

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Prof. ing. ANTON DOLENC

TRANSFORMATORI

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Prof. ing. Anton Dolenc

T R A N S F O R M A T O R I

Svezak I.

Komisija za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu

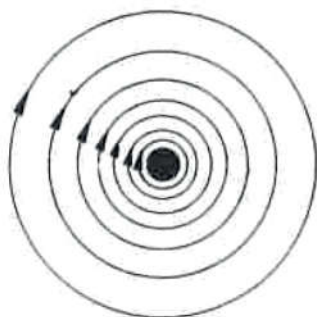
1961

TRANSFORMATORI

1. OSNOVE

Uvod

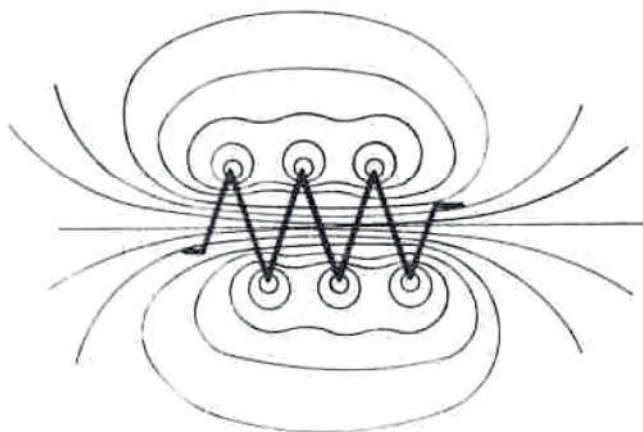
Gradnja transformatora i električkih strojeva temelji se na dvjema vrstama fizikalnih pojava, na električkim i magnetskim pojavama, koje usko povezuje zakon protjecanja i zakon indukcije. Nema električkih pojava bez magnetskih, a niti obrnuto.



Sl. 1-1
Magnetsko polje oko vodiča

Oko svakog vodiča, kojim protječe električna struja, stvara se istovremeno magnetsko polje, čija je jakost proporcionalna struji, koja prolazi kroz taj vodič (slika 1-1). Ako imamo više vodiča paralelno, kroz koje prolazi struja istog pravca, onda je magnetsko polje oko istih proporcionalno sumi svih struja kroz sve vodiče.

Ako s jednim vodičem napravimo svitak (sl. 1-2) i kroz taj svitak, koji ima "w" zavoja, prolazi struja "i", dobijemo magnetsko polje, čija jakost je proporcionalna sumi svih struja, odnosno umnošku struje "i" i broja zavoja "w".



Sl. 1-2
Magnetsko polje zavojnice

Svakoj točki u magnetskom polju pripada određena jakost magnetskog polja "H", koja je definirana po smjeru i po iznosu. Zakon protjecanja kaže, da je integral jakosti magnetskog polja duž jedne silnice, odnosno bilo koje linije duljine "l", koja prolazi kroz svitak, i zatvara se oko svitka jednak sumi struja "Σi", odnosno sumi amperzavoja "IW", što je izraženo formulom:

$$\oint \mathcal{H}_t dl = \Sigma i = iw \quad (1-1)$$

U V-A-s-m sistemu jedinica mjerimo veličinu jakosti magnetskog polja "H" u amperima na

metar "A/m", a amperzavoje u ukupnim amperima "A". Za amperzavoje upotrebljavamo i izraz električno protjecanje " Θ " .

$$\dot{I}W = \Theta \quad (1-2)$$

Magnetsko polje, odnosno polje magnetske indukcije "B", predstavljamo si obično u obliku silnica. Ukupni broj silnica u nekom presjeku nazivamo magnetskim tokom " Φ " . Što je veća jakost u jednoj točki to je veća gustoća silnica odnosno magnetska indukcija "B" u toj točki.

$$B = \mu \cdot H \quad (1-3)$$

" μ " zovemo permeabilnost.

Magnetska indukcija međjutim je ovisna i o materijalu, pa je permeabilitet " μ " za razne materijale različit, a kod feromagnetičkih materijala osim toga ovisan i o vrijednosti magnetske indukcije "B" .

Magnetski tok mjerimo u "V-A-s-m" sistemu u volt-sekundama "Vs". Ta jedinica naziva se još i veber "Wb". Prema tome mjerimo indukciju u voltsekundama odnosno veberima na kvadratni metar tj. "Vs/m²" odnosno "Wb/m²", a nedavno je za tu jedinicu uveden naziv tesla "T".

Kod proračuna električkih strojeva i transformatora su se prije upotrebljavale, a i danas se još mnogo upotrebljavaju ove jedinice:

$$\begin{aligned} \text{za tok :} & \quad 1 \text{ maksvel (M) = } 10^{-8} \text{ Wb} \\ \text{za indukciju :} & \quad 1 \text{ gaus (G) = } 10^{-4} \text{ T} \end{aligned}$$

U elektrotehnici volimo, da se u fizikalnoj slici služimo silnicama, tj. magnetskim tokom i da općenito tretiramo magnetski tok analogno električnoj struji. U analogiji tih pojava nailazimo na jednu veliku razliku, da naime električna struja putuje vodičima, a ostali prostor predstavlja izolaciju, dok za magnetske silnice odnosno magnetski tok nema izolacije, već samo bolji i lošiji vodiči, tj. feromagnetski i ostali materijali. Prema tome se magnetski tok odnosno magnetske silnice svugdje u prostoru zatvaraju, što u veliko otežava izračunavanje magnetskih tokova. Kod proračuna električkih strojeva i transformatora je zato točnost magnetskih proračuna mnogo manja od točnosti električkih proračuna. Možda u tome treba tražiti razlog, da praktička elektrotehnika upotrebljava kod električkih proračuna kao jedinicu mjerila duljine milimetar, dok kod magnetskih proračuna upotrebljava centimetar, jer za manje točan račun zadovoljava i grublje mjerilo. Još jednu razliku treba zapamtiti. U većini slučajeva radi se u elektrotehnici sa izmjeničnim strujama i prema tome i izmjeničnim magnetskim tokovima. Dok izmjenične električne veličine mjerimo u efektivnim vrijednostima, magnetske veličine mjerimo u tjemnim odnosno maksimalnim vrijednostima. To ima svoje opravdanje u tome, što električkim veličinama izračunavamo većinom snagu, dok kod magnetskih vrijednosti izražavamo stanje zasićenja, koje je određeno maksimalnim vrijednostima indukcije. Efektivna vrijednost struje "I" određena je onom ekvivalentnom vrijednošću istosmjernje struje, koja prouzrokuje iste gubitke Jouleove topline kao mjerena sinusna izmjenična struja, određena tjemnom, odnosno maksimalnom strujom "I_m" .

$$I^2 R = \frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 R \sin^2 \omega t \, dt = \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)^2 R \quad (1-4)$$

Iz te jednadžbe dobijemo, da je u slučaju sinusnog oblika izmjenične struje njezina efektivna vrijednost :

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Općenito je efektivna vrijednost jednaka drugom korjenu iz prosječnog iznosa kvadrata momentanih vrijednosti za vrijeme jedne periode.

Godine 1831 pronašao je Faraday zakon indukcije, koji kaže, da promjenljivi magnetski tok inducira u svakom zavoju oko sebe električki napon, koji je proporcionalan brzini promjene toka prema jednadžbi

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

gdje je Φ momentana vrijednost toka.

Kod "w" zavoja :

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt} \quad (1-5)$$

Ako za umnožak broja zavoja i toka uvedemo pojam ulančenog magnet-skog toka " Ψ " dobijemo :

$$e = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (1-6)$$

Ustanovili smo već, da se prema zakonu protjecanja oko svakog vodiča uzbuđuju magnetski tok, koji je proporcionalan struji. Prema tome je i ulančani tok proporcionalan struji, pa možemo to izraziti jednadžbom :

$$w \cdot \Phi = \Psi = L \cdot i \quad (1-7)$$

u kojoj faktor proporcionalnosti "L" zovemo "koeficijent samoindukcijske", odnosno kraće "induktivitet", koji u stvari predstavlja ulančani tok uzbuđen kod struje od 1 ampera. Na taj način dobijemo direktnu povezanost između struje i induciranih napona u jednadžbi :

$$e = -L \frac{di}{dt} \quad (1-8)$$

Iz svega ovoga možemo zaključiti slijedeće: Ako na jedan vodič narinemo električki napon, potjerati će on kroz vodič struju, koja ne može momentano narasti. Promjenljiva rastuća struja uzbuđuje rastući tok, a taj po zakonu samoindukcijske inducira u vodiču protunapon, koji se protivi narinutom naponu, a prema tome i porastu struje. Zbog toga što se inducirani napon protivi narinutom naponu, ima gornja jednadžba za zakon indukcije negativni predznak.

Kako su mehaničke pojave pristupačnije našem fizikalnom shvaćanju rado uspoređujemo električne veličine sa mehaničkim, konkretno električki napon sa silom "F" i induktivitet sa masom "m", a

$$\frac{di}{dt} \text{ sa ubrzavanjem } \frac{dv}{dt} = a.$$

Jednadžbi :

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

odgovara po analogiji iz mehanike jednadžba :

$$F = m \frac{dv}{dt} = ma$$

Induktivitet ima prema tome karakter tromosti za struju. Mi na pr. ne možemo momentano mijenjati veličinu struje, jer bi se time u vodiču kroz kojega prolazi struja inducirao beskonačni protunapon, koji bi se protivio toj promjeni struje, odnosno koji bi onemogućio momentanu promjenu struje.

Isto tako, ne možemo jednoj masi dati momentano jednu brzinu, već samo postepeno sa većim ili manjim ubrzavanjem.

Ako na jedan električni krug s omskim otporom "R", prikazanim pravokutnikom i induktivitetom "L", prikazanim zavojnicom (sl.1-3) narinemo momentano određenu veličinu istosmjernog napona, onda struja ne će momentano narasti na vrijednost, koja je kod istosmjernog napona u stacionarnom stanju određena sa

$$I = \frac{U}{R}$$



već će porast struje kao prelazna pojava biti definiran po drugom Kirchhoffovom zakonu zahtjevom, da suma svih napona u jednom strujnom krugu mora biti u svakom momentu jednaka nuli, tj.

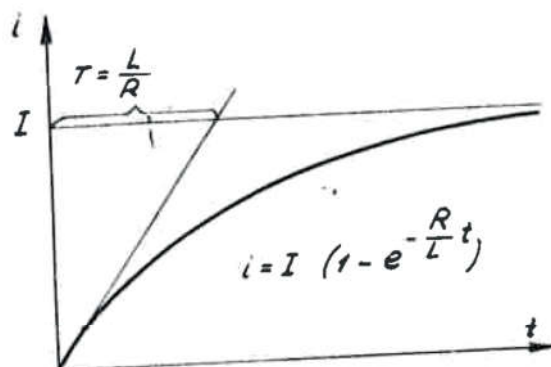
$$U - iR - L \frac{di}{dt} = 0$$

Sl. 1-3

Rješenje te jednadžbe pokazuje, da će struja rasti po eksponencijalnoj krivulji (sl.1-4) do svoje konačne vrijednosti prema jednadžbi :

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

u kojoj vrijednost " $\frac{L}{R}$ " predstavlja odsječak subtangente eksponencijalne krivulje na horizontali konačne vrijednosti struje (vidi sl.1-4) i pošto ta veličina karakterizira brzinu porasta struje, zovemo istu "vremenska konstanta T". Nakon vremena u iznosu trostruke vremenske konstante postigne struja 95 % svoje konačne vrijednosti. Kod iste vrijednosti radnog otpora a kod raznih vrijednosti induktiviteta jednog strujnog kruga vidimo, da je brzina porasta struje obrnuto proporcionalna induktivitetu. Što



Sl. 1-4
Prelazna pojava kod ukapčanja
prigušnice na istosmjerni
napon

je veći induktivitet u jednom strujnom krugu, to polaganije, odnosno to tromije će struja slijediti promjene napona. Iz tog razmatranja vidimo, da induktivitet u elektrici igra analognu ulogu kao masa u mehanici. Na osnovu te analogije može izračunati potencijalnu energiju magnetskog polja, jer kako u mehanici kinetička energija mase u translacionom gibanju iznaša

$$A_{meh} = m \frac{v^2}{2}$$

tako onda kod elektromagnetskog polja mora iznašati potencijalna energija istog

$$A_{mag} = L \frac{i^2}{2}$$

U tehnici izmjeničnih struja pokušavamo uvijek postići vremensku liniju bilo struje, bilo toka, bilo napona, što bližu sinusoidi. Na primjer za napone

$$e = E_m \sin \omega t$$

u kojoj jednadžbi " ω " predstavlja kružnu frekvenciju :

$$\omega = 2 \pi f$$

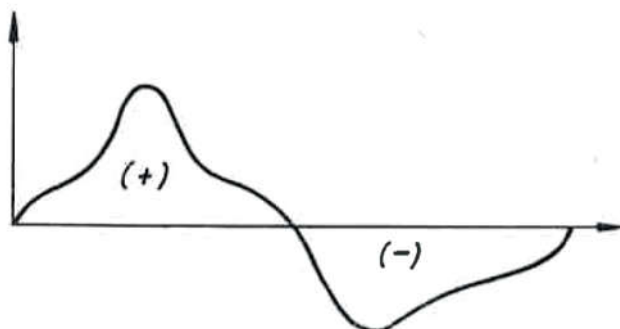
Sinusni oblik je, može se reći, zapravo prirodan, i jedini ispunjava uvjet, da je kod sinusnog narinutog napona i tok, koji inducira protunapon, sinusan, jer je derivacija sinusoide opet sinusoida (iako fazno pomaknuta) :

$$\frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = E_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Svaku periodičku funkciju možemo po Fourieru rastaviti na sinusoidu sa osnovnom frekvencijom razmatrane periodičke funkcije, i na sinusoide, čija frekvencija je višekratnik osnovne frekvencije. Mi obično označujemo te sinusoide kao osnovni harmonik i kao više harmoničke članove.

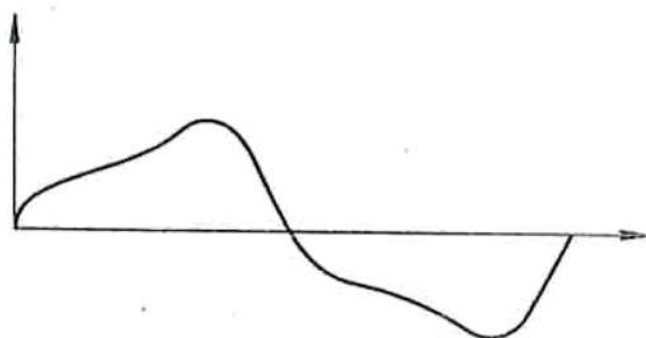
Iz odredjenih odnosa između gornjih i donjih poluperioda jedne periodičke funkcije možemo zaključiti slijedeće :

a) ako je površina pozitivnog poluvala jednaka površini negativnog poluvala prema sl.1-5, onda nema istosmjernog člana;



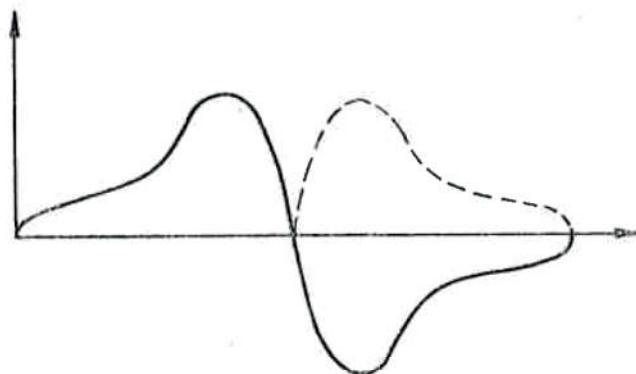
Sl. 1-5

b) ako je gornji polual obzirom na vremensku os zrcalna slika donjeg poluvala prema sl.1-6, onda nema parnih članova od viših harmoničkih članova;



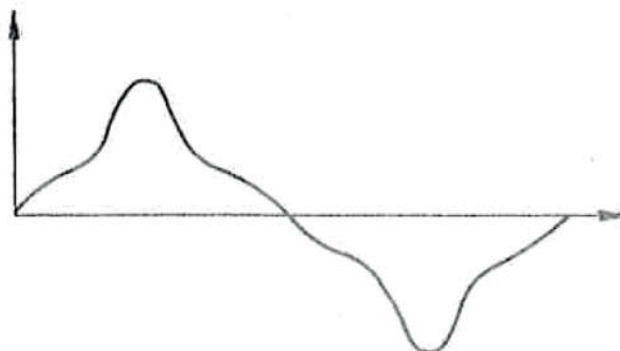
Sl. 1-6

c) ako je gornji polual zrcalna slika, obzirom na vertikalnu os donjeg poluvala zaokrenutog oko horizontalne osi gore prema sl.1-7, onda nema za 90° pomaknutih sinusnih članova;



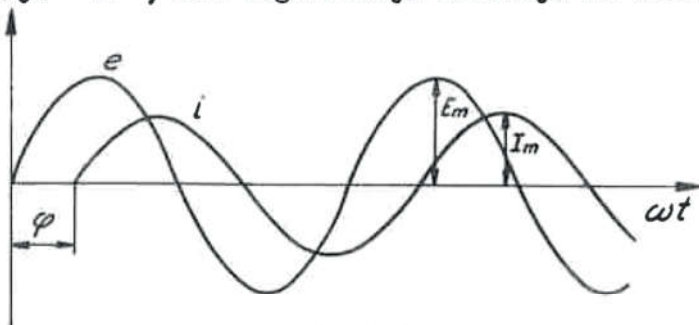
Sl. 1-7

d) ako postoji simetrija u smislu b) i c) prema sl.1-8, tada postoje samo neparni sinusni članovi, koji nisu pomaknuti u fazi.



Sl. 1-8

Ako imamo posla sa raznim sinusnim veličinama iste frekvencije "f", odnosno iste kružne frekvencije " ω ", kako su npr. u vremenskom dijagramu (sl.1-9) prikazani sinusni izmjenični napon "e" i struja "i", kod čega struja zaostaje za vremenski kut " φ "



Sl. 1-9

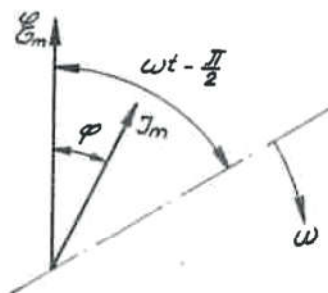
za naponom, onda možemo obje veličine izraziti jednačbama :

$$e = E_m \sin \omega t$$

$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

u kojima " E_m " i " I_m " predstavlja maksimalne vrijednosti. Jednačbama je za svaki trenutak određena momentana vrijednost napona i struje.

Sinusni oblik elektromagnetskih veličina nam daje tu prednost, da možemo iste simbolično prikazati vektorima u vektorskom dijagramu. Tako je npr. u sl.1-10 prikazan vektorski dijagram vremenskog dijagrama sl.1-9 sa vremenskom osi $\vec{OM}$, koja rotira u smislu ka-



Sl. 1-10

zala na uri sa kružnom frekvencijom " ω ". Projekcija svakog vektora na vremensku os u bilo kojem momentu daje momentani iznos dotične veličine. Ove vektore kao simbole sinusnih veličina ćemo označavati velikim pisanim slovima, npr. e , i itd., za razliku od njihovih efektivnih ili maksimalnih odnosno skalarnih veličina, koje označavamo velikim štampanim slovima, npr. E , I itd.

Vektorski dijagram nam daje mogućnost računanja s vektorima kao kompleksnim brojevima u Gaussovoj ravlini prema sl.1-11. bilo da vektore izražavamo pomoću komponenata :

$$I_{1m} = I_{1m} \cos \alpha + j I_{1m} \sin \alpha$$

$$I_{2m} = I_{2m} \cos \beta + j I_{2m} \sin \beta$$

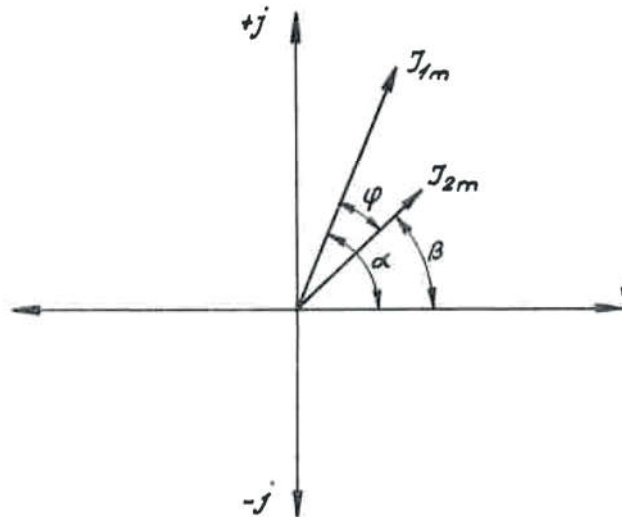
bilo u polaznom obliku, ako supstituiramo:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$$

i dobijemo :

$$I_{1m} = I_{1m} e^{j\alpha} = I_{1m} e^{j(\alpha + \varphi)}$$

$$I_{2m} = I_{2m} e^{j\beta}$$



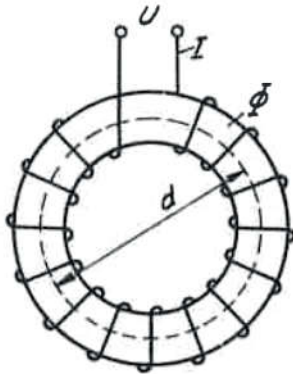
Sl. 1-11

Kako kod izmjeničnih struja normalno operiramo sa efektivnim vrijednostima, možemo u svim gornjim jednažbama umjesto maksimalnih vrijednosti sinusnih veličina pisati njihove efektivne vrijednosti umnožene sa faktorom $\sqrt{2}$, a isto tako možemo u vektorskim dijagramima crtati sve vektore u efektivnim vrijednostima, jer se time zapravo mijenja samo mjerilo, u kojem se vektorski dijagram crta.

2. TEORIJA TRANSFORMATORA

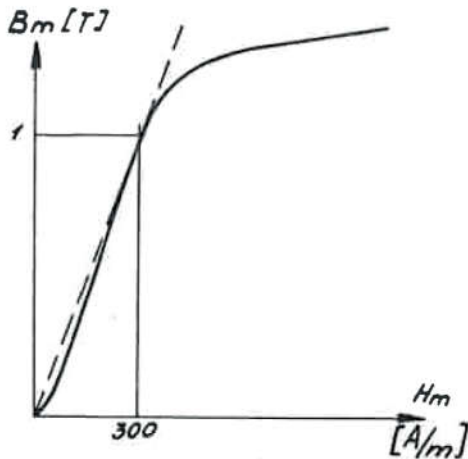
2.1 Prigušnica

Uzmimo jezgru u obliku prstena, izradjenu od feromagnetskog materijala, npr. legiranog transformatorskog lima, i namotajmo je gusto električkim vodičem sa "w" zavoja po cijelom obodu prste - na, kako to prikazuje sl.2.1-1. U tom slučaju možemo računati da



Sl.2.1-1

Prigušnica s pretenastom jezgrom



Sl.2.1-2

Krivulja magnetiziranja željeza

se silnice zatvaraju unutar namota, i da prema tome izvan namota nema magnetskog polja. Normalni legirani transformatorski lim ima krivu - lju magnetiziranja prema sl.2.1-2.

Za naša razmatranja pretpostav - ljamo da ne ćemo zasititi željezo, već raditi samo ispod koljena kri - vulje magnetiziranja, praktički na pravcu koji je crtkano ucrtan na sl 2.1-2.tj. sa konstantnom permeabilnosti.

Dalje pretpostavljamo da nema gubitaka u željezu, i da je radni otpor namota praktički zanemariv.

Pitajmo se sada, što će se dogo - diti, ako na taj namot narinemo izm - jenični sinusni napon konstantne efektivne vrijednosti "U" sa kon - stantnom frekvencijom "f", odnos - no kružnom frekvencijom "ω" ?

Razmatrajmo samo stacionarno sta - nje, koje će nastupiti nakon prelaz - ne pojave, koju ćemo razmatrati kas - nije.

Po II.Kirchhoffovom zakonu mora suma svih napona u jednom zatvorenom električkom krugu biti jednaka nuli. Radnog pada napona nema, jer zanema - rujemo radni otpor. Narinuti izmje - nični napon potjerati će kroz namot izmjeničnu struju, koja će po zakonu protjecanja u prstenu uzбудiti izmje - nični tok, a taj će po zakonu induk - cije inducirati u namotu protunapon

$$-w \frac{d\Phi}{dt} :$$

$$U\sqrt{2} \sin \omega t - w \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

$$U\sqrt{2} e^{j\omega t} - w \hat{\Phi}_m j\omega = 0$$

$$\hat{\Phi}_m = \Phi_m \cdot e^{j\omega t}$$

odnosno simbolično:

gdje je:

Iz te jednađbe možemo izračunati koliki će biti tok :

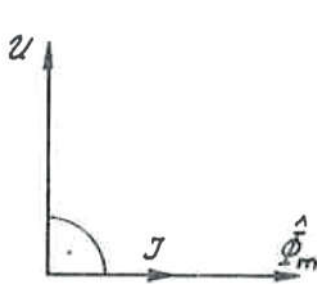
$$\phi_m \cdot e^{j\omega t} = \hat{\phi}_m = \frac{U\sqrt{2}}{\omega W} \cdot (-j) \cdot e^{j\omega t} \quad (2.1-1)$$

ako ispuštimo simbolično izražavanje, te se zadovoljimo samo numeričkom relacijom, dobijemo veličinu magnetskog toka :

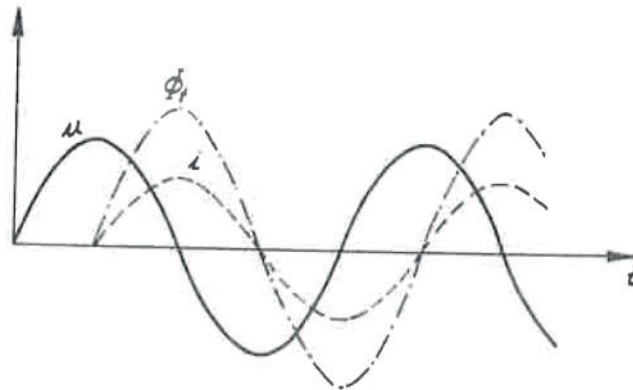
$$\phi_m = \frac{U\sqrt{2}}{\omega W} \quad (2.1-2)$$

Jednađba (2.1-1) pokazuje, da je kod određenog narinutog napona određene frekvencije i kod određenog broja zavoja, određen i tok, bez obzira na kvalitet materijala. I kod svitka bez željeza tok bi bio isti. Osim toga vidimo iz funkcije $e^{j\omega t}$, da je tok sinusan i iz faktora $(-j)$, se vidi, da vektor toka vremenski zaostaje za kut od 90° za vektorom narinutog napona. Oznaka " $\hat{\phi}_m$ " predstavlja vektor maksimalne vrijednosti, a " ϕ_m " maksimalnu vrijednost toka za razliku od "U", koji predstavlja efektivnu vrijednost napona.

Tok u prstenu mora biti uzbudjen od struje, koja je po zakonu protjecanja istovremena sa tokom, te prema tome i struja zaostaje za narinutim naponom za kut od 90° . Na osnovu toga dobijemo vektorski dijagram sl.2.1-3, odnosno vremenski dijagram sl.2.1-4.



Sl. 2.1-3



Sl. 2.1-4

Ako hoćemo u jednađbi (2.1-2) izraziti " ω " sa frekvencijom "f", dobijemo

$$U = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot W \cdot \phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot W \cdot \phi_m = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot \phi_m \quad (2.1-3)$$

gdje je

- U = efektivna vrijednost napona u V
- f = frekvencija u Hz
- W = broj zavoja
- ϕ_m = maksimalna vrijednost toka u Wb.

Ovaj dijagram moramo još nadopuniti vektorom po Faradayevom zakonu inducirano protunapona samoindukcije :

$$e = -W \frac{d\phi}{dt}$$

odnosno vektorski :

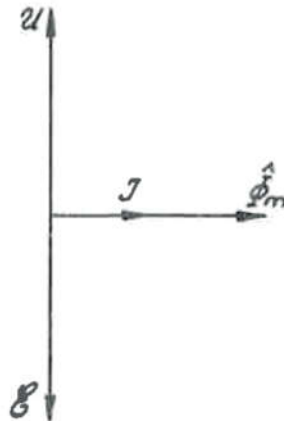
$$\mathcal{E}\sqrt{2} = -w \hat{\phi}_m j\omega = w \frac{U\sqrt{2}}{\omega w} (-j) \cdot e^{j\omega t} \cdot j\omega \quad (2.1-4)$$

$$\mathcal{E} = -U \cdot e^{j\omega t}$$

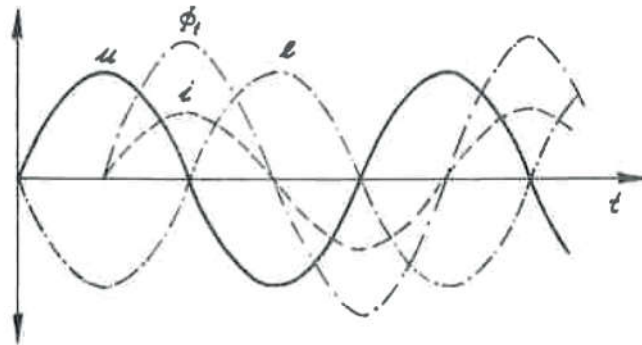
$$\mathcal{E} = -U$$

$$(2.1-5)$$

tj. vektor induciranog napona protivan je vektoru narinutog napona i u vektorskom dijagramu prema istom zaostaje za 180° , te dobijemo potpuni vektorski odnosno vremenski dijagram prigušnice kao na sl. 2.1-5 i 2.1-6.



Sl.2.1-5



Sl.2.1-6

Ova razmatranja vrijede samo uz pretpostavku sinusnog oblika narinutog napona "U". Međutim, svaki drugi oblik napona možemo po Fourieru rastaviti na osnovni harmonik i više harmonike, pa će za svaki harmonik vrijediti gornja jednačba. Iz toga možemo zaključiti, da se u slučaju nesinusnog oblika napona mijenja samo faktor "4,44" dok proporcionalnost vrijedi i dalje, pa prema tome možemo postaviti općenitu jednačbu za svaki oblik narinutog napona :

$$U = 4 f_0 f w \phi_m \quad (2.1-6)$$

gdje faktor " f_0 " ovisi o obliku narinutog napona ; kod sinusnog napona " f_0 " iznosi 1,11.

Pitamo se još, kolika će biti struja ? Svakako tolika, da uzbuđi tok " ϕ_m ", koji je već određen jednačbom (2.1-2) odnosno (2.1-3). Prema zakonu protjecanja mora biti :

$$\int H_l dl = \Theta = iw$$

pa je prema tome :

$$i = \frac{\int H_l dl}{w}$$

Pošto se u našem slučaju radi o prstenu sa konstantnim presjekom i

sa relativno malom razlikom između unutarnjeg i vanjskog promjera, možemo računati jednostavno sa srednjim promjerom " d " i sa srednjom duljinom silnica $l = \pi d$, te prema tome dobijemo :

$$i = \frac{l}{w} \cdot H_t$$

Zbog linearnosti krivulje magnetiziranja mora biti i jakost polja sinusnog oblika, pa vrijedi to i za struju, te dobijemo simbolički prikazano :

$$I_m e^{j\omega t} = \frac{l}{w} H_m e^{j\omega t}$$

odnosno numeričku relaciju :

$$I = \frac{l}{\sqrt{2}w} H_m \quad (2.1-7)$$

gdje u jednadžbu ulazi " $\sqrt{2}$ ", jer smo maksimalnu vrijednost struje " I_m ", kako je uobičajeno, zamijenili njezinom efektivnom vrijednošću " I ", dok jakost polja kao magnetska veličina ostaje izražena njezinom maksimalnom vrijednošću H_m .

Općenito je $H_m = f(B_m)$ prema krivulji magnetiziranja.

U slučaju našeg razmatranja pretpostavljamo konstantnu permeabilnost i dobijemo kako je prije izračunato

$$B_m = \mu \cdot H_m$$

Ako presjek prstena označimo sa " S ", i ako tražimo prosječnu indukciju, dobijemo :

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S}$$

pa se konačno ostvaruje mogućnost izračunavanja struje magnetiziranja po jednadžbi :

$$I_\mu = \frac{\Phi_m \cdot l}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot w \cdot S} = \frac{l \cdot B_m}{\sqrt{2} \cdot \mu w} \quad (2.1-8)$$

I_μ	(A)	efektivna vrijednost struje magnetiziranja
Φ_m	(Wb)	maksimalna vrijednost toka
B_m	(T)	maksimalna vrijednost indukcije
l	(m)	srednja duljina silnica u jezgri
S	(m ²)	presjek jezgre

Ova jednadžba pokazuje da struja ovisi o kvaliteti, tj. o permeabilnosti jezgre. Ako ostavimo svitak bez željezne jezgre, dobi-
jemo nekoliko tisuća puta veću struju. Kako struja prema jednadžbi
(2.1-8) predstavlja samo struju potrebnu za magnetiziranje željeza,
obično je nazivamo : struja magnetiziranja I_μ .

Izračunajmo slijedeći primjer :

Jezgra prigušnice iz transformatorskog lima sa krivuljom magnetiziranja prema sl.2.1-2 ima :

srednji promjer jezgre	0,4 m
presjek jezgre	$S = 0,04 \text{ m} \times 0,025 \text{ m} = 0,001 \text{ m}^2$
broj zavoja	$w = 1200$
napon	$U = 220 \text{ V}$
frekvencija	$f = 50 \text{ Hz}$

Tražimo tok, indukciju i struju magnetiziranja.

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 1200} = 0,00083 \text{ Wb} = 83000 \cdot 10^{-8} \text{ Wb} = 83000 \text{ M}$$

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S} = \frac{83000 \cdot 10^{-8}}{10 \cdot 10^{-4}} = 8300 \cdot 10^{-4} \text{ T} = 8300 \text{ G}$$

$$l = 0,4 \pi = 1,26 \text{ m}$$

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} = \frac{1}{300} \text{ (prema sl.2.1-2)}$$

$$I_\mu = \frac{l \cdot B_m}{\sqrt{2} \cdot \mu \cdot w} = \frac{300 \cdot 1,26 \cdot 8300 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{2} \cdot 1200} = 0,185 \text{ A}$$

Ako bi taj svitak bio bez jezgre, tj. u zraku ili na nekoj jezgri iz neferomagnetskog materijala istog oblika, onda tok " Φ_m " ostaje nepromijenjen, dok se struja " I_μ " povećava u obrnutom omjeru permeabilnosti.

Za zrak i ostale neferomagnetske materijale je permeabilnost konstantna i iznosi

$$\mu_0 = 0,4 \pi \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \text{ uz } B [\text{T}] \quad H [\text{A/m}]$$

$$\mu_0 = 0,4 \pi \text{ uz } B [\text{G}] \quad H [\text{A/cm}]$$

$$\mu_0 = 1 \text{ uz } B [\text{G}] \quad H [\text{Oe}]$$

Prema tome bi u našem primjeru struja magnetiziranja iznašala

$$I_\mu = 0,185 \frac{10^6}{300 \cdot 0,4 \pi} = 490 \text{ A}$$

Naravno, kod toga ne smijemo zaboraviti da smo zanemarili radni otpor, što je kod male struje magnetiziranja od 0,185 A opravdano. Kod

struje od 490° A ne bi mogli opravdati to zanemarenje, jer bi radni pad napona bio osjetan, pa bi zato struja bila manja, kako ćemo to kasnije izračunati.

Kad računamo prigušnice, i općenito uvijek tamo, gdje se u električnim strujnim krugovima inducira protunapon po zakonu indukcije radi promjene toka oko vodiča tog kruga, volimo da umjesto sa tokom računamo sa induktivitetom "L" :

$$L = \frac{W\Phi_m}{I_m} = \frac{\Psi_m}{I_m}$$

Induktivitet je ulančeni tok " Ψ " kod struje od jednog ampera, a jedinica mu je H (henri) .

Induktivitet je definiran kao omjer momentane vrijednosti ulančenog toka i momentane vrijednosti struje, pa ako smo uzeli maksimalno ulančenje, moramo uzeti i maksimalnu vrijednost struje " I_m ", odnosno kod sinusne struje $\sqrt{2}$ povećanu efektivnu vrijednost struje "I" :

$$L = \frac{W\Phi_m}{\sqrt{2}I} \quad (2.1-9)$$

Ako tok u jednadžbi (2.1-3) izrazimo sa induktivitetom, dobijemo :

$$U = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot W \frac{L\sqrt{2}}{W} = \omega L I$$

Iz jednadžbe vidimo, da možemo ωL u jednom električnom krugu tretirati kao induktivni otpor, kojeg označavamo za razliku od radnog otpora "R" sa oznakom "X" .

$$X = \omega L$$

no ne smijemo zaboraviti da vektor induciranog protunapona zaostaje prema sl.2.1-5 i 2.1-6 za 90° za vektorom struje, za razliku od vektora protunapona, prouzročenog strujom koja prolazi kroz radni otpor, a koji vektor protunapona zaostaje za 180° za vektorom struje.

Riješimo zadatak iz primjera sa strane 14 pomoću izračunavanja induktivnog otpora ! Pomoću jednadžbe (2.1-9) dobijemo induktivitet. Tok možemo izračunati analogno kao struju, ako imamo za silnice vodič sa konstantnim presjekom, kako je to slučaj u već navedenom primjeru :

$$\begin{aligned} I &= \frac{U}{R} & \Phi_m &= \frac{\sqrt{2}IW}{R_m} = \frac{\Theta_m}{R_m} \\ R_m &= \text{magnetski otpor} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \\ L &= \frac{\Phi_m W}{\sqrt{2}I} = \frac{W^2 \sqrt{2} \mu \cdot S}{\sqrt{2} \cdot l} = W^2 \frac{\mu \cdot S}{l} = \frac{W^2}{R_m} \end{aligned}$$

Induktivitet je, proporcionalan kvadratu broja zavoja i obrnuto proporcionalan magnetskom otporu, te je prema tome određen samo oblikom vodiča, odnosno svitka, i magnetskom karakteristikom njego-

ve okoline. U spomenutom primjeru dobijemo

$$L = 1200^2 \frac{10 \cdot 10^{-4}}{300 \cdot 126} = 3,82 \text{ H}$$

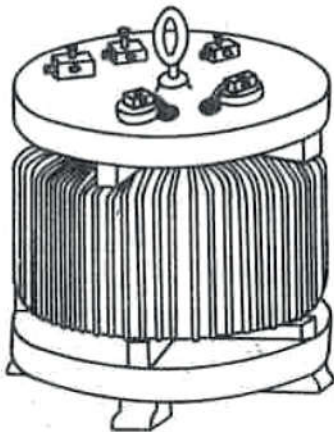
$$X = \omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 3,82 = 1200 \Omega$$

$$I = \frac{U}{X} = \frac{220}{1200} = 0,185 \text{ A}$$

2.2 Idealni transformator

Svaki transformator se sastoji iz jezgre, niskonaponskog i visokonaponskog odnosno primarnog i sekundarnog namota, a u iznimnim slučajevima imamo još jedan tercijarni namot, što sve zajedno predstavlja aktivni dio transformatora, za razliku od ostalog konstruktivnog i izolacionog dijela transformatora, koji ne služi direktno za transformaciju električne energije.

Prve transformatore počela je graditi tvrtka GANZ u Budimpešti poslije 1880 godine. Na sl. 2.2-1 prikazana je izvedba jednofaznog transformatora iz onih godina. Jezgra je u obliku prstena, koji je izradjen iz željezne žice, te predstavlja u stvari kolut željezne žice.



Sl.2.2-1

Transformator tvrtke Ganz
iz 1880 god.

U daljnjem razvoju gradnje transformatora uskoro se prešlo na sada već klasični oblik gradnje transformatora u dvije izvedbe :

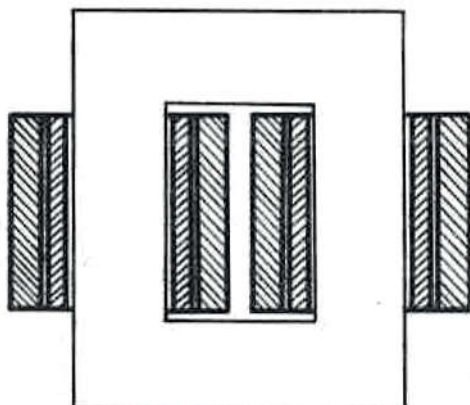
- jezgrasti oblik prema sl.2.2-2 i
- ogrnuti oblik prema sl.2.2-3 .

Jezgra klasičnog transformatora sastoji se iz :

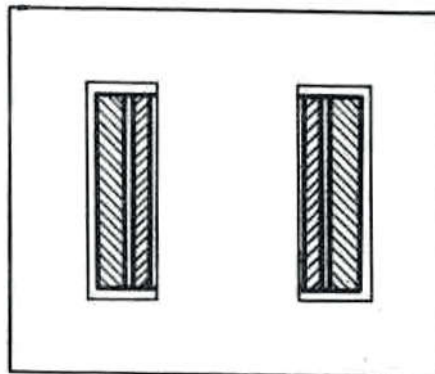
- stupa jezgre, na kojem se nalazi namot, i
- jarma, koji sa stupovima zatvara magnetski krug.

