom posljednjem slučaju napon nul-tačke prema zemlji podigne se dodatnim transformatorom.



Prema prijedlogu našeg standarda treba i kod transformatora s postepenom izolacijom iznad 72,5 kV provesti pokus stranim naponom, ali sniženog iznosa. Kod čvrstog uzemljenja nul-tačke ispitni je napon 34 kV; kod uzemljenja preko regulacionog transformatora, sa katodnim odvodnicima u spojištu obaju transformatora, smanjuje se ispitni napon u omjeru napona regulacionog transformatora prema nazivnom naponu ispitivanog transformatora; kod nul-tačke spojene sa zemljom preko katodnog odvodnika, bez obzira da li je inače izolirana, ili spojena na prigušnicu za dozemni spoj, smanjuje se ispitni napon na 58% pune vrijednosti.

2.lo.4. Ispitivanje provodnika. Na provodnicima vršimo tipno ispitivanje stranim naponom i udarnim naponom. Ispitivanje stranim naponom vrši se prije ugradnje i priključivanja namota. Ispitni naponi navedeni su u tabeli 2.lo-1. Ispitivanje traje 1 minutu. Kod ispitivanja treba upotrijebiti originalne prirubnice, kojima će provodnici biti pričvršćeni. Provodnici za transformatore predviđene za

rad u zatvorenom prostoru ispituju se u suhom stanju, a za rad na otvorenom prostoru ispituju se na kiši.

Isto tako provodi se ispitivanje udarnim naponima iste visine kao kod ispitivanja namota. Ako je predviđeno ispitivanje namota udarnim naponom, onda su istovremeno ispitani i provednici.

Provednici unutar samog transformatora ne ispituju se posebno, jer prolaze sva naponska ispitivanja zajedno s namotom.

2.10.5 Ponovljena ispitivanja. Svako naponsko ispitivanje predstavlja naprezanje izolacije veće od normalnoga. Zbog toga se ne preporuča ponavljanje naponskih pokusa na namotu, koji je već bio ispitivan prilikom preuzimanja. Ako je to ipak potrebno, onda treba uzeti svega 80% ispitnog napona.

Nakon popravka, ako je transformator bio u pogonu duže od garantnog roka, ispitivanje se vrši sa 70% ispitnog napona. Iznimku čine popravci, kod kojih je namot zamijenjen potpuno novim, i gdje treba primijeniti pune ispitne napone.

2.11 Ostala ispitivanja

Kod puštanja u pogon većih transformatora važno je da se kontrolira funkcioniranje pomoćnih uređaja.

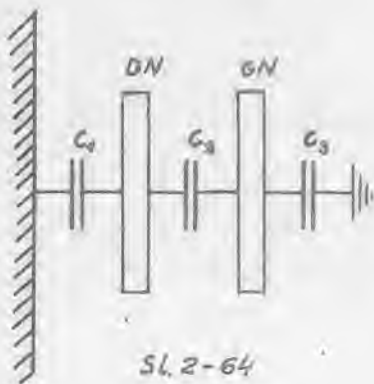
Premještač transformatora i event. regulaciona sklopka predstavljaju sastavni dio transformatora, te se ispituju zajedno s namotom kod naponskih pokusa i mjerenja gubitaka u kratkom spoju. Pri tome treba udesiti srednji odnosno normalni položaj premještača ili regulacione sklopke. Prijenosni omjer i relativni kratkospojni napon treba odrediti za svaki položaj posebno. Ostala ispitivanja, u prvom redu provjeravanje ispravnog funkcioniranja i ispravnog redoslijeda operacija kod regulacionih sklopki, vrše se kao tipna ispitivanja ili kao komadna ispitivanja prije ugradnje sklopke u transformator.

Funkcioniranje rashladnog uređaja - ventilatora, pumpi za vodu i za ulje - također treba provjeriti prije puštanja u pogon. Ukoliko je rad tih uređaja povezan s automatikom, treba kontrolirati funkcioniranje automatike. Gubici pomoćnih uređaja mjere se i navode zasebno, a ne računaju se u gubitke transformatora pri određivanju korisnosti η .