Ako razmatramo rad idealnog transformatora u klasičnoj izvedbi jezgrastog oblika prema sl.2.2-4 , kod kojeg opet pretpostavljamo da

se svaka silnica zatvara kroz jezgru i prema tome prolazi kroz oba namota, da su gubici u željezu i bakru zanemarivi, kao i da je permeabilnost jezgre konstantna veličina, onda u stvari svi rezultati razmatranja za prigušnicu u prethodnom članu vrijede i za ovaj idealni transformator u praznome hodu. Kao prazni hod transformatora označavamo prema tome pogonsko stanje transformatora, u kojem je isti priključen na napon, tj. na mrežu, dok je sekundarni strujni krug otvoren ; prema tome se transformator u praznom hodu razlikuje od

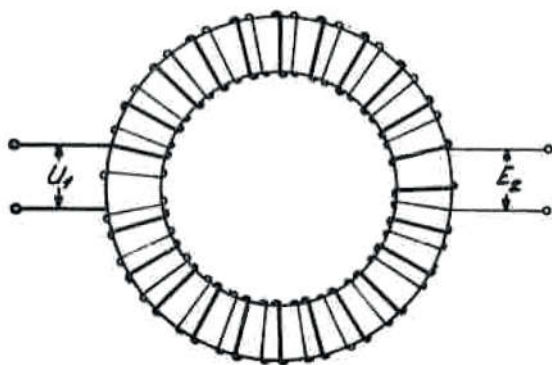


Sl. 2.2-2
Jednofazni jezgrasti
transformator

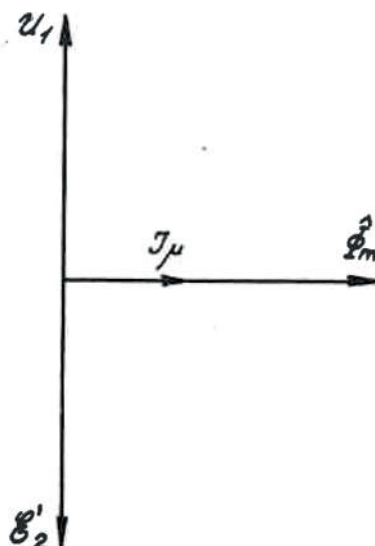


Sl. 2.2-3
Jednofazni ogrnuti
transformator

prigušnice samo utoliko, što ima još jedan sekundarni namot, u kojem se doduše inducira napon po zakonu indukcije isto kao u primarnom namotu, no taj namot ne utiče na rad transformatora, pošto kroz njega u tom pogonskom slučaju ne prolazi nikakva struja.



Sl. 2.2-4
Transformator sa prstenastom
jezgrom



Sl. 2.2-5
Vektorski dijagram idealnog trans-
formatora u praznom hodu

Za razliku od prigušnice, transformator ima dva namota, pa zato označujemo jednom ili drugom namotu pripadajuće veličine s indeksom 1 odnosno 2. Bitna razlika između oba namota je u broju zavoja

" w_1 ", odnosno " w_2 ". U svakom zavoju inducira tok " Φ " isti napon, pa je samo po sebi razumljivo, da se u oba namota inducirani naponi odnose kao omjer zavoja :

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \quad (2.2-1)$$

i da je vektorski pravac obaju vektora induciranih napona " E_1 " i " E_2 " isti. Jednadžba (2.2-1) predstavlja osnovnu jednadžbu transformatora, jer je u njoj izražena mogućnost i svrha transformatora da transformira električnu energiju sa jednog nivoa napona na drugi nivo.

Kod razmatranja fizikalne slike rada transformatora, a pogotovo kod ortanja vektorskog dijagrama, pojednostavnjujemo rad sa pretpostavkom da je primarni broj zavoja jednak sekundarnom, ili pak kod računa za konkretni transformator preračunavamo veličine sekundarnog namota na primarni broj zavoja, kako ćemo to kasnije upoznati, te iste označujemo sa indeksom crtica (E_2' , I_2' , itd.). Vektorski dijagram se uvijek crta pod pretpostavkom jednakog broja zavoja obaju namota. Iz toga slijedi, da će u vektorskim dijagramima transformatora biti vektor " E_1 " uvijek identičan sa vektorom " E_2' ", pa ga označujemo samo sa " E_2' ", jer elektromotorna sila " E_1 " u razmatranju rada transformatora ne igra neku osobitu ulogu. Na taj način dobijemo vektorski dijagram transformatora u praznom hodu prema sl. 2.2-5.

Pretpostavljamo za sada, radi lakšeg shvaćanja, da oba namota stvarno imaju jednaki broj zavoja, pa je prema tome :

$$E_1 = E_2' = E_2$$

Ako na sekundarnu stranu transformatora priključimo potrošač električne energije, koji ima određeni radni otpor " R_p " i induktivni otpor " X_p ", onda će sekundarni napon transformatora potjerati struju, koja je određena jednadžbom :

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_p^2 + X_p^2}}$$

a koja će zaostajati za vektorom napona " E_2 " za kut " φ_2 " određen jednadžbom

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_p}{R_p}$$

Struja " I_2 " teče kroz zavoj sekundarnog namota i čini s njima nove amperzavoje. Kod razmatranja prigušnice ustanovili smo da primarna struja magnetiziranja " I_μ " čini sa primarnim zavojima protjecanje, da bi se uzbudio tok potreban za induciranje protunapona " E_1 ", koji drži ravnotežu sa narinutim naponom " U_1 ". Pri opterećenju transformatora smo s amperzavojima " $I_2 w_2$ " to uravnoteženo stanje narušili. Medjutim, narinuti napon " U_1 " će i sada automatski potjerati onu struju " I_1 ", koja je potrebna da se stanje uravnoteži, tj. potjerati će dodatnu struju, koja treba da poništi djelovanje sekundarne struje, tj. sekundarnih protuamperzavoja " $I_2 w_2$ ". Uz isti smjer namatanja primara i sekundara biti će dakle

$$I_1' w_1 + I_2 w_2 = 0$$

odnosno :

$$I_1' w_1 = -I_2 w_2$$

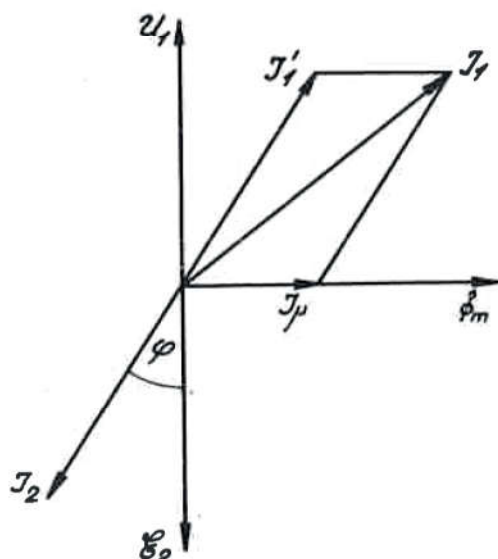
Iz toga slijedi :

$$\frac{I_1'}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad (2.2-2)$$

Za razliku od napona, omjer struja se odnosi obrnuto proporcionalno prema omjeru pripadajućih zavoja .

Budući da vektorski dijagram crtamo, kako je već spomenuto, za slučaj " $w_1 = w_2$ ", mora u vektorskom dijagramu biti

$$I_1' = -I_2$$



Sl. 2.2-6

Vektorski dijagram opterećenog idealnog transformatora

Prema vektorskom dijagramu u sl.2.2-6 dobijemo ukupnu primarnu struju " I_1 " kod svakog slučaja opterećenog transformatora kao vektorsku sumu struje magnetiziranja " I_μ " i za 180° okrenute struje tereta " I_2 ", odnosno struje " I_2' ".

$$I_1 = I_\mu - I_2 = I_\mu + I_2'$$

Time smo dobili potpuni vektorski dijagram idealnog transformatora. Kontrolirajmo energetski bilans rada tog transformatora :

$$\begin{aligned} E_2 I_2 &= \left(E_1 \frac{w_2}{w_1} \right) \left(-I_1' \frac{w_1}{w_2} \right) = \\ &= -E_1 I_1' = U_1 I_1' \end{aligned}$$

$$U_1 I_1 = U_1 I_1' + U_1 I_\mu$$

Transformator uzima primarno iz mreže potrebnu jalovu snagu za magnetiziranje željeza plus prividnu snagu, koliku sekundarno predaje potrošaču.

2.3 Struja magnetiziranja i gubici

2.31 Struja magnetiziranja i gubici u željezu

Za uzbuđivanje magnetskog polja u jezgri transformatora potrebni su prema zakonu protjecanja uzbuđni amperzavoji, koji će ovisiti o potrebnoj veličini magnetskog toka u jezgri, geometrijskim dimenzijama jezgre, te o magnetskim karakteristikama limova, iz kojih je jezgra načinjena.

Ako transformator priključimo primarno na mrežu, čiji je napon sinusan, mora se u jezgri uzбудiti sinusni magnetski tok, čija je tjemena vrijednost prema jednadžbi (2.1-3) jednaka :

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 \cdot f \cdot W_1}$$

Prilikom proračuna struje magnetiziranja pretpostavit ćemo da nema rasipnog toka, tj. da magnetski tok u svim presjecima jezgre ima istu momentanu vrijednost Φ . Na taj način za razna mjesta "x" magnetskog kruga dobijemo, uz pretpostavku jednolike raspodjele toka po presjeku, indukciju B_x prema jednadžbi

$$B_x = \frac{\Phi}{S_x}$$

gdje je S_x presjek na tom mjestu jezgre. Uz sinusan tok biti će i promjena indukcije također sinusna.

U zračnim rasporima magnetskog kruga iznositi će jakost magnetskog polja $H_0 = B_0 / \mu_0$.

Iz "Osnova" je poznato, da ako se indukcija u željeznoj jezgri periodički mijenja, odvija se ta promjena po tzv. petlji histereze. Za svaku momentanu vrijednost magnetske indukcije dobijemo iz petlje histereze pripadnu jakost polja u jezgri. Kada znamo jakost magnetskog polja na svim mjestima u jezgri, možemo iz zakona protjecanja

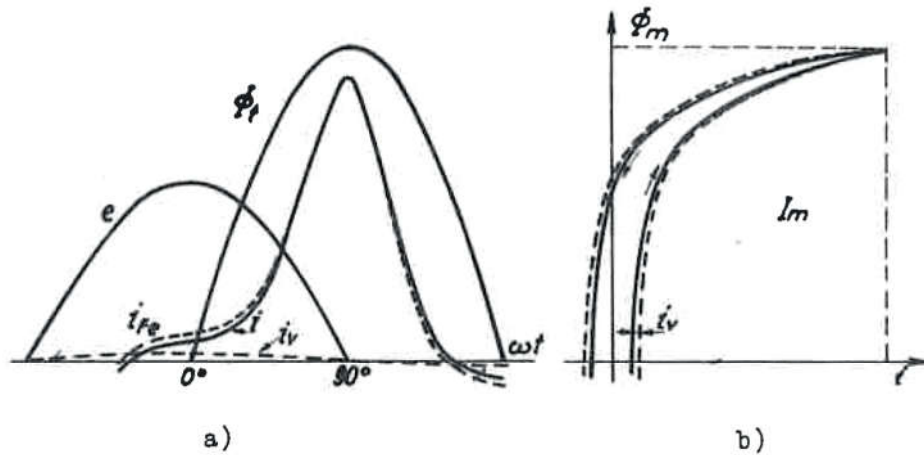
$$\oint H_l dl = i_0 W_1$$

izračunati u tom trenutku potrebne amperzavoje struje magnetiziranja. Integraciju možemo provesti odvojeno za dio puta kroz željezo i dio puta kroz zrak :

$$\frac{1}{W_1} (\oint H_{Fe} dl + \int H_0 dl) = i_0 = i_{Fe} + i_0$$

Potrebnu uzбудnu struju možemo dakle rastaviti na struju za uzбудu željeza i_{Fe} i struju za uzbudjivanje zračnog raspóra i_0 .

Na sl. 2.31-1 je provedena analiza struje magnetiziranja željeza za jednu poluperiodu. Da bi se inducirao protunapon narinutom naponu " U_1 " javlja se u jezgri sinusni tok " Φ ", koji zaostaje za narinutim naponom za 90° . Iz statičke petlje histereze možemo za razne vrijednosti toga toka izračunati potrebnu uzбудnu struju. Tako dobijemo statičku magnetsku karakteristiku kruga tj. petlju tok-struja prikazanu punom linijom na sl.2.31-1b. Iz te petlje možemo, poznavajući vremensku promjenu toka, dobiti odgovarajuću vremensku promjenu struje magnetiziranja " i " kao na sl.2.31-1a. Ta struja nije sinusna. Kako je poluperioda simetrična u smislu slike 1-6, to ona sadrži neparne sinusne i kosinusne članove viših harmonika. Tu krivulju možemo prema sl.2.31-2 rastaviti na dvije krivulje, od kojih komponenta " i_{Fe} " sadrži članove sa $\sin \omega t$, $\sin 3\omega t$, $\cos 3\omega t$, i nešto viših neparnih i sinusnih i kosinusnih članova, dok druga komponenta " i_0 " sadrži samo član sa $\cos \omega t$. Prva komponenta " i_{Fe} " zove se "čista struja magnetiziranja". To je čisto jalova struja, jer joj osnovni harmonik

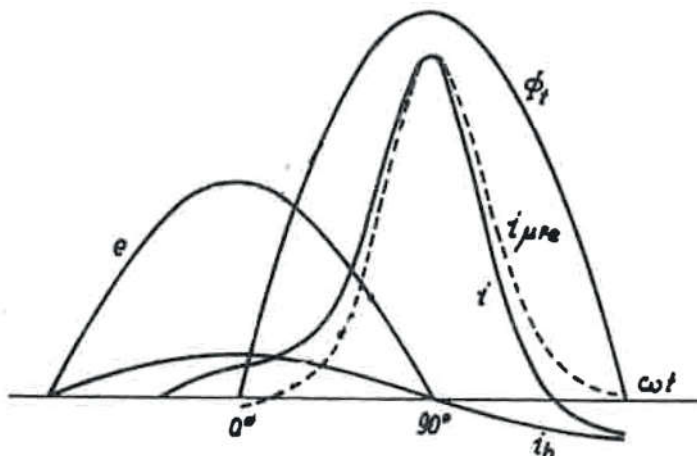


Sl. 2.31-1

Grafička konstrukcija za određivanje struje magnetiziranja

zaostaje za naponom mreže za 90° . Osnovni harmonik druge komponente je u fazi sa naponom mreže, pa je to radna komponenta, koja nadoknađuje gubitke histereze u jezgri. Ovi gubici se mogu odrediti planimetriranjem petlje histereze. To je prilično mukotrpno posao, pa se zato u praksi upotrebljavaju empirijske formule. Oblik petlje histereze je ovisan o kvaliteti transformatorskog lima. Općenito možemo reći da su gubici u masi od 1 kg proporcionalni nekoj potenciji maksimalne vrijednosti indukcije, te broju premagnetiziranja u sekundi tj. frekvenciji mreže. Tako dobijemo za specifične gubitke histereze

$$p_{Fe,h} = k \cdot f \cdot B_m^x$$



Sl. 2.31-2

Rastavljanje struje magnetiziranja na radnu i jalovu komponentu

Eksponent "x" nije konstantna veličina, već se mijenja sa indukcijom. Do 1 T iznosi oko 1,6, između 1 i 1,6 T približava se 2, a kod većih indukcija još bitno raste. Nema, međutim, neke određene zakonitosti za sve materijale.

Radna komponenta struje magnetiziranja prema tome iznosi :

$$I_h = \frac{P_{Fe,h}}{E_1}$$

Struja $i_{Fe} + i_h$, međutim, još uvijek nije potpuna struja magnetiziranja željeza, jer ne uzima u obzir vrtložne struje. Promjena toka inducira u jezgri vrtložne struje, koje su zbog čisto radnog otpora u fazi sa induciranim elektromotornom silom. Da se ponište amperzavoji tih struja mora iz mreže poteći dodatna struja i_v , koja će također biti u fazi sa elektromotornom silom, pa prema tome i sa primarnim naponom. Na sl.2.31-1 je ucrtana i ta struja i_v , koja nadoknađuje gubitke vrtložnih struja u jezgri. Efektivna vrijednost te struje iznosi

$$I_v = \frac{P_{Fe,v}}{E_1}$$

gdje je E_1 inducirana elektromotorna sila u namotu, a $P_{Fe,v}$ gubici vrtložnih struja. Ta struja ima sinusni oblik, pa je njezina maksimalna vrijednost

$$I_{vm} = \sqrt{2} I_v$$

Sastavljanjem jezgre iz međusobno izoliranih, tzv. transformatorskih limova, uveliko sprečavamo gubitke vrtložnih struja, no ne možemo ih ipak u potpunosti spriječiti. Što su limovi tanji to su manji gubici vrtložnih struja. Danas se općenito upotrebljavaju transformatorski limovi debljine 0,35 mm. Snižavanje gubitaka vrtložnih struja postizava se, osim toga, povećavanjem električkog otpora limova, jer se tada uz istu formaciju električkog polja u limu, dobiju manje vrtložne struje. U tu svrhu se limovi legiraju sa silicijem, najviše do 4,5 %, jer se time povećava tvrdoća i krhkost lima, što ima za posljedicu brzo otupljenje odnosno istrošenje noževa i štanca kod obrade lima. Baš radi toga se kod dinamo-limova za rotacione električne strojeve lim još manje legira, jer je u pitanju životna dob skupih štanca.

Vrtložne struje rastu proporcionalno sa induciranim naponom, pa prema tome proporcionalno sa indukcijom i frekvencijom. Pošto gubici vrtložnih struja rastu sa kvadratom struje, dobijemo za specifične gubitke vrtložnih struja, tj. gubitke po kilogramu mase

$$P_{Fe,v} = k_1 f^2 B_m^2$$

Gubitke u željezu računamo uvijek na osnovu specifičnih gubitaka kod frekvencije 50 Hz i indukcije 1 T odnosno 1,5 T, koje treba za svaku kvalitetu lima posebno mjerenjem ustanoviti. Za druge indukcije i druge frekvencije izračunavamo ukupne gubitke u željezu pomoću jednadžbe

$$P_{Fe} = \left[P_{Fe, h_1} \frac{f}{50} B^x + P_{Fe, v_1} \left(\frac{f}{50} B \right)^2 \right] m_{Fe}$$

gdje je:

P_{Fe, h_1} = spec. gubici histereze kod 1 T i 50 Hz na 1 kg lima,

P_{Fe, v_1} = spec. gubici vrtložnih struja kod 1 T i 50 Hz na 1 kg lima.

Pošto se eksponent "x" razlikuje za razne kvalitete lima i razne iznose indukcije, ionako ne možemo točno izračunati gubitke, pa se kod općenitih proračunavanja gubitaka u željezu za razne pogonske prilike (uzevši u obzir da su gubici vrtložnih struja kod suvremenih limova maleni) služimo, jednadžbom:

$$P_{Fe} = P_{Fe1} \frac{f}{50} B^2 m_{Fe}$$

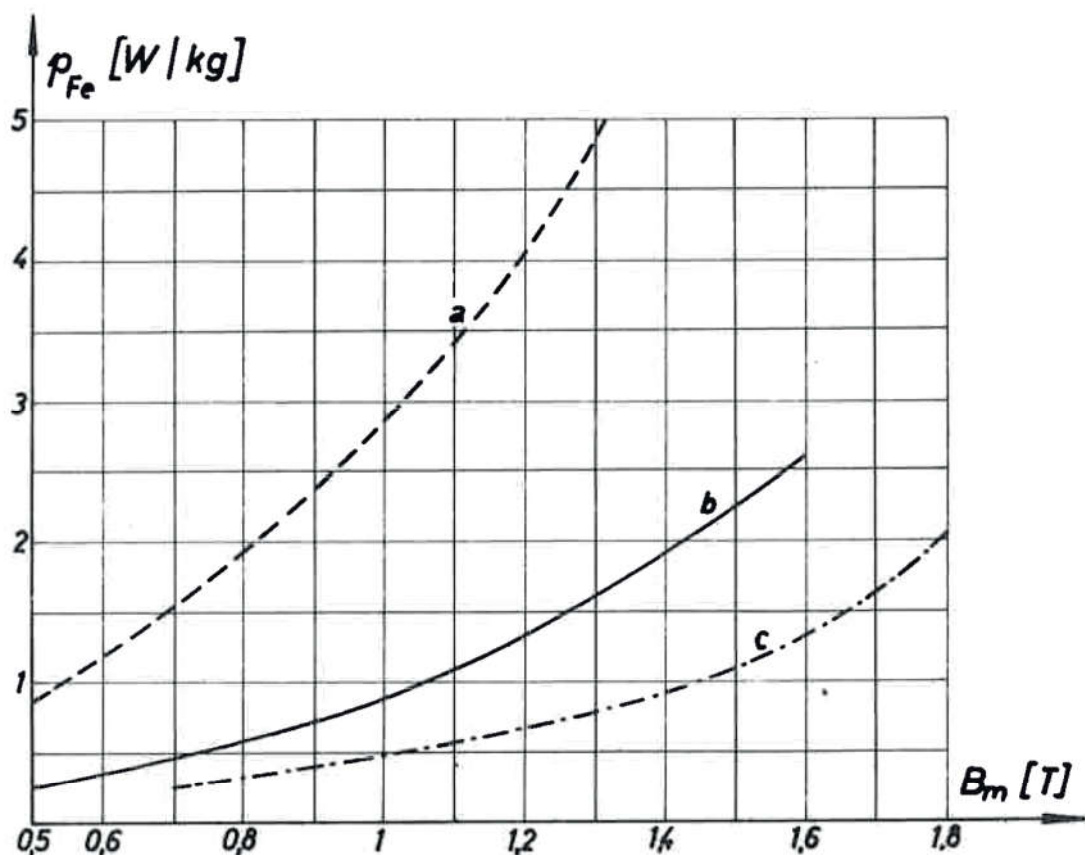
P_{Fe1} = spec. ukupni gubici u željezu kod 1 T i 50 Hz.

Ako, međutim, želimo točnije poznavati gubitke u željezu za neki konkretan slučaj, onda se služimo dijagramom s krivuljama gubitaka laboratorijski snimljenim za dotični transformatorski lim, kojega želimo kod gradnje transformatora upotrebiti. Takav dijagram specifičnih gubitaka u željezu, za razne vrijednosti indukcije uz konstantnu frekvenciju, prikazan je za razne kvalitete transformatorskih limova na sl. 2.31-3.

Poslije rata počeli su Amerikanci s produkcijom tzv. orijentiranih (hipersil-, tekstur-) limova, kod kojih se pomoću određenog tehnološkog procesa, tj. hladnim valjanjem i termičkom obradom, postiže molekularna orijentiranost u magnetskom pogledu u pravcu valjanja, tako da su specifični gubici kod magnetiziranja u tom pravcu znatno manji od specifičnih gubitaka klasičnih, toplo valjanih limova. Radi orijentiranosti u pravcu valjanja su gubici okomito na taj pravac još znatno veći od gubitaka klasičnih toplo valjanih limova. To, naravno, zahtijeva posebnu konstrukciju jezgre, tj. takovu konstrukciju, da silnice uvijek prolaze samo u pravcu valjanja.

Na sl. 2.31-3 prikazan je dijagram prosječnih specifičnih gubitaka za toplo valjane limove, kakovi se danas normalno upotrebljavaju u serijskoj proizvodnji. Gubici su snimljeni Epsteinovim aparatom kod frekvencije 50 Hz. Stvarni gubici mogu odstupati na gore i na dolje od vrijednosti koje daju te krivulje. Praktički računamo kod tih poljih toplo valjanih limova sa 0,93 W/kg, a kod hladno valjanih limova sa 0,48 W/kg. Na sl. 2.31-4 prikazane su za iste limove krivulje "prvog magnetiziranja" (djevičanske krivulje), tj. krivulje na kojima leže vrhovi petlji histereze za razne maksimalne indukcije. Krivulje a) odnose se na slabo legirani dinamo-lim "Falck" (Italija). Krivulje označene sa b) prikazuju karakteristike toplo valjanog transformatorskog lima Armco Tran-core, dok krivulje c) pripadaju hladno valjanom limu Armco oriented M-6X.

Kvalitet transformatorskih limova nije određen samo gubicima, već i krivuljom magnetiziranja tj. indukcijom koju on postizava kod određene jakosti polja, odnosno određenih amperzavoja po metru. I kod toga se u još većoj mjeri pokazuje prednost hladno va-



Sl. 2.31-3

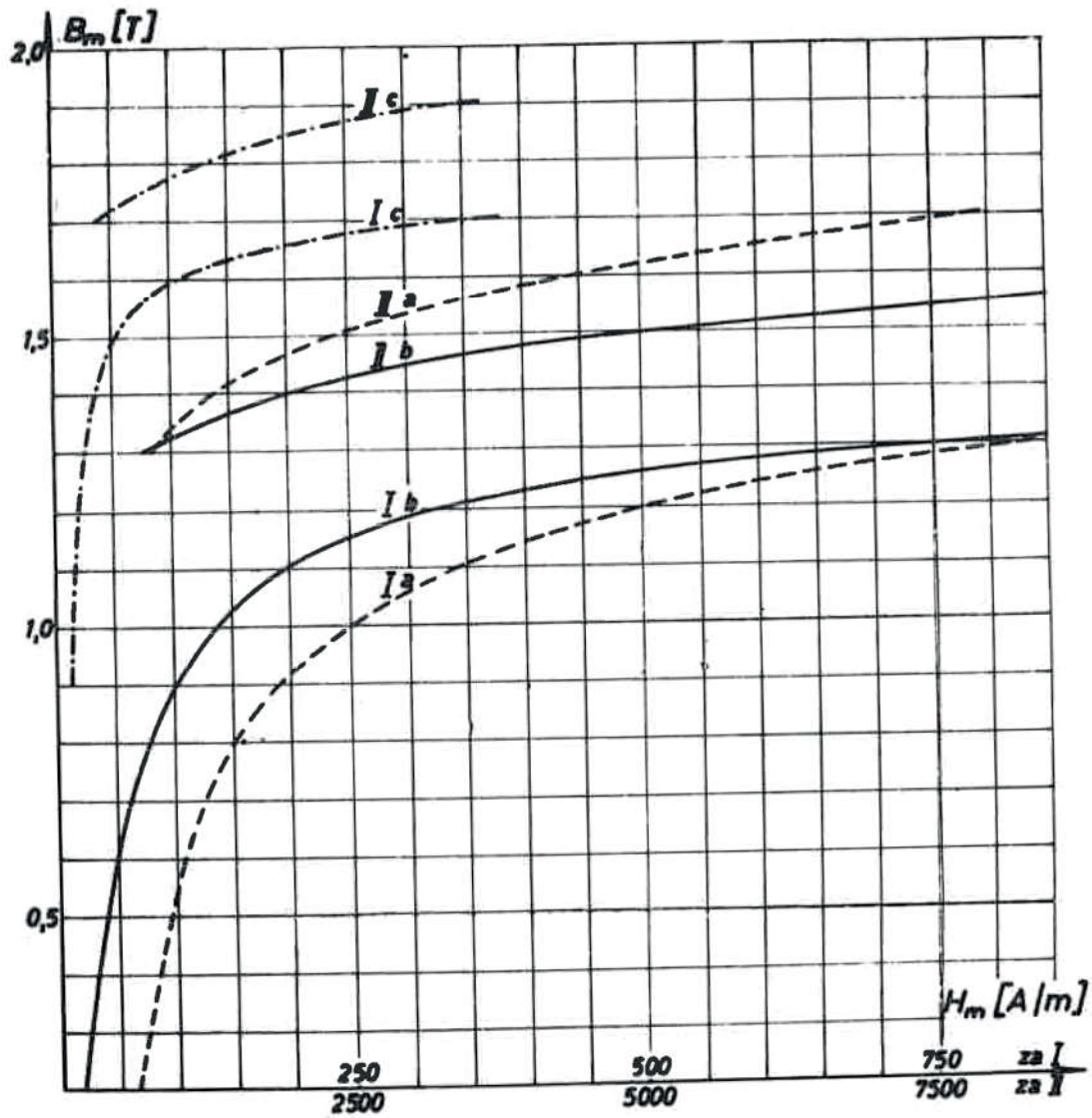
Specifični gubici u željezu

- a) dinamo lim "Falck" (Italija) debljine 0,5 mm
- b) toplo valjani transform.lim "Armco Tran-core 6" deblj. 0,356 mm
- c) orijentirani lim "Armco-oriented M-6X" debljine 0,356 mm

ljanih limova, koji imaju strmiju krivulju magnetiziranja nego normalni limovi. Mala struja magnetiziranja, kao i mali specifični gubici, dozvoljavaju gradnju transformatora sa većom indukcijom, pa se tako smanjuje težina transformatora.

U zadnje vrijeme se već dosta piše o uspješnim laboratorijskim pokusima, da se izrade orijentirani transformatorski limovi, koji imaju povoljna svojstva u dva okomita pravca, a tek u pravcu treće osi koordinatnog sistema imaju povećane gubitke. Međutim, još nije uspjelo da se proizvodnja ovakvih limova osvoji i u industrijskom smislu.

Utjecaj vrtložnih struja možemo prenijeti i na statičku petlju tok-struja, te kao rezultat dobijemo proširenje te petlje, kao što je to načrtano na sl.2.31-1. Ako smo imali jezgru konstantnog presjeka, možemo tok preračunati na indukciju, a struju na jakost magnetskog polja i tako dobijemo dinamičku petlju histereze lima. Dinamička petlja histereze je, prema tome, šira od statičke, a

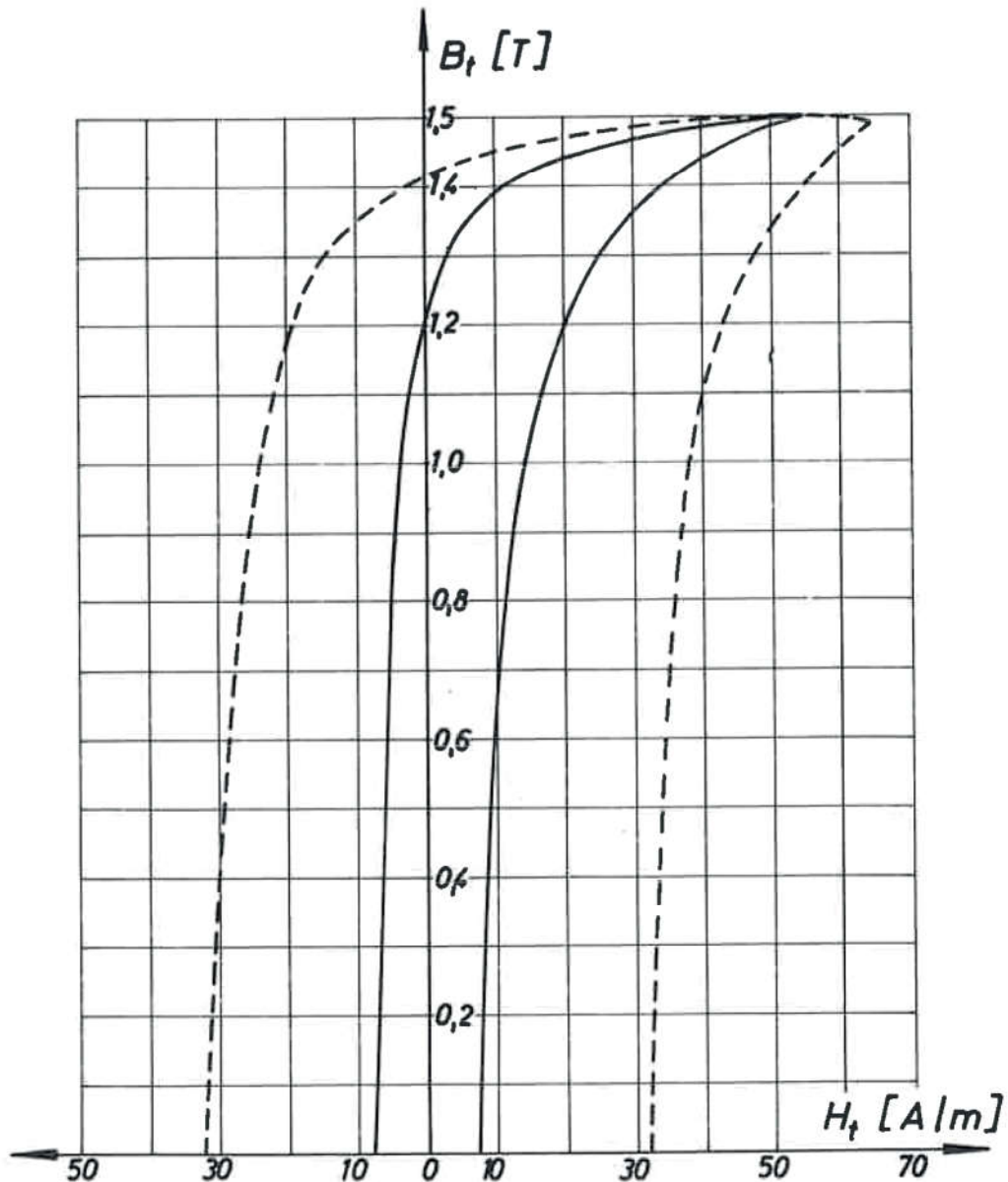


Sl. 2.31-4

Krivulje prvog magnetiziranja

- a) dinamo lim "Falck" (Italija) debljine 0,5 mm
- b) toplo valjani transform.lim "Armco Tran-core 6" deblj. 0,356 mm
- c) orijentirani lim "Armco-oriented M-6Y" debljine 0,356 mm

njezina površina je jednaka ukupnim gubicima u željezu za vrijeme jedne periode. Kako vrtložne struje rastu sa kvadratom frekvencije to će sa povećanjem frekvencije rasti i širina dinamičke petlje histereze. Deblji limovi imaju također širu dinamičnu petlju histereze. Na sl.2.31-5a prikazana je statička i dinamička petlja lima Armco-oriented M-6X i to za lim debljine 0,356 mm i frekvenciju 60 Hz, dok su na sl.2.31-5b prikazane petlje lima Armco Tran-core 6 snimljene kod 50 Hz za lim debljine 0,356 mm.



Sl. 2.31-5a

Petlje histereze lima "Armco-oriented M-6X"

- a) statička petlja histereze
- b) dinamička petlja za lim debljine 0,356 mm snimljena kod 60 Hz

Iz tih krivulja vidimo kako su kod orijentiranih limova mali gubici histereze, te da veći dio gubitaka predstavljaju gubici vrtložnih struja, koji su približno isti kao i kod toplo valjanih limova. Očito je, također, da se ubuduće značajnije smanjenje gubitaka može postići još samo smanjivanjem gubitaka vrtložnih struja.

Dinamičke petlje histereze možemo snimati direktno oscilografskim putem, i to tako da na horizontalni otklonski sistem oscilografa dovedemo pad napona, što ga čini struja magnetiziranja na jednom radnom otporu, a na vertikalni sistem za $\pi/2$ zaokrenutu elektromotornu silu. Postoje također i druge preciznije metode.

Iz dosadašnjeg izlaganja slijedi, da, ako je napon mreže $u = \sqrt{2} U \cos \omega t$, za struju magnetiziranja željeza i_{Fe} vrijedi slijedeći izraz :

$$i_{Fe} = \sqrt{2} (I_1' \sin \omega t + I_3' \sin 3\omega t + I_5' \sin 5\omega t + \dots + I_1'' \cos \omega t + I_3'' \cos 3\omega t + I_5'' \cos 5\omega t + \dots)$$

Struja I_1'' je jedina radna komponenta, tj. jedino ona može sa naponom mreže dati neki učin. Njena efektivna vrijednost je jednaka sumi efektivnih vrijednosti struje histereze I_h i struje I_v , koja nadomješta gubitke vrtložnih struja u jezgri.

$$I_1'' = I_h + I_v$$

Ta struja iznosi :

$$I_1'' = \frac{P_{Fe}}{E_1}$$

Struja I_1' je čisto jalova struja, koja ne povećava učin struje magnetiziranja, nego samo njenu efektivnu vrijednost. Već je iz Osnova elektrotehnike poznato, da neki radni učin mogu dati samo izmjenični naponi i struje koji su iste frekvencije. Prema tome, viši harmonici ne mogu sa naponom mreže dati nikakav radni učin, nego samo povećavaju efektivnu vrijednost struje magnetiziranja. Oni, dakle, djeluju kao jalova struja. Zato ih zajedno sa osnovnom jalovom komponentom grupiramo u tzv. "čistu struju magnetiziranja željeza", čija je efektivna vrijednost jednaka

$$I_{Fe} = \sqrt{I_1'^2 + I_3'^2 + I_5'^2 + I_1''^2 + I_3''^2 + I_5''^2 + \dots}$$

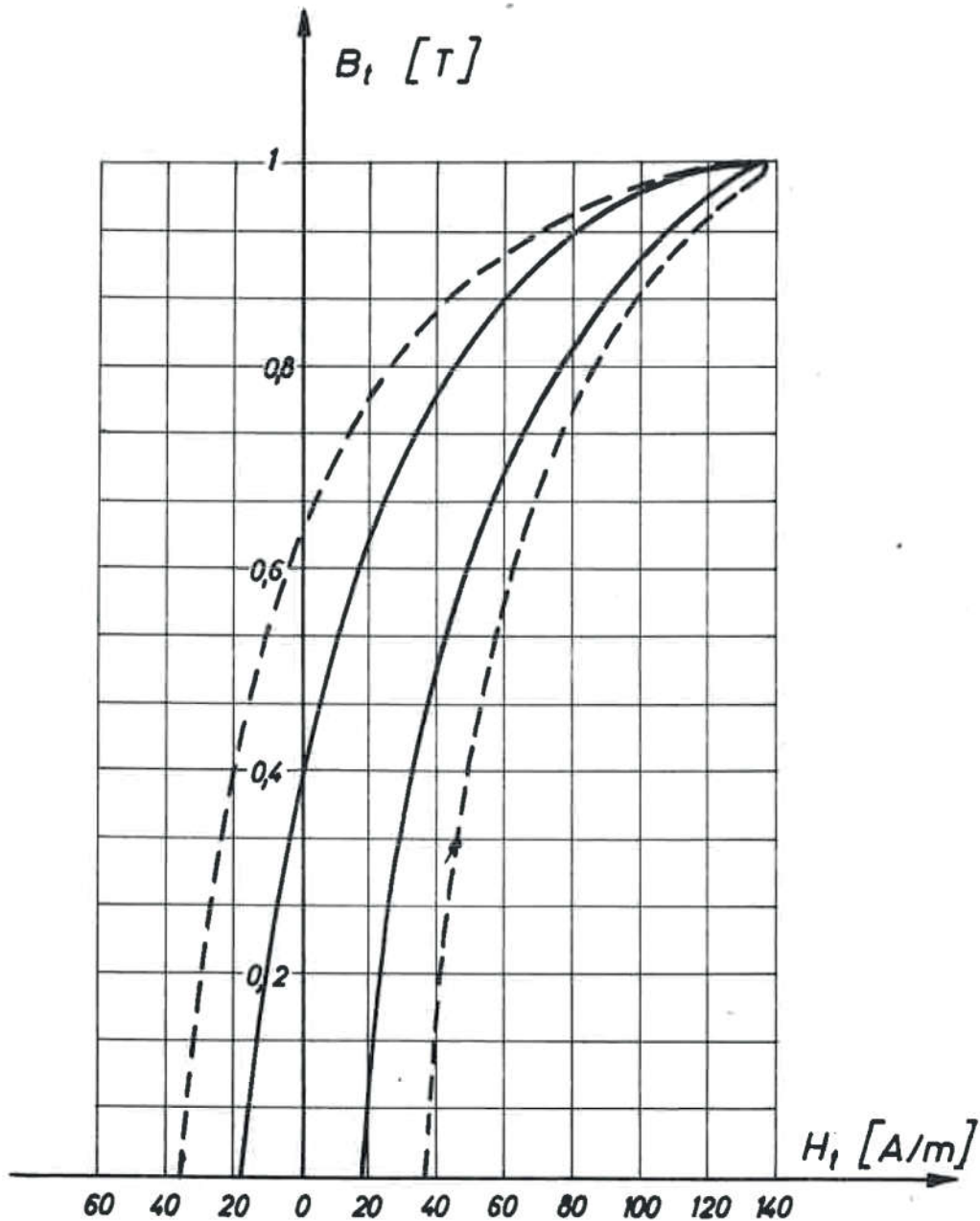
Kako je efektivna vrijednost y -tog harmonika općenito jednaka :

$$I_y = \sqrt{I_y'^2 + I_y''^2}$$

to za efektivnu vrijednost čiste struje magnetiziranja željeza dobijemo iznos :

$$I_{Fe} = \sqrt{I_1'^2 + I_3'^2 + I_5'^2 + \dots}$$

Na taj način definirana je radna i jalova komponenta struje magnetiziranja željeza.



Sl. 2.31-5b

Petlje histereze lima "Armco Tran-core 6"

a) statička petlja histereze

b) dinamička petlja za lim debljine 0,356 mm snimljena kod 50 Hz

Jakost magnetskog polja u zračnom rasporu jezgre je proporcionalna magnetskoj indukciji, odnosno toku, pa će struja magnetiziranja zračnog raspora i_σ biti u fazi sa tokom. Ta struja predstavlja, dakle, jalovu komponentu i možemo je izraziti jednačinom:

$$i_{\sigma} = \sqrt{2} I_{\sigma} \sin \omega t$$

gdje je :

$$I_{\sigma} = \frac{B_m \cdot \sigma}{\sqrt{2} \cdot \mu_s \cdot W_1}$$

Ta struja je u fazi sa osnovnim harmonikom čiste struje magnetiziranja željeza. Efektivna vrijednost čiste struje magnetiziranja transformatora I_{μ} iznosi dakle :

$$I_{\mu} = \sqrt{(I_1' + I_{\sigma})^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

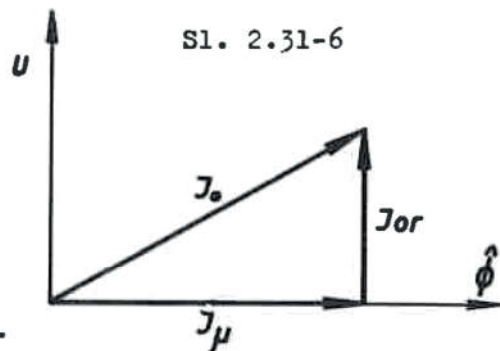
Zračni raspor nije imao nikakvog utjecaja na radnu komponentu struje magnetiziranja. Efektivna vrijednost radne komponente je prema tome jednaka :

$$I_{or} = I_h + I_v = \frac{P_{Fe}}{E_1}$$

Efektivna vrijednost ukupne struje magnetiziranja iznosi :

$$I_{\sigma} = \sqrt{I_{or}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{(I_h + I_v)^2 + (I_1' + I_{\sigma})^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots}$$

Iz ove jednadžbe vidimo da struju magnetiziranja možemo predložiti i pomoću vektorskog dijagrama (vidi sl. 2.31-6) i to pomoću dviju komponenti. Jedna komponenta je čisto radna i sinusna, a onu drugu, jalo-
vu, možemo predložiti sa ekvivalentnom sinusnom strujom iste efektivne vrijednosti, koju ima stvarna nesinusoidna struja I_{μ} . Struja magnetiziranja, koju dobijemo vektorskim zbrajanjem, ima istu efektivnu vrijednost i isti srednji učin kao i stvarna struja magnetiziranja, te prema tome potonju točno nadomješta, iako je račun pomoću vektorskog dijagrama normalno moguć samo za izmjenične veličine iste frekvencije. U analizi slučajeva, kada se struji magnetiziranja dodaje neka druga komponenta osnovnog harmonika, kao kod opterećenja transformatora, predstavljanje struje magnetiziranja pomoću ekvivalentne sinusne struje nije više točno. U stvarnosti bi se samo osnovni harmonik struje magnetiziranja morao vektorski zbrojiti sa dodatnom strujom, pa bi drugi korijen iz sume kvadrata efektivne vrijednosti tako dobivenog osnovnog harmonika i kvadrata efektivnih vrijednosti viših harmonika dao efektivni iznos rezultantne primarne struje. To bi bio strogo egzaktni račun, ali on zahtjeva poznavanje viših harmonika struje magnetiziranja. Kako nam ovi obično nisu poznati, zadovoljavamo se da struju magnetiziranja nadomjestimo ekvivalentnom sinusnom strujom, koju možemo vektorski zbrajati sa ostalim sinusnim strujama. Kako struja magnetiziranja iznosi samo 4-8 % nominalne struje, takav aproksimativni račun



će u većini slučajeva biti zadovoljavajući.

Ipak i takav račun zahtjeva nadomjesne sinusne čiste struje magnetiziranja. Na gotovom transformatoru je možemo bez teškoća izmjeriti, ali prilikom projektiranja transformatora ona bi se mogla izračunati samo vrlo dugotrajnim računom tj. izračunavanjem vremenske krivulje struje magnetiziranja kao na sl.2.31-1 i traženjem veličina viših harmonika pomoću Fourierove analize. Da se to izbjegne, uveden je pojam efektivne vrijednosti magnetskog polja u jezgri H_{ef} , definiran izrazom :

$$H_{ef} = \frac{W \cdot I_{\mu Fe}}{l_{Fe}}$$

gdje je $I_{\mu Fe}$ = čista struja magnetiziranja željeza
 l_{Fe} = srednja duljina silnica u željezu .

Efektivna vrijednost magnetskog polja nam omogućuje jednostavan račun struje magnetiziranja, a može se lako izmjeriti Epsteinovim aparatom, tj. mjerenjem efektivne vrijednosti struje magnetiziranja i gubitaka kod raznih indukcija u jezgri. Slika 2.31-7 nam daje krivulje efektivne vrijednosti magnetskog polja za limove, čije smo karakteristike dali.

Slično kao i kod gubitaka, može se efektivna vrijednost magnetskog polja u jezgri, odnosno čista struja magnetiziranja, izraziti pomoću jalove snage potrebne za magnetiziranje kilograma lima (VAr/kg) za određenu indukciju i određenu frekvenciju. Ako označimo sa :

S_{Fe} = presjek jezgre (m^2)
 l_{Fe} = srednja duljina silnice u jezgri (m)
 m_{Fe} = masa jezgre (kg)
 γ_{Fe} = specifična masa jezgre (za željezo $7,6 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$)
 H_{Fe} = efektivna vrijednost magnetskog polja (A/m)

možemo postaviti jednadžbu :

$$P_{Fe,jB} = \frac{E \cdot I_{\mu Fe}}{m_{Fe}} = \frac{4,44 \cdot f \cdot S_{Fe} B_m \frac{W \cdot I_{\mu Fe}}{l_{Fe}} \cdot l_{Fe}}{\gamma_{Fe} \cdot S_{Fe} \cdot l_{Fe}}$$

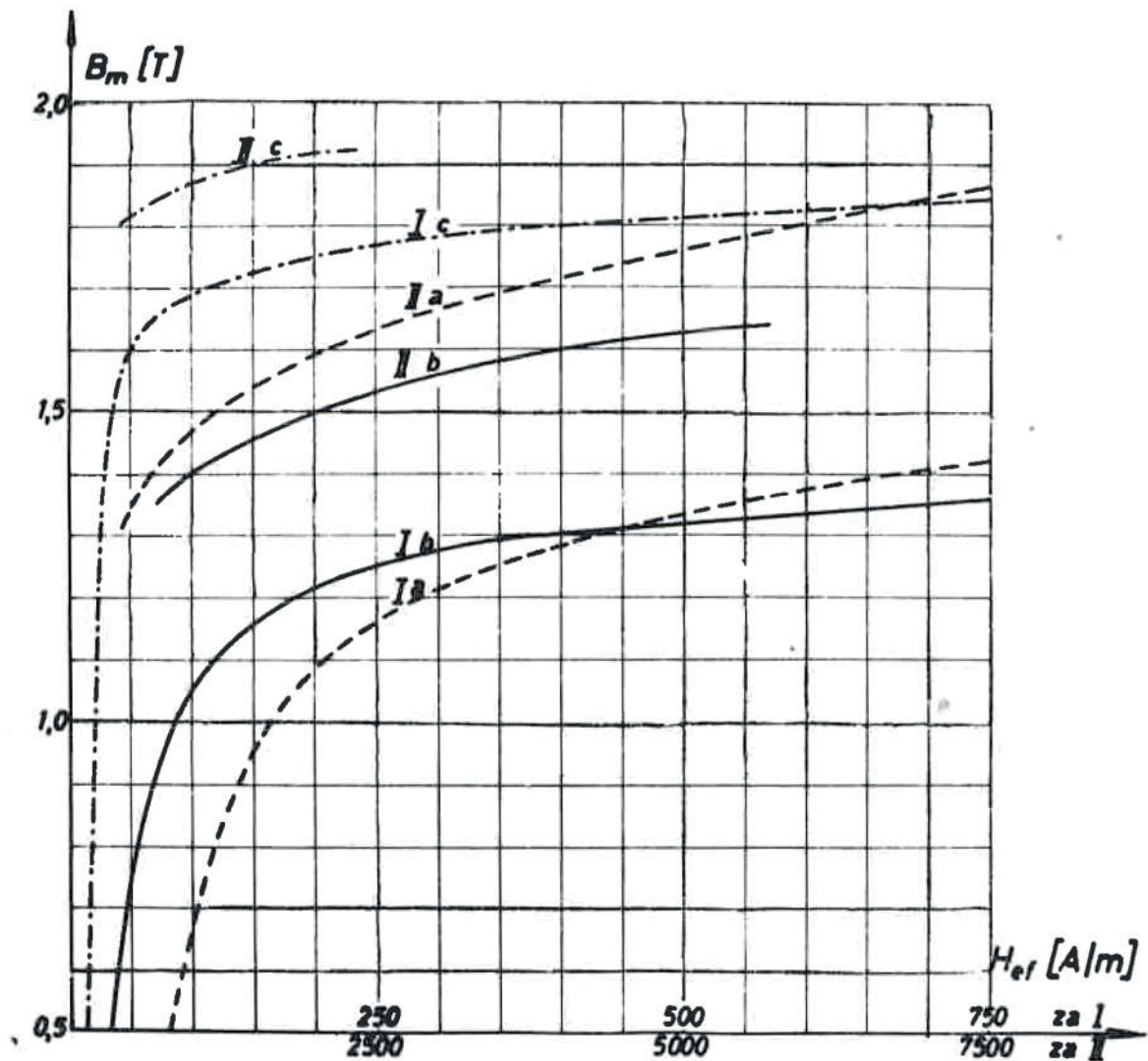
gdje je $P_{Fe,jB}$ specifična jalova snaga kod indukcije B_m i frekvencije f (VAr/kg) . Sredjivanjem jednadžbe dobijemo uz frekvenciju 50 Hz :

$$P_{Fe,jB} = \frac{4,44 \cdot 50 \cdot B_m H_{ef}}{7600} = 0,0292 \cdot B_m \cdot H_{ef} \quad [T, A/m]$$

Tako možemo npr. izračunati pomoću jakosti polja dobivenih za $B_m = 1 \text{ T}$ iz krivulja za toplo i hladno valjani lim na sl.2.31-7 specifične gubitke jalove snage :

za normalni lim : $p_{Fe,j1} = 0,0292 \cdot 85 \cdot 1 = 2,48 \text{ VAr/kg}$

za orijentirani lim : $p_{Fe,j1} = 0,0292 \cdot 20 \cdot 1 = 0,58 \text{ VAr/kg}$



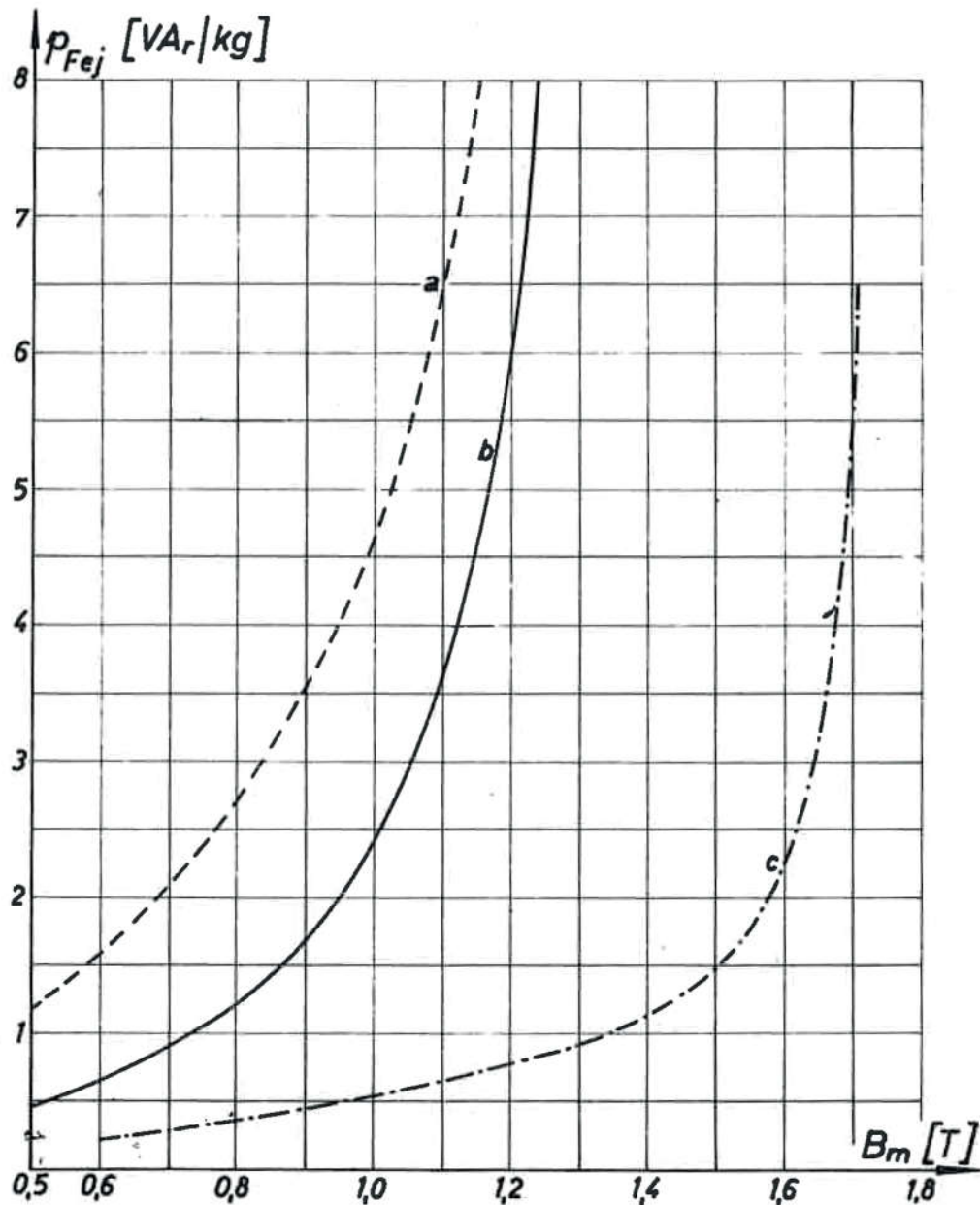
Sl. 2.31-7

Efektivna vrijednost magnetskog polja na sinusni tok

- a) dinamo lim "Falok" (Italija) debljine 0,5 mm
- b) toplo valjani trafo-lim "Armco Tran-core 6" debljine 0,356 mm
- c) orijentirani lim "Armco-oriented M-6X" debljine 0,356 mm

Na sl. 2.31-8 su dani dijagrami specifične jalove snage za iste materijale kao i naprijed. Iz tog dijagrama možemo za razne vrijednosti indukcije B_m izračunati potrebnu jalovu snagu za magnetiziranje jezgre, a zatim jalovu struju magnetiziranja željeza :

$$I_{Fe} = \frac{P}{E}$$



Sl. 2.31-8

Specifična jalova snaga za sinusni tok

- a) dinamo lim "Falck" (Italija) debljine 0,5 mm
- b) toplo valjani trafo-lim "Armco Tran-core 6" debljine 0,356 mm
- c) orijentirani lim "Armco-oriented M-6X" debljine 0,356 mm

Jedina mana ovog računa je u tome, što se uticaj zračnog raspore ne može egzaktno uzeti u račun. Za izračunavanje ukupne jalove struje magnetiziranja služimo se jednažbom :

$$I_{\mu} = I_{\mu Fe} + I_{\sigma}$$

koja, kako je naprijed objašnjeno, nije egzaktna ali je za naš račun dovoljno točna. Zračni raspor, ionako mnogo ovisi o načinu proizvodnje, sili kojom stežemo jezgru i drugim faktorima, koje ne možemo unaprijed predvidjeti, pa je struja I_{σ} već i sama prilično netočno izračunata. Osim toga, jedan empirijski faktor korekcije se također mora uzeti iz razloga, što svojstva lima odstupaju od prosječnih vrijednosti, koje su dane na dijagramima, a osim toga, ona se još znatno mijenjaju prilikom obrade lima. Osim toga, postoji znatan utjecaj pritiska stezanja jezgre, uglova na jezgri, prekrivanja u zračnom rasporu itd. Ipak su te krivulje korisne za uspoređivanja magnetskih kvaliteta raznih limova, kao i za približno izračunavanje efektivne vrijednosti struje magnetiziranja transformatora.

3.32 Gubici u bakru

Gubici u bakru transformatora određeni su jednažbom

$$P_{Cu} = P_{Cu1} + P_{Cu2} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

Radne otpore dobijemo jednažbom

$$R = \varrho \frac{l_{cu}}{q} [\Omega]$$

l_{cu} = duljina vodiča u m

q = presjek vodiča u m^2

ϱ = specifični otpor vodiča kod $20^\circ C$

Za namote transformatora dolazi praktički isključivo u obzir elektrolitički bakar koji ima $\varrho = 0,0175 \cdot 10^{-8} [\Omega m^2/m]$. Aluminijski se još uvijek ekonomski ne isplati, pa nailazimo na primjenu aluminijskog samo u iznimnim slučajevima, npr. u slučaju rata u onim zemljama, koje oskudjevaју bakrom.

Razvijanjem gubitaka, tj. Joulove topline u bakru transformatora, raste temperatura bakra, a time i otpor prema jednažbi :

$$R_t = R_H (1 + \alpha \Delta \theta)$$

$$\Delta \theta = \vartheta_t - \vartheta_H$$

gdje je :

ϑ_t = temperatura toplog bakra, kod koje otpor iznosi R_t

ϑ_{hl} = temperatura hladnog bakra, kod koje otpor iznosi R_{hl}

za bakar $\alpha=0,0039$

za aluminij $\alpha=0,004$

Kao " ϑ_{hl} " se obično uzima temperatura od 20°C . Na ovu temperaturu se odnose i gornji podaci o specifičnom otporu " ρ " kao i podaci o temperaturnom koeficijentu " α ".

Obrnuto, može se izračunavati temperatura bakra u toplom stanju mjerenjem otpora u hladnom stanju " R_{hl} " i otpora u toplom stanju " R_t " prema jednadžbi :

$$\vartheta_t = \frac{R_t - R_{hl}}{R_{hl}} (235 + \vartheta_{hl}) + \vartheta_{hl}$$

U tehnici volimo računati sa specifičnim vrijednostima, pogotovo sa onima, koje se mnogo ne mijenjaju. Tako npr. znamo iz iskustva, da se specifična opterećenja bakra kod nominalne struje, obzirom na dopuštena zagrijavanja i gubitke, mnogo ne mijenjaju :

kod suhih transformatora $\Gamma = 1,5 - 2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$

kod uljnih transformatora $\Gamma = 2,5 - 3,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$

Iz specifičnog opterećenja bakra " Γ " možemo izračunati specifične gubitke u bakru :

$$P_{cu} = I^2 \cdot R = (\Gamma \cdot q)^2 \cdot \rho \frac{l_{cu}}{q}$$

$$m_{cu} = \gamma_{cu} \cdot l_{cu} \cdot q$$

$$\frac{P_{cu}}{m_{cu}} = \Gamma^2 \cdot \frac{\rho}{\gamma_{cu}}$$

P_{cu} = gubici u bakru u W

m_{cu} = masa bakra u kg

γ_{cu} = specifična masa bakra = $8,92 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{P_{cu}}{m_{cu}} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6}}{8,92 \cdot 10^3} \cdot \Gamma^2 = 1,96 \cdot 10^{-12} \Gamma^2 \quad \text{kod } 20^\circ \text{C}$$

$$\frac{P_{cu}}{m_{cu}} = \frac{0,0175(1+0,0039 \cdot 55) \cdot 10^{-6}}{8,92 \cdot 10^3} \cdot \Gamma^2 = 2,4 \cdot 10^{-12} \Gamma^2 \quad \text{kod } 75^\circ \text{C}$$

Po VDE propisima se uzima da bakar namota u toplom pogonskom stanju transformatora ili stroja ima temperaturu 75°C , ako ta temperatura nije točno ustanovljena.

Pomoću gornje jednadžbe možemo iz gubitaka i specifičnog opterećenja u bakru transformatora izračunati težinu bakra i obrnuto. Ako nam specifično opterećenje bakra nije poznato, možemo barem od prilike računati.

Radni pad napona i gubici u bakru su određeni jednadžbama :

$$U_r = I \cdot R \quad P_{cu} = I^2 \cdot R = U_r \cdot I$$

Ove vrijednosti volimo radi preglednosti izražavati u postocima nominalnih vrijednosti, tj. onih vrijednosti, za koje je transformator gradjen.

$$u_r = \frac{100 \cdot U_r}{U_n} = \frac{100 \cdot I_n \cdot R}{U_n} \%$$

$$P_{cu} = \frac{100 \cdot P_{cu}}{P_n} = \frac{100 \cdot I_n^2 \cdot R}{U_n \cdot I_n} = \frac{100 \cdot I_n \cdot R}{U_n} \%$$

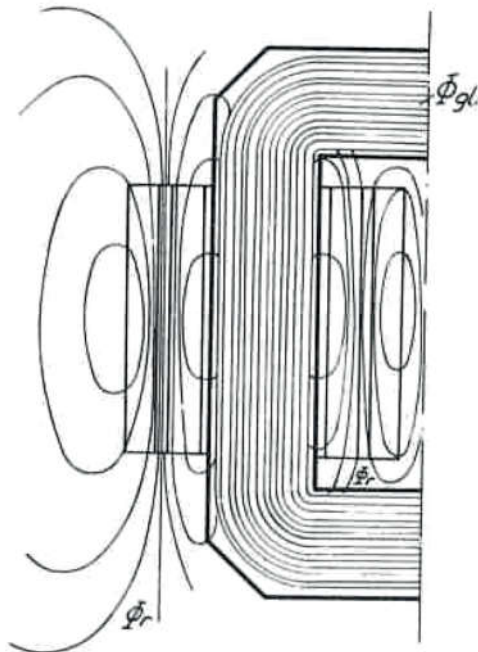
Dolazimo do interesantnog zaključka da je procentualna vrijednost gubitaka u namotu jednaka procentualnoj vrijednosti radnog pada napona u namotu.

$$P_{cu} \% = u_r \%$$

2.4 Rasipanja

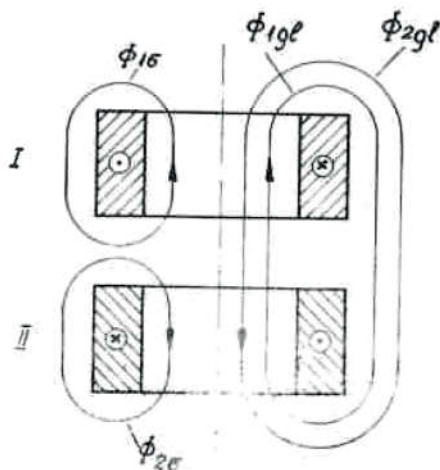
Magnetske silnice se ne zatvaraju samo kroz željeznu jezgru transformatora, kako smo to kod idelnog transformatora pretpostavljali, već i kroz zrak, odnosno, bolje rečeno, svugdje oko transformatora. U sl. 2.4-1 prikazana je jedna polovina jednofaznog transformatora u presjeku sa ucrtanim silnicama.

Silnice, koje se zatvaraju kroz zavoje primarnog i sekundarnog svitka, označujemo kao glavni tok " Φ_{gl} ", jer taj tok predstavlja nosioca elektromagnetske veze između oba svitka. Silnice, koje se zatvaraju samo oko zavoja primarnog svitka, označujemo kao rasipni tok primarnog svitka " Φ_{pr} ", koji prouzrokuje induciranje protunapona samo u primarnom svitku. Taj protunapon tretiramo kao induktivni pad napona u primarnom svitku, jer se taj napon ne pre -



Sl.2.4-1
Magnetsko polje opterećenog transformatora

" Φ_r ", ili samo oko svih zavoja sekundarnog namota " Φ_{2r} ", ili pak samo oko svih zavoja primarnog i sekundarnog namota " Φ_{1r} ",



Sl. 2.4-2
Predstavljanje magnetskog polja transformatora pomoću "nadmjesnih tokova"

naša na sekundarnu stranu pa prema tome predstavlja izgubljeni napon. To vrijedi analogno i za rasipni tok " Φ_{2r} ".

Kako vidimo iz sl.2.4-1 rasipne silnice se ne zatvaraju oko svih zavoja pripadajućeg namota, pa bi trebalo u namotu inducirani napon računati :

$$e = - \frac{d\Sigma(w_r \Phi_{rt})}{dt}$$

Međutim, praktički si pojednostavimo fizikalnu sliku rasipnog toka time, da računamo sa jednim fiktivnim ekvivalentnim rasipnim tokom " Φ_r ", koji inducira isti protunapon kao stvarni rasipni tok :

$$\frac{d\Sigma(w_r \Phi_{rt})}{dt} = w \frac{d\Phi_r}{dt}$$

Prema tome dobijemo jednostavnu fizikalnu sliku glavnog toka i rasipnih tokova prema sl. 2.4-2. U sl.2.4-2 prikazani su dakle fiktivni tokovi, kojih silnice idu ili samo oko svih zavoja primarnog namota

Φ_{1gt} = momentana vrijednost primarnog dijela glavnog toka, tj. koji obuhvaća sve zavoje primarnog i sekundarnog namota u slučaju da samo kroz primarni namot teče struja i_1 ;

Φ_{2gt} = glavni tok za slučaj da samo kroz sekundarni namot teče struja i_2 ;

Φ_{1rt} = primarni rasipni tok ;

Φ_{2rt} = sekundarni rasipni tok .

Ukupni tok, za slučaj da teče samo primarna struja, iznosi

$$\Phi_{1glt} + \Phi_{1\sigma t}$$

Umjesto da računamo sa tokovima, možemo računati sa primarnim induktivitetom, koji je jednak ukupnom ulančenju toga toka kod struje 1 A :

$$L_1 = \frac{(\Phi_{1glt} + \Phi_{1\sigma t}) W_1}{i_1} \quad (2.4-3)$$

Ulančenje glavnog toka primara sa zavojima sekundara, kod struje 1 A predstavlja medjuinduktivitet izmedju primara i sekundara.

$$M = \frac{W_2 \cdot \Phi_{1glt}}{i_1} = \frac{W_1 \cdot \Phi_{2glt}}{i_2} \quad (2.4-4)$$

Primarni rasipni induktivitet je jednak :

$$L_{1\sigma} = \frac{W_1 \cdot \Phi_{1\sigma t}}{i_1}$$

Iz jednadžbe (2.4-3) dobijemo:

$$\Phi_{1\sigma t} = \frac{L_1 \cdot i_1}{W_1} - \Phi_{1glt}$$

Ako ovamo stavimo " Φ_{1glt} " iz jednadžbe (2.4-4) dobijemo:

$$\Phi_{1\sigma t} = \frac{L_1 \cdot i_1}{W_1} - \frac{M \cdot i_1}{W_2} \quad (2.4-5)$$

Na taj način dobijemo konačno za primarni rasipni induktivitet:

$$L_{1\sigma} = \frac{W_1}{i_1} \left(\frac{L_1 \cdot i_1}{W_1} - \frac{M \cdot i_1}{W_2} \right) = L_1 - \frac{W_1}{W_2} M \quad (2.4-6)$$

Analognim računom dobijemo za sekundarni rasipni induktivitet :

$$L_{2\sigma} = L_2 - \frac{W_2}{W_1} M \quad (2.4-7)$$

dok su primarni i sekundarni rasipni otpori određeni sa :

$$X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}, \quad X_{2\sigma} = \omega L_{2\sigma} \quad (2.4-8)$$

Veličinu rasipnih tokova možemo karakterizirati na taj način, da rasipne tokove stavljamo u omjer sa glavnim tokovima. Pri tome se mogu činiti razni omjeri. Kako u tehnici proračunavanja transformatora nije važno koliki pad napona otpada na primarni a koliki na sekundarni namot, služimo se danas najčešće Blondelovim faktorom rasipanja, koji karakterizira ukupno rasipanje transformatora. Blondelov faktor je definiran jednadžbom :

$$\sigma = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 L_2} = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}$$

Kada nema rasipnih silnica onda je :

$$\frac{W_1}{W_2} L_1 = M = \frac{W_2}{W_1} L_2$$

odnosno

$$L_1 \cdot L_2 = M^2 ; \sigma = 0$$

Obrnuto, ako su sve silnice rasipne, onda je :

$$M = 0 ; \sigma = 1$$

2.5 Vektorski dijagram transformatora

2.51 Potpun vektorski dijagram

Ako nadopunimo vektorski dijagram idealnog transformatora prema sl.2.2-6 sa dodatnim uplivom radnog otpora, rasipanja i gubitaka u željezu, onda dobivamo potpuni vektorski dijagram transformatora prema sl.2.51-1a za induktivni teret, i 2.51-1b za kapacitivni teret.

Gubici u željezu se mogu pokrivati samo radnom strujom, koju primarni namot uzima iz mreže. Označimo li ovu radnu struju sa " I_{or} ", možemo postaviti jednadžbu:

$$I_{or} = \frac{P_{Fe}}{E_1}$$

Vektorskim zbrajanjem struje magnetiziranja " I_μ " i struje " I_{or} " dobijemo struju praznog hoda " I_0 ". Sa "praznim hodom" označujemo uvijek ono pogonsko stanje, kod kojeg je transformator primarno priključen na napon mreže, dok na sekundarnoj strani nije priključen nikakav teret

$$I_0 = I_\mu + I_{or} ; I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_{or}^2}$$

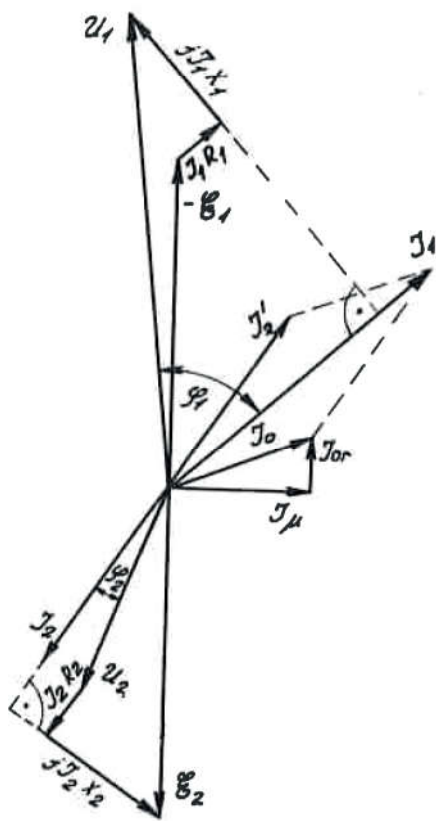
Zbog pada napona na radnim otporima i rasipnim induktivitetima, vrijediti će sada za primarni i sekundarni krug slijedeće jednadžbe:

$$U_1 + E_1 = I_1 R_1 + j I_1 X_1$$

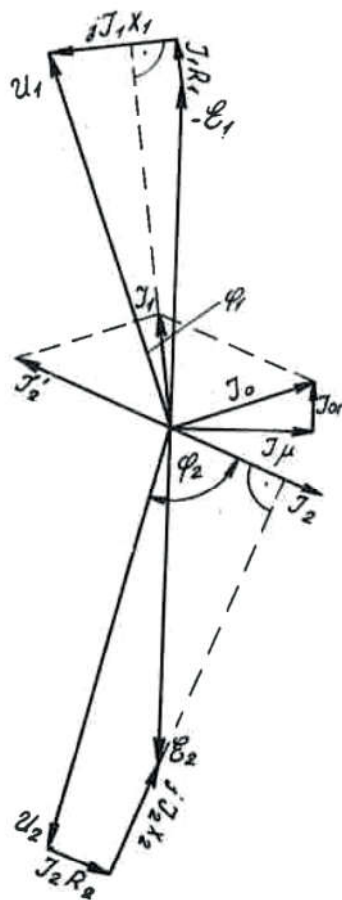
$$E_2 = U_2 + I_2 R_2 + j I_2 X_2$$

Po II Kirchhoffovom zakonu mora za jednu zatvorenu petlju biti suma elektromotornih sila jednaka sumi padova napona. U drugoj jednadžbi je U_2 stavljen među padove napona, jer je on jednak padu napona na otporu potrošača, tj.

$$U_2 = I_2 R + j I_2 X$$



Sl. 2.51-1a



Sl. 2.51-1b

Potpuni vektorski dijagram transformatora kod
a) induktivnog opterećenja
b) kapacitivnog opterećenja

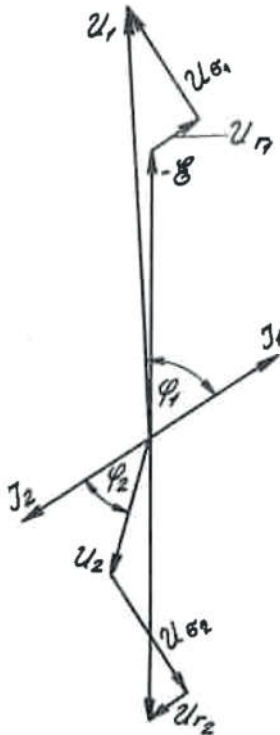
gdje su R i X –adni i induktivni otpor potrošača. Iz tih jednadžbi možemo jednostavno nacrtati vektorsku sliku napona za primarni i sekundarni krug. Vektor radnog pada napona " U_r " je isti na sl. 2.51-2 u pravcu vektora struje, dok vektor induktivnog pada napona, odnosno rasipnog pada napona " U_r ", prethodi za kut od 90° vektoru struje.

$$U_{r1} = I_1 R_1$$

$$U_{r2} = I_2 R_2$$

$$U_{o1} = j I_1 X_1$$

$$U_{o2} = j I_2 X_2$$



Sl. 2.51-2

Pojednostavnjeni vektorski dijagram transformatora

elektromotorna sila, tj. sekundarna elektromotorna sila uz $w_1 = w_2$ slijedeći iznos:

$$\mathcal{E}_2' = \frac{w_1}{w_2} \mathcal{E}_2$$

Reducirana sekundarna struja " $\mathcal{I}_2'$ " mora jednako djelovati na magnetsko polje kao i stvarna struja " $\mathcal{I}_2$ ". To će biti samo onda, ako su stvarni i reducirani amperzavoji jednaki. Mora dakle biti:

$$\mathcal{I}_2' \cdot w_1 = \mathcal{I}_2 \cdot w_2$$

odnosno

$$\mathcal{I}_2' = \frac{w_2}{w_1} \mathcal{I}_2$$

Izračunajmo kolika je reducirana sekundarna snaga:

$$P_2' = \mathcal{E}_2' \cdot \mathcal{I}_2' = \frac{w_1}{w_2} \mathcal{E}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1} \mathcal{I}_2 = \mathcal{E}_2 \cdot \mathcal{I}_2 = P_2$$

Reducirana sekundarna snaga je jednaka stvarnoj snazi. Računanje s reduciranim sekundarnim veličinama zadovoljava dakle i princip održavanja energije.

Praktički kod vektorskih dijagrama transformatora veće snage zanemarujemo struju praznog hoda " $\mathcal{I}_0$ ", jer ona iznaša tek koji postotak nominalne struje " $\mathcal{I}_n$ "; tada dobijemo pojednostavnjeni vektorski dijagram, koji je za induktivni teret prikazan na sl. 2.51-2. Kod ortanja vektorskih dijagrama pretpostavljali smo da je sekundarni broj zavoja jednak primarnom, što u stvari skoro nikad nije slučaj. Mi, međutim, možemo uvijek sve sekundarne vrijednosti preračunati tako, kao da sekundarni namot ima isti broj zavoja kao primarni namot, odnosno, kako to obično kažemo, možemo sekundarne vrijednosti reducirati na primarnu stranu, tako, da sve pogonske osobine transformatora ostaju nepromijenjene, tj. da gubici, procentualni padovi napona, težina i specifično opterećenje bakra na sekundarnoj strani ostanu nepromijenjeni. Sve na primarnu stranu reducirane vrijednosti označujemo s indeksom crtica gore (').

Reduciranje sekundarnih vrijednosti ne smije nam mijenjati primarne vrijednosti, a to će biti samo tada, ako magnetske prilike u transformatoru ostanu nepromijenjene. Ako je magnetski tok nepromijenjen, imat će reducirana sekundarna e-

Gubici u sekundaru, računani bilo s reduciranim ili stvarnim vrijednostima, moraju biti isti tj.

$$I_1^2 R_2 = I_2'^2 R_2' = \left(\frac{W_1}{W_2} I_2\right)^2 R_2'$$

te tako dobijemo za reducirani sekundarni otpor slijedeći iznos:

$$R_2' = R_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$$

Analogno dobijemo:

$$X_2' = X_2 \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2$$

To slijedi iz uvjeta, da relativni induktivni pad napona (pad napona izražen u postocima ukupnog napona) mora biti za reducirane kao i za stvarne vrijednosti isti.

Ako uz bilo koji odnos primarnog i sekundarnog broja zavoja računamo s ovako reduciranim sekundarnim vrijednostima, ostati će svi do sada pokazani vektorski dijagrami transformatora nepromijenjeni.

2.52 Smjer inducirano napona i oznake stezaljki

Pogledom na do sada uvedene vektorske dijagrame transformatora, lako bi se moglo u prvi mah pomisliti da je napon sekundarnih stezaljki " U_2 ", suprotnog polariteta u odnosu na primarni napon " U_1 ". Međutim, podrobnija analiza pokazuje, da to u našem slučaju nije tako. Prilikom ortanja vektorskih dijagrama pretpostavljano je da su primarni i sekundarni namotaj namotani u istom smjeru oko magnetske jezgre, te da prema tome promjenjivi magnetski tok inducira između početne i krajnje stezaljke primarnog i sekundarnog namota napon istog smjera. Zbog toga su u vektorskom dijagramu elektromotorne sile " $\mathcal{E}_1$ " i " $\mathcal{E}_2$ " ortane u istom smjeru. Na sl. 2.52-1 nacrtan je ponovno ovako namotani idealni transformator; za primarni krug mora po II Kirchhoffovom zakonu suma napona

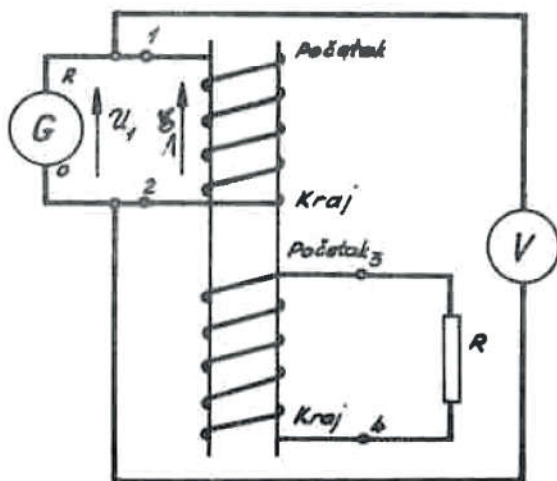
biti jednaka nuli; pa za idealni transformator vrijedi

$$U_1 + \mathcal{E}_1 = 0$$

odnosno

$$\mathcal{E}_1 = -U_1$$

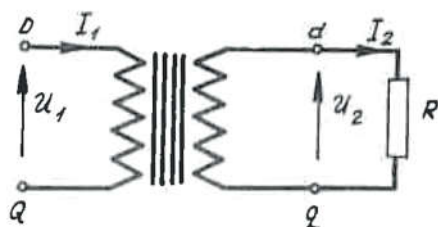
u našem strujnom krugu ima, dakle, " $\mathcal{E}_1$ " suprotan smjer nego " U_1 ". To znači, da ako npr. u određenom trenutku ima R stezaljka generatora pozitivni polaritet, mora i elektromotorna sila inducirana u primarnom namotaju imati na stezaljki "jedan" polarnost i tako držati ravnotežu



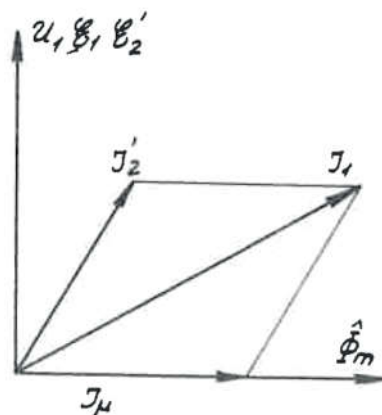
Sl. 2.52-1

primarnom naponu " U_1 ". Medjutim, za neki vanjski potrošač, npr. voltmetar, spojen na primarne stezaljke transformatora, su i generator i primarni namotaj paralelno spojeni, tj. djeluju kao dva paralelno spojena generatora istog napona. Za nekog vanjskog potrošača imaju dakle i napon generatora " U_1 " i inducirani protunapon primarnog svitka " $\mathcal{E}_1$ " isti smjer, tj. tjerali bi kroz potrošač struju u istom smjeru. Protuelektromotorna sila " $\mathcal{E}_1$ " je prema tome suprotna naponu " U_1 " samo u promatranom primarnom strujnom krugu, dok za vanjskog promatrača je " $\mathcal{E}_1$ " istog smjera kao i " U_1 ". U vektorskim dijagramima smo, misleći na zatvoreni strujni krug, crtali " $\mathcal{E}_1$ " suprotno od " U_1 ". Zatim smo, zbog istog smjera namatanja primarnog i sekundarnog namotaja, crtali i elektromotornu silu sekundarnog namotaja " $\mathcal{E}_2$ " u istom smjeru kao i " $\mathcal{E}_1$ ". Ovakvo nacrtani smjer sekundarne elektromotorne sile znači u stvarnosti to, da, kada bi sekundarna elektromotorna sila djelovala u primarnom krugu, djelovala bi jednako kao i primarna elektromotorna sila " $\mathcal{E}_1$ ", tj. djelovala bi protivno od primarnog napona " U_1 ". Za nekog vanjskog promatrača ima napon " U_2 " na otporu R, kojim je opterećen sekundar, kao i elektromotorne sile " $\mathcal{E}_1$ " i " $\mathcal{E}_2$ ", isti smjer kao i primarni napon " U_1 ". Iz svega ovoga vidimo, da uz isti smjer namatanja primarnog i sekundarnog namotaja, napon između početne i krajnje stezaljke (3 i 4) sekundarnog namotaja ima za vanjskog promatrača isti pokritet, ili bolje rečeno istu fazu, kao i napon između početne i krajnje stezaljke (1 i 2) primarnog namotaja. Govoreći o početnoj i krajnjoj stezaljci, mislimo pri tome o točki iz koje je započeto namatanje, i o točki u kojoj je ono završeno. U slučaju da su primarni i sekundarni namoti suprotno namotani, bili bi ti naponi protufazni. U elektrotehničkoj praksi postoje propisi, koji odredjuju, da se zbog lakšeg snalaženja označi na transformatoru koje su primarne a koje sekundarne stezaljke istog polariteta. U tu svrhu se, prema našim novim propisima, jednofaznim transformatorima označavaju primarne stezaljke sa velikim slovima D i Q, a sa istim malim slovima d i q sekundarne stezaljke, koje imaju isti polaritet kao i istoimene primarne stezaljke. Pri tome možemo stezaljke jednog namota označiti sasvim proizvoljno, ali će time biti potpuno određene oznake stezaljki drugog namota. Prema tome, između istoimenih stezaljki se induciraju naponi iste faze. Dodamo još i drugo pravilo: Struje, koje ulaze na istoimene stezaljke, magnetiziraju jezgru u istom pravcu. Ovo pravilo možemo lako provjeriti na sl.2.52-1. Ako bi po pravilima označivali stezaljke transformatora prikazanog na slici 2.52-1, očito je da bi sa D, Q d i q trebali označiti redom stezaljke 1, 2, 3, 4.