Posebnu pažnju treba posvetiti ispravnosti zaštite transformatora. Buchholzova zaštita je sastavni dio transformatora, i treba je provjeriti prilikom ispitivanja transformatora. To se čini tako, da se kroz ventil za

ispust ulja na dnu kotla ručnom pumpom utjera nešto zraka u kotao, pri čemu zaštita mora reagirati. Kod transformatora, koji je tek napunjen uljem, događa se redovito - uza svu pažnju i sve mjere poduzete kod punjenja - da u namotima zaostane zraka, koji se postepeno oslobađa, i aktivira Buchholzovu zaštitu. To ne treba smatrati greškom zaštite, ali treba svakako provjeriti, da li se zaista radi o zraku.

U nekim slučajevima želimo odrediti kapacitete gornjonapon-



skog i donjonaponskog namota međusobno i prema zemlji (sl.2-64). U tu svrhu metodom struje i napona odredimo odgovarajuće kapacitivne otpore, iz kojih slijede kapaciteti:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{U}{I} \quad (1)$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c}$$

Na taj način izvršimo 3 mjerenja:

- 1) pri uzemljenom gornjonaponskom namotu, $C' = C_1 + C_2$
- 2) pri uzemljenom donjonaponskom namotu, $C'' = C_2 + C_3$
- 3) pri spojenom GN i DN namotu, $C = C_1 + C_3$

Iz ova 3 mjerenja dobivamo tražene kapacitete:

$$C_1 = \frac{1}{2}(C' - C'' + C) \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{1}{2}(C'' - C + C') = C' - C_1 \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{1}{2}(C - C' + C'') = C'' - C_2 \quad (5)$$

Kod velikih transformatora katkada se dogovara ispitivanje šuma. Aparat za mjerenje šuma prima šum preko mikrofona, koji je okrenut okomito prema površini transformatora. Kod tipnog ispitivanja vrši se po 1 mjerenje nasuprot sredini svake strane transformatora, ukupno 4 mjerenja, a ako je transformator duži od 2 m, onda se sa svake duže strane vrše još po dva mjerenja, dakle ukupno 8 mjerenja. Udaljenost mikrofona od transformatora mora biti:

	1 m	3 m	5 m
ako je dužina transformatora do	2 m	2-7 m	preko 7 m .

U dimenzije transformatora računaju se hladnjaci, radijatori, cijevi, kućišta i sl., koji mogu sudjelovati pri emisiji zvuka, dok ne treba uzeti u obzir dimenzije provodnika, ventila, konzervatora, prijevoznog postolja i sl.

Kao srednja jačina šuma vrijedi aritmetička sredina svih mjerenja, uz naznaku udaljenosti.

Osim toga izvodi se prema potrebi skraćeno komadno ispitivanje šuma, u polovini visine transformatora, i u udaljenosti od 0,5 m oko čitavog transformatora. Po jedna mjerna tačka treba da bude nasuprot sredini svake strane, a event. daljnje tačke u razmacima po 1 m.

Buka prostoriije treba da bude pri ispitivanju ispod određenog nivoa, a isto tako ne smiju biti blizu transformatora pregrade, koje bi izazvale refleksiju zvuka. Vlastiti ventilatori se kod komadnog ispitivanja isključe, a kod tipnog ispitivanja provedemo dva mjerenja, s uključenim i s isključenim ventilatorima.

2.12 Tolerancije

Tolerancije su dopuštena odstupanja od zahtijevane vrijednosti, tj. od vrijednosti, koja je označena na natpisnoj pločici kao prosječna vrijednost za određenu tipu, ili je na bilo koji drugi način zagarantirana ili ugovorena između proizvođača i naručitelja. Postignute vrijednosti općenito će nešto odstupati od zahtijevanih vrijednosti, pa su u propisima definirana dopuštena odstupanja u postocima zahtijevanih vrijednosti. Prema prijedlogu našeg standarda iznose tolerancije kod transformatora:

Zahtijevana vrijednost	Tolerancija
1) Prijenosni omjer	$\pm 0,5\%$ ili $\pm \frac{1}{10}$ mjerene vrijednosti za u_k . Vrijedi manja od ove dvije vrijednosti.
2) Ukupni gubici	$+ 10\%$
3) Pojedini gubici (praznog hoda odnosno kratkog spoja)	$+ 15\%$ za svaki gubitak, uz ograničenje od 10% za ukupne gubitke.
4) Napon kratkog spoja kod 75°C	$\pm 10\%$
5) Struja praznog hoda (srednja vrijednost za sve 3 faze)	$+ 30\%$