Uzmimo sada da imamo ispravno označen transformator prema slici 2.52-2. Treba nacrtati takav vektorski dijagram, u kojem će svi naponi između istoimenih stezaljki biti istofazni. Iz dosadašnjeg izlaganja je poznato da su kod idealnog transformatora naponi između istoimenih stezaljki istofazni. Da dobijemo istofaznost napona, potrebno je u prije nacrtanom vektorskom dijagramu idealnog transformatora sl.2.2-6 zaokrenuti vektore sekundarne strane za 180° . Tako se dobije dijagram prikazan na sl.2.52-3. Dijagram je crtan kao što je uobičajeno, sa sekundarnim vrijednostima reduciranim na primar. Na isti način, tj. zaokretanjem vektora sekundarne strane za 180° , dobijemo iz sl.2.52-1a potpuni vektorski dijagram transformatora opterećenog induktivnim potrošačem. Takav dijagram prika-



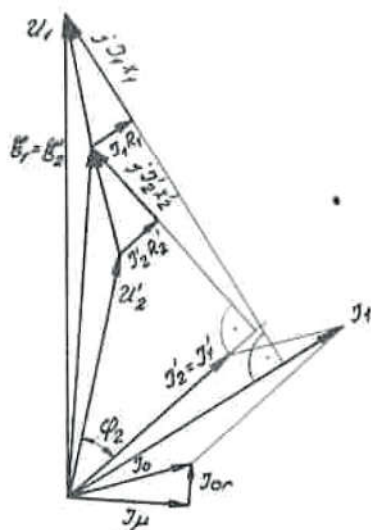
Sl. 2.52-2



Sl. 2.52-3

Vektorski dijagram idealnog transformatora kod induktivnog opterećenja

zuje sl.2.52-4 . Kada pogledamo ovako crtane vektorske dijagrame, može nam u prvom trenutku izgledati čudnovato što sekundarna struja " I_2 " ima isti smjer kao i primarna struja " I_1 ", pa možemo pomisliti da će obje struje magnetizirati jezgru u istom pravcu. Iz teorije transformatora znamo da primarna struja " I_1 " mora magnetizirati jezgru suprotno nego sekundarna struja " I_2 ", tj. protjecanja tih dviju struja moraju biti međusobno protufazna. Kakvu će međjutim, fazu morati imati primarne i sekundarne struje, da bi to doista bilo tako, ovisi o smjeru računa, koji smo na primaru i sekundaru uzeli kao pozitivan. Ako i na primaru i na sekundaru uzmemo za pozitivne takove struje, koje ulaze na istoimene stezaljke, i na primaru i na sekundaru, onda će struja morati biti protufazna, da bi i njihova protjecanja bila protufazna.



Sl. 2.52-4

Potpuni vektorski dijagram induktivno opterećenog transformatora

Ako pak uzmemo za pozitivnu onu struju koja na primaru ulazi, a na sekundaru izlazi iz istoimene stezaljke, onda moraju primarna i sekundarna struja biti u istoj fazi. Jedino ovaj drugi način je ispravan, ako hoćemo da nam sve veličine ostanu u ispravnoj fazi u odnosu na vanjskog promatrača, tj. ako hoćemo da zadržimo isti pozitivni smjer računa struje kroz potrošač, bez obzira, spojili mu iste priključke na primarne ili istoimene sekundarne stezaljke. Ako, naime, stezaljku 1 otpora R na slici 2.52-2 spojimo zajedno sa stezaljkom D primara i uzmemo kao pozitivnu onu struju koja ulazi na D stezaljku transformatora, morati ćemo također uzeti kao pozitivnu struju, koja ulazi na stezaljku 1 otpora, jer i transformator i otpor za vanjskog promatrača predstavljaju potrošača, a kroz njih, prema tome, mora izvor tjerati struju u istom smjeru. Taj

smjer struje kroz otpor mora biti zadržan i kada otpor spojimo na istoimene sekundarne stezaljke, pa dobijemo kao pozitivnu onu struju, koja izlazi iz istoimene sekundarne stezaljke. Takav smjer struje je i logičan, jer sekundarni namotaj predstavlja za potrošača izvor.

Iz cijelog ovog izlaganja vidimo da vektorski dijagram transformatora, crtan kao na sl. 2.52-4, iako je u stvarnosti nastao zakretanjem sekundarnih vektora za 180° zbog jednostavnijeg računa, ima i potpuno jasan fizikalni smisao. U elektrotehničkoj literaturi nailazimo na oba načina prikazivanja vektorskog dijagrama transformatora, no danas općenito prevladava tendencija da se zaba-ci onaj način, kod kojega je sekundarni dio dijagrama crtan dolje, jer nas to može navesti na krivo mišljenje da je sekundarni napon i kod namotaja, koji su namotani u istom smjeru, pomaknut za oko 180° od primarnog, tj. da mu je protufazan. Osim toga je dijagram prema sl. 2.52-4 fizikalno jasniji, jer iz njega vidimo očitito, kako odbijanjem gubitaka napona dolazimo od " U_1 " na " U_2 ". Ako na vektorskom dijagramu idealnog transformatora sl. 2.52-3 zanemarimo struju magnetiziranja, dobijemo dijagram iz kojega se može vidjeti, da idealni transformator s $w_1 = w_2$ bez gubitaka i bez struje magnetiziranja radi kao da ga uopće i nema. Crtanje vektorskog dijagrama prema sl. 2.52-4 ima još i tu prednost, da omogućuje jednostavnije prikazivanje transformatora pomoću ekvivalentne sheme, a također i olakšava račun. Pitanje polariteta primarnog i sekundarnog napona ne izgleda nam važno, kada transformator sam napaja nekog potrošača. Međutim, kod paralelnog rada transformatora, kao i kod transformatora u elektroničkim sklopovima, to pitanje ima neobično važnu ulogu, jer krivo spojen transformator može uništiti cijeli uređaj.

2.6 Analitički račun rada i ekvivalentna shema transformatora

U prethodnoj glavi razjašnjeni su odnosi polariteta primarnih i sekundarnih napona i struja kod transformatora. Pokazano je, kako jedna-džbe transformatora, pisane na prije uobičajen način, dovode do nepogodnog oblika vektorskog dijagrama transformatora, koji, osim što navodi na pomisao pogrešnog polariteta sekundarnog napona, ote-žava predstavljanje transformatora pomoću ekvivalentne sheme. Sada, kada su nam ti pojmovi jasni, napisati ćemo diferencijalne jedna-džbe transformatora, tako, da dovode do ispravnog rezultata.

Na sl. 2.52-2 prikazana je shema jednofaznog transformatora. Na stezaljkama svakog namota označeni su polariteti tih namota. Hoće-mo da se diferencijalne jedna-džbe napišu tako, da primarni i se-kundarni napon imaju istu fazu, te da se kao pozitivne računaju primarna struja koja ulazi na stezaljku "D" i sekundarna struja koja izlazi iz stezaljke "d" transformatora, što je u skladu s pojmom izvora i potrošača. U tom slučaju vrijedit će prema II. Kirchhoffovom zakonu za primarni i sekundarni krug sljedeće dife-rencijalne jedna-džbe:

$$u_1 + M \frac{di_2}{dt} - L_1 \frac{di_1}{dt} = R_1 i_1 \quad (2.6-1)$$

$$M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} = u_2 + R_2 i_2 \quad (2.6-2)$$

Jednadžbe smo napisali tako, da smo na lijevu stranu jednadžbe stavili elektromotorne sile, a na desnu stranu padove napona. U jednadžbi (2.6-1) računali smo član sa M pozitivno, jer ako struja i_2 raste, ona inducira na primaru takav napon, da poraste struja i_1 i poništi njene amperzavoje, a napon, koji povećava struju i_1 , moramo računati kao pozitivan. Protivno tome u induktivitetu L_1 se inducira napon, koji se protivi porastu struje, pa smo tome članu stavili negativni predznak. U jednadžbi (2.6-2) izvor napona predstavlja izraz $M di_1/dt$. On je pozitivan, jer napon koji se inducira kod porasta primarne struje je takav, da raste i sekundarna struja. Sekundarni induktivitet djeluje protiv porasta struje, pa smo taj član opet računali negativno.

Ove diferencijalne jednadžbe će vrijediti za sva pogonska stanja, ali samo uz uvjet da konstantni koeficijenti u jednadžbama budu zaista konstante, koje su neovisne o vrijednostima napona i struje. Tražeći konstantne samoinduktivitete i međui induktivitet ograničili smo se na transformator bez željeza. Kod željezne jezgre zbog promjenjivog permeabiliteta, jednadžbe se mijenjaju, pa moramo za račun pretpostaviti konstantan permeabilitet. Iz fizikalnog tumačenja rada transformatora sa željezom znamo, da suma primarnih i sekundarnih amperzavoja mora ostati konstantna, ako želimo da tok u jezgri ostane nepromijenjen. Za pozitivne smjerove računa, kao na sl. 2.52-2, vrijedit će jednadžba

$$i_1 = i_p + \frac{w_2}{w_1} i_2 \quad (2.6-3)$$

jer za pozitivno i_2 , koje izlazi iz stezaljke "d", mora na primarnu stezaljku "D" poteći dodatna struja $(w_2/w_1) \cdot i_2$ koja će magnetizirati jezgru suprotno od sekundarne struje, tako da ukupni amperzavoji ostanu opet $w_1 \cdot i_p$, koliko je potrebno za uzbuđivanje toka u jezgri. Jednadžbu (2.6-3) možemo pisati i ovako:

$$i_2 = \frac{w_1}{w_2} (i_1 - i_p) \quad (2.6-4)$$

Ako jednadžbe (2.6-3) i (2.6-4) uvrstimo u (2.6-1) i (2.6-2) dobijemo:

$$u_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{w_1}{w_2} \frac{d(i_1 - i_p)}{dt} = i_1 R_1$$

$$u_2 + i_2 R_2 = M \frac{d}{dt} (i_p + \frac{w_2}{w_1} i_2) - L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Ako ovo drugačije sredimo, dobijemo:

$$u_1 - (L_1 - \frac{w_1}{w_2} M) \frac{di_1}{dt} - M \frac{w_2}{w_1} \frac{di_p}{dt} = i_1 R_1 \quad (2.6-5)$$

$$M \frac{di_1}{dt} - \left(L_2 - \frac{w_2}{w_1} M \right) \frac{di_2}{dt} = u_2 + i_2 R_2 \quad (2.6-6)$$

Ove dvije jednačbe nam pokazuju, da se u svakom namotu inducira-ju po dvije elektromotorne sile, i to :

1. elektromotorne sile koje inducira promjena struje magnetizira-nja, i
2. elektromotorne sile inducirane promjenom primarne i sekundarne struje

Da odredimo što predstavljaju ove posljednje, promotrimo u dife-rencijalnim jednačbama izraze u zagradama, tj.

$$L_1 - \frac{w_1}{w_2} M \quad \text{odnosno} \quad L_2 - \frac{w_2}{w_1} M$$

Prema jednačbama (2.4-6) i (2.4-7) ti izrazi predstavljaju primarni odnosno sekundarni rasipni induktivitet, pa je

$$\left(L_1 - \frac{w_1}{w_2} M \right) \frac{di_1}{dt}$$

pad napona na primarnom rasipnom induktivitetu, a

$$\left(L_2 - \frac{w_2}{w_1} M \right) \frac{di_2}{dt}$$

pad napona na sekundarnom rasipnom induktivitetu.

Elektromotorna sila inducirana promjenom struje magnetiziranja u primarnom namotu iznosi :

$$e_1 = M \frac{w_1}{w_2} \frac{di_2}{dt}$$

i kod porasta struje magnetiziranja protivi se narinutom naponu, U sekundarnom namotu ta elektromotorna sila iznosi :

$$e_2 = M \frac{di_1}{dt}$$

tj. kod porasta struje magnetiziranja uzrokuje porast sekundarnog napona. Omjer tih dviju elektromotornih sila iznosi:

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

odakle zaključujemo, da te elektromotorne sile bi mogao uzrokovati glavni tok transformatora, jer je samo on ulančen sa svim zavojima primarnog i sekundarnog namota. Da se u to uvjerimo, potražimo iz-raz za glavni tok transformatora.

Prema jednačbi (2.4-4) glavni tok uzbudjen strujom i_1 u pri-marnom namotu iznosio bi

$$\phi_{1,kt} = \frac{M i_1}{w_2} \quad (2.6-7)$$

Analogno bi dobili za glavni tok, koga bi uzбудila struja i_2 u sekundarnom namotu

$$\phi_{2gt} = \frac{M i_2}{W_2} \quad (2.6-8)$$

Kako primarna i sekundarna struja suprotno magnetiziraju jezgru, a pretpostavljamo linearne odnose u magnetskom krugu (konstantan magnetski otpor kruga) pa će vrijediti zakon, superpozicije, to će ukupni glavni tok biti jednak razlici glavnih tokova primara i sekundara. Ako za pozitivni smjer toka uzmemo onaj, u kojem bi pozitivna primarna struja magnetizirala jezgru, dođjemo:

$$\phi_{gt} = \phi_{1gt} - \phi_{2gt} = M \left(\frac{i_1}{W_1} - \frac{i_2}{W_2} \right) = M \frac{1}{W_2} \left(i_1 - \frac{W_2}{W_1} i_2 \right)$$

Ako ovu jednadžbu usporedimo sa jednadžbom (2.6-3) dobijemo :

$$\phi_{gt} = M \frac{1}{W_2} i_k \quad (2.6-9)$$

Napon, kojeg promjena toka inducira u primarnom namotu iznosi:

$$e_1 = W_1 \frac{d\phi_{gt}}{dt} = M \frac{W_1}{W_2} \frac{di_k}{dt} \quad (2.6-10)$$

Znamo da se taj napon protivi porastu struje, pa izraz $-M \frac{W_1}{W_2} \frac{di_k}{dt}$

u diferencijalnoj jednadžbi (2.6-5) predstavlja zaista napon, koga glavni tok inducira u primaru. Na isti način dobijemo da se u sekundarnom namotu inducira napon

$$e_2 = W_2 \frac{d\phi_{gt}}{dt} = M \frac{di_k}{dt} \quad (2.6-11)$$

Diferencijalne jednadžbe (2.6-5) i (2.6-6) možemo sada pisati :

$$u_1 - L_{1\sigma} \frac{di_1}{dt} - e_1 = i_1 R_1 \quad (2.6-12)$$

$$e_2 - L_{2\sigma} \frac{di_2}{dt} = u_2 + i_2 R_2 \quad (2.6-13)$$

Prelaskom na simboličku metodu dobijemo :

$$u_1 = \mathcal{E}_1 + (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) \cdot \mathcal{I}_1 \quad (2.6-14)$$

$$\mathcal{E}_2 = u_2 + (R_2 + j\omega L_{2\sigma}) \cdot \mathcal{I}_2 \quad (2.6-15)$$

Ako u drugoj jednadžbi pomnožimo lijevu i desnu stranu sa $\frac{W_1}{W_2}$ dobijemo:

$$\mathcal{E}_2 \frac{W_1}{W_2} = u_2 \frac{W_1}{W_2} + \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 (R_2 + j\omega L_{2\sigma}) \frac{W_2}{W_1} \mathcal{I}_2 \quad (2.6-16)$$

Nakon uvođenja pojma reduciranih sekundarnih vrijednosti, tj. :

$$\frac{W_1}{W_2} \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_2' , \quad \frac{W_1}{W_2} \mathcal{U}_2 = \mathcal{U}_2' , \quad \frac{W_1}{W_2} J_2 = J_2'$$

$$\left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 R_2 = R_2' , \quad \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^2 L_{2\sigma} = L_{2\sigma}'$$

možemo uz pomoć $\mathcal{E}_2' = \mathcal{E}_1$ konačno uvrštavanjem $\mathcal{E}_2'$ u jednadžbu (2.6-14) dobiti :

$$\mathcal{U}_1 = \mathcal{U}_2' + (R_2' + j\omega L_{2\sigma}') J_2' + (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) J_1 \quad (2.6-17)$$

Ako ovu jednadžbu nadopunimo sa jednadžbom

$$J_1 = J_\mu + J_{\sigma r} + J_2' = J_0 + J_2' \quad (2.6-18)$$

koja u stvari predstavlja jednadžbu (2.6-3) pisanu u simboličkom obliku samo što smo struji magnetiziranja dodali još jednu radnu komponentu za pokrivanje gubitaka u jezgri, dobijemo jednadžbe transformatora, iz kojih možemo nacrtati dijagram transformatora kao na sl.2.52-4. Tako smo ovaj dijagram dobili i čisto analitičkim putem.

Napišimo jednadžbe (2.6-10) i (2.6-11) u simboličkom obliku:

$$\mathcal{E}_1 = j\omega M \frac{W_1}{W_2} J_\mu$$

$$\mathcal{E}_2 = j\omega M \cdot J_\mu$$

Ako to uvrstimo u (2.6-14) i (2.6-16) dobijemo uz uvođenje reduciranih sekundarnih vrijednosti :

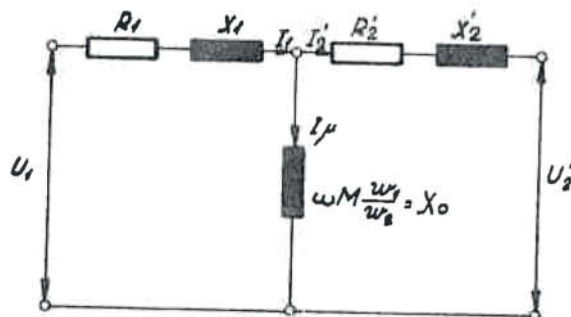
$$\mathcal{U}_1 = j\omega M \frac{W_1}{W_2} J_\mu + (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) J_1 \quad (2.6-19)$$

$$j\omega M \frac{W_1}{W_2} J_\mu = \mathcal{U}_2' + (R_2' + j\omega L_{2\sigma}') J_2' \quad (2.6-20)$$

Jednadžbu (2.6-3) možemo simboličkom metodom napisati u obliku :

$$J_1 = J_\mu + J_2' \quad (2.6-21)$$

Ako pažljivo promotrimo jednadžbe (2.6-19), (2.6-20) i (2.6-21), možemo primjetiti da postoji strujni krug u obliku jednog četveropola, načinjen od radnih i induktivnih otpora, za koga vrijede te iste jednadžbe. Taj četveropol je prikazan na sl.2.6-1, a nazivamo ga ekvivalentnom shemom transformatora. Taj krug ipak nam još ne može nadomjestiti realni transformator, jer sa njime nisu obuhvaćeni gubici u jezgri transformatora. Te gubitke ipak možemo uzeti u račun tako, da otporu X_0 paralelno dodamo još jedan radni otpor R_0 .



Sl. 2.6-1

tako velik, da kroz njega teče struja I_{or} , potrebna za pokrivanje gubitaka u jezgri :

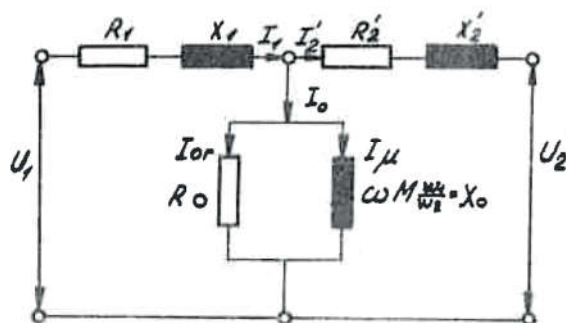
$$I_{or}^2 R_0 = P_{Fe} = \left(\frac{\xi_1}{R_0} \right)^2 R_0$$

odnosno

$$R_0 = \frac{\xi_1^2}{P_{Fe}}$$

Red veličine odnosa otpora u ekvivalentnoj shemi može se dati slijedećim brojkama :

$$R_1 : R_2' : X_1 : X_2' : X_0 : R_0 = 1 : 1 : 2 : 2 : 1000 : 10\ 000$$



Sl. 2.6-2

Nadomjesna shema transformatora

Tako smo dobili potpunu nadomjesnu shemu transformatora, prikazanu na sl. 2.6-2, koja omogućuje da analitički, tj. simboličkom metodom računamo ponašanje transformatora kod opterećenja. Dijagram se može još nadopuniti nadomjesnim otporima za potrošač. Ako taj ima radni otpor R i induktivitet X vrijediti će :

$$U_2 = (R + jX) I_2$$

odnosno

$$\frac{W_1}{W_2} U_1 = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 (R + jX) \frac{W_2}{W_1} I_2$$

$$U_1' = (R' + jX') I_1'$$

gdje je

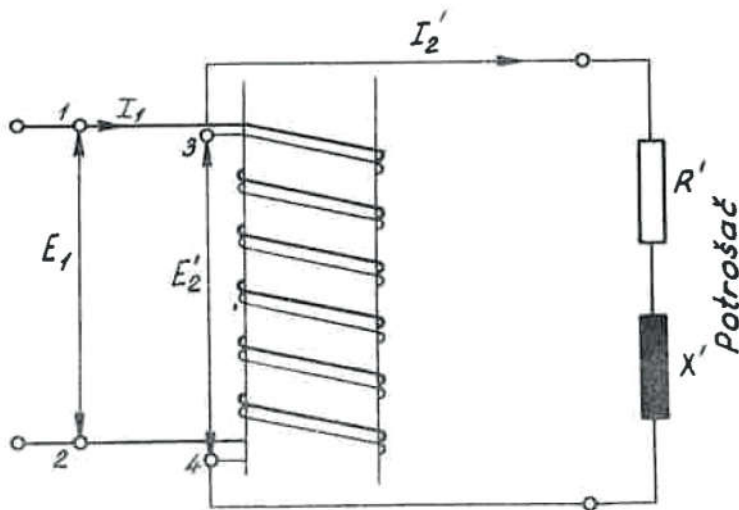
$$R' = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 R \text{ reducirana vrijednost radnog otpora potrošača}$$

$$X' = \left(\frac{W_1}{W_2} \right)^2 X \text{ reducirana vrijednost reaktancije potrošača .}$$

Te vrijednosti nam mogu u ekvivalentnoj shemi nadomjestiti potrošač, koji je priključen na sekundar transformatora.

Do fizikalne slike ekvivalentne sheme transformatora možemo doći ovako. U sl. 2.6-3 prikazana je shema transformatora sa jednakim brojem zavoja, koji su na stupu jezgre paralelno namotani.

Ako pretpostavljamo da nema radnog ni induktivnog otpora u namotima tog transformatora, onda i pod teretom između stezaljki 1-2 i stezaljki 3-4 vlada isti vektor napona $E_1 = E_2$. Prema tome, možemo stezaljku 1 spojiti galvaniski na kratko sa stezaljkom 3 i isto tako stezaljku 2 sa stezaljkom 4, tj. primarni namot spojiti paralelno sa sekundarnim namotom, a da se ni " I_1 " ni " I_2 "



Sl. 2.6-3

ne će promijeniti. Ukoliko primar i sekundar nisu namotani u istom smjeru, moći ćemo opet spojiti istoimene stezaljke primara i sekundara zajedno.

Iz prijašnjeg izlaganja je jasno da se svaki transformator, sa bilo kojim omjerom zavoja može zamisliti kao da je broj zavoja primara i sekundara isti, samo što sekundarne veličine poprimaju u tom slučaju iznose, koje smo nazvali reduciranim sekundarnim vrijednostima. Na takvom transformatoru sa reduciranim sekundarnim vrijednostima ($w_1 = w_2$) može ćemo opet spojiti istoimene primarne i sekundarne stezaljke. Ako si sada k tome zamislimo radne i induktivne otpore primarnog i sekundarnog namota spojene ispred, odnosno iza transformatora, dobijemo ekvivalentnu shemu transformatora prema sl.2.6-2.

Iz sl.2.6-3 možemo, međutim, povući još jedan zaključak. Ako su sekundarni zavoji, namotani u istom pravcu kao primarni, onda ima vektor napona " U_2 " na sekundarnim stezaljkama isti pravac kao i vektor napona " U_1 " na primarnim stezaljkama.

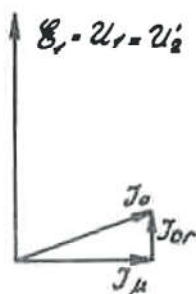
2.7 Pokus praznog hoda i kratkog spoja

Pokusima praznog hoda i kratkog spoja dobijemo sve glavne podatke o nekom transformatoru. Kod pokusa praznog hoda možemo, radi relativno male struje praznog hoda, zanemariti padove napona i gubitke u bakru, te dobijemo vektorski dijagram prema sl.2.7-1.

Mjerenjem napona na primarnim i sekundarnim stezaljkama transformatora dobijemo

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}, \quad P_0 \approx P_F$$

Mjerenjem snage, koju uzima transformator u praznom hodu kod nominalnog napona iz mreže, dobijemo nominalne gubitke u željezu, jer možemo gubitke u bakru zanemariti.



Sl. 2.7-1

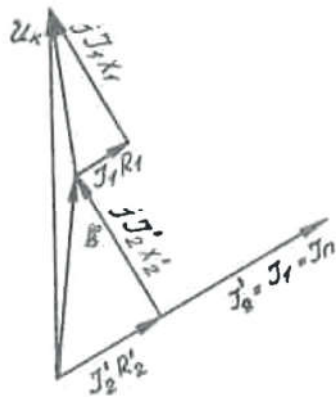
Vektorski dijagram transformatora u praznom hodu

Kod pokusa kratkog spoja spojićmo sekundarne stezaljke transformatora na kratko i narinemo na primar transformatora onaj napon, koji potjera kroz namote transformatora nominalnu struju. Taj napon se zove napon kratkog spoja " U_k ". U slici 2.7-2 prikazan je vektorski dijagram transformatora u kratkom spoju. Zbog malog napona je zanemariva struja magnetiziranja. Pošto je napon na sekundarnim stezaljkama jednak nuli, troši se sav narinuti napon na padove napona, kako to vidimo u vektorskom dijagramu na sl.2.7-2a. Pošto se pokus kratkog spoja odnosi na nominalnu struju, trokut u sl.2b predstavlja nominalne vektore pada napona i to :

$$U_r = I_{1n} R_1 + I_{2n}' R_2' = I_{1n} (R_1 + R_2')$$

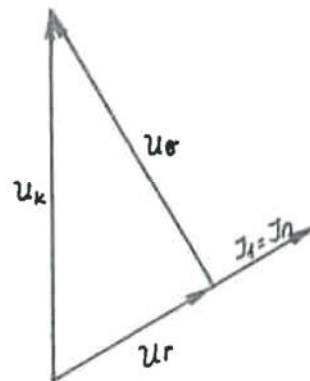
$$U_\sigma = j I_{1n} X_1 + j I_{2n}' X_2' = I_{1n} (X_1 + X_2') \cdot j$$

$$U_k = U_r + U_\sigma, \quad U_k = \sqrt{U_r^2 + U_\sigma^2}$$



a)

Sl.2.7-2



b)

Vektorski dijagram transformatora u kratkom spoju

Veličine padova napona kod nominalne struje volimo izražavati u postocima nominalnog napona

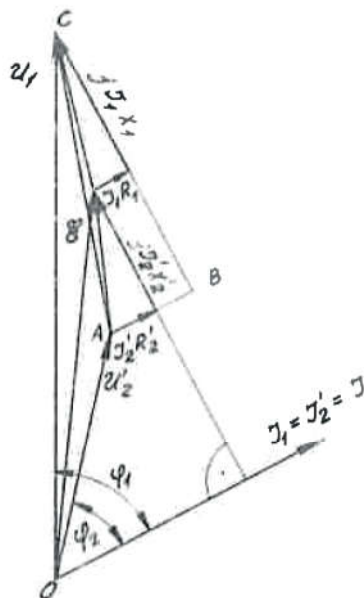
$$u_k = \frac{U_k}{U_n} \cdot 100 \% \quad u_r = \frac{U_r}{U_n} \cdot 100 \% \quad u_\sigma = \frac{U_\sigma}{U_n} \cdot 100 \%$$

Napon kratkog spoja "\$U_k\$" kod normalnih transformatora iznaša cca 4-12 %, kod čega se veće vrijednosti odnose na veće transformatore. Kod tako niskih napona su gubici u željezu, koji opadaju proporcionalno s kvadratom indukcije, i time s kvadratom napona, zanemarivi. Prema tome mjerenjem snage "\$P_k\$", koju uzima transformator kod pokusa kratkog spoja kod nominalne struje iz mreže, dobijemo nominalne gubitke transformatora u bakru :

$$P_k \cong P_{cu}$$

2.8 Kappov dijagram

Kod tehničkih računa sa transformatorima može se zanemariti struja magnetiziranja \$I_0\$, jer ona za transformatore jake struje iznosi tek nekoliko postotaka od nominalne primarne struje. Time nam račun postaje mnogo jednostavniji, jer u nadomjesnoj shemi transformatora otpada poprečna grana, pa ostaju samo serijski otpori, kroz koje teče struja tereta. Ako uz te uvjete nacrtamo dijagram opterećenog transformatora, i to onako kako smo ga nacrtali na sl.2.52-4, tj. sa vektorima sekundarnih veličina ortanim prema gore, dobijemo Kappov dijagram transformatora kao na sl.2.8-1.



Sl.2.8-1
Kappov dijagram

Obje struje I_1 i I_2' padaju zajedno, pa ih možemo označiti jednostavno sa I . Zbog istog smjera primarne i sekundarne struje postaju istofazni radni padovi napona na primaru i sekundaru, a također i induktivni padovi napona. Ako istofazne padove napona složimo zajedno, dobijemo trokut pada napona, tj. trokut ABC nazvan Kappov trokut. Na sl.2.8-2 je nacrtan ponovo isti vektorski dijagram kao na sl.2.8-1 samo sa promijenjenim redoslijedom zbrajanja padova napona i sa vektorom struje postavljenim u vertikalnu os. Za transformator, kome je struja magnetiziranja zanemariva, vrijedit će slijedeće jednačbe :

$$I_1 = I_2' = I; \quad U_1 = U_2' + I \cdot Z_k$$

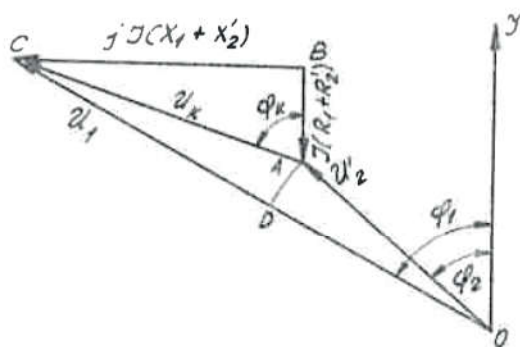
gdje je

$$Z_k = R_k + jX_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \angle \varphi_k^\circ$$

$$R_k = R_1 + R_2'; \quad X_k = X_1 + X_2'; \quad \tan \varphi_k = \frac{X_k}{R_k}$$

Trokut ABC nije u stvari ništa drugo nego dijagram napona kratkog spoja, uz struju kratkog spoja jednaku struji I . Hipotenuza Kappovog trokuta je jednaka U_k , dok su katete jednake radnom,

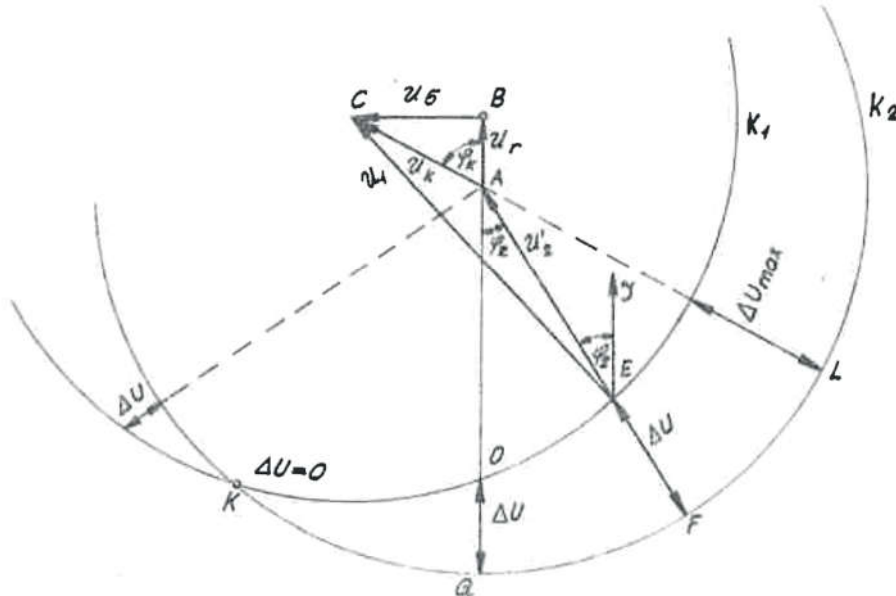
odnosno induktivnom padu napona U_R i U_X . Prilikom opterećenja transformatora strujom I , bit će, zbog pada napona na unutarnjim otporima, napon na sekundarnim stezaljkama U_2' manji za napon kratkog spoja uz struju I , od napona $U_{20} = U_1$ u neopterećenom stanju. Pri tome hipotenuza Kappovog trokuta predstavlja ukupnu promjenu napona, koja uzima u obzir i pomicanje faznog kuta od φ_1 na φ_2 . Ako hoćemo naći samo promjenu napona po apsolutnom iznosu, tj. $U_1 - U_2' = \Delta U$ povući ćemo iz O kružni luk kroz točku A, i tako dobijemo na vektoru U_1 točku D. Dužina CD predstavlja promjenu napona ΔU .



Sl.2.8-2
Kappov dijagram

Veličina Kappovog trokuta je to veća što je veća struja i što su veći unutarnji otpori transformatora. Prema tome će od dva transformatora, opterećena istom strujom, veći pad napona imati onaj, čiji su unutarnji otpori veći. Pri tome ima ulogu i pomak φ_k između struje i hipotenuze Kappovog trokuta. Veličina apsolutnog pada napona ovisi osim toga i o faznom pomaku φ_2 između sekundarne struje i napona.

Da dobijemo preglednu sliku o tome kako se mijenja pad napona ΔU uz konstantnu struju I , a za razne pomake φ_2 , nacrtajmo opet Kappov dijagram kao na sl.2.8-3. Sa polumjerom $r = U_1$ nacrtamo dva kružna luka i to iz središta C luk k_1 , a iz središta A luk k_2 . Spojnica od bilo koje točke E kruga k_1 do točke C jednaka je



Kapacitivni teret $\leftarrow \varphi_2 = 0 \rightarrow$ Induktivni teret

Sl. 2.8-3
Kappov dijagram

naponu U_1 , dok spojnica $\overline{EA}$, daje reducirani sekundarni napon U_2 , i to zato, jer se U_1 i U_2 razlikuju uvijek baš za pad napona $\overline{AC}$.

Kako je $\overline{AF}$ također jednako U_1 , to je odrezak između oba kruga na zruci, potegnutoj iz A pod kutem φ_2 prema vertikali, jednak razlici apsolutnih vrijednosti primarnog i sekundarnog napona.

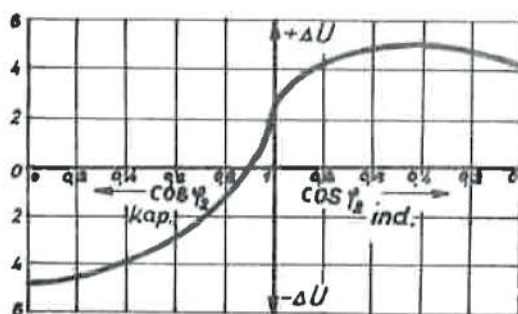
Za čisti omski teret ($\varphi_2 = 0$) pada smjer napona U_2 u smjer struje, pa je $\overline{OA}$ veličina napona U_2 , a $\overline{OQ}$ promjena napona ΔU . Na lijevo od vertikale, koja nam pokazuje smjer struje I , nalaze se kapacitivni tereti, jer je u tom području vektor struje pred vektorom sekundarnog napona, dok se na desno od vertikale nalaze induktivni tereti. U točki L , nekog induktivnog tereta, određenog s $\varphi_2 = \varphi_k$, dobivamo maksimalnu promjenu napona. Za neki kapacitivni teret dobijemo u točki K promjenu napona jednaku nuli, a za kapacitivne terete sa još većim faznim pomakom mijenja se predznak pada napona i postaje negativan, jer umjesto pada sekundarnog napona dobivamo njegovo povećavanje. To je već bilo pokazano na vektorskom dijagramu transformatora za kapacitivni teret na sl. 2.51-lb.

Prenesemo li sada dobivene vrijednosti ΔU zajedno sa predznacima u dijagramu kao funkciju kuta φ_2 , odnosno $\cos \varphi_2$, uz stalnu struju I dobijemo dijagram na sl.2.-04.

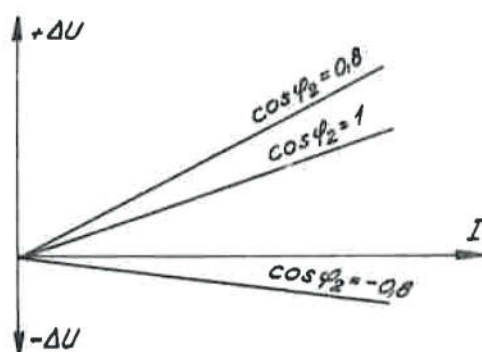
Ako pak predočimo $\Delta U = f(I)$ za konstantne $\cos \varphi_2$, dobijemo približno linearnu ovisnost. Dobivene linije nazivamo vanjskim karakteristikama transformatora (vidi sl.2.8-5). Iz Kappovog dijagrama možemo još

primjetiti da za normalne terete, tj. za terete od kojih je $\cos \varphi_2$ blizu jedan, na promjenu napona djeluje uglavnom radni pad napona u_r , dok induktivni pad napona pretežno uzrokuje fazni pomak između primarnog i sekundarnog napona.

Za određivanje promjene napona ΔU nije zgodno iskoristiti neposredno Kappov dijagram, jer je trokut ABC u stvarnosti jako malen, a isto otežava konstrukciju dijagrama i ujedno može znatno sniziti točnost rezultata. Zato se Kappov dijagram koristi za određivanje promjene napona ΔU analitičkim putem.



Sl. 2.8-4



Sl. 2.8-5

Vanjska karakteristika transformatora

$$u_r = \frac{U_r}{U_1} 100\% \quad (2.8-1)$$

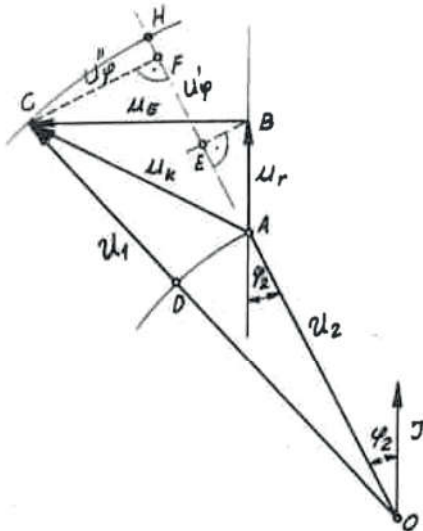
a procentualni induktivni pad napona

$$u_r' = \frac{U_r}{U_1} 100\% \quad (2.8-2)$$

Produžimo smjer napona U_2 i iz točke C povucimo okomicu $\overline{CF}$ na taj pravac. Osim toga, potegnimo dva kružna luka $\overline{CH}$ i $\overline{AD}$ sa središtem u O. Ako označimo dužinu $\overline{AF}$ sa u_r' , a $\overline{FC}$ sa u_r'' tada će vrijediti:

$$\overline{AF} = u_r' = u_r \cos \varphi_2 + u_r \sin \varphi_2 \quad (2.8-3)$$

$$\overline{FC} = u''_{\varphi} = -u_r \sin \varphi_2 + u_k \cos \varphi_2 \quad (2.8-4)$$



Sl. 2.8-6
Kappov dijagram

Iz sl. 2.8-6 vidimo da je ukupna procentualna promjena napona

$$u_{\varphi} = \frac{\Delta U}{U_1} 100\%$$

jednaka

$$u_{\varphi} = \overline{DC} = \overline{AF} + \overline{FH} = \overline{AF} + (\overline{OH} - \overline{OF})$$

$$u_{\varphi} = \overline{AF} + U_1 - \sqrt{U_1^2 - \overline{CF}^2}$$

Izraženo u postocima tj. uzevši $U_1 = 100\%$ i upotrebom jednadžbi (2.8-3) i (2.8-4) dobijemo za procentualnu promjenu napona

$$u_{\varphi} = u'_{\varphi} + 100 - \sqrt{100^2 - u''_{\varphi}^2} \quad (2.8-5)$$

Ako u gornjoj jednadžbi razvijemo drugi korjen u red i zanemarimo sve članove više od drugog, dobijemo upotrebom formule $\sqrt{1-x^2} \approx 1 - \frac{x^2}{2}$

sljedeću približnu vrijednost za u_{φ} :

$$u_{\varphi} = u'_{\varphi} + 100 - 100 \sqrt{1 - \left(\frac{u''_{\varphi}}{100}\right)^2} \approx u'_{\varphi} + 100 - 100 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{u''_{\varphi}}{100}\right)^2\right] \quad (2.8-6)$$

$$u_{\varphi} = u'_{\varphi} + 0,005 (u''_{\varphi})^2$$

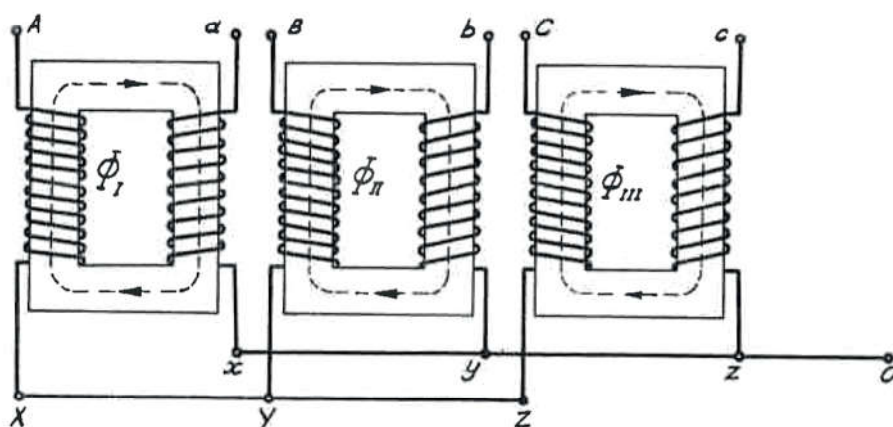
Ako je u_{φ} manji od 4% to nam izlazi u_{φ} približno jednak u'_{φ} , pa se u tom slučaju, prema propisima za transformatore smije uzeti

$$u_{\varphi} \approx u'_{\varphi}$$

2.9 Trofazni transformatori

2.91 Općenito

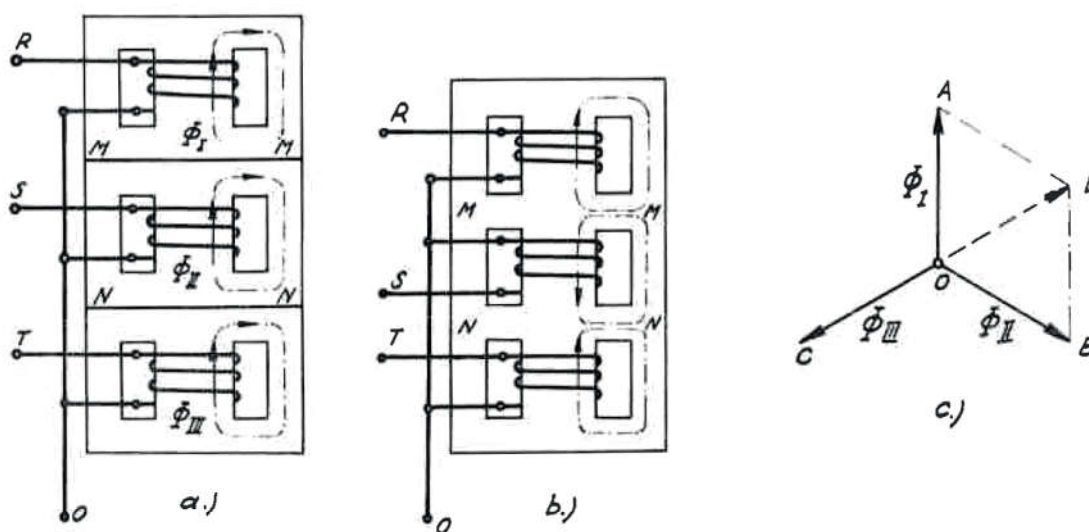
Upotrebom trofazne struje pojavila se i potreba za trofaznim transformatorima. Prvo rješenje, koje se je i danas zadržalo naročito u Americi, je bilo, da se tri jednofazna transformatora spoje u trofazni spoj, kao što je načinjeno npr. na sl. 2.9-1. Zatim je započeta gradnja trofaznog transformatora kao jedinstvene jedinice. Najprije kao jezgra trofaznog transformatora bila je uzeta kombinacija triju jednofaznih ogrnutih transformatora prema sl. 2.9-2, koja se dobije tako, da se tri jednofazna transformatora ogrnutog tipa stave jedan na drugog. U svakoj fazi uzbudit će se izmjenični tok, koji za



Sl. 2.9-1

Trofazni spoj jednofaznih transformatora

prikladnim faznim naponom zaostaje, kao i kod jednofaznog transformatora, za kut od 90° . Ako je transformator spojen primarno na simetričan trofazni sistem napona, dobiti ćemo u jezgrama pojedinih faza simetričan trofazni sistem magnetskih tokova, kako je to prikazano na sl.2.9-2c. Ako se sada priključe svi primarni svici na trofaznu mrežu tako, da su smjerovi namatanja u svim trim transformatorima jednaki, to bi dobili prema sl.2.9-2c, u jarmu MM i u jarmu NN ukupni tok, koji rezultira kao diferencija dvaju faznih tokova, dakle veličinu BA prema vektorskom dijagramu. Ako pak spojimo srednji svitak obrnuto (sl.2.9-2b), dobijemo u zajedničkim dijelovima jarma M i N znatno manje tokove, jer sada izlazi kao rezultanta obaju tokova veličina OD, koja se dobije zbrajanjem tokova OA i OB.

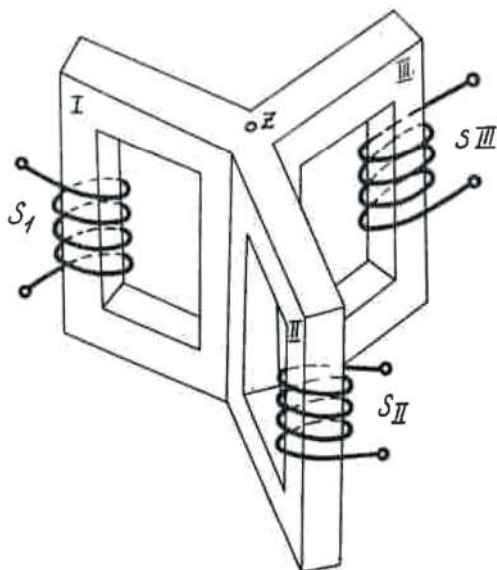


Sl. 2.9-2

Simetrični trofazni ogrnuti transformator sa povratnim magnetskim putem

U tom slučaju svi dijelovi jarma vode isti tok $\phi/2$, koji je upravo jednak polovici magnetskog toka kroz stup. Dakle možemo jarmovima MM i NN dati polovične presjke kao i krajnjim dijelovima jarma, pa time smanjiti potrošak materijala. Ogrnuti trofazni transformatori nisu danas tako općenito u upotrebi kao jezgrasti trofazni transformatori, pa se zato na ogrnuti tip ne ćemo više osvrnati.

Za trofazni jezgrasti transformator upotrebljava se danas u Evropi normalna jezgra, koja ima oblik prema sl.2.9-4. Do ove se forme došlo na taj način, da su se za transformaciju trofazne struje združila najprije tri jednofazna jezgrasta transformatora u jednu cjelinu prema sl.2.9-3. Budući da kod priključka primarnih namotaja S_I , S_{II} i S_{III} na trofaznu mrežu dobijemo tri jednaka magnetska toka, koji su, kao i fazni naponi mreže, međusobno pomaknuti za 120° , to je zbroj ovih tokova



Sl. 2.9-3
Simetrični trofazni jezgrasti transformator sa povratnim magnetskim putem

ban da se tokovi mogu zatvoriti.

Točka Z na sl.2.9-3, u kojoj se sva tri fazna toka sastaju, zove se nul-točka ili zvijezdište toka. Vidimo da se i ovdje, kod spajanja triju magnetskih sistema u jedan jedinstveni sistem, isto tako može prištediti na materijalu, kao što je to bilo i kod veza triju električkih sistema u jedan trofazni. Ova nul-točka Z je jednako udaljena od svih triju stupova I, II, III, i ona ima, dakle, u sl.2.9-3 simetričan položaj, pa se zato ova jezgra naziva simetričnom trofaznom jezgrom. Do konačne forme magnetskog kruga trofaznog jezgrastog transformatora, kakav je danas općenito u upotrebi, potreban je samo još jedan korak. Treba samo sva tri stupa iz sl.2.9-3 staviti u jednu ravninu, pa se tako dobije jezgra prema sl.2.9-4. No time smo prvotni oblik trofaznog transformatora, koji je bio simetričan, deformirali, i on je postao nesimetričan, jer sada duljine svih tokova između nultočaka Z nisu više jednake. To se, dakako, mora očitovati u strujama magnetiziranja, jer će srednji stup II trebati manje amperzavoja da proizvede tok ϕ , nego vanjski stupovi I i III.

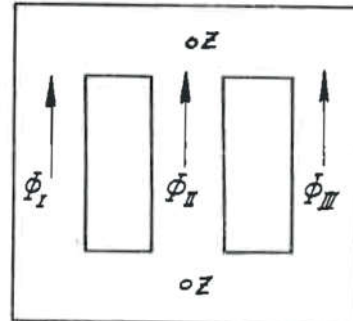
Prednosti ove pojednostavljene jezgre i smještaja namotaja je tolika, da se ovaj oblik danas u Evropi općenito upotrebljava usprkos

$$\phi_I + \phi_{II} + \phi_{III} = 0$$

U srednjem stupu, sl.2.9-3, gdje se ovi tokovi zbrajaju, dobijemo zapravo tok jednak nuli. Ova nam činjenica dozvoljava da srednji stup maknemo, jer kroz njega ne prolazi i onako nikakav tok. To vrijedi, dakako, samo onda, ako pojedini tokovi ϕ_I , ϕ_{II} i ϕ_{III} čine doista simetričan trofazni sistem. Inače, ako taj uvjet ne bi bio ispunjen, dobijemo u srednjem stupu ipak neki rezultirajući tok, pa nam je taj stup potre-

svih mana, što ih ova jezgra ima radi magnetske nesimetričnosti. To, a i manjak onog srednjeg stupa kroz koji se tokovi, ako su nesimetrični, mogu zatvoriti, ipak ne smijemo posve zaboraviti, nego valja uvijek paziti da ne bi uslijed toga moglo u pogonu doći do izvjesnih smetnja. No o tome će biti poslije još opširnije govora.

Kada usporedimo jezgru trofaznog transformatora sa jezgrama triju odvojenih jednofaznih transformatora, očita je ušteda na željezu kod trofaznog transformatora, a naročito kod trofaznog transformatora jezgrastog tipa. Rezultat: cijena aktivnog materijala jednog trofaznog jezgrastog transformatora je za cca 15 % niža od cijene aktivnog materijala ekvivalentnih jednofaznih transformatora. Ukupna cijena transformatora sadrži i cijenu neaktivnog materijala, koja ovisi mnogo o mehaničkoj i električkoj konstrukciji transformatora. Ipak, možemo reći, da cijena aktivnog materijala iznosi otprilike polovicu cijene kompletnog transformatora.



Sl.2.9-4
Trofazni jezgrasti transformator

Kod trofaznog transformatora spojevi među namotima su načinjeni u ulju unutar kotla. To omogućuje da imamo samo tri visokonaponska i tri niskonaponska izvoda iz kotla, što predstavlja izvjesnu uštedu, a što je još važnije, uveliko pojednostavnjuje spoj transformatora na prenosne linije. Uzevši u obzir, da je kod triju jednofaznih transformatora i konstrukcioni materijal skuplji nego kod trofaznog transformatora, i da treba dvostruki broj provodnih izolatora, dobijemo, da razlika u cijeni između trofaznog transformatora i triju ekvivalentnih jednofaznih transformatora iznosi oko 20 %. Unatoč povećane cijene ipak su se zadržali u Americi u upotrebi jednofazni transformatori u trofaznom spoju, jer imaju neke prednosti. Razmotriti ćemo zato redom prednosti i nedostatke jedne i druge kombinacije.

Za pogone, kod kojih se zbog sigurnosti zahtjeva stopostotna rezerva, bit će kod grupe jednofaznih transformatora dovoljno imati u rezervi samo jedan jednofazni transformator, jer se rijetko događa kvar na više faza najjednom. Kod trofaznog transformatora morati ćemo imati u rezervi trofazni transformator, koji je mnogo skuplji od jednog jednofaznog.

Skupit ćemo još jednom sve razloge za i protiv upotrebe trofaznih transformatora u usporedbi s grupom jednofaznih transformatora.

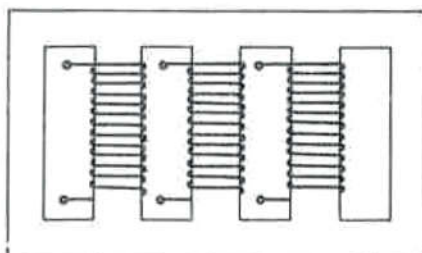
- za:
1. zahtijevaju za svoj smještaj manju površinu
 2. lakši su
 3. jeftiniji su i
 4. postoji samo jedna jedinica za spajanje i rukovanje;

protiv:

1. veća težina po jedinici, pa prema tome i teži transport
2. ako je potrebna rezerva, treba imati cijelu jedinicu, dok je kod jednofaznih dovoljno imati zamjenu za samo jednu fazu.

To su prednosti i nedostaci trofaznih transformatora evropskog tipa. Činjenica je, međutim, da se danas trofazni transformatori i u Americi sve više primjenjuju.

Kod transformatora najvećih snaga pojavljuje se, zbog ograničenih mogućnosti transporta, naročito željeznicom, ograničenje visine transformatora. Da se što više smanji visina transformatora, uzima se manja visina jarma. No, da se magnetski otpor ovakvog transformatora ne poveća, tj. da ne poraste indukcija u jarmu, i da se time ne povećaju gubici u željezu, dodaje se u tom slučaju četvrti i peti stup, koji služi za lakše zatvaranje magnetskog toka. Takav transformator pokazuje nam sl.2.9-5. Ako uzmemo da je u jarmu ista indukcija kao i u stupovima,



Sl. 2.9-5
Trofazni peterostupni transformator

proračun pokazuje da je kod jarma peterostupnog transformatora dovoljan presjek, koji iznosi samo 58 % presjeka stupova na kojima se nalaze namoti. Isti presjek imaju i oba krajnja stupa. Prema tome, imat će peterostupni transformator visinu jarma jednaku 58 % visine normalnog jezgrastog transformatora, pa će tako biti smanjena visina cijelog transformatora. Ekonomičnost gradnje transformatora postavlja zahtjev da se kod istih presjeka stupova daje peterostupnim transformatorima kraće stupove

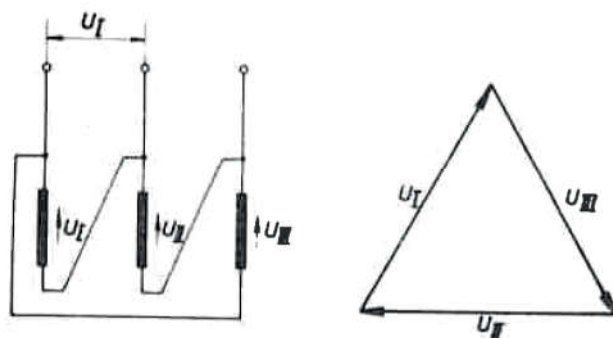
nego transformatorima s tri stupa. Zbog toga imaju peterostupni transformatori niže i jarmove i stupove nego trofazni jezgrasti transformatori. Možemo reći da je visina peterostupnog transformatora približno jednaka $\frac{2}{3}$ visine normalnog jezgrastog transformatora iste snage. Ovakav oblik jezgre susročemo i kod transformatora gradjenih u specijalne svrhe, kao što su npr. transformatori za dojavu dozemnog spoja.

2.92 Spojevi

Namote trofaznih transformatora možemo spojiti na tri načina : u trokut, zvijezdu i cik-cak. Kod spoja u trokut (vidi sl.2.9-6) djeluje na namot jedne faze linijski napon mreže, dok je linijska struja jednaka razlici struja dvaju faznih namotaja. Kod spoja u zvijezdu, prema sl.2.9-7, je struja u vodu jednaka faznoj struji, a linijski napon je jednak razlici dvaju faznih napona. Prema tome, kod istih vrijednosti linijskog napona i linijske struje, te uz istu indukciju u željezu, mora namotaj spojen u trokut imati $\sqrt{3}$ - puta više zavoja nego namotaj spojen u zvijezdu. No, zato može biti presjek žice kod spoja u trokut $\sqrt{3}$ - puta manji nego kod spoja u zvijezdu. Tako izgleda da potrošak bakra i potreban prostor za namotaj ostaje u oba slučaja isti. No, radi relativnog većeg iznosa izolacije kod tanje žice, ili, kako se to inače kaže, zbog lošijeg faktora punjenja prozora, treba spoj u trokutu više prostora nego spoj u zvijezdu a i potrošak bakra mu je veći, jer je srednji promjer namota veći.

Pogledajmo sada kako se promijene podaci gotovog transformatora, ako spoj primarnog ili sekundarnog namota promijenimo iz trokuta u zvijezdu. Budući da kod ove promjene ne ćemo mijenjati ni magnetsku indukciju u željeznoj jezgri, ni gustoću struje u namotu, to naponi, koji se induciraju u namotima, ostaju nepromijenjeni, a također i struje kojima se može opteretiti namotaj. Nakon što smo transformator prespojili moći ćemo ga priključiti na $\sqrt{3}$ - puta veći napon, ali će on moći dati linijsku struju $\sqrt{3}$ - puta manju nego u prijašnjem spoju, jer je prije kod spoja u trokut linijska struja bila $\sqrt{3}$ puta veća od struje u namotaju, a sada je linijska struja jednaka struji u namotaju, koja mora ostati nepromijenjena. Prema tome, ako imamo neki trofazni namot, spojimo li ga u trokut ili u zvijezdu, ukupna snaga ostaje ista.

Spoj dvostruka zvijezda ili "cik-cak" prikazuje sl.2.9-8 . Princip cik-cak spoja je slijedeći. Sekundarni namotaj svakog stupa razdijeli se u dvije jednake polovice, pa se onda za svaku fazu uzme jedna polovica namotaja sa jednog stupa i suprotno spoji sa drugom polovicom namotaja na slijedećem stupu. To se dobije kao fazni napon diferencija dvaju polovičnih napona sa dva različita stupa. U vektorskom dijagramu na sl.2.9-8 su predloženi naponi cik-cak



Sl. 2.9-6

spoja. Sa $U/2$ je označena veličina inducirane elektromotorne sile u polovičnom svitku. Radi faznog pomaka od 120° između obje komponente napona jedne faze, iznosi napon faze :

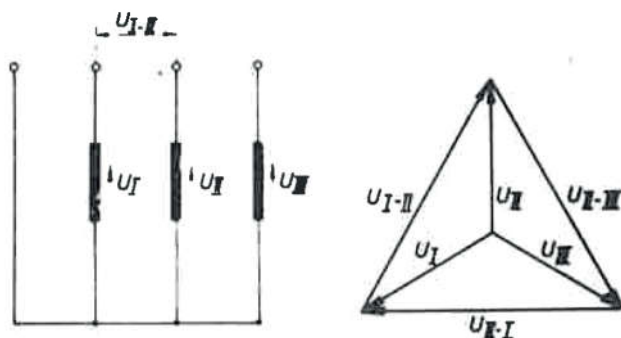
$$U_f = \frac{U}{2} \sqrt{3}$$

Kada bi obje polovice jednog stupa spojili u jednu cjelinu kao jedan fazni namotaj, dobili bi fazni napon jednak

$$2 \cdot \frac{U}{2} = U$$

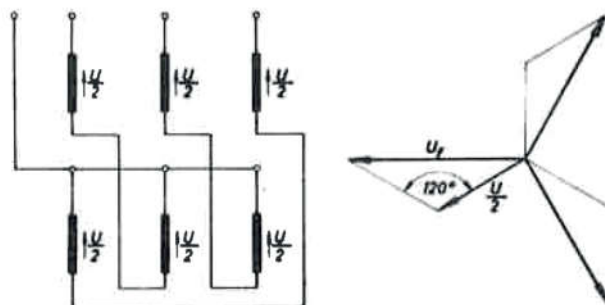
Prema tome iznosi fazni napon u cik-cak spoju $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$ puta fazni napon, koji se inducira u istom namotu kad bi bio spojen u zvijezdu. Isti fazni napon, kakvog ima obična zvijezda, postićemo kod cik-cak spoja samo ako broj zavoja povećamo

$$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$$



Sl. 2.9-7

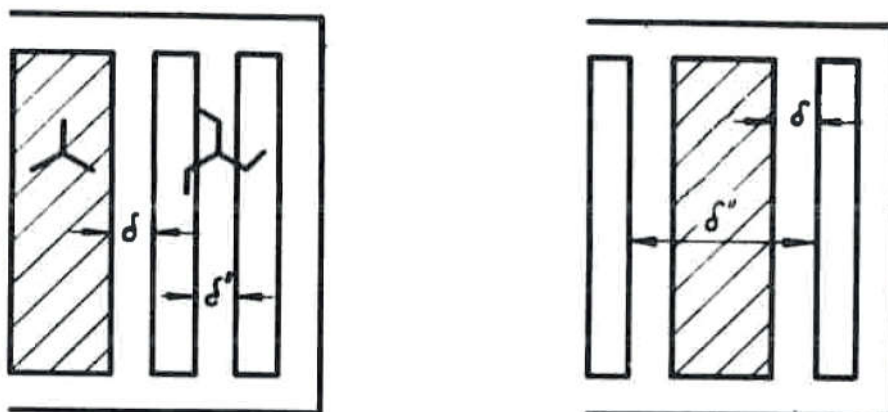
puta u odnosu na broj zavoja kod zvijezde. Cik-cak spoj je prema tome 15,5 % skuplji od zvijezde, ali se ipak često upotrebljava zbog nekih svojih prednosti, i to uvijek samo na sekundarnoj strani. Primarno se taj spoj nikada ne uzima, jer ima jednu veliku manu, koja je obradjena u poglavlju 6.2.3.



Sl. 2.9-8

Kod cik-cak spoja obično upotrebljavamo koncentrični namot. Namote raspoređujemo u prozoru transformatora prema sl.2.9-9a tako da je raspor "δ" između obje polovine svitaka što manji. Potpuno pogrešan bi bio raspored svitaka prema sl.2.9-9b, jer bi se tako, kao što ćemo kasnije vidjeti, dobili veliki rasipni induktiviteti i veliki padovi napona, koje normalno izbjegavamo.

Svaki transformator ima dva namota, od kojih svaki može biti spojen na bilo koji od navedena tri načina. Svakako bi bilo najjednostavnije da se za spoj i primara i sekundara uzme zvijezda. Međutim, spoj u zvijezdu ima, kako će to biti kasnije pokazano, manu da je nepogodan za nesimetrična opterećenja transformatora. Ako bi, naime, imali na primarnoj strani spoj transformatora u zvijezdu, a na sekundarnoj takodjer u zvijezdu, ali sa nulvodom, koji bi omogućio nesimetrična opterećenja, došlo bi prilikom veće struje u nulvodu do izobličenja sekundarnih faznih napona i po iznosu i po faznom kutu (vidi poglavlje 6.33). To, naravno, nije dozvoljeno, jer bi onemogućilo ispravan rad potrošačkih aparata, ili bi ih čak uništilo. Zbog toga propisi dozvoljavaju upotrebu transformatora u spoju zvijezda - zvijezda sa nulvodom samo u slučajevima, kada struja u nulvodu ne premašuje 10 % nominalne struje transformatora.



a)

Sl.2.9-9

b)

Raspored namota trofaznog transformatora kod spoja cik-cak

Svugdje, gdje moramo dozvoliti veća nesimetrična opterećenja, moramo upotrebiti transformatore u spoju trokut-zvijezda, ili zvijezda-cik-cak. U električkom pogledu su obje te varijante iste vrijednosti, jer obje dopuštaju nesimetrična opterećenja i do iznosa nominalne struje.

Ekonomski razlozi su oni, koji određuju da li ćemo se u određenom slučaju odlučiti na jednu ili drugu varijantu. Cik-cak je svakako barem 15 % skuplji od zvijezde. Rečeno je već, da spoj u trokut ima veći potrošak bakra i izolacije nego spoj u zvijezdu. Osim toga, kod spoja u trokut imamo $\sqrt{3}$ - puta manji presjek, nego kod zvijezde, a cijena kilograma bakra je to veća, što je žica tanja, jer se tanja žica mora više puta izvlačiti, pa su joj i troškovi produkcije veći. Prema tome, bit će kod namotaja u trokut cijena u odnosu na zvijezdu to više povećana, što su manji presjeci vodiča, odnosno manje snage transformatora. Kod transformatora većih snaga razlika u cijeni između namota spojenih u zvijezdu ili u trokut isčezava. Kod najvećih transformatora je baš obrnuti slučaj, te je spoj trokut, radi manjeg presjeka vodiča, pogodniji od spoja zvijezda. Preveliki presjeci su, naime, isto tako nepovoljni, jer stvaraju poteškoće pri namatanju. Kod transformatora ispod 250 kVA bit će poskupljenje namota spojenog u trokut prema onom koji je spojen u zvijezdu veće od 15,5%, tj. od poskupljenja cik-cak spoja u odnosu na zvijezdu. Zato je za transformatore, čija je snaga manja od 250 kVA, ekonomično upotrebljavati spoj zvijezda-cik-cak, a za transformatore veće snage upotrebiti ćemo spoj trokut-zvijezda.

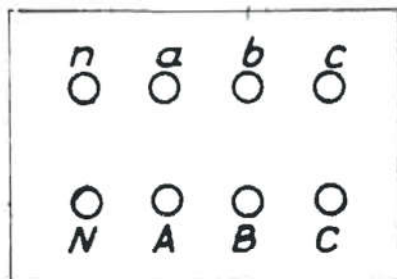
Iz čitavog ovog izlaganja vidimo slijedeće:

Namoti zvijezda-zvijezda susreću se vrlo rijetko. Taj spoj se susreće samo kod visokonaponskih transformatora, gdje je potrebno zvijezdište na obje strane uzemljiti kruto, ili pomoću Pettersen-ovog svitka za kompenzaciju struje dozemnog spoja. Da kod zemnih spojeva i nesimetričnih opterećenja ne bi došlo do nesimetrije faznih napona, dodajemo takvim transformatorima, kako ćemo vidjeti kasnije, namot koji predstavlja dodatni namot u spoju trokut

(tercijarni namot). Najčešći je, svakako, spoj trokut-zvijezda, a kod malih distributivnih transformatora nadomještava ga spoj zvijezda-cik-cak.

Kod trofaznog spoja triju jednofaznih transformatora ne upotrebljava se spoj cik-cak, jer je nepotreban, a i teško izvediv, nego se nadomješta spojem trokut-zvijezda.

Da se omogući ispravno spajanje transformatora, uvedeno je označivanje krajeva namota i stezaljki transformatora. Prema našim novim propisima označuje se jedan kraj namotaja, nazovimo ga "početak", početnim slovima abecede, dok se drugi kraj, odnosno "svršetak", označuje završnim slovima abecede. Pri tome se oznake "početak" i "svršetak" ne odnose na početak i kraj namatanja namotaja, nego se mogu potpuno proizvoljno; kada su dane jednom namotu transformatora, točno su određeni krajevi naziva svih ostalih namota, ako hoćemo dobiti određeni fazni pomak između primarnih i sekundarnih napona. Gornjonaponska strana se označuje velikim uspravnim slovima (npr. A, B, C, D, X, Y, Z, Q), dok se donjonaponska strana označuje malim kosim slovima (npr. *a, b, c, d, x, y, z, q*). Srednjonaponska strana kod višenaponskih transformatora se označuje također velikim uspravnim slovima, samo što se ispred njih stavlja slovo m (npr. mA, mB, mC, mD, mX, mY, mZ, mQ). Kod jednofaznih transformatora, koji čine trofaznu grupu, krajevi namota mogu imati oznake kao krajevi namota trofaznih transformatora. U svim ostalim slučajevima krajevi namota jednofaznih transformatora označuju se slovima D Q, odnosno d q. Da bi se smanjio broj izvoda iz kotla transformatora vrše se obično svi spojevi među namotima kod trofaznih transformatora unutar kotla, a visokonaponski i niskonaponski namoti imaju izvedene samo tri ili četiri stezaljke. Kod



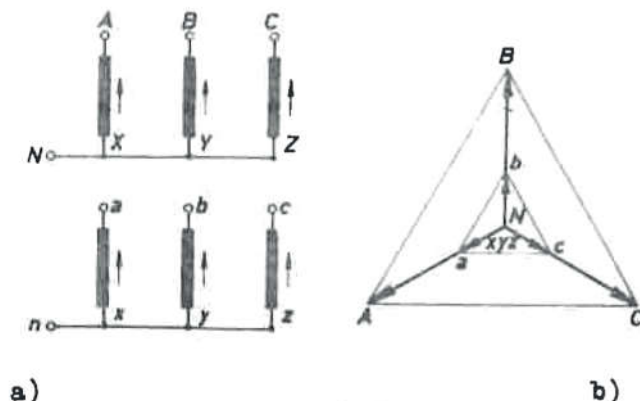
Sl.2.9-10

Raspored priključnih stezaljki trofaznog transformatora

takovih trofaznih transformatora stezaljke imaju oznake početka namota. Jedino će u slučaju otvorenih namota biti izvedeni i počeci i krajevi namota, pa će stezaljke imati oznake početaka i svršetaka namota. Nultočke transformatora se označuje slovom N, odnosno n. Stezaljke trofaznih transformatora se označuju abecednim redom od lijeva prema desno, gledajući sa visokonaponske strane (vidi sl. 2.9.-10). Nultočka transformatora, ukoliko postoji, nalazi se s lijeve strane stezaljke A (a), također gledano sa gornjonaponske strane. Poznavajući ova pravila, možemo na gotovom transformatoru odrediti redoslijed stezaljki, i ako ove nisu posebno označene.

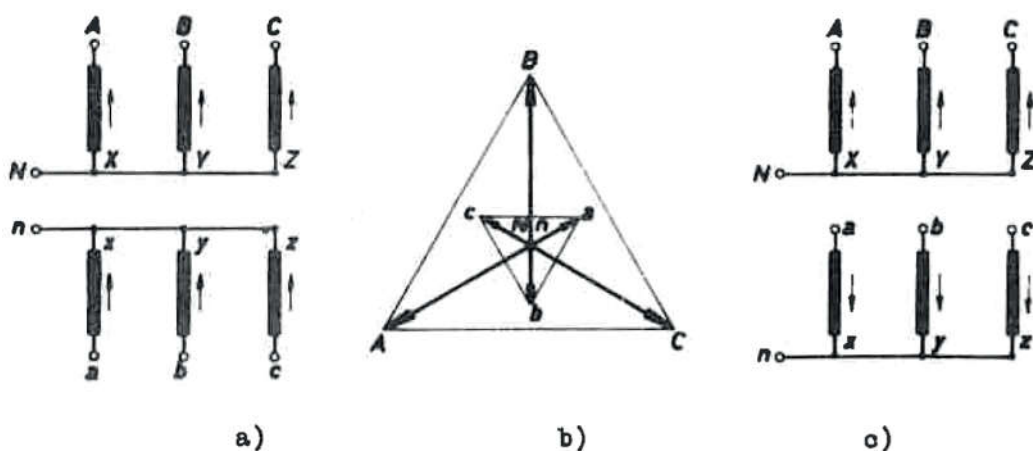
O načinu spajanja faznih namotaja u trofaznom transformatoru ovisi kut, pod kojim je sekundarni napon relativno pomaknut spram primarnog. To ćemo najbolje uočiti razmatrajući nekoliko spojeva. Najjednostavniji je spoj zvijezda na obim stranama primarnoj i sekundarnoj. Kod toga su u zajedničkoj nultočki N (vidi sl.2.9-11) spojeni svršeci svih primarnih faza X, Y, Z, a počeci su dovedeni na istoimene visokonaponske stezaljke ABC. Isto je i sa niskonaponskom stranom. Oznake namota smo u ovom slučaju stavili sasvim proizvoljno. Ako je smjer namatanja na niskonaponskoj strani trans-

formatora jednak onome visokonaponske strane, bit će elektromotorne sile u oba namota, koji se nalaze na jednom stupu, istog smjera u odnosu na početak i kraj namatanja namota, pa će (kako je već pokazano u poglavlju 2.52) i primarni i sekundarni naponi biti istofazni. Prema tome, ako smo našu oznaku za početak namota dali i kod primarnog i kod sekundarnog namota na početak namatanja namota, ili kod oba namota na kraj namatanja namota, bit će primarni i sekundarni napon između istoimenih stezaljki istofazan. Postoji još jedno pravilo, koje nam dobro dodje kod crtanja vektor-



Sl. 2.9-11

skih dijagrama trofaznih transformatora, a to je slijedeće; Vektor primarnih i sekundarnih napona između stezaljki visokonaponskog i niskonaponskog namota, smještenog na isti stup, padaju po fazi zajedno, ako su elektromotorne sile među dotičnim stezaljkama iste faze. Ovo pravilo nam je jasno iz prijašnjeg izlaganja o polaritetu napona kod jednofaznih transformatora. Sl. 2.9-11a prikazuje spojnu shemu, a sl. 2.9-11b vektorski dijagram napona toga spoja. Smjerovi induciranih elektromotornih sila su naznačeni u shemi strelicama uz pojedine namote. Kako su strelice uz namote istog stupa usmjerene prema istoimenim krajevima, vidimo da su kod ovog spoja primarni i sekundarni fazni naponi između istoimenih stezaljki istofazni.

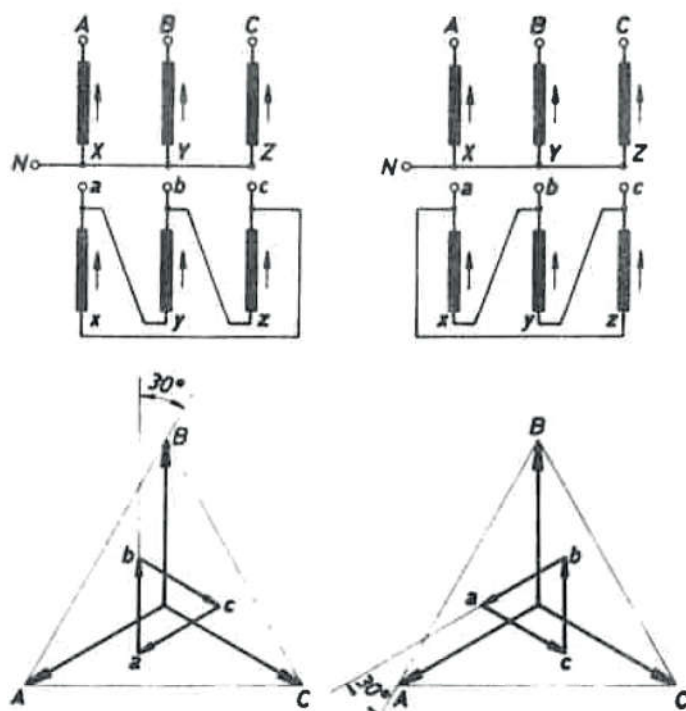


Sl. 2.9-12

Prema tome, fazni naponi medju istoimenim stezaljkama (npr. Ax i ax) padaju u vektorskom dijagramu po fazi zajedno.

Ako promijenimo početke i svršetke jednog namotaja, kako je to učinjeno na strani niskog napona na sl.2.9-12a, bit će sekundarni fazni napon odmaknut za 180° od prijašnjeg smjera, tj. bit će protufazan primarnom naponu. Isti taj rezultat dobivamo kada prema sl.2.9-12a označimo krajeve namota jednako kao na sl.2.9-11, ali ako je sekundarni namotaj namotan u suprotnom smjeru nego primarni, što je na slici naznačeno strelicom suprotnog smjera na primaru i sekundaru.

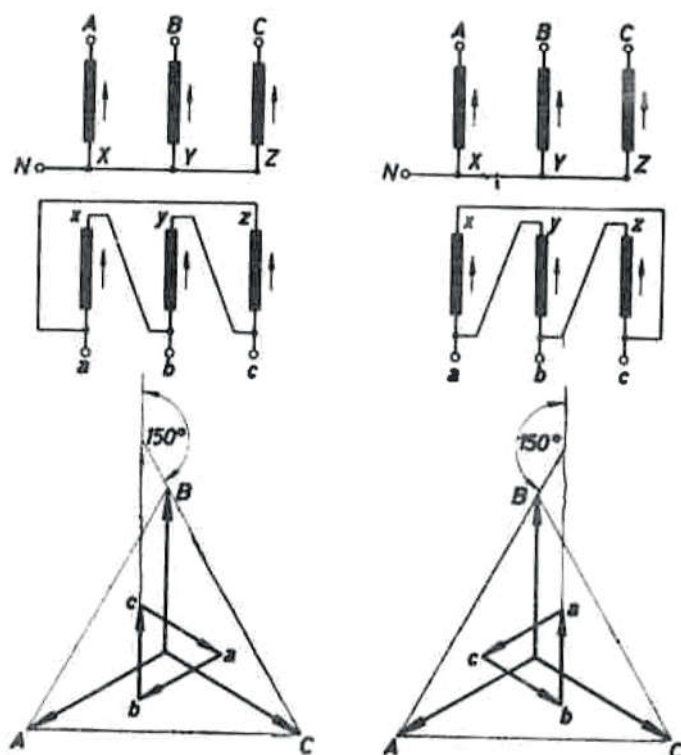
Promotrimo transformator spojen primarno u zvijezdu, a sekundarno u trokut prema sl.2.9-13. Prema shemi spoja na sl.2.9-13a vidimo da su istofazni slijedeći naponi: XA i xa , YB i yb , ZC i zo .



Sl. 2.9-13

Sekundarni fazni naponi xa , yb i zc jednaki su prema shemi spoja linijskim naponima sekundara, i to redom: ca , ab , bc . Prema tome, na vektorskom dijagramu toga spoja moraju biti istofazni slijedeći naponi: NA i ca , NB i ab , te NC i bc . Iz vektorskog dijagrama tog spoja vidimo, da linijski napon sekundarne strane prethodi istoimenom primarnom naponu (npr. ab i AB) za kut od 30° , ili, što je isto, zaostaje za primarnim naponom za kut od 330° . Za spoj prema sl.2.9-13b dobijemo pak da sekundarni napon zaostaje za istoimenim primarnim za kut od 30° .

Ako zamijenimo na jednoj strani početke i svršetke namotaja, ili ako na jednoj strani promijenimo smjer motanja, dobijemo prema sl.1.2-14 medju istoimenim linijskim naponima primara i sekun-



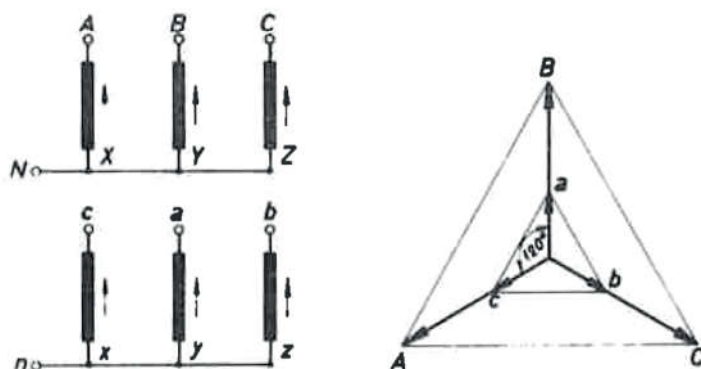
Sl.2.9-14

dara fazni pomak od 150° . U spoju prema shemi na sl.2.9-14a prethodi sekundarni napon pred primarnim za kut 150° , dok u spoju prema b) sekundarni napon zaostaje za isti taj kut za primarnim.

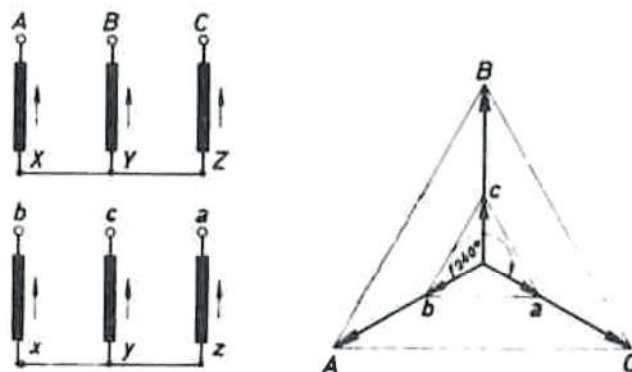
Promotriti ćemo još, kakvu promjenu u vektorskom dijagramu uzrokuje ciklička zamjena priključaka pojedinih svitaka na stezaljke transformatora, (ili, što je isto, ciklička zamjena oznaka stezaljki). U tu svrhu promijenit ćemo u spoju zvijezda-zvijezda prema sl.2.9-11 cikličkim redom oznake sekundarnih stezaljki transformatora, te tako dobijemo spoj prema sl.2.9-15. Iz vektorskog dijagrama vidimo da u tom slučaju sekundarni napon zaostaje za primarnim za kut od 120° . Provedemo li još jednu cikličku zamjenu stezaljki prema sl.2.9-16, dobijemo da nam vektori sekundarnih napona zaostaju za istoimenim primarnim naponima za kut 240° . Prema tome svaka ciklička zamjena oznaka stezaljki uzrokuje pomak faznog napona za 120° . Lako se može ustanoviti da se cikličkom zamjenom mogu u spoju prema sl.2.9-13 dobiti fazni pomaci 90° i 210° , kod spoja prema sl.2.9-14 pomaci od 270° i 30° , a kod spoja prema sl.2.9-12 možemo dobiti još i fazne pomake od 300° i 60° .

Pogledamo li sve moguće spojeve trofaznih transformatora, vidjet ćemo da se oni mogu svrstati u 11 grupa spojeva sa istim faznim pomakom primarnog i sekundarnog napona. Svi mogući fazni pomaci su višekratnik od 30° , što je omogućilo jednostavan način označivanja tih grupa, a i pojedinih spojeva.

Prije svega uvedeno je dogovorom (prema IEC propisima) označivanje spojeva namota slovnim oznakama, koje su usvojene i u našim propisima. Te oznake su dane na sl. 2.9-17. Zaostajanje niskona-



Sl. 2.9-15

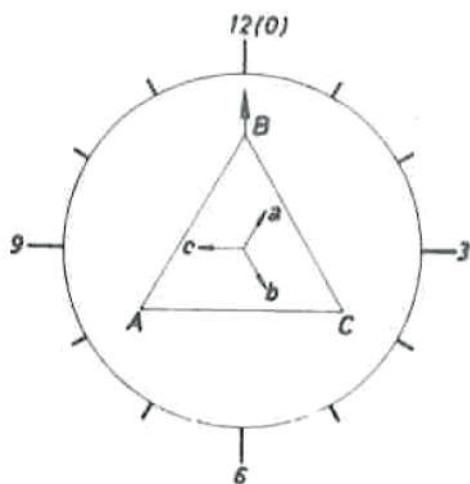


Sl. 2.9-16

	Namot višeg napona	Namot nižeg napona
Otvoreni namot	III	iii
Namot spojen u trokut	D	d
" " " zvijezdu	Y	y
" " " cik-cak	Z	z

Sl. 2.9-17

ponskog faznog napona za istoimenim visekonaponskim naponom označuje se brojem, koji nam pokazuje koliko puta je taj kut višekratnik od kuta 30° . Taj broj naziva se i satni broj. Pomaci između dviju susjednih oznaka na brojčaniku sata iznose, naime, također 30° , pa ako postavimo vektor, koji nam predodžuje napon između nultocke i stezaljke višeg napona, tako, da nam pokriva brojku 12, onda će vektor, koji predodžuje napon između nultocke i istoimene stezaljke nižeg napona, pokrivati na brojčaniku satni broj. Na sl. 2.9-18 načinjen je taj postupak za spoj transformatora prema slici 2.9-14b. Za taj spoj, kod koga napon sekundara kasni za primarnim za 150° , iznosi satni broj 5.



Sl. 2.9-18

Spoj dvonamotnog trofaznog transformatora označuje se tako, da se najprije navede slovna oznaka spoja namota višeg napona, zatim slovna oznaka spoja namota nižeg napona i na kraju satni broj. Spoj prema sl.2.9-14b bi prema tome imao oznaku Y d 5 .

U tabeli I. prikazani su uobičajeni spojevi transformatora snage trofaznih i jednofaznih. U tabeli su osim oznaka prema našim i IEC propisima dane i oznake prema VDE propisima. VDE propisi označuju grupu spoja velikim slovima A, B, C, D, a sam spoj brojem uz grupnu oznaku.

U tabeli su takodjer dane i oznake trofaznih i jednofaznih štednih transformatora.

Spojevi transformatora sa više od dva namota na stupu označuju se takodjer, da se najprije navede slovna oznaka namota najvišeg napona, iza koje slijede u redu padajućih napona slovne oznake ostalih namota s pripadnim satnim brojem, uzevši vektor najvišeg napona kao referentni. Tako će npr. transformator, koji ima tri namota za napone 110 000 V (zvijezda) 60 000 V (zvijezda) 10 000 V (trokut) i kome su namoti spojeni u zvijezdu u fazi, a namot spojen u trokut zaostaje za njima za 150° , imati oznaku Y, y 0, d 5 .

T a b e l a I

Trofazni transformatori						
Oznaka		Dijagram spoja		Shema spoja		Oznaka VDE
Grupa	Spoj	gn - namot	dn - namot	gn - namot	dn - namot	
0	Dd 0					A ₁
	yy 0					A ₂
	Dz 0					A ₃
6	Dd 6					B ₁
	yy 6					B ₂
	Dz 6					B ₃

5	Dy 5			C ₁
	yd 5			C ₂
	yz 5			C ₃
11	Dy 11			D ₁
	yd 11			D ₂
	yz 11			D ₃
0	III y 0			
0	y 0			
<i>Jednofazni transformatori</i>				
0	I i 0			
0	I 0			

3. ZAGRIJAVANJE I HLADJENJE

Proračun zagrijavanja električkih strojeva je osnovni proračun, koji određuje nominalnu, odnosno trajnu snagu, koju možemo dobiti iz nekog stroja. Kod svih neelektričkih strojeva, je trajna snaga određena drugim uvjetima, a zagrijavanje igra sporednu ulogu. Par- ni ili eksplozivni stroj preopterećen više od kojih 20 % preko svoje nominalne snage će se zaustaviti. Nasuprot tome, svi elek- trički strojevi, a pogotovo transformatori, se bez opasnosti mogu kratkotrajno preopteretiti čak i 2 - 3 puta više od nominalne snage.

Kod izmjeničnih strojeva (asinhronih, sinhronih i kolektorskih) postoji ipak stanoviti maksimalni moment, iznad kojega se ne može ići sa teretom, jer ga stroj ne može savladati. Kod istosmjernih strojeva je maksimalni teret određen kolektorom, tj. pojavom is- krenja prilikom komutacije. Kod transformatora ne postoji uopće nikakovo ograničenje osim zagrijavanja. Kako će biti dalje pokaza- no, životna dob jednog električkog stroja ili transformatora, tj. životna dob njegove izolacije, je to veća što su manje temperature, koje stroj postiže u pogonu. Normalne izolacije od papira ili pamu- ka mogu podnijeti ugrijavanje na 95° - 110° C, a da životna dob ostane još uvijek na ekonomskim granicama. Zato te temperature pred- stavljaju granične vrijednosti dozvoljenog ugrijavanja. Iz računa zagrijavanja ćemo vidjeti, da su dozvoljena kratkotrajna preoptere- ćenja stroja, a da se ipak ne predje preko granične temperature. Iz svega ovoga je očito, da ćemo jedan električki stroj ili transforma- tor moći to više opteretiti, što ga bolje hladimo. Prilikom dimen- zioniranja električkih strojeva će specifična opterećenja stroja bi- ti određena upravo zagrijavanjem stroja. Dimenzioniramo li stroj ili transformator što lakšim, gubici mu sve više rastu, a time i problem odvoda topline postaje sve veći.

3.1 Prijelaz topline

Sa nekog tijela, čija je temperatura veća od temperature okolnog prostora, prelazi topline u okolinu na tri načina : vodjenjem, isi- javanjem i konvekcijom. Količina topline, koja se okolini predaje vodjenjem i konvekcijom, ovisna je bitno o svojstvima okoline. Na- suprot tome, količina topline koju tijelo isijava u okolinu ovisi samo o svojstvima dotičnog tijela.

3.11 Vodjenje topline

Neka nam ploča od nekog materijala razdijeljuje u prostoru dva područja u kojima vladaju različite temperature t_1 i t_2 . Plo- ča ima debljinu d i površinu S . Količinu topline, koja u jedinici vremena prelazi iz jednog prostora u drugi, označimo sa Q . Uz konstantni presjek S duž cijelog puta u toj ploči, kroz koju topline struji, iznositi će količina topline

$$Q = \lambda \frac{S}{d} (\vartheta_1 - \vartheta_2) = \frac{\Theta}{\frac{d}{\lambda}} \quad (3.1-1)$$

$$\Theta = \vartheta_1 - \vartheta_2$$

Formula je analogna Ohmovom zakonu $I = U/R$. Zato je iznos $d/\lambda S$ ($^{\circ}\text{C/W}$) nazvan toplinskim otporom, a λ specifičnom toplinskom vodljivošću ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$). Specifična toplinska vodljivost različitih materijala dana je u tablici 1.

T a b l i c a 1

Toplinske vodljivosti materijala

- a) Vodljivost željeznih limova u uzdužnom smjeru (λ_1) i u poprečnom smjeru (λ_2) ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$):

		λ_1	λ_2
slabo legirani limovi	0,5 mm papirom izolirani	57	1
emajlirani limovi	0,44 mm	47	1,3
neemajlirani limovi	0,44 mm	47	1,6
transformatorski limovi	0,35 mm sa 4 % Si	32	0,5

- b) Vodljivost masivnih metala ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$):

elektrolitički bakar	384	čelik	45
aluminij	202	čisto željezo	65
mesing	104	sirovo željezo	46

- c) Vodljivost tekućina i plinova 0°C i 760 mm Hg ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$):

transformatorsko ulje	0,165	zrak	0,022
ulje za podmazivanje	0,116	zrak (kod 60°C i 760 mm Hg)	0,028
inerteen	0,155	vodik	0,147
voda	0,58		

- d) Vodljivost izolacionih materijala ($\text{W/m}^{\circ}\text{C}$):

platneni papir	0,115
platneni papir natopljen uljem	0,142
platneni papir natopljen lakom	0,170
prešpan	0,170
prešpan natopljen uljem	0,227
tinjac	0,360
mika-vrpca	0,264
mikafolij	0,232
mikanit grijaći	0,28
mikanit formni	0,24
azbest	0,2
pamuk nenatopljen	0,066
pamuk natopljen lakom	0,24
platno natopljeno lakom	0,146
staklo	0,8
porculan	1,0
tvrda guma	0,18
parafin	0,26
asfalt	0,70
drvo duž vlakna	0,16
drvo poprečno na vlakna	0,04
pluto	0,30
lakovi	0,2 - 0,3

Ako uz istu razliku temperature θ hoćemo prenijeti što veću količinu topline, moramo kod stroja načiniti što tanju izolaciju, sa što boljom toplinskom vodljivošću. Slojeve zraka unutar izolacije treba i zbog hlađenja izbjegavati, jer je vodljivost zraka mnogo manja nego ostale izolacije te on povećava potreban pad temperature. Impregniranjem namotaja poboljšavaju se izolaciona svojstva i prijelaz topline.

Ukoliko toplina prelazi kroz više slojeva različitih materijala, računamo toplinski otpor, odnosno njegovu recipročnu vrijednost, tj. toplinsku vodljivost, analogno kao za serijsku kombinaciju električkih otpora.

3.12 Odvod topline konvekcijom

Prelaz topline sa površine tijela na rashladno sredstvo se vrši vodjenjem samo na čestice plina i tekućina neposredno uz površinu tijela. Dalje te čestice prenose toplinu vlastitim gibanjem, tj. miješanjem toplih i hladnih slojeva rashladnog sredstva. Ovakav način prenošenja topline nazivamo konvekcijom. Prelaz topline će pri tome ovisiti znatno o brzini i turbulenciji strujanja rashladnog sredstva. Kod strojeva sa prirodnim hlađenjem će se, zbog zagrijavanja rashladnog sredstva pojaviti uzgon, koji će uzrokovati njegovo strujanje. Da bi se uz isti uzgon dobile što veće brzine strujanja, potrebno je da otpor strujanja bude što manji. Zbog toga kanali za rashladno sredstvo moraju biti što širi. Ako je sloj rashladnog sredstva tanak, naglo se smanji odavanje topline prirodnom konvekcijom, pa ekvivalentna vodljivost sloja pada sve do same konduktivne toplinske vodljivosti rashladnog sredstva. Zato kanali u ulju ne smiju biti uži od 4 - 7 mm, a u zraku od 14 mm. Ukoliko, naravno, hlađenje nije dovoljno, može se odvođenje konvekcijom povećati prisilnom cirkulacijom rashladnog sredstva.

Za količinu topline, određenu u jedinici vremena konvekcijom, vrijedi jednadžba

$$Q = h_k \cdot \theta \cdot S \quad [W] \quad (3.1-2)$$

Koeficijent odvoda topline h_k ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$) ovisi, kako je već rečeno, o toplinskim svojstvima rashladnog sredstva, geometrijskom obliku rashladne površine, brzini strujanja, turbulenciji itd.

Za odavanje topline prirodnom konvekcijom sa beskonačno široke vertikalne plohe visine H na zrak vrijedi teoretski približno :

$$h_k = 1,3 \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{\frac{\theta}{H}} \quad (W/m^2 \text{ } ^\circ C)$$

gdje je γ (kg/m^3) specifična masa rashladnog sredstva, θ = razlika između temperature površine i temperature hladnog rashladnog sredstva.

Pokusi kod električkih strojeva su pokazali mnogo manji utjecaj linearnih dimenzija i nadtemperature, nego što ga daje teorija o hlađenju beskonačno široke ravne plohe. Za zrak približno vrijedi:

$$h_k = 6,5 + 0,05 \theta \quad [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$$

uz $\theta = 35 \text{ } ^\circ C$ dobijemo $h_k \approx 8 \text{ W/}^\circ C m^2$

3.13 Isijavanje topline

Prema Stefan-Boltzmanovom zakonu iznosi količina topline, koja se u jedinici vremena isijava sa jedinice površine apsolutno crnog tijela u prostor, čija je apsolutna temperatura nula

$$Q = \sigma \cdot T^4 = 5,7 \cdot 10^{-8} T^4 \quad (W/m^2) \quad (3.1-3)$$

T = apsolutna temperatura tijela ($^\circ K$)

Ako sa T_0 označimo apsolutnu temperaturu okoline, a tijelo nije apsolutno crno, vrijedi :

$$Q' = 5,7 \cdot \nu \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \quad [W/m^2] \quad (3.1-4)$$

Faktor crnoće ν je ovisan o stanju površine tijela i uzima se prema tabeli 2 .

T a b e l a 2

Faktor crnoće

apsolutno crno tijelo	1,00
lijevano željezo - hrapavo	0,97
kovko željezo - mat	0,95
izolacije (papir i vlakna)	0,90
bakreni lim	0,40
kovko željezo - polirano	0,29
mesing - mat	0,20
bakar poliran	0,17

Kod električkih strojeva se može u prosjeku za faktor crnoće, u slučaju da tijela koja se nalaze u okolini ne reflektiraju znatnije količine topline (tj. imaju temperaturu okoline ili im je faktor crnoće što veći), uzeti iznos od 0,92. U protivnom slučaju se može to uzeti u obzir smanjenje faktora crnoće na 0,85.

Radi lakšeg računa izražava se količina topline odavana isijavanjem u slijedećem obliku :

$$Q' = h_i \theta \quad [W/m^2] \quad (3.1-5)$$

gdje je

$$\theta = T - T_0 = \vartheta - \vartheta_0 \quad [^\circ C]$$

Koeficijent h_i nije sada više konstantan, nego ovisi o temperaturi tijela i okoline. Vrijednosti h_i sa tijelo sa faktorom crnoće 0,85 dani su u tabeli 3.

T a b l i c a 3

Koeficijent isijavanja topline h ;

ϑ/K	10°C	20°C	30°C
5	4,63	5,03	5,55
10	4,65	5,16	5,69
20	4,91	5,42	5,98
30	5,17	5,71	6,28
40	5,44	6,05	6,59
50	5,73	6,30	6,91
60	6,03	6,62	7,25
70	6,34	6,95	7,60
80	6,67	7,30	7,98

Kako vidimo iz tabele za električke strojeve se može uz temperaturu okoline od 30°C i za nadtemperaturu od 40°C za h uzeti prosječan iznos od 6,6 W/m² °C.

Za ukupnu količinu topline, što je isijava u jedinici vremena jedan električki stroj površine S , možemo dakle napisati:

$$Q = 6,6 \cdot S \cdot \vartheta \text{ [W]} \quad (3.1-6)$$

3.2 Zagrijavanje homogenog tijela

Promatrati ćemo zagrijavanje homogenog tijela mase m (kg) u kome se gubicima razvija topline jednoliko po cijelom volumenu. Razvijena topline u jedinici vremena iznosi Q/W . Tijelo ima površinu S (m²), specifičnu toplinu c (W_s/kg °C) i koeficijent odvođenja topline h (W/m² °C). Količina topline razvijena za element vremena dt troši se za povišenje temperature tijela za $d\vartheta$, a jednim dijelom prelazi na okolinu. Prema tome vrijedit će slijedeća diferencijalna jednačina:

$$Q dt = m \cdot c \cdot d\vartheta + S \cdot h \cdot \vartheta \cdot dt \quad (3.2-1)$$

Tijelo postiže maksimalnu temperaturu kada je $d\vartheta = 0$. Iz gornje diferencijalne jednačine dobiva se tada za maksimalnu nadtemperaturu spram okoline:

$$\vartheta_m = \frac{Q}{S \cdot h} \quad (3.2-2)$$

Diferencijalnu jednačinu možemo sada napisati u slijedećem obliku:

$$\begin{aligned} \vartheta_m \cdot S \cdot h \cdot dt &= m \cdot c \cdot d\vartheta + S \cdot h \cdot \vartheta \cdot dt \\ S h (\vartheta_m - \vartheta) dt &= m \cdot c \cdot d\vartheta \end{aligned} \quad (3.2-3)$$

$$dt = \frac{m \cdot c}{S \cdot h} \cdot \frac{d\vartheta}{\vartheta_m - \vartheta} = \frac{T}{\vartheta_m - \vartheta} d\vartheta$$

gdje je $T = \frac{m \cdot c}{S \cdot h}$ (3.2-4)

konstanta, koja ima dimenziju vremena, pa se naziva vremenska konstanta zagrijavanja.

Rješenje diferencijalne jednačbe (3.2-3) je

$$t = -T \cdot \ln(\Theta_m - \Theta) + C$$

Konstantu integracije dobivamo iz početnih uvjeta, tj. da je za $t = 0$ nadtemperatura spram okoline $\Theta = \Theta_0$. Tako se za C dobije

$$C = T \cdot \ln(\Theta_m - \Theta_0)$$

Uvrštenjem integracione konstante dobiva se

$$t = T \ln \frac{\Theta_m - \Theta_0}{\Theta_m - \Theta} \quad (3.2-5)$$

Rješenjem ove jednačbe po nadtemperaturi Θ dobiva se

$$\Theta = \Theta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

što se može napisati i u obliku

$$\Theta = (\Theta_m - \Theta_0) (1 - e^{-\frac{t}{T}}) + \Theta_0 \quad (3.2-6)$$

Za $\Theta_0 = 0$ dobijemo :

$$\Theta = \Theta_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (3.2-7)$$

Na slici 3.2-1 predstavljena je krivulja zagrijavanja, koja odgovara jednačbi (3.2-7).

Vremenska konstanta T jednaka je sup tangenti te krivulje. Iz jednačbe (3.2-5) dobijemo

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_m - \Theta}{T} \quad (3.2-8)$$

Ako u bilo kojoj točki krivulje zagrijavanja postavimo tangentu, odsjecat će ona na pravcu, povučenom okomito na os ordinatu u točki Θ_m , slijedeći iznos (vidi sl.2.3-1)

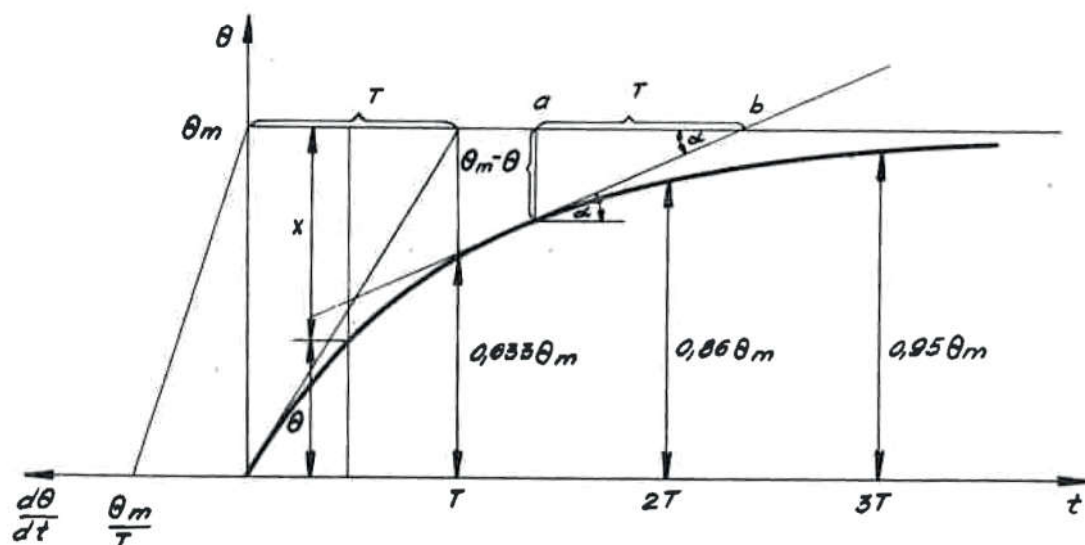
$$\overline{ab} = \frac{\Theta_m - \Theta}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\Theta_m - \Theta}{\frac{d\Theta}{dt}}$$

a to je prema jednačbi (3.2-8) upravo jednako T :

$$\overline{ab} = T$$

Ako u jednačbu (3.2-4) uvrstimo (3.2-2) dobijemo za vremensku konstantu T slijedeći iznos

$$T = \frac{m \cdot c \cdot \Theta_m}{Q} \quad (3.2-9)$$



Sl. 3.2-1
Krivulja zagrijavanja homogenog tijela

Brojnik $m \cdot c \cdot \theta_m$ predstavlja toplinu akumuliranu u tijelu kod nadtemperature θ_m . Zato možemo za vremensku konstantu reći da predstavlja vrijeme koje je potrebno da se tijelo, uz konstantno dovodjenje topline i bez odvoda topline (bez hladjenja), zagrije na maksimalnu temperaturu. Iz jednadžbe (3.2-4) vidimo da je vremenska konstanta to manja, što je produkt $m \cdot c$ manji, a $s \cdot h$ veći, tj. što je manji toplinski kapacitet tijela i bolje hladjenje. Zato će se transformator, ako uz njega postavimo ventilator, brže zagrijati na maksimalnu temperaturu nego uz prirodno hladjenje, ali će ta maksimalna temperatura biti manja nego kod prirodnog hladjenja. Vremenske konstante su obično veće kod većih jedinica, jer je tamo problem hladjenja veći. To, međutim, nije pravilo. Tako npr. jedan transformator od 250 kVA, 6/0,38 kV, s prirodnim hladjenjem ima vremensku konstantu 250 minuta, dok jedan transformator od 12 500 kVA, 30/6 kV, s vještačkom ventilacijom ima vremensku konstantu samo 75 minuta. Transformatori starijih konstrukcija, koje još i danas susrećemo u pogonu, imaju mnogo veću vremensku konstantu nego transformatori suvremene konstrukcije. Tako je prije bila nominalna vrijednost vremenske konstante 5 - 6 sati, a danas je ta vrijednost pala na 1 sat. Stari strojevi su imali male vrijednosti indukcije i gustoće, pa je za istu snagu trebala mnogo teža jedinica nego danas. Moderni orijentirani limovi dozvoljavaju mnogo veću indukciju uz smanjene gubitke. Uz to su metode hladjenja transformatora danas daleko savršenije i efikasnije. Smanjenje težine transformatora i poboljšanje hladjenja su uzrokovali ovo smanjenje vremenske konstante transformatora. Zato možemo reći da je veličina vremenske konstante u neku ruku mjerilo zastarjelosti neke konstrukcije. Treba ipak naglasiti, da su stari transformatori zbog svoje velike vremenske konstante bili mnogo manje osjetljivi na kratkotrajno preopterećenje. Uz to, od dva transformatora iste snage, onaj teži ima bolji stepen djelovanja (ako su transformatori građeni od istog materijala).

U tabeli 3 su prema jednadžbi (3.2-7) za razne iznose vremena trajanja zagrijavanja u odnosu na vremensku konstantu iznosi nad - temperature u odnosu na konačnu maksimalnu temperaturu.

$\frac{t}{T}$	$\frac{\Theta}{\Theta_m} 100$	$\frac{t}{T}$	$\frac{\Theta}{\Theta_m} 100$	$\frac{t}{T}$	$\frac{\Theta}{\Theta_m} 100$
0,01	1	0,6	45,5	1,5	78
0,1	10	0,7	51	2	86
0,2	18,2	0,8	55	3	95
0,3	26	0,9	60	4	98
0,4	34	1	63,3		
0,5	40	1,2	71		

Teoretski se nadtemperatura Θ_m dostiže tek poslije beskonačno dugog vremena. Vremensku promjenu nadtemperature dobijemo iz jednadžbe (3.2-8) tj.

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_m - \Theta}{T}$$

Ona je u svakom momentu proporcionalna razlici $\Theta_m - \Theta$ tj. dužini

X na sl.3.2-1. Nadtemperatura Θ u zavisnosti od $\frac{d\Theta}{dt}$ pred - stavljena je pravcem koji naapsi odsjeca veličinu $\frac{\Theta_m}{T}$, a na ordinatnoj osi Θ_m (vidi sl.3.2-1). Za određivanje maksimalne temperature dovoljno je, dakle, odrediti tangente u dvije točke krivulje zagrijavanja. Na ovome se osniva metoda mjerenja maksimalnog zagrijavanja uz skraćeni postupak zagrijavanja. Zagrijavanje Θ se mjeri u jednakim vremenskim razmacima Δt . Prirast zagrijavanja nanese se u ovisnosti od zagrijavanja $\Delta \Theta$. Spajanjem dobivenih točaka dobiva se pravac, koji na ordinatnoj osi odsjeca Θ .

Postupak je prikazan na sl.3.2-2.

Tako nije potrebno vršiti do kraja dugotrajan pokus zagrijavanja.

Ukoliko se ne primijeni gornja metoda, potrebno je prema VDE propisima, a i prema prijedlogu naših propisa, vršiti pokus zagrijavanja tako dugo, dok prirast temperature ne postane manji od 1°C/sat u zadnja dva sata mjerenja. Dobiveno zagrijavanje smatra se tada stacionarnim. U tom slučaju će ipak još uvijek postojati razlika između mjerene i stvarne maksimalne temperature. Za zadnji sat vrijedi :

$$\frac{d\Theta}{dt} = \frac{\Theta_m - \Theta}{T} = \frac{1^\circ\text{C}}{1\text{sat}}$$

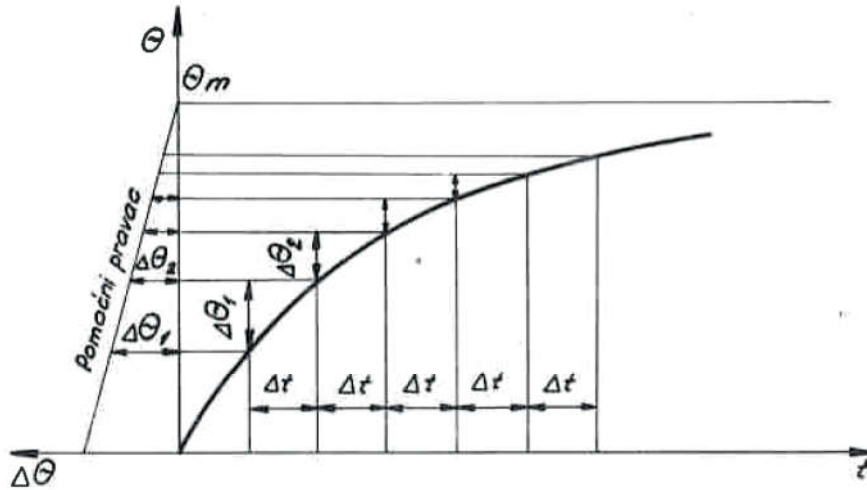
odnosno

$$\Theta_m - \Theta = T$$

Za transformator, koji ima vremensku konstantu 5 sati, biti će

$$\Theta_m - \Theta = 5^\circ\text{C}$$

Veliki transformatori s umjetnim hladjenjem imaju danas $T = 1\text{ sat}$, pa prema tome $\Theta_m - \Theta = 1^\circ\text{C}$.



Sl. 3.2-2

Određjivanje maksimalnog zagrijavanja pomoću skraćenog postupka zagrijavanja

Na sl.3.2-3 prikazan je dijagram zagrijavanja za tri slučaja. Za slučaj malog tereta, malih gubitaka, pa prema tome niske konačne temperature zagrijavanja Θ_m , te za slučaj srednjeg tereta i za slučaj jačeg tereta. Pošto se radi o zagrijavanju jednog te istog stroja ili transformatora, vremenska konstanta je u sva tri slučaja ista, pa je prema tome i sup tangenti svih triju eksponencijalnih krivulja jednaka. Iz toga se vidi da je relativna brzina zagrijavanja kod jednog te istog stroja nezavisna o jakosti zagrijavanja odnosno visini tereta.

Ako u diferencijalnu jednadžbu zagrijavanja (3.2-1) stavimo $Q = 0$, tj. da nema dovoda topline, dobijemo jednadžbu hlađenja tijela

$$dt = -\frac{m \cdot c}{S \cdot h} \cdot \frac{1}{\Theta} d\Theta \quad (3.2-10)$$

Rješenje ove diferencijalne jednadžbe je

$$t = -T \ln \Theta + C$$

Konstanta C se dobije iz početnih uvjeta za $t = 0$, $\Theta = \Theta_m$:

$$C = T \cdot \ln \Theta_m ; \quad t = T \cdot \ln \frac{\Theta_m}{\Theta}$$

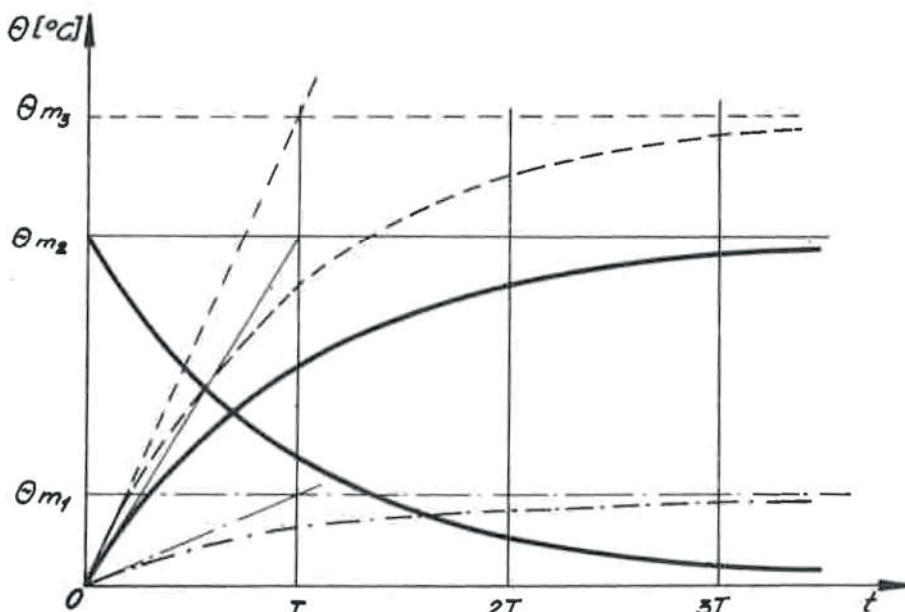
Ako ovu jednadžbu riješimo po Θ dobijemo

$$\Theta = \Theta_m \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.2-11)$$

Pri tome ne smijemo zaboraviti da je Θ nadtemperatura stroja spram okoline. Na sl.3.2-3 je predstavljena i krivulja hlađenja

(za srednju maksimalnu temperaturu). Ona je zrcalna slika krivulje zagrijavanja obzirom na pravac $\theta = 0,5\theta_m$.

Zagrijavanje tijela možemo za bilo koju količinu razvijene topline prikazati uvijek u istom dijagramu, ako na apscisnu os nanesemo vrijeme s jedinicama u vremenskoj konstanti t/T , a na ordinatu temperaturu u postocima maksimalne temperature. Na taj način

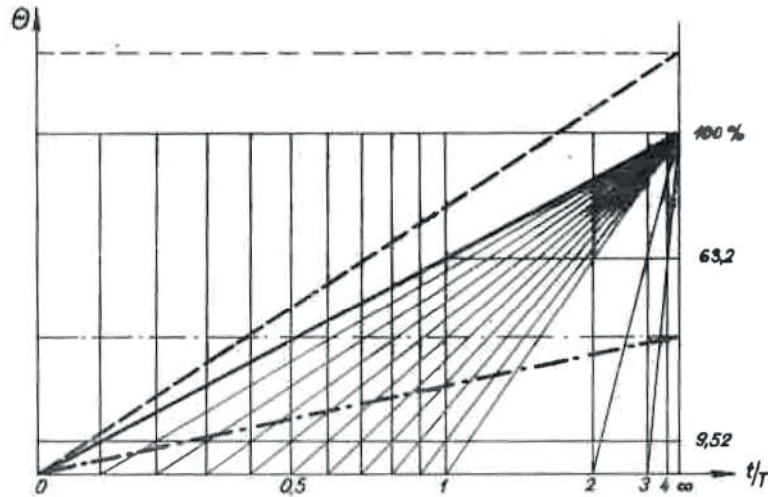


Sl. 3.2-3

Krivulja zagrijavanja homogenog tijela uz različite maksimalne nadtemperature

smo postigli da ovaj dijagram vrijedi za svaki stroj, za svaki slučaj bilo koje vremenske konstante, kao i za svaki slučaj bilo kojeg opterećenja. Svakom opterećenju, naime, odgovara jedno konačno maksimalno zagrijanje " θ_m ", koje je u dijagramu uneseno sa 100 %. Ako namot opteretimo nominalnom strujom, onda očekujemo da će se on zagrijati do propisima dozvoljenog maksimalnog zagrijanja, te je u tom slučaju konačno zagrijanje 100 % od " θ_m " jednako maksimalno dozvoljenom zagrijanju " θ_d ". Ako međutim namot preopteretimo jednom većom strujom od nominalne, onda moramo očekivati da maksimalna temperatura, pod pretpostavkom trajnog pogona, prelazi propisima dozvoljenu temperaturu. U tom slučaju služimo se ovim dijagramom na taj način, da mjerilo na ordinati promijenimo tako, da 100 % " θ_m " odgovara novoj višoj konačnoj temperaturi, koju bi dostigli u trajnom pogonu s ovim preopterećenjem, pa prema tome u novom mjerilu maksimalno dozvoljeno zagrijanje " θ_d " dolazi ispod maksimalnog zagrijanja "100 % θ_m ". Ako sada prenesemo taj dijagram u drugi dijagram prema sl.3.2-4 u kojem je apscisa nacrtana s eksponencijalnom skalom, onda dobijemo te eksponencijalne krivulje u obliku pravaca. Kod crtanja takvog dijagrama možemo eksponencijalnu razdiobu i grafički vrlo jednostavno odrediti time, da iz desnog gornjeg kuta, koji odgovara 100 % θ_m i vremenu ∞ , povučemo ravnu crtu u lijevi donji kut i na visini od 63,2 % θ_m dobijemo sjecište, koje daje na apscisi točku 1. Ako iz desnog gornjeg ugla povučemo pravac do te donje točke

1 dobijemo na visini od 63,2 % Θ_m sjecište sa kojim je određena točka 2, i tako dalje.

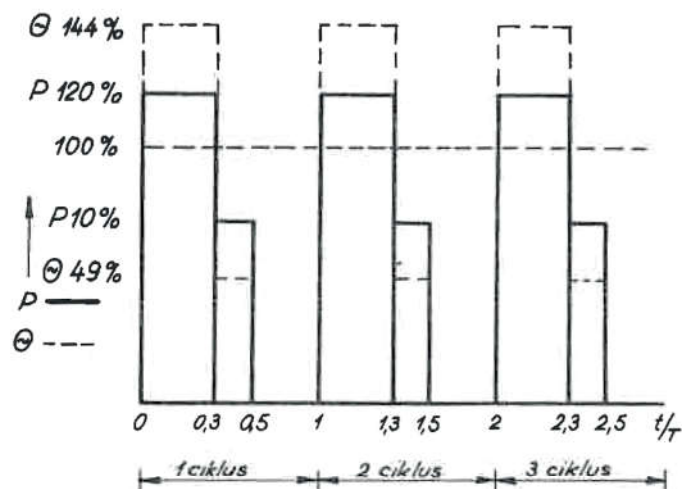


Sl. 3.2-4

"Univerzalni" dijagram zagrijavanja

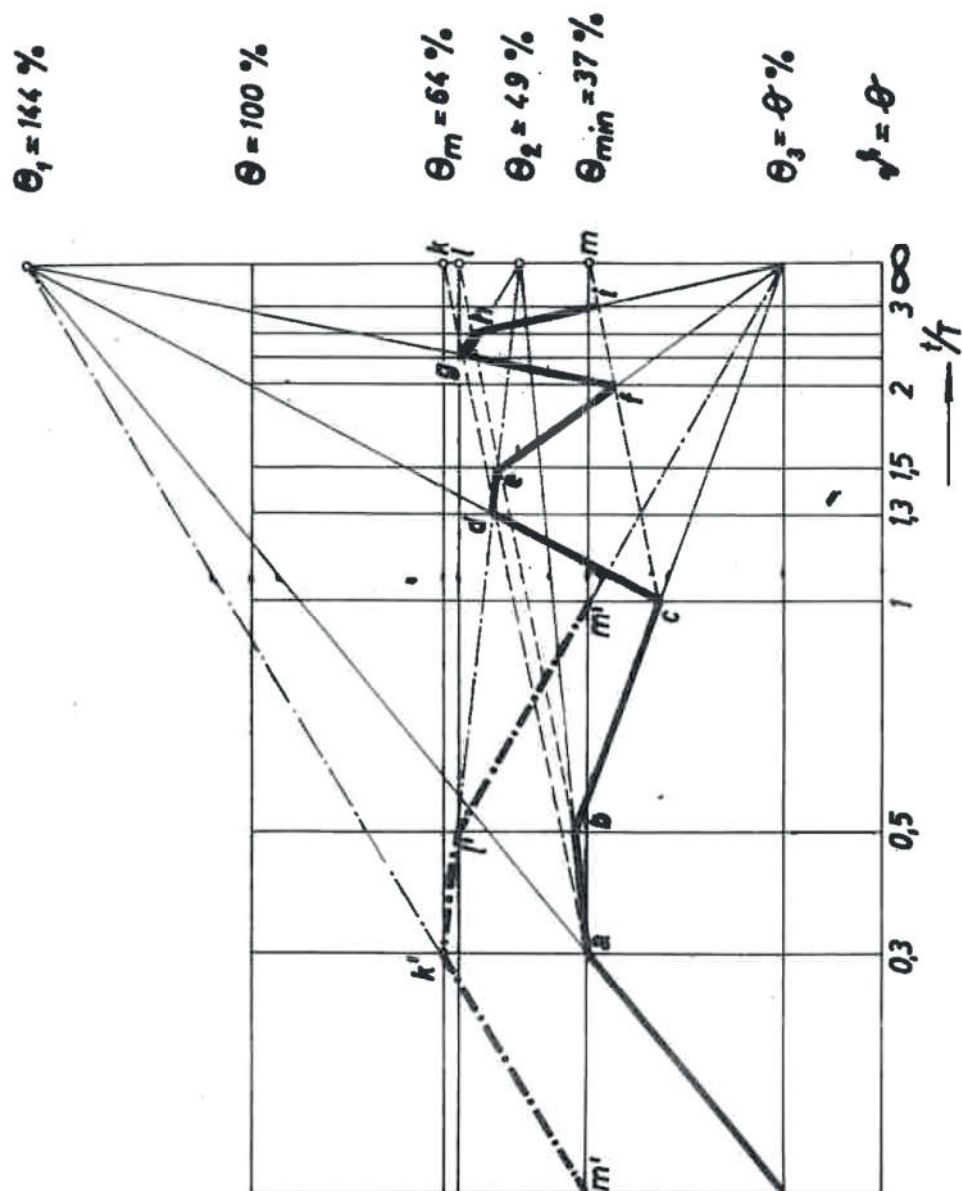
Na isti način možemo načiniti i finiju razdiobu na desetinke jednostavno tako, da na isti način tražimo sjecište na visini od 9,52 % Θ_m .

Ako u ovaj dijagram na apscisu unesemo vrijednost vremena podijeljenog s vremenskom konstantom dotičnog tijela, onda nam taj isti dijagram može služiti za razmatranje kod svake vremenske konstante tako, da se samo mjerilo apscise mijenja prema veličini vremenske konstante.



Sl. 3.2-5

Isprekidani pogon



Sl. 3.2-6

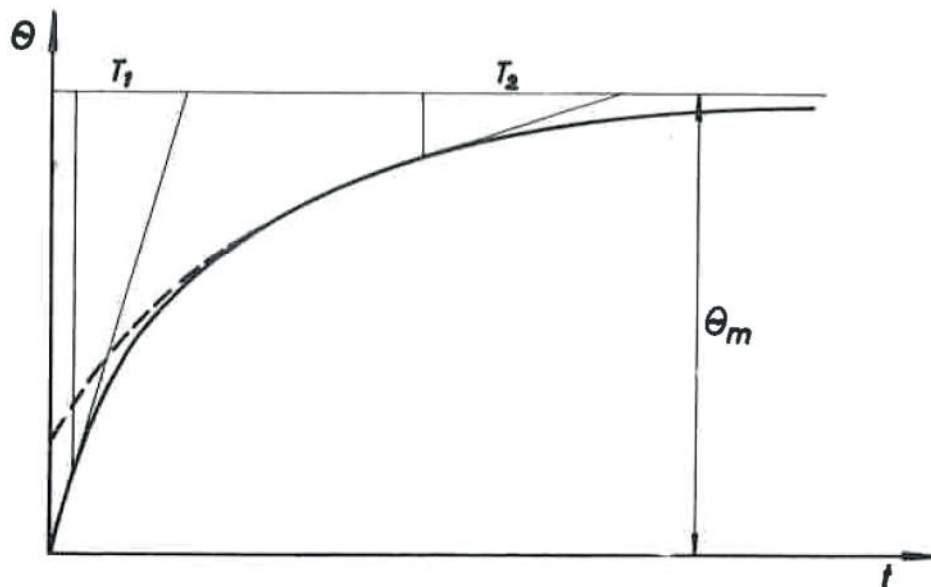
Zagrijavanje transformatora kod isprekidanog opterećenja prema sl. 3.2-5

Razmatrajmo sada za jedan transformator pogonski slučaj s isprekidanim pogonom u kojemu nema konstantnog tereta, već se teret mijenja u ciklusima od, recimo, tri vremenske faze, kako je to prikazano u priloženoj sl.3.2-5. Apscisa u tom vremenskom dijagramu je već u mjerilu vremenske konstante, dok je teret izražen sa gubicima u ordinati, jer je maksimalno zagrijanje " Θ_m " u trajnom pogonu kod određenog tereta proporcionalno gubicima, pa možemo pisati :

$$\Theta_m = \frac{Q}{S \cdot h} = k \cdot P_g$$

Ako se poslužimo prije opisanim dijagramom s eksponencijalnom apscisom dobijemo uz radni ciklus prema sl.3.2-5 zagrijavanje tog transformatora u pogonu, kako je to prikazano na sl.3.2-6.

Pretpostavimo kod početka pokusa temperaturu okoline od 15°C i hladan transformator. Za vrijeme od $0,3$ vremenske konstante tokom prve periode diže se temperatura do točke "a", koja je određena s jedne strane s maksimalnom temperaturom " Θ_{m1} " i s druge strane s vremenom od $0,3$ vremenske konstante. U istom smislu u vremenu druge periode tereta dobijemo točku "b", dok se u trećoj periodi iskopčani transformator ohladi do točke "c". Ako sada postupamo istom grafičkom metodom u drugom ciklusu dobijemo točke : "d, e, f" i u trećem ciklusu točke : "g, h, i". Točke "a, d, g" moraju ležati na zajedničkom pravcu, koji kod $\frac{t}{T} = \infty$ dostiže točku "k", koja predstavlja maksimalnu temperaturu kod navedenog trajno isprekidanog pogona. Isto tako dobijemo točku "l" i točku "m".



Sl. 3.2-7

Krivulja zagrijavanja transformatora

Sada možemo nacrtati na lijevoj strani kako će se u trajno isprekidanom pogonu mijenjati temperatura namota za vrijeme svakog ciklusa, što je u sl. 3.2-6 označeno s pravcima između točaka "m' k' l' m'".

Ove izvedene jednadžbe vrijede teoretski egzaktno samo za slučaj zagrijavanja, odnosno hlađenja, jednog homogenog tijela u kojem se podjednako u cijelom tijelu razvija toplota. Niti stroj, niti transformator ne predstavlja homogeno tijelo, a osim toga se toplota razvija samo u aktivnom dijelu. Međutim, promatramo li zagrijavanje pod teretom, koji nije bitno veći od nominalnog ili je čak manji, onda temperatura namota tako polagano raste, da se vrijeme prelaza topline od aktivnog na neaktivni materijal može zanemariti, pa se može pretpostaviti da se radi o homogenom tijelu. Pogreška je u tom slučaju tako malena da praktički ne dolazi do izražaja. Kada se za jedan transformator snimi krivulja zagrijavanja, izgleda ona kako je prikazano na sl. 3.2-7. Za usporedbu je nacrtana na istom dijagramu crtkanom linijom krivulja zagrijavanja homogenog tijela. Za iznose vremenske konstante dobivaju se različite vrijednosti već prema tome na kojem se dijelu krivulje nalazimo. Na početku procesa zagrijavanja krivulja ima mnogo manju vremensku konstantu nego za preostali dio procesa. Zato kod transformatora i električkih strojeva kada govorimo o vremenskoj konstanti zagrijavanja, govorimo o nekoj vrijednosti, koja je jednaka vremenskoj konstanti analognog homogenog tijela. Kod točnijih računa (i procesa zagrijavanja) moraju se kombinirati dva procesa zagrijavanja. Zagrijavanje namotaja možemo promatrati kao zagrijavanje homogenog tijela. Zagrijavanje ulja možemo također promatrati kao odvojeni proces zagrijavanja. Namotaj ima mnogo manji toplinski kapacitet nego ulje, a uz to je odvod topline s namotaja na ulje mnogo bolji nego s ulja na okolinu, pa namotaj ima mnogo-struko manju vremensku konstantu nego ulje. Vremensku konstantu namotaja možemo izračunati prema jednadžbi (3.2-9) na slijedeći način:

$$T_{Cu} = \frac{m_{Cu} \cdot c_{Cu} \cdot \theta_m}{Q} = \frac{c_{Cu} \theta_m}{Q/m_{Cu}}$$

gdje je " θ_m " razlika temperature bakra i ulja. U nazivniku su gubici po kilogramu bakra, a za te možemo pisati:

$$\frac{Q}{m_{Cu}} = \frac{\rho}{\gamma} r^2$$

za temperaturu bakra 75°C dobije se za specifične gubitke

$$\frac{Q}{m_{Cu}} = 2,7 r^2 \cdot 10^{-12}$$

Tako dobijemo za vremensku konstantu namota:

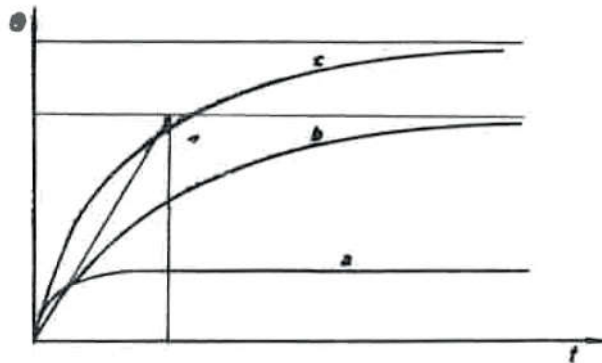
$$T_{Cu} = \frac{c_{Cu} \cdot \theta_m}{2,7 \cdot r^2 \cdot 10^{-12}}$$

Mjerenjem na transformatorima je ustanovljeno, da bakar ima prosječno 15°C višu temperaturu nego ulje. Tako dobijemo za vremensku konstantu namota, uzevši u obzir da je specifična toplota bakra $390 \text{ Ws/kg } ^\circ\text{C}$ a gustoća struje $r = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, slijedeći iznos:

$$T_{Cu} = \frac{390}{2,7 \cdot 9} \cdot 15 = 240 \text{ sek} = 4 \text{ min}$$

Vremenska konstanta namotaja je, dakle, mnogo manja od vremenske konstante ostalih konstrukcijskih dijelova. Na sl. 3.2-8 krivulja "a" prikazuje nadtemperaturu bakra spram ulju, a krivulja "b" nadtemperaturu ulja spram okoline u ovisnosti o vremenu. vidimo da se na-

motaj mnogo brže zagrije nego ulje. Stvarna krivulja zagrijavanja namotaja c spram okoline se dobije približno zbrajanjem krivulja a i b, kako je na sl.3.2-8 provedeno. Isključivši početak, proces zagrijavanja se odvija po eksponencijalnoj krivulji čija je



Sl. 3.2-8

Približna metoda za određivanje krivulje zagrijavanja transformatora

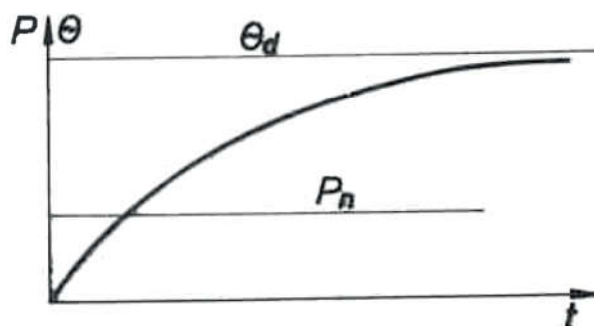
vremenska konstanta jednaka vremenskoj konstanti ulja. Prilikom naglih preopterećenja će se zbog male vremenske konstante vrlo brzo zagrijati namotaj. Ukoliko to preopterećenje traje kratko vrijeme, promjena temperature ulja će biti nematna. Iz toga se vidi da nije dovoljno mjeriti samo temperaturu ulja u transformatoru, jer se prilikom kratkih preopterećenja mogu u namotaju razviti visoke temperature, bez obzira što temperatura ulja ostaje u dozvoljenim granicama.

3.3 Vrste pogona

Transformatori, kao i električki strojevi, rade u pogonu normalno sa promijenljivim opterećenjem, koje je obično teško izraziti nekim zakonitostima. U pogonu, međjutim, susrećemo i takova opterećenja, koja se odvijaju po izvjesnim pravilima. Tako razlikujemo slijedeće tipične vrste opterećenja.

3.31 Trajni pogon

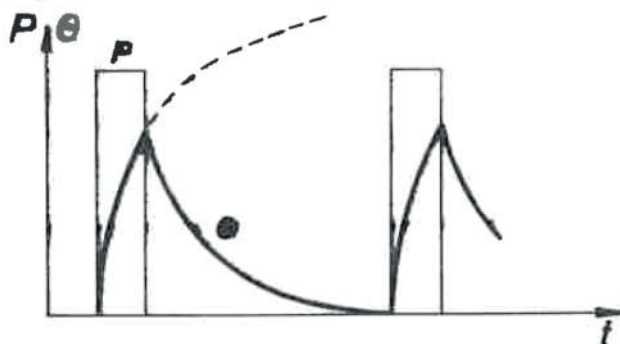
Stroj je opterećen konstantnom snagom dovoljno dugo da se postigne konačna maksimalna temperatura. Na sl. 3.3-1 je prikazan dijagram takvog opterećenja. Tankom linijom je prikazana snaga stroja u ovisnosti o vremenu, a debljom zagrijavanje. Prikazan je slučaj opterećenja nominalnom snagom. Nominalna snaga transformatora je snaga kojom možemo trajno opteretiti transformator, a da zagrijavanje ne prijedje dozvoljenu vrijednost. Ta snaga je naznačena na natpisnoj pločici transformatora.



Sl. 3.3-1
Trajni pogon

3.32 Kratkotrajni pogon

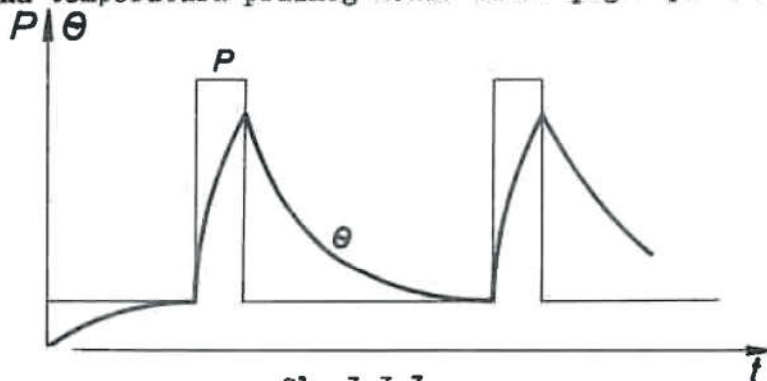
Stroj je opterećen konstantnom snagom kroz određeno vrijeme u kojem se ne zagrije do konačne nadtemperature, a nakon toga je iskopčan dovoljno dugo da se ohladi na temperaturu okoline. Takvo opterećenje je prikazano na sl. 3.3-2.



Sl. 3.3-2
Kratkotrajni pogon

3.33 Trajni pogon sa kratkotrajnim opterećenjem

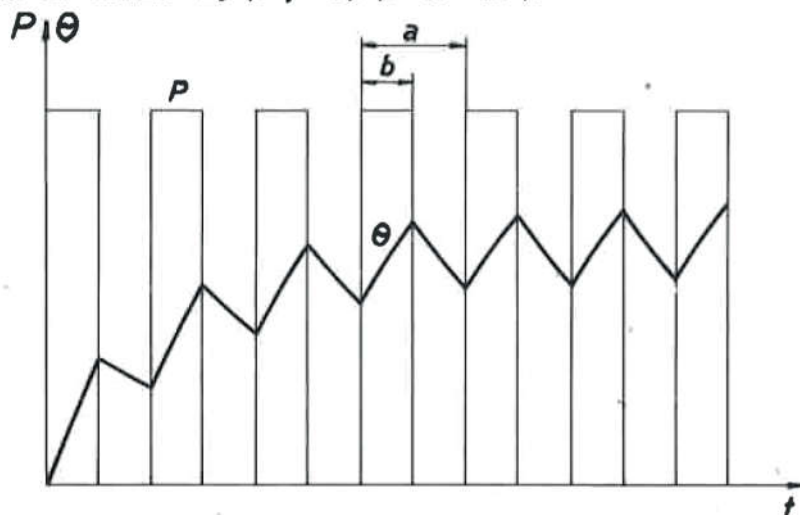
U prvom periodu stroj radi u praznom hodu i zagrije se na temperaturu praznog hoda. Nakon toga stroj se optereti, ali ne dovoljno dugo da bi se zagrijao na maksimalnu temperaturu koja odgovara tome teretu. Nakon toga stroj je u praznom hodu dovoljno dugo da bi se ohladio na temperaturu praznog hoda. Takav pogon prikazuje sl. 3.3-3.



Sl. 3.3-3
Trajni pogon s kratkotrajnim opterećenjem

3.34 Isprekidani (intermitirani) pogon prikazuje sl.3.3-4

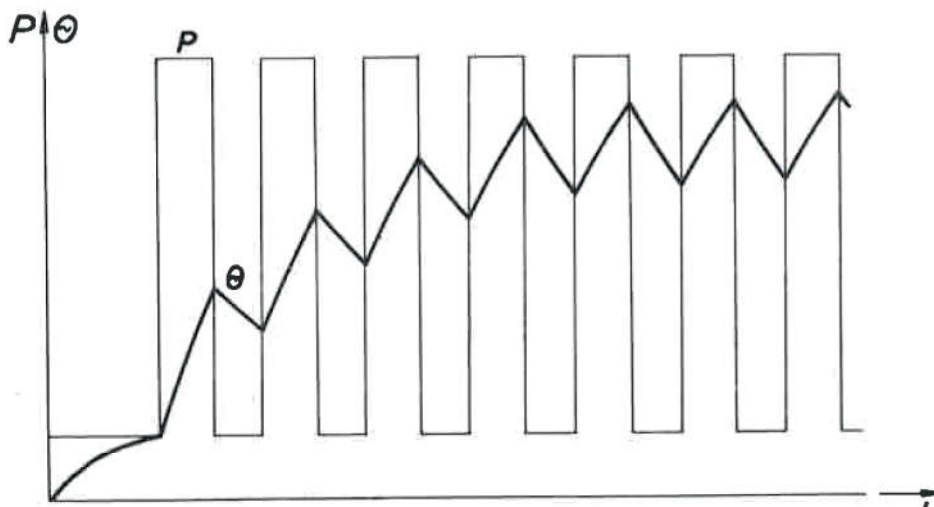
Opterećenje i mirovanje bez napona se izmjenjuju u takvim vremenskim razmacima da se stroj za vrijeme mirovanja ne može ohladiti na temperaturu okoline. Maksimalno trajanje jednog perioda iznosi 10 minuta. Omjer trajanja opterećenja i ukupnog trajanja jednog perioda (b/a) se naziva relativno trajanje opterećenja (intermitencija), a obično se uzima 15 %, 25 % i 40 %.



Sl. 3.3-4
Isprekidani pogon

3.35 Trajni pogon s isprekidanim opterećenjem

Prema sl.3.3-5 izmjenjuju se naizmjenično opterećenja i mirovanje u praznom hodu tako, da se stroj u periodu mirovanja ne može ohladiti na temperaturu praznog hoda. Period i intermitencija su i ovdje isti kao i kod isprekidanog pogona.



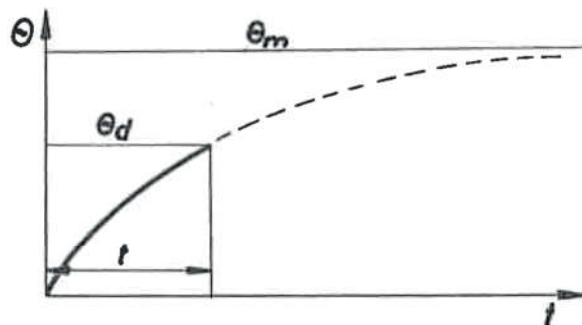
Sl. 3.3-5
Trajni pogon s isprekidanim opterećenjem

3.36 Poljoprivredni pogon

Transformator mora biti tako dimenzioniran da trajno podnaša 60% preopterećenja. U toku godine dozvoljava se 500 sati kratkotrajnog pogona po 12 sati sa $P_n + 100\%$ poslije trajnog pogona sa P_n .

3.4 Kratkotrajni pogon

Iz prijašnjeg izlaganja vidimo da će se opterećeni stroj nakon nekog vremena zagrijati do maksimalne temperature proporcionalne gubicima u stroju. Pri nominalnom opterećenju stroj će se zagrijati do maksimalno dozvoljene nadtemperature " θ_d ". Ako stroj opteretimo više od nominalnog opterećenja, on ne može raditi trajno, nego samo neko ograničeno vrijeme, dok se ne zagrije na dozvoljenu temperaturu. Takav slučaj je prikazan na sl.3.4-1. Na toj slici je " θ_m "



Sl. 3.4-1

Krivulja zagrijavanja kod kratkotrajnog pogona

maksimalna nadtemperatura na koju bi se stroj ugrijao kad bi trajno radio. Ako na visini dozvoljene nadtemperature povučemo horizontalu, dobijemo u sjecištu s eksponencijalnom krivuljom vrijeme, u kojem bi se kod dotičnog preopterećenja namot zagrijao do maksimalno dozvoljene nadtemperature " θ_d ". Ako još više preopteretimo namot, dobijemo još kraće dozvoljeno vrijeme preopterećenja " t_d ". Na osnovu eksponencijalne krivulje može se izračunati to dozvoljeno vrijeme trajanja preopterećenja za određeno preopterećenje stroja ovako:

Iz jednadžbe (3.2-6) dobijemo

$$\frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{\theta - \theta_0}{\theta_m - \theta_0} = \frac{\theta_m - \theta}{\theta_m - \theta_0}$$

$$e^{\frac{t}{\tau}} = \frac{\theta_m - \theta_0}{\theta_m - \theta}$$

Ako ovu jednadžbu riješimo po "t" dobijemo

$$t = T \ln \frac{\Theta_m - \Theta_0}{\Theta_m - \Theta_d}$$

Ako u ovu jednadžbu stavimo za " Θ " maksimalnu dozvoljenu temperaturu ($\Theta = \Theta_d$) dobijemo za dozvoljeno trajanje pogona

$$t_d = T \ln \frac{\Theta_m - \Theta_0}{\Theta_m - \Theta_d} \quad (3.4-1)$$

Iz ove jednadžbe vidimo da će se stroj sa većom vremenskom konstantom smjeti dulje vremena preopteretiti.

Označimo omjer maksimalne i dozvoljene nadtemperature sa p . Kako su prema jednadžbi (3.2-2) maksimalne nadtemperature proporcionalno gubicima u stroju vrijediti će slijedeće:

$$p = \frac{\Theta_m}{\Theta_d} = \frac{P_g'}{P_{gn}}$$

gdje su P_g' gubici kod preopterećenja
 P_{gn} nominalni gubici stroja

Ako sa X označimo omjer struje kod preopterećenja i nominalne struje, a sa ξ omjer gubitaka u bakru i željezu kod nominalnog opterećenja, tj.

$$X = \frac{I'}{I_n}, \quad \xi = \frac{P_{Cu,n}}{P_{Fe}}$$

vrijedit će za omjer gubitaka slijedeće jednadžbe

$$p = \frac{P_g'}{P} = \frac{P_{Fe} + P_{Cu}'}{P_{Fe} + P_{Cu}} = \frac{1 + \frac{P_{Cu}'}{P_{Fe}}}{1 + \frac{P_{Cu}}{P_{Fe}}} \quad (3.4-2)$$

$$p = \frac{1 + \xi X^2}{1 + \xi} = \frac{\xi}{1 + \xi} X^2 + \frac{1}{1 + \xi}$$

Ako jednadžbu (3.4-1) podijelimo sa Θ_d , te ako je $\Theta_0 = 0$ dobijemo

$$t_d = T \ln \frac{p}{p-1} \quad (3.4-3)$$

Iz jednadžbe (3.4-2) možemo za razne X izračunati p , a zatim iz (3.4-3) odgovarajuće dozvoljeno vrijeme pogona.

Međutim, obično računamo radi jednostavnosti samo s gubicima u bakru, koji izravno utječu na temperaturu namota, i zanemarujemo gubitke u željezu, što u stvari predstavlja samo stanovitu rezervu. Pod tom pretpostavkom je maksimalna nadtemperatura proporcionalna gubicima u bakru, a oni su proporcionalni kvadratu struje. Prema tome možemo postaviti jednadžbu da je preopterećenje namota " p " jednako odnosu maksimalne nadtemperature " Θ_m " prema maksimalno

dozvoljenoj nadtemperaturi " θ_d ", a ovo je dalje jednako odnosu gubitaka kod preopterećenja prema nominalnim gubicima, a gubici se odnose kao kvadrati struje, tj.

$$p = \frac{\theta_m}{\theta_d} = \frac{P'_g}{P_{gn}} = \frac{I'^2}{I_n^2} = \chi^2 \quad (3.4-4)$$

Na osnovu toga možemo sada izračunati dozvoljeno vrijeme trajanja pogona za razna preopterećenja kako slijedi :

$$I = 1,50 \cdot I_n ; \quad p = 2,25 ; \quad t_d = T \cdot I_n \frac{2,25}{1,25} = 0,585 \quad T$$

$$I = 2,00 \cdot I_n ; \quad p = 4,00 ; \quad t_d = T \cdot I_n \frac{4}{3} = 0,287 \quad T$$

$$I = 5,00 \cdot I_n ; \quad p = 25,00 ; \quad t_d = T \cdot I_n \frac{25}{24} = 0,042 \quad T$$

$$I = 10,00 \cdot I_n ; \quad p = 100,00 ; \quad t_d = T \cdot I_n \frac{100}{99} = 0,01 \quad T$$

Ako pretpostavimo da imamo stroj ili transformator s vremenskom konstantom zagrijanja od $t = 60$ minuta, onda dobijemo prema izvedenim jednadžbama za slučaj strujnog preopterećenja od 50 %, da se može namot s tim preopterećenjem opteretiti iz hladnog stanja kroz vrijeme od cca $0,585 \cdot T = 35$ minuta. To je, naravno, za preopterećenje od 50 % relativno veliko vrijeme.

3.5 Termičko naprezanje bakra kod kratkog spoja

Kako je već rečeno, najprije se zagrije bakar u transformatoru, a tek mnogo kasnije ulje. Ukoliko je preopterećenje 3 i više puta veće od nominalnog opterećenja, ne će biti vremena da značajnije količine topline prijedju sa bakra na ulje, a da se prije toga bakar ne zagrije preko dozvoljene nadtemperature. Maksimalna temperatura, na koju bi se bakar zagrijao je u ovom slučaju 9 i više puta veća od one kod nominalnog opterećenja. Ako promatramo samo zagrijavanje do dozvoljene temperature, kod jako velikih preopterećenja odvija se ono na dijelu krivulje, koji praktički ne odstupa od tangente na krivulju u točki $t = 0$. To znači da kod proračuna zagrijavanja do dozvoljene temperature možemo računati da nema odvoda topline sa bakra na ulje, tj. da se sva razvijena toplota akumulira u bakru. Upravo ovakav slučaj zagrijavanja imamo kod transformatora u kratkom spoju. Za gubitke u bakru transformatora imali smo

$$P_{cu} = I^2 R = k \cdot \Gamma^2 m_{cu} \quad (3.5-1)$$

gdje je :

$$k = \frac{S}{\gamma} \quad (3.5-2)$$

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \Theta) \quad (3.5-3)$$

ρ_0 = specifični otpor kod 20°C kod temperature okoline

$\Theta = \vartheta - 20^\circ \text{C}$ tj. razlika između temperature bakra i temperature okoline. Za specifični otpor bakra možemo pisati

$$\rho_{Cu} = 0,01754 (1 + 0,00388 \cdot \Theta)$$

Ako za vrijeme kratkog spoja zanemarimo hlađenje bakra, dobijemo za nadtemperaturu, na koju se bakar zagrije, slijedeći iznos

$$\Theta_k = \frac{I_k^2 R_t t}{c_{Cu} m_{Cu}} \quad (3.5-4)$$

gdje je t = vrijeme trajanja kratkog spoja

c_{Cu} = specifična toplota bakra ($390 \text{ Ws/kg}^\circ\text{C}$)

R_t = srednja vrijednost otpora za vrijeme procesa zagrijavanja i iznosi

$$R_t = R (1 + \alpha \Theta_{sr})$$

Θ_{sr} = srednja nadtemperatura za vrijeme procesa zagrijavanja.

Ako je namotaj prije početka kratkog spoja imao srednju temperaturu ϑ_i , a nakon kratkog spoja zagrijao se na temperaturu ϑ_k dobijemo za srednju nadtemperaturu slijedeći iznos

$$\Theta_{sr} = \frac{\vartheta_k + \vartheta_i}{2} - 20 \quad (^\circ\text{C})$$

To možemo pisati i ovako :

$$\Theta_{sr} = \vartheta_i + \frac{\vartheta_k - \vartheta_i}{2} - 20 = \vartheta_i + \frac{\Theta_k}{2} - 20 (^\circ\text{C}) \quad (3.5-5)$$

Struja kratkog spoja

$$I_k = I_n \frac{100}{U_k}$$

Gubitke u bakru u brojniku formule (3.5-4) možemo računati i pomoću jednadžbe (3.5-1), u koju moramo za gustoću struje uvrstiti vrijednost :

$$I_k = I_n \frac{100}{U_k}$$

a za specifični otpor srednju vrijednost za vrijeme procesa zagrijavanja

$$\rho_{sr} = \rho_0 (1 + \alpha \Theta_{sr})$$

Računajući na ovaj način dobijemo

$$\Theta_k = \frac{\Gamma_n^2 \cdot m_{cu} \cdot 100^2 \cdot S_o (1 + \alpha \cdot \Theta_{sr}) \cdot t}{U_k^2 \cdot \delta_{cu} \cdot C_{cu} \cdot m_{cu}} = \frac{100^2 \cdot \Gamma_n^2 \cdot k \cdot t}{U_k^2 \cdot C_{cu}} \quad (3.5-6)$$

Kod transformatora dozvoljavamo da se bakar kod kratkog spoja zagrije na temperaturu 250°C . Uz temperaturu prije početka kratkog spoja 110°C , porasti će temperatura za vrijeme kratkog spoja za $\Theta_k = 250 - 110 = 140^\circ \text{C}$.

Srednja temperatura za vrijeme procesa zagrijavanja će iznositi:

$$t_{sr} = 110 + \frac{\Theta_k}{2} = 180^\circ \text{C}$$

a srednji specifični otpor

$$S_{sr} = 0,01754 [1 + 0,00388 (180 - 20)] \cdot 10^{-6} = 0,0283 \cdot 10^{-6} \quad \frac{\Omega \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

$$k = \frac{S_{sr}}{\delta} = \frac{0,0283 \cdot 10^{-6}}{8,9 \cdot 10^{-3}} \approx 3,2 \cdot 10^{-12}$$

Iz jednačbe

$$\Theta_k = \frac{k \cdot 10^4 \cdot \Gamma_n^2 \cdot t}{U_k^2 \cdot C_{cu}}$$

dobijemo dozvoljeno vrijeme trajanja kratkog spoja

$$t = \frac{140 \cdot U_k^2 \cdot C_{cu} \cdot 10^{-4}}{k \cdot \Gamma_n^2} = 44 \frac{U_k^2 \cdot C_{cu}}{\Gamma_n^2} 10^8 \quad (3.5-7)$$

Ako uzmemo veliki transformator sa $u_k = 10\%$ i $\Gamma_n = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{dobijemo} \quad t = \frac{44 \cdot 10^2 \cdot 390 \cdot 10^8}{3^2 \cdot 10^{12}} = 19 \text{ sekunda}$$

a ako, međjutim, uzmemo mali transformator sa $u_k = 4\%$ i

$\Gamma_n = 4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, dobijemo

$$t = \frac{44 \cdot 4^2 \cdot 390 \cdot 10^8}{4^2 \cdot 10^{12}} = 1,7 \text{ sekunda}$$

Za strujne transformatore dozvoljavaju VDE propisi maksimalnu gustoću struje kratkog spoja $180 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ u vremenu od 1 sek. Prema tome iznosi za njih maksimalna nadtemperatura

$$\Theta_k = \frac{k \cdot \Gamma_n^2 \cdot t}{C_{cu}}$$

Ako pretpostavimo $k \approx 3 \cdot 10^{-12}$ dobijemo

$$\Theta_k = \frac{3 \cdot 10^{-12} \cdot 180^2 \cdot 10^{12} \cdot 1}{390} = 250^\circ \text{C}$$

dakle praktički isto kao za učinske transformatore.

Za slobodni vod se kod kratkog spoja dozvoljava nadtemperatura 300°C tj. temperatura $35 + 300 = 335^\circ\text{C}$. Kod kabla se dozvoljava $35 + 150 = 185^\circ\text{C}$.

3.6 Dozvoljena zagrijavanja i životna dob namota

Dozvoljene maksimalne nadtemperature ili zagrijavanja ^{namota} određene su propisima a zavisna su o kvaliteti izolacije, tj. o klasi izolacije. Razne države imaju u tom pogledu različite propise, koji se međusobno mnogo ne razlikuju, no ipak su u pogledu maksimalno dozvoljenih temperatura te razlike osjetljive. Ti propisi su prije, još u prvim decenijama ovog stoljeća imali svoju osnovu u čisto slobodnoj procjeni maksimalno dozvoljene temperature na osnovu iskustva, a da se ta procjena nije temeljila na nekim istraživanjima i dubljim teoretski osnovanim računima. Općenito se smatralo da svaka izolacija može beskonačno dugo izdržati do neke određene temperature, dok kod prekoračenja te temperature relativno brzo dotraje, što naravno nema nikakve fizikalne osnove.

Tek godine 1930. dolazi Amerikanac Montsinger s novim pojmom tzv. "životne dobi" izolacije u zavisnosti o temperaturi, računajući tako da je izolacioni materijal kod svake temperature izložen prirodnim zakonima starenja. U stvari se radi o kemijskom procesu koji je zavisan o visini temperature, i koji ima za posljedicu da izolacioni materijal gubi svoja fizikalna svojstva, koja su mjerodavna za ocjenu njegove izolacione sposobnosti. Gubljenje tih svojstava zovemo starenjem izolacionog materijala.

Životna dob jednog izolacionog materijala mjeri se danas većinom prema gubitku čvrstoće kod naprezanja na vlak. Životna dob se smatra iskorišćenom, kad izolacioni materijal potpuno izgubi svoju mehaničku čvrstoću. Montsinger je na osnovu velikog broja pokusa, koje je vršio na transformatorima, postavio slijedeći zakon:

$$\check{Z} = a \cdot 2^{-b\vartheta} \quad (3.6-1)$$

"Ž" = životna dob

ϑ = temperatura izolacije, kod koje se računa životna dob. "a" i "b" predstavljaju konstante izolacionog materijala, čija se životna dob računa. Ovu se jednadžbu može matematskom operacijom promijeniti u drugi oblik, i to:

$$\check{Z} = \check{Z}_0 \cdot 2^{-\left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta_0}\right)} \quad (3.6-2)$$

Ako u toj jednadžbi postavimo da " $\check{Z}_0$ " predstavlja životnu dob od 10 godina, onda " ϑ_0 " predstavlja temperaturu, kod koje životna dob iznosi 10 godina. Iz te jednadžbe dalje slijedi da " Δ_0 " predstavlja ono povišenje ili sniženje temperature " ϑ " u °C, kod koje se životna dob "Ž" snižuje na pola odnosno povisuje dvostruko. Prema toj jednadžbi ima svaki izolacioni materijal dvije konstante, konstantu " Δ_0 " i konstantu " ϑ_0 ".

Tako možemo npr. navesti te dvije karakteristične konstante za sljedeće izolacione materijale :

papir u ulju	$\Delta_a = 8^\circ\text{C}$	$\phi = 100^\circ\text{C}$
pamuk, papir u zraku	$\Delta_a = 10^\circ\text{C}$	$\phi = 95^\circ\text{C}$
tinjao, s dodatkom vezivnog sredstva klase A	$\Delta_a = 10^\circ\text{C}$	$\phi = 120^\circ\text{C}$

Ako prema tome izračunamo za papir u ulju, ili bolje rečeno za transformator, životnu dob namota, dobijemo :

Temperatura " ϕ " = 68, 76, 84, 92, 100, 108, 116, 124, 132 i 140 $^\circ\text{C}$
 "Ž" = 160, 80, 40, 20, 10, 5, 2,5, 1,25, 0,625,
 0,3125 godina

Ta zavisnost " $\text{Ž} = f(\phi)$ " pokazuje se u dijagramu s logaritmičkom apscisom kao pravac (vidi sl.3.6-1).

Ako na osnovu ove teorije o životnoj dobi razmatramo pitanje propisa, onda dolazimo do zanimljivog zaključka, da bi transformator, za kojega propisi dozvoljavaju zagrijavanje za $+70^\circ\text{C}$ kod temperature okoline od 35°C , tj. temperaturu od 105°C , prema toj teoriji imao kod te temperature životnu dob od samo cca 7 godina. Jasno je, da mi ne gradimo transformatore s tako kratkom životnom dobi. Jasno je i to, da nema smisla graditi transformatore sa životnom dobi od preko 30 godina, jer iz iskustva znamo, da napretkom tehnike u vremenu od 30 godina transformator već tehnički tako zastari, da se isplati izmjena tog starog transformatora s novim, boljim.

Problem maksimalno dozvoljene temperature prema propisima u odnosu na životnu dob transformatora postaje još teži, ako pomislimo, da se prema VDE propisima dozvoljena temperatura od 105°C u namotu uljnog transformatora odnosi na prosječnu temperaturu u bakru, mjerenu iz prirasta otpora namota, dok je izvan svake sumnje, da je za životnu dob namota odnosno izolacije mjerodavna temperatura na najtoplijem mjestu namota, jer ako na tom mjestu izolacija dotraje, onda je time i cijeli transformator dotraja.

Možemo računati, da temperatura na najtoplijem mjestu u bakru iznaša sigurno 5°C više od prosječne temperature, pa treba prema tome životnu dob izračunati za temperaturu od 110°C , što daje samo cca 4,5 godina. Zato propisi u osnovi dozvoljavaju maksimalno zagrijanje od 70°C kao tehnički podatak, a maksimalna temperatura 105°C je samo posljedica najviše temperature okoline, koja može privremeno nastupiti. Iz toga i slijedi da potpuno krivo postupi onaj, koji smatra tu po propisima dozvoljenu temperaturu od 105°C kao onu temperaturu, koju može transformator u pogonu trajno izdržati.

Pretpostavimo da se temperatura tokom godina mijenja od 0°C pa do maksimalnih 35°C . Pretpostavimo dalje da se temperatura za vrijeme jedne godine linearno mijenja s vremenom u navedenim granicama. Želimo li izračunati životnu dob za slučaj, pomognimo si novim pojmom, tzv. iskorišćenjem životne dobi u postocima životne dobi. Označimo to iskorišćenje sa " $I_\text{ž}$ ". Iskorišćenje neka iznaša 100 % onda, kad je životna dob jedne izolacije potpuno iskorišćena.

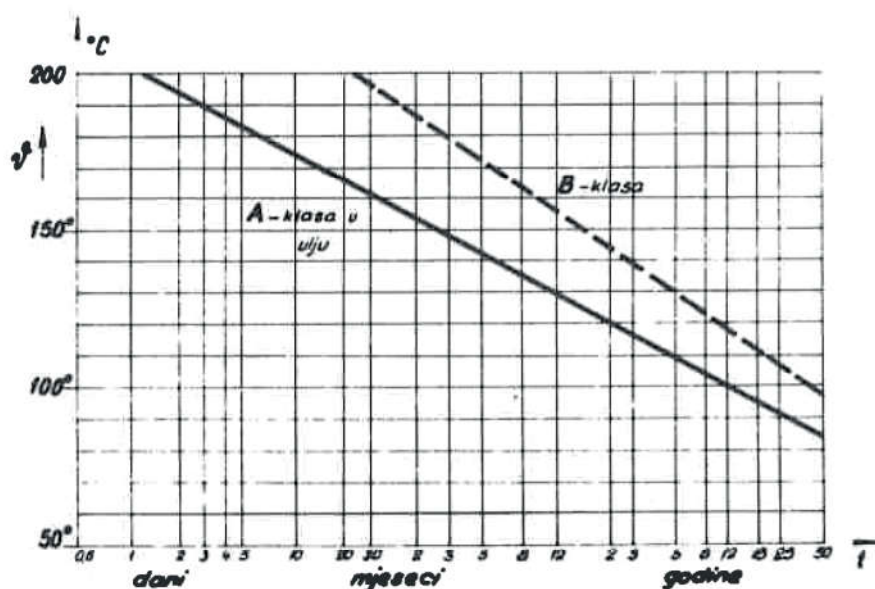
Tih 100 % vrijedi za svaki slučaj, bilo za 4,5 godine kod temperature od 110 °C, bilo za 10 godina životne dobi kod temperature od 100 °C. Ako prema tome izolacija ima temperaturu od 100 °C kroz jednu godinu dana, i ako kod te temperature životna dob izolacije iznosi 10 godina, onda možemo reći, da iskorišćenje životne dobi u vremenu od jedne godine iznosi 10 % tj.

$$I_{\text{ž}} = \frac{1}{Z} \cdot 100 \% = \frac{1}{10} \cdot 100 = 10 \%$$

Ako temperatura izolacije kroz daljnjih godinu dana iznosi 108 °C, onda to odgovara životnoj dobi od 5 godina i onda dobijemo prema istoj računici kao gore, da je transformator kroz tu drugu godinu iskoristio svoju životnu dob sa :

$$I_{\text{ž}} \cdot \frac{100}{5} = 20 \%$$

To znači, da će kroz tu drugu godinu biti izolacija iskorišćena sa 20 % svoje životne dobi, a kroz obadviije godine bit će izolacija



Sl. 3.6-1

Životna dob izolacije kod raznih pogonskih temperatura

prema tome iskorišćena u pogledu svoje životne dobi s ukupno 30 %. Ako prema tome u dvije godine transformator bude iskorišten s 30 % svoje životne dobi, možemo logički iz toga zaključiti, da će, u slučaju kombiniranog tereta tj. pola vremena sa temperaturom od 100 °C pola sa 108 °C, životna dob izolacije iznositi :

$$Z = 100 \cdot \frac{2}{30} = 6,7 \text{ godina}$$

Prema tome vidimo, da za opterećenje kroz prvu godinu iznosi životna dob 10 godina, za opterećenje kroz drugu godinu 5 godina, dok

je za prosječno opterećenje životna dob 6,7 godina.

Želimo li, međjutim, da izračunamo životnu dob izolacije za slučaj da se temperatura tokom određenog vremena linearno mijenja od određene minimalne do određene maksimalne temperature, možemo za taj slučaj postaviti slijedeću jednadžbu :

$$I_z = 100 \int_{t_1}^{t_2} \frac{1}{Z} dt \% = \frac{100}{Z_0} \int_{t_1}^{t_2} 2^{-\left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta_0}\right)} dt \% \quad (3.6-3)$$

Rješenje te jednadžbe prema Gotteru za slučaj linearne promjene temperature u vremenu od t_1 do t_2 glasi:

$$I_z = \frac{\delta}{(\vartheta_2 - \vartheta_1) \ln 2} \left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1} \right) 100 \% \quad (3.6-4)$$

Ako pretpostavljamo da se temperatura rashladnog zraka za vrijeme jedne godine mijenja linearno od 0°C pa do maksimalnih 35°C i ako pretpostavljamo trajno, maksimalno zagrijavanje prema VDE propisima od 70°C , onda se mijenja temperatura namota tokom godine linearno od 70°C do 105°C . Uzmemo li u obzir najvišu temperaturu namota, onda moramo, kako je prije navedeno, dodati još 5°C , te tako dobijemo da iznaša :

temperatura namota $\vartheta_1 = 75^\circ\text{C}$ u vrijeme $t_1 = 0$

temperatura namota $\vartheta_2 = 110^\circ\text{C}$ u vrijeme $t_2 = 1$ god.

Za temperaturu od 110°C odgovara prema Montsingeru životna dob od cca 4,5 godine, dok temperaturi od 75°C odgovara životna dob od cca 58 godina. Ako sada te vrijednosti unesemo u gornju jednadžbu dobijemo :

$$I_z = \frac{\delta}{(\vartheta_2 - \vartheta_1) \ln 2} \left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1} \right) \cdot 100 \% = \frac{11,5 \cdot 100}{110 - 75} \left(\frac{1}{4,5} - \frac{1}{58} \right) = 6,7 \%$$

tj. u vremenu od godinu dana izolacija pod gore navedenim uvjetima gubi 6,7 % svoje životne dobi. Ako iskorišćenje životne dobi za vrijeme od jedne godine iznosi 6,7 % onda možemo iz toga zaključiti da životna dob pod istim uvjetima iznosi :

$$\check{Z}_p = \frac{100}{6,7} = 15 \text{ godina}$$

odnosno da konstantna temperatura, koja bi odgovarala za istu životnu dob, iznosi :

$$\vartheta_{km} = 95^\circ\text{C}$$

a prosječna temperatura namota :

$$\vartheta_{kp} = 90^\circ\text{C}$$

Iz gornjeg računa vidimo da, obzirom na promjenljivu temperaturu rashladnog zraka tokom godina, životna dob izolacije odgovara trajnoj temperaturi od 95°C , iako računamo na osnovi maksimalno dozvoljene srednje temperature namota od 105°C . Ako kritički pogledamo gornji rezultat, prema kojem životna dob transformatora koji je trajno opterećen s punom nominalnom snagom, i koji zadovoljava VDE propisima, iznaša cca 15 godina, onda nam možda ta životna dob još uvijek izgleda malena. Međutim, moramo uzeti u obzir da se rijetko dešava da su transformatori trajno noć i dan pod punim nominalnim teretom. Osim toga, kad se naručuje transformator, projektant voli uzeti nešto rezerve, kako transformator ne bi bio preopterećen. Sve u svemu moramo računati s time, da su transformatori, a to vrijedi naravno isto tako i za sve strojeve, u pogonu prosječno manje opterećeni, pa prema tome je i temperatura manja, nego smo računali u provedenoj računici. Zato je razumljivo da praksa pokazuje životnu dob transformatora i strojeva od sigurnih cca 30 godina.

Prema novom prijedlogu Jugoslavenskog standarda za transformatore treba računati sa maksimalnom dnevnom temperaturom zraka od 40°C , srednjom dnevnom temperaturom od 30°C i srednjom godišnjom temperaturom 20°C . Iz toga slijedi da prijedlog toga standarda predviđa godišnju promjenu temperature rashladnog zraka od 0°C do 40°C .

Prema istim propisima se dozvoljava maksimalna nadtemperatura od 60°C , a ako se doda još razlika od 5°C između srednje i maksimalne temperature namota dobijemo da se maksimalna temperatura namota tokom godine kod punog tereta mijenja od 65 do 105°C . Ako te vrijednosti unesemo u gornju jednačbu dobijemo :

$$I_{\Sigma} = \frac{8}{(105 - 65) \ln 2} \left(\frac{1}{7} - \frac{1}{110} \right) \cdot 100 = 3,86 \%$$

$$\dot{z}_p = \frac{100}{3,86} = 26 \text{ godina}$$

Iz gornjeg vidimo da relativno mala razlika od 5°C prema VDE propisima ima za posljedicu da se životna dob od cca 15 godina povisila na 26 godina.

Pogledamo li nasuprot tome američanske propise, vidimo da Amerikanci propisuju i maksimalno dozvoljenu srednju nadtemperaturu namota, mjerenu povišenjem otpora, kao i maksimalnu temperaturu na najtoplijem mjestu. Tako npr. za izolaciju u ulju propisuju :

Maksimalna temperaturu rashladnog zraka	40°C
Maksimalna srednja nadtemperatura namota	55°C
Maksimalna temperatura u bakru na najtoplijem mjestu	105°C

Kako iz gornjeg vidimo, američanski propisi se razlikuju od našeg prijedloga za jugoslavenski standard samo utoliko, što mi pretpostavljamo razliku temperature između srednje i maksimalne temperature namota od 5°C , dok Amerikanci za tu razliku predviđaju 10°C .

Tò se je odrazilo i na rezultat konferencije "CIGRE" godine 1954. na kojoj je donijet prijedlog da se može dozvoliti trajna temperatura u transformatoru na najtoplijem mjestu u bakru od 105°C , što se slaže i s preporukama IEC. Naš novi prijedlog za jugoslavenski standard se zasniva na tom IEC prijedlogu, pa prema tome vidimo da

Životna dob od 26 godina odgovara današnjem stanju tehnike u gradnji transformatora.

Provjeravamo li u podacima izvedenih mjerenja razliku između srednje temperature i temperature na najtoplijem mjestu namota, vidimo da ta razlika od 5°C odgovara samo za jako malene transformatore. Kod većih transformatora može ta razlika temperature biti mnogo veća. Tako smo na primjer kod ispitivanja u novoj termoelektrani Šoštanj izmjerili na velikim blok-transformatorima snage 32 MVA zagrijanje (nadtemperaturu) najtoplije točke u bakru 64°C , a srednje zagrijanje namota (mjereno UI metodom) 47°C , pa prema tome imamo u ovom slučaju razliku temperature od punih 17°C .

Naravno, mora se očekivati od solidne tvornice da kod projektiranja transformatora uzme u obzir eventualnu veću razliku između prosječne i maksimalne temperature namota, što vidimo i u ovom slučaju, gdje je prosječno zagrijanje od 47°C daleko ispod po VDE propisima maksimalno dozvoljenog zagrijavanja od 70°C . Ipak vidimo kod toga opravdanost američkog stava, koji ograničava zagrijanje na najtoplijem mjestu, jer propisi se ipak ne bi smjeli oslanjati na dobronamjernost i solidnost fabrikanta. Za dobre i solidne fabrikante propisi uopće nisu potrebni, već baš za one, koji vole da bez obzira na posljedice, iskoriste slovo propisa do kraja.

Na konferenciji "CIGRE" 1954 godine predložio je Chevalier u svom referatu da se kod uljnih transformatora za trajnu maksimalnu dozvoljenu temperaturu na najtoplijem mjestu namota usvoji 105°C . Njemačka delegacija se na toj konferenciji nije složila s tim prijedlogom, koji bi imao za posljedicu reduciranje dozvoljenog zagrijanja prema VDE propisima od dosadašnjih 70°C na 60°C .

Međutim VDE propisi iz 1955 godine su se u tom pogledu ugledali u američke propise, te određuju za transformatore u ulju maksimalno dozvoljenu temperaturu na najtoplijem mjestu sa 115°C . Ta temperatura je znatno viša nego kod američkih propisa, ali je ipak određena, što prije nije bio slučaj.

Ako uzmemo u obzir razliku u temperaturi namota prema gore navedenim izlaganjima, koja može varirati od cca $5-17^{\circ}\text{C}$, moramo se upitati, kako je utjecaj te razlike na životnu dob npr. dvaju transformatora, koji se zagrijevaju na jednaku srednju temperaturu bakra, recimo na 95°C , ali kod kojih razlika srednje i maksimalne temperature u bakru iznosi u jednom slučaju 5°C a u drugom 17°C . To dakako zavisi o konstrukciji transformatora tj. o tome, da li je širina svitka velika ili mala, da li je cirkulacija ulja brza ili spora, tj. o izdašnosti hladjenja najtoplijeg mjesta u namotu. Prema tome može najtoplije mjesto u bakru kod jednog transformatora imati temperaturu od $95^{\circ} + 5^{\circ} = 100^{\circ}\text{C}$, dok će drugi transformator imati $95^{\circ} + 17^{\circ} = 112^{\circ}\text{C}$. Prema Montsingeru ćemo za prvi slučaj izračunati životnu dob od 10 godina, a za drugi životnu dob od samo cca 3 godine, tj. 3 puta manje. To je prevelika razlika, a da bi je mogli zanemariti. Zato smatramo, da bi trebalo i naš prijedlog Jugoslavenskih standarda upotpuniti u toliko, da se dodaje još maksimalna dozvoljena temperatura na najtoplijem mjestu namota u iznosu od 105°C . Jasno je da Nijemci, odnosno VDE propisi, imaju svoj razlog za svoj stav. Najtoplije mjesto namota je vrlo teško pristupačno mjerenjima, te se kod transformatora u visoko-naponskom namotu uopće ne može izravno mjeriti, već je potrebna neizravna metoda, koja nije pouzdana. Osim toga se mora priznati da nije uputno u propisima tražiti mjerenja koja i za iskusne stručnjake predstav-

ljaju problem. Međutim, ako propisi predviđaju i jedno i drugo ograničenje maksimalne temperature, onda možemo barem očekivati da će svaki konstruktor morati paziti da ne bude velikih razlika između srednje i maksimalne temperature namota u transformatoru.

Razumljivo je da je na pokusima kod ispitivanja izolacionog materijala na životnu dob veoma teško preslikati pogonske prilike, pod kojima se nalazi dotični izolacioni materijal u stroju ili transformatoru, i na taj način donekle točno izmjeriti životnu dob izolacionog materijala. Osim toga moramo računati sa činjenicom da je jedan te isti izolacioni materijal u raznim konstrukcijama različito izložen procesu starenja. Međutim, koliko god sva ta dosadašnja ispitivanja pokazuju u svojim rezultatima prilična odstupanja, ipak se kod svih pokusa za isti materijal dobije jedan te isti nagib pravca u polulogaritmikom dijagramu, tj. jedan te isti " Δ_0 ". Svi ti pokusi potvrđuju pravilo udvostručenja životne dobi kod snižavanja temperature za 8°C , odnosno 10°C , pa se prema tome iz rezultata mjerenja životne dobi jednog izolacionog materijala pri određenoj temperaturi, može s priličnom sigurnošću zaključiti na životnu dob dotičnog materijala kod jedne više ili jedne niže temperature. Tako je račun, s kojim smo u prijašnjem stavku ustanovili kod usporedbe dvaju transformatora da drugi ima tri puta manju životnu dob, veoma točan i nema razlika sumnjati u njega, jer se on temelji samo na veličini Δ_0 .

Možemo zato utvrditi da teorija životne dobi izolacije već danas mnogo pomaže da pravilno rješavamo teške probleme zagrijavanja. Ta činjenica ima i svoju posljedicu već u tome, da se počelo razmatrati mogućnosti uvođenja u propise kratkotrajnih pokusa životne dobi. Takav propis, naravno, dolazi u obzir samo za male, odnosno sasvim male strojeve i transformatore, kod kojih ne predstavlja nikakav problem da se na nekoliko komada načini pokus uništenja namota i time odredi životna dob kod jedne povećane temperature. Konkretno se definira taj pokus time, da se npr. propisuje opterećenje takvog stroja ili transformatora kod temperature rashladnog zraka od cca 120°C tako, da se zagrije na 200°C , i da se nakon 240 sati pogona konstatira njegova pogonska sposobnost.

Za izolacioni materijal malih transformatora i motora se danas većinom upotrebljava impregnirana lak-žica, dakle klasa izolacije "E". Za taj materijal se može u granicama od 100 do 200°C računati s udvostručenjem životne dobi kod snižavanja temperature za $\Delta_0 = 10^\circ\text{C}$. Ako dalje postavimo zahtjev da ta izolacija kod neprekidnog pogona nominalnim teretom mora izdržati 15 godina, (kako smo to izračunali za uljne transformatore kod najviše temperature od 105°C) i ako uzmemo u obzir da maksimalna temperatura za E-klasu iznosi 120°C , a obzirom na promjenu temperature rashladnog zraka tokom godine možemo uzeti cca 110°C , onda možemo izračunati životnu dob kod 200°C .

$$\check{Z}_{200} = 15 \cdot 8600 \cdot 2^{\frac{200-110}{10}} = 250 \text{ sati}$$

Prema tome kod takvog namota životna dob kod 200°C iznosi cca 250 sati, pa je prema tome praktički potpuno jednostavno provjeriti životnu sposobnost dotičnog namota. Takav pokus ima tu prednost, da se kod ispitivanja životne dobi izolacija stvarno ispituje pod onim okolnostima, koje su za dotični stroj mjerodavne, odnosno koje u dotičnom stroju stvarno postoje.

Prema tome treba očekivati da će se u budućnosti sve više uvoditi ispitivanje životne dobi namota, i tako omogućiti da boljim materijalom i boljom konstrukcijom još više iskoristimo materijal i postignemo što manju težinu kod istih pogonskih uvjeta.

3.7 Termička zaštita

Zadatak termičke zaštite je da zaštićuje namot od prebrzog istrošenja ili od pregaranja, a da pritom ipak dozvoljava ona preopterećenja, kod kojih temperatura namota ne prelazi po propisima dozvoljene granice. Prema tome nije pravi kriterij za idealnu termičku zaštitu visina struje, već visina temperature, za koju se smatra da u pogonu ne bi smjela prelaziti propisima dozvoljene granice.

U glavi 3.4 smo izračunali dozvoljena vremenska preopterećenja, a da se stroj ne pregrije /jednadžbe (3.4-3) i (3.4-4)/. Ako te izračunate vrijednosti dozvoljenih vremena ukopčanja " t_d " kod raznih strujnih preopterećenja unesemo u priloženi dijagram u sl.3.7-1, u kojem imamo na apscisi u logaritmičkoj skali naneseno preopterećenje u struji ($x I_n$), a na ordinati dozvoljeno vrijeme u minutama, dobit ćemo uz $T = 60$ minuta krivulju, koja je označena sa "a".

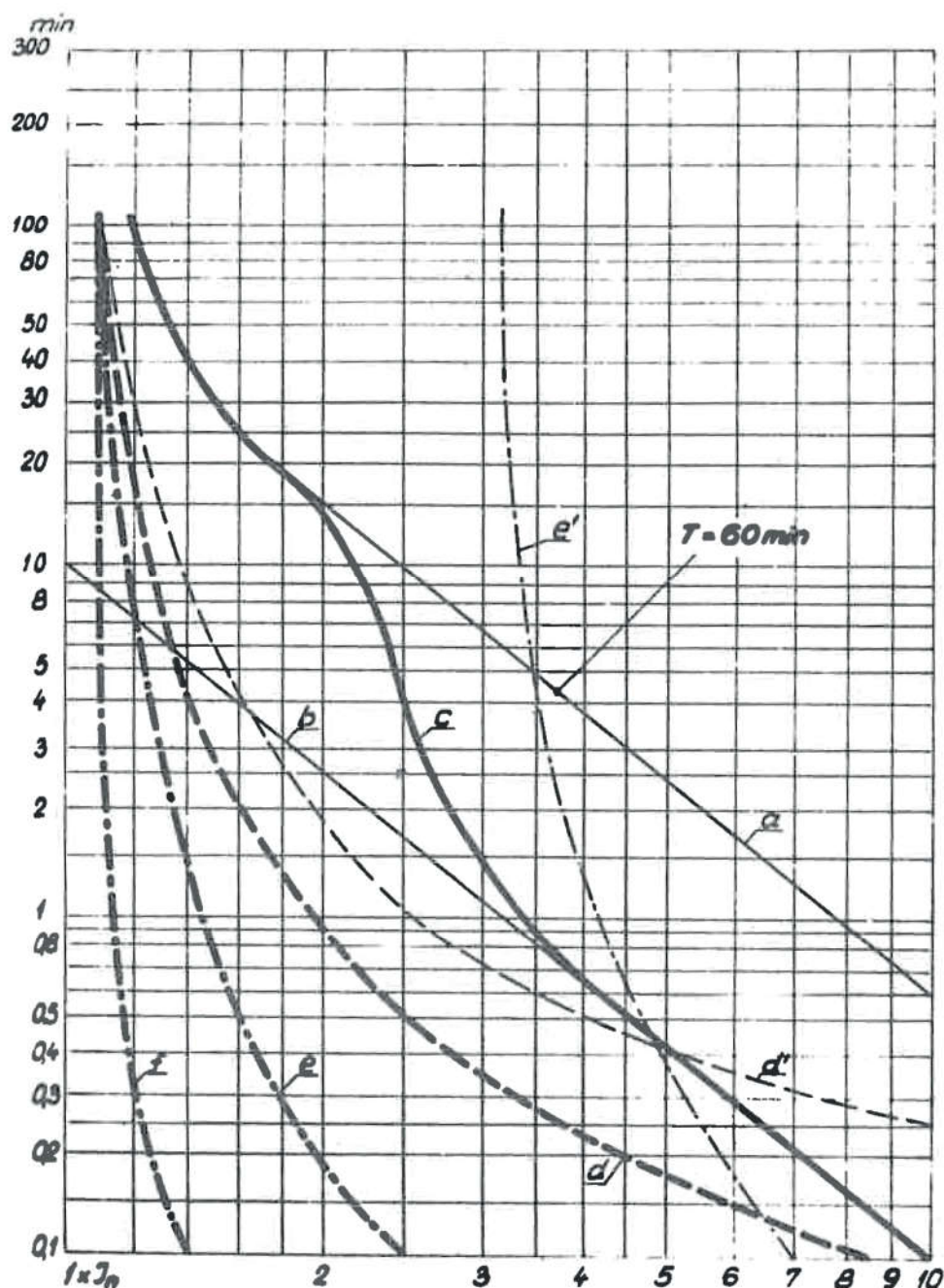
Ako, međjutim, pretpostavimo da se bakar u namotu ne hladi, tj. da se sva toplina u bakru akumulira, onda se može vrijeme, potrebno za zagrijanje do 60°C kod određenog specifičnog opterećenja " I ", izračunati po jednadžbi:

$$t_d \approx \frac{180 \cdot 10^6}{I^2} \text{ minuta}$$

Ako dalje pretpostavimo da u našem slučaju specifično opterećenje bakra kod nominalne struje iznosi $4 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, onda prema gornjoj jednadžbi za nominalnu struju dobijemo dozvoljeno vrijeme ukopčanja cca 10 min, a kod 10-erostruke struje tj. kod $40 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, dozvoljeno vrijeme od samo cca 0,1 min. Sve ostale vrijednosti " t_d " za razna opterećenja leže na pravcu, koji je u sl.3.7-1 uočen oznakom "b".

Možemo reći da se od cca 5-erostruke struje na više, tj. kod gubitaka 25 puta većih od nominalnih, zagrijavanje u bakru tako brzo odigrava i temperatura tako brzo diže, da odvod topline u tom slučaju praktički ne igra nikakvu ulogu. Iz tog slijedi da bi namot u slučaju 5-erostrukog preopterećenja ili većeg od toga morao biti zaštićen tako, da bude iskopčan u vremenu koje je određeno s pravcem, koji je u sl.3.7-1 označen sa "b". Dalje možemo reći da se u slučaju dvostrukog preopterećenja temperatura bakra tako polagano diže, da toplina ipak ima dovoljno vremena za prijelaz iz bakra u neaktivni dio, te zato možemo u tom slučaju smatrati stroj odnosno transformator homogenim tijelom, pa prema tome vrijedi za taj slučaj zagrijavanje s vremenskom konstantom od pretpostavljenih 60 minuta. Iz tog slijedi da pravu krivulju dozvoljenog ukopčanja dobivamo na taj način, da poslije dvostruke struje tereta pa do cca 5-erostruke struje prelazimo iz krivulje "a" na pravac "b". Ta krivulja je u sl.3.7-1 debelo izvučena i označena s "c". Na

osnovu gornjeg izlaganja došli smo, prema tome, do točne definicije vremena, kroz koje smijemo kod određenog strujnog preopterećenja ostaviti namot ukopčan, tj. kroz koje bi namot iz hladnog stanja kod dotičnog preopterećenja dostigao dozvoljenu nadtemperaturu od 60°C . Time dolazimo do problema, kako izraditi termičku zaštitu, koja bi udovoljila gore navedenoj krivulji "c".



Sl. 3.7-1

Karakteristike raznih vrsta termičke zaštite

Za termičku zaštitu najčešće se upotrebljavaju bimetali, koji se kod zagrijavanja strujom tereta savijaju i u zavisnosti od savijanja iskapčaju zaštitu. Možemo zamisliti da načinimo bimetal čija je vremenska konstanta isto tolika, kolika je vremenska konstanta zaštićenog stroja. U tom slučaju bi namot toga stroja bio zaštićen prema krivulji "a". Iz prijašnjih izlaganja slijedi da ta zaštita ne bi odgovarala, jer bi kod preopterećenja preko dvostruke nominalne struje prekasno iskapčala namot. Iz tog vidimo, da bimetal s istom vremenskom konstantom, kakvu ima namot, ne bi mogao zadovoljiti. Zato se bimetali normalno grade za daleko manje vremenske konstante. Tako na primjer prema propisima VDE treba termička zaštita da kod izvedbe "T₁" iskopča kod 5-erostruke struje poslije najviše pola sekunde, a zaštita označena sa "T₁₁" treba kod 6-erostruke struje da iskopča za 5 sekundi. Ako prema podacima raznih fabrikata ucertamo u sl.3.7-1 dijagram odnosno krivulju iskapčanja za bimetal koji odgovara karakteristici "T₁₁", onda dobijemo u priloženoj sl.3.7-1 krivulju označenu sa "d", koja u području od cca 2 X I_n dozvoljava vrijeme ukopčanja "t_d" od cca 1 minute, dok stvarno vrijeme prema krivulji "c" iznaša 12 minuta.

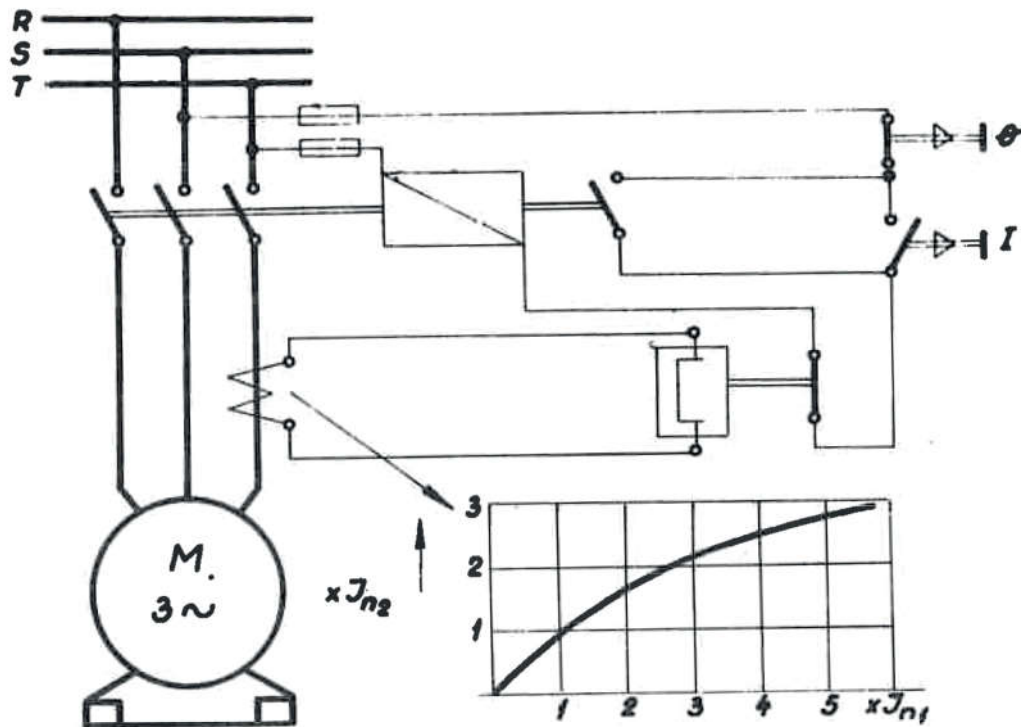
U ogromnoj većini slučajeva ipak ovakva bimetalna zaštita kao termička zaštita potpuno odgovara, jer su preopterećenja preko 50 % relativno rijetka, a osim toga je vrijeme od 3 minute kod 50 % preopterećenja (prema toj krivulji) relativno dovoljno. Medjutim, kod teških pogona, koji dolaze u obzir, osobito u termoelektranama za pogon ventilatora i mlinova, upotrebljavamo u novije vrijeme skoro isključivo kratkospajne motore, kod kojih vrijeme pokretanja radi velikih zamašnih masa često puta iznosi više od 20 sekundi sa strujom pokretanja koja može da prelazi čak i 5-erostruku struju. U ovakvim slučajevima bi prema toj karakteristici bimetalna zaštita iskapčala već nakon 0,17 minuta, tj. za 10 sekundi što je odviše prerano, jer bi se prema krivulji "c" mogao motor bez opasnosti ostaviti ukopčan preko 30 sekundi.

U takvim slučajevima pomažemo si na taj način da :

- a) ili ugradimo u sklopu pomoćni kontakt, koji kod pokretanja zaštitu spaja na kratko,
- b) ili pak priključimo zaštitu preko zasićenog transformatora tako, da isti kod preopterećenja ne prenaša vjerno struju na bimetalnu zaštitu, već sa manjim prenosnim omjerom i tako umjetno, radi smanjenja sekundarne struje, povećava vrijeme iskopčanja tako, da na pr. dobijemo u sl.3.7-1 pomaknutu krivulju "d". Takav transformator nije zasićen do nominalne struje, nego zasićenje počinje tek kod preopterećenja. U sl.3.7-2 nacrtana je principijelna shema za takav priključak termičke zaštite, iz koje je princip rada sam po sebi razumljiv.

Idealnu termičku zaštitu u smislu krivulje "c" u dijagramu na sl. 3.7-2 predstavljaju tzv. termorelei .

Princip rada tih relea je slijedeći : U releu se nalazi tanka žica, koja je preko strujnog transformatora opterećena sa strujom tereta. Ta žica predstavlja termičku sliku žice namota stroja, kojeg taj termo-rele zaštićuje . Kad prolazi struja kroz tu žicu, ona se zagrijava i radi toga rasteže. To rastezanje prenaša se velikim prenosnim omjerom na jedno kazalo, koje je tako baždareno da pokazuje temperaturu žice. Osim toga je ta žica obložena jednim termičkim balastom, da se tako izrazimo, koji predstavlja neaktivni dio stroja, odnosno



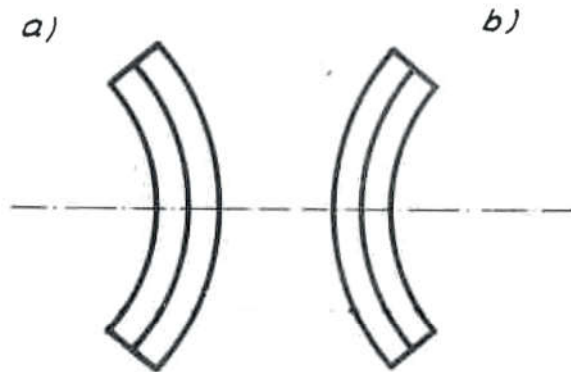
Sl. 3.7-2

Principijelna shema termičke zaštite asinhronog motora pomoću bimetala i zasićenog transformatora

njegovu termičku vremensku konstantu. Kod zagrijavanja žice prenosi se toplina na taj balast i žica s tim oblogom predstavlja vjernu termičku sliku stroja, kojeg taj termorele zaštićuje. Ako se radi o manjim preopterećenjima, onda se ta žica grije, preko te žice grije se i oblog, pa žica preko kazaljke sa svojim rastezanjem pokazuje u svakom momentu svoju temperaturu, koja mora biti identična s temperaturom namota. Ako se, međutim, radi o velikim preopterećenjima, onda kod brzog zagrijavanja te žice toplina ne stigne da iz žice prelazi na oblog, sama žica se zato brže zagrijava, diže se temperatura žice i kazaljka toliko brže pokazuje povećanje temperature. Ukratko, u tom releu imamo u termičkom pogledu isti slučaj, koji se odigrava u samom stroju. Releji je tako izradjen, da se može udesiti na proizvoljnu temperaturu, kod kojeg termorele daje kontakt za iskopčanje dotičnog stroja. Takav termorele prema tome predstavlja idealnu zaštitu stroja, pod uvjetom da se vremenska konstanta stroja ne mijenja i pod uvjetom, da zagrijavanje u stroju dolazi jedino od gubitaka Jouleove topline u bakru, a ne od eventualnih dodatnih gubitaka (npr. zbog potiskivanja struje). Za strojeve koji se zaustavljaju, ili koji nemaju konstantnu brzinu vrtnje, pa se prema tome kod njih mijenja i hlađenje, taj termorele ne odgovara radi promjene ventilacije, jer se promjenom ventilacije mijenja i vremenska konstanta stroja, dok vremenska konstanta termičke slike u termoreleu ostaje nepromijenjena. Za zaštitu trans-

formatora i sinhronih generatora, međutim, taj termorele predstavlja savršenu zaštitu. Slaba strana tih termorelea leži, međutim, i u tome, da su radi komplicirane izrade relativno skupi. Termorelei zato više dolaze u obzir tamo, gdje stroj ili transformator stalno radi s velikim udarcima tereta, pa je jedino termorele sposoban, da nadzire zagrijavanje namota i u slučaju potrebe pravovremeno iskapča.

Iz iznesenog vidimo da idealna termička zaštita još ne postoji. Zato se u svijetu još uvijek traže nova rješenja, te se čini da ima najviše izgleda na uspjeh zaštita sa termostatom u vidu kapsule. Tu kapsulu je prva proizvela američka firma "Clixon", po kojoj se često ta kapsula zove. Tvrtka BBC je gradi pod imenom "Ipsotherm". Takva kapsula ima veličinu metalnog novca od 1 Din i ugradi se direktno u namot stroja, kojeg želimo zaštititi. Kapsula je napravljena prema sl. 3.7-3. Iz okrugle bimetalne konkavno formirane pločice



Sl. 3.7-3

koja se zagrijavanjem sve više izravnavava sve dok kod određene temperature u trenutku predje na drugu stranu i načini kontakt, koji izbaci sklopku. No međutim, i ova kapsula ima svoju slabu stranu u tome, što ona treba mnogo vremena da se toliko ohladi da se prebaci opet natrag u prvi položaj, a to povlači za sobom nepoželjnu pauzu, jer se u tom vremenu stroj ili transformator ne može ponovo ukopčati. Osim toga se ta kapsula iz razumljivih razloga ne može ugraditi u visokonaponske namote. Velika prednost tih kapsula leži u tome, da su veoma jeftine i da u svakom slučaju mjere temperaturu namota, koje je jedina mjerodavna kao kriterij za termičku zaštitu.

U dijagramu na sl. 3.7-1 uortana je karakteristika iskapčanja odnosno istopljenja i za obične osigurače, naznačena sa slovom "f", kao i za osigurače visokog učina, označena slovom "e". Kako vidimo iz te karakteristike izgorjevaju osigurači još mnogo prije, nego li izbacuje bimetalna zaštita. Ako pogledamo karakteristiku " d' ", koja predstavlja pomaknutu karakteristiku " d " bimetala pomoću zasićenog transformatora, onda vidimo da ona kod struja preko 5-ero-struke nominalne struje djeluje kasnije, nego bi trebala djelovati obzirom na krivulju "c". Prema tome bi kod kratkog spoja, a time i kod većih struja, ta bimetalna zaštita prekasno djelovala. Zato se može bez daljnjega uzeti osigurač visokog učina za struju od recimo cca 2,5-struke nominalne struje, kako je to ucrtano u dijagramu s karakteristikom označenom slovom " e' ". Kako vidimo, osigurač pre-

uzima kod takvih velikih kratkospojnih struja zaštitu, jer izgori prije nego li je potreba data prema karakteristici "c".

3.8 Ekvivalentna shema

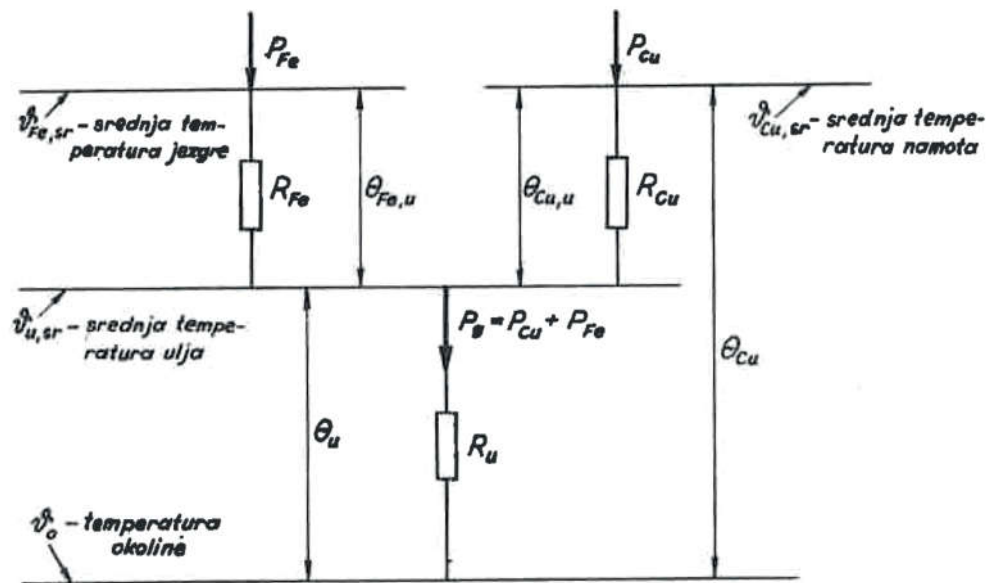
U transformatoru, koji je u pogonu, stalno se razvijaju gubici, koji predstavljaju pretvaranje električne energije u toplinsku. Ta toplina putuje sa svog izvora tj. iz aktivnog željeza i aktivnog bakra prema vanjskoj površini transformatora i odavle u okolinu. Da bi toplina mogla prelaziti sa unutrašnjosti transformatora na okolinu, potrebna je izvjesna razlika temperature. Kako je ta razlika temperature proporcionalna količini topline, možemo uvesti pojam toplinskog otpora i računati razliku temperature analogno kao pad napona u električnom strujnom krugu. Prema tome temperatura raste od temperature okoline prema izvoru topline, gdje moramo očekivati najvišu temperaturu. Ta najviša dopustiva temperaturna razlika između temperature bakra i temperature okoline ograničena je prema propisima, kako to vidimo u poglavlju 3.9.

Praktički skoro uvijek je nominalna snaga transformatora određena sa dozvoljenim zagrijavanjem, jer svaki proizvođač transformatora će projektirati transformator tako, da po propisima dozvoljeno zagrijavanje što više iskoristi. Iz toga možemo zaključiti da kod svakog transformatora nadtemperatura bakra kod nominalne snage odgovara barem približno po propisima dozvoljenoj nadtemperaturi.

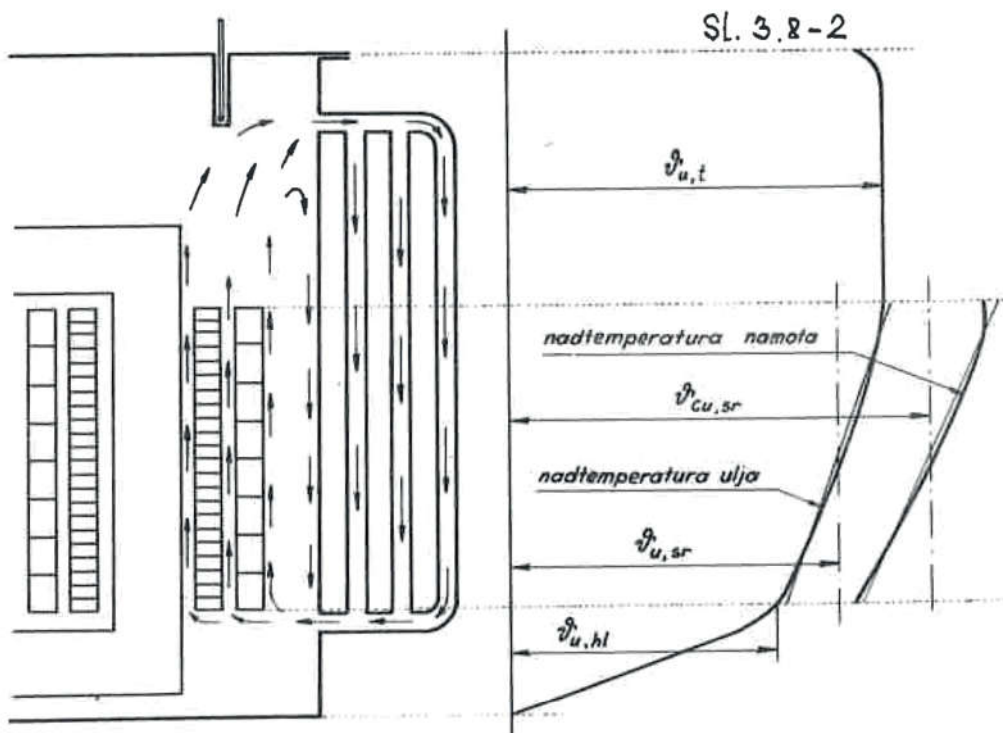
Kao električari, volimo da računamo električkim shemama. Zato toplinske račune i provodimo pomoću toplinskih otpora, koji nam omogućuju da procese prijelaza topline prikazujemo ekvivalentnim toplinskim shemama. Taj račun nije kod prijelaza topline konvekcijom potpuno egzaktna, ali ipak daje zadovoljavajuće rezultate. Na sl.3.8-1 prikazana je ekvivalentna shema prijelaza topline kod transformatora.

Ulje se u transformatoru diže kroz namot i kraj jezgre, hladi se u radiatorima i pada na dno kotla. Na taj način ono prenosi toplinu iz aktivnog dijela transformatora na površinu njegovog kotla. Na dnu kotla ima ulje temperaturu okolnog zraka. Uzduž namota u vertikalnom pravcu raste temperatura skoro linearno, tako da možemo za naše daljnje razmatranje pretpostaviti linearno raspodjelu temperature, kako je to u dijagramu ucrtano. Iznad namota se temperatura praktički ne mijenja, osim sasvim ispod poklopca, gdje se ulje od poklopca hladi. Zato se džep za termometar na kotlu transformatorapredviđa dubok barem 10 cm, kako bi se termometrom mogla mjeriti temperatura najtoplijeg ulja.

Količina topline koja prelazi sa toplijeg na hladno tijelo određena je s razlikom njihovih temperatura i toplinskim otporom. Kako je razlika temperature namota i temperature ulja praktički konstantna na bilo kojem mjestu jezgre, to će se toplina jednoliko odvoditi po čijeloj površini namota transformatora. Taj proces prijelaza topline je prema tome isti, kao kad bi imali cijeli namot zagrijan na srednju temperaturu ϑ_{csr} , a ulje na srednju temperaturu ϑ_{lsr} . Potpuno analogni su i proces prijelaza topline sa željeza na ulje, kao i sa ulja na okolni zrak. Zbog toga je ekvivalentna shema na



Sl. 3.8-1



Sl. 3.8-2

sl. 2.8-1 i ortana tako kao da se proces prijelaza topline odvija između srednjih temperatura namota, željeza i ulja.

Pojedini toplinski otpori mogu se približno dobiti računskim putem. Lakše ih je, međutim, izmjeriti na gotovom transformatoru. Temperatura ulja je lako pristupačna za mjerenje. Ako izmjerimo nadtemperaturu vrućeg ulja $\Theta_{u,t}$ i nadtemperaturu hladnog ulja $\Theta_{u,hl}$ do-
lje na izlazu iz radijatora u kotao, možemo izračunati srednju tempe-
raturu ulja

$$\Theta_{u, sr} = \frac{\Theta_{u,t} + \Theta_{u,hl}}{2}$$

Srednju nadtemperaturu bakra Θ_{cu} možemo izmjeriti UI metodom. Poznavajući razliku temperatura $\Theta_{cu,u}$ između srednje temperature bakra i srednje temperature ulja, kao i gubitke u bakru, možemo izračunati toplinski otpor za prijelaz topline sa bakra na ulje, kao omjer razlike temperatura i gubitaka u bakru. Analogno možemo računati i ostale toplinske otpore nadomjesne sheme.

Iz iskustva znamo da razlika $\Theta_{cu,u}$ između prosječne temperature bakra i prosječne temperature ulja iznosi kod nominalnog opterećenja kod svih transformatora cca 20° C. Propisi nam određuju maksimalnu nadtemperaturu ulja, pa tako možemo izračunati i razliku između srednje temperature ulja i temperature okoline naravno pretpostavljajući da je projektant transformatora potpuno iskoristio dozvoljeno zagrijavanje transformatora. Poznavajući te dvije vrijednosti možemo jednostavnim računom dobiti zagrijavanje bakra kod raznih pogonskih uslova.

Tako npr. želimo da izračunamo zagrijavanje jednog transformatora sa omjerom gubitaka $P_{Cu}/P_{Fe} = \xi$ kod γ % od nominalnog napona i X % nominalne struje. U novom pogonskom stanju iznositi će nadtemperatura bakra spram okoline :

$$\Theta' = \Theta_{cu,u} \frac{P'_{cu}}{P_{cu,n}} + \Theta_u \frac{P'_g}{P_{g,n}} \quad (3.8-1)$$

gdje je $\Theta_{cu,u}$ nadtemperatura bakra spram ulja kod nominalnog opterećenja, a Θ_u nadtemperatura ulja spram okoline .

Ukupni gubici kod nominalnog opterećenja iznose

$$P_{gn} = P_{cu,n} + P_{Fe,n} = P_{Fe,n} (1 + \xi) \quad (3.8-2)$$

Kod novog opterećenja biti će ukupni gubici :

$$P'_g = P'_{cu} + P'_{Fe}$$

Gubici u bakru mijenjaju se proporcionalno sa kvadratom promjene struje

$$P'_{cu} = P_{cu,n} \left(\frac{X}{100} \right)^2 \quad (3.8-3)$$

Gubici u željezu rastu sa kvadratom indukcije, te su prema tome proporcionalni kvadratu promjene napona.

$$P'_{Fe} = P_{Fe} \left(\frac{Y}{100} \right)^2$$

Ukupni gubici u novom pogonskom stanju biti će prema tome :

$$P'_g = P_{Cu} \left(\frac{X}{100} \right)^2 + P_{Fe} \left(\frac{Y}{100} \right)^2 = P_{Fe} \left[\xi \left(\frac{X}{100} \right)^2 + \left(\frac{Y}{100} \right)^2 \right] \quad (3.8-4)$$

Uvrštavanjem (3.8-2), (3.8-3) i (3.8-4) dobijemo za novu nadtemperaturu ulja

$$\begin{aligned} \Theta' &= \Theta_{Cu,u} \left(\frac{X}{100} \right)^2 + \Theta_u \frac{\xi \left(\frac{X}{100} \right)^2 + \left(\frac{Y}{100} \right)^2}{1 + \xi} \\ \Theta' &= \Theta_{Cu,u} \left(\frac{X}{100} \right)^2 + \Theta_u \frac{1}{1 + \xi} \left[\xi \left(\frac{X}{100} \right)^2 + \left(\frac{Y}{100} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (3.8-5)$$

Za primjer uzmimo jedan transformator s omjerom gubitaka $\frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = 3$

gradjen tako da zadovoljava VDE propise. Koliko će iznositi srednja nadtemperatura bakra spram okoline kod 110 % nominalnog napona i 80 % nominalne struje ?

Prema VDE propisima dozvoljena je maksimalna srednja nadtemperatura bakra 70° C. Ako pretpostavimo da kod nominalnog opterećenja nadtemperatura bakra spram ulja iznosi 20° C, dobijemo za nadtemperaturu ulja spram okoline 50° C. Prema tome biti će novo zagrijavanje transformatora :

$$\Theta' = 20 \left(\frac{80}{100} \right)^2 + 50 \frac{1}{4} \left[3 \left(\frac{80}{100} \right)^2 + \left(\frac{110}{100} \right)^2 \right] = 52^\circ \text{ C}$$

Uzmimo sada drugi slučaj. Pita se, kolika je nominalna snaga nekog transformatora gradjenog da zadovoljava VDE propise, ako se prema prijedlogu JUS propisa dozvoli zagrijavanje od samo 60° C, umjesto 70° C. Opet pretpostavljamo da nadtemperatura bakra spram ulja iznosi 20° C i da transformator ima omjer gubitaka

$$\frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = 3 \text{ . Uz } Y = 100$$

dobijemo iz jednadžbe (3.8-5) :

$$\Theta_{JUS} = 60^\circ = 20 \left(\frac{X}{100} \right)^2 + 50 \frac{1}{4} \left[3 \left(\frac{X}{100} \right)^2 + 1 \right]$$

odakle izračunamo :

$$X = 90,8 \%$$

Dakle prema JUS propisima ima taj transformator samo 90,8 % prijašnje nominalne snage.

3.9 Propisi

3.9.1 Općenito

U našoj zemlji su donedavno bili na snazi njemački VDE propisi, a njima se i danas u većini slučajeva koristimo. To ima svoj razlog u tome, što smo u prošlosti u velikoj mjeri nabavljali elektrotehničke proizvode iz Njemačke, pa je u pomanjkanju vlastitih propisa bilo prirodno da se koristimo njemačkim propisima, prema kojima su ti proizvodi bili gradjeni.

Već dulje vremena Internacionalna Elektrotehnička Komisija (IEC) radi na internacionalnim preporukama, koje su velikim dijelom već izašle, no nisu kompletne; za transformatore postoje već definitivne preporuke IEC.

Internacionalne preporuke (preporuke IEC) nisu propisi koji obavezuju, nego preporuke radjene sa svrhom da ih nacionalne komisije pojedinih država prihvate kao nacionalne propise. Tek tada sadržaj IEC preporuka postaje obavezan kao propis za dotičnu državu.

Jugoslavenski propisi (JUS) za transformatore još nisu izašli, ali je za njih već izradjen prijedlog, koji se uglavnom oslanja na IEC preporuke.

Kod VDE propisa moramo razlikovati: odredbe, pravila, upute i norme (standarde).

- a) Odredbe su postavljene obzirom na opasnost po život i opasnost od požara te se njih moramo pridržavati.
- b) Pravila su podaci koji upućuju kako se općenito mogu uobičajenim sredstvima ispuniti zahtjevi propisa; ove podatke treba primijenjivati kao propise, osim ako u pojedinim slučajevima naročiti razlozi ne opravdavaju odstupanje od njih.
- c) Upute (smjernice) su podaci koji se nakon dugotrajnog ispitivanja izdaju kao pravila ili kao propisi, a dč tada služe kao preporuke.
- d) Norme, odnosno standardi, sadrže točne podatke o sastavu, obliku i mjeri materijala, o njegovoj težini, mehaničkim, električkim ili magnetskim svojstvima itd, a njih se proizvođač mora pridržavati, ako izradjuje proizvode po standardima.

Osim što trebaju čovjeka zaštititi od opasnosti po život i materijalne štete, propisi daju, odnosno propisuju, zajedničke vrijednosti za različite proizvode i time ih svode na zajednički kriterij. Propisima su npr. ograničena dozvoljena zagrijavanja; oni točno određuju koliko se smije npr. namot transformatora pod određenim uvjetima rada najviše zagrijati. Što lakši, što jeftiniji transformator želimo napraviti, to je teže tim zahtjevima udovoljiti, tj. što je dozvoljeno zagrijavanje veće, to je lakši i jeftiniji transformator, ali mu je manja životna dob. Računom se ne može točno odrediti dozvoljena maksimalna nadtemperatura, koja smije nastupiti

u bakru namota. Dozvoljene nadtemperature su, uostalom, u raznim propisima različite. Ako, međutim, usporedjujemo dva transformatora koja su gradjena npr. po VDE propisima ali od različitih proizvođača, onda možemo tvrditi da su u pogledu životne dobi oba transformatora jednaka, jer se jednako zagrijavaju; time su oba transformatora u pogledu zagrijavanja odnosno životne dobi svedena na zajednički kriterij. Ako je, međutim, svaki od razmatranih transformatora gradjen po drugim propisima, tada moramo preračunati podatke jednog transformatora na propise drugog transformatora, kako je to učinjeno u poglavlju 3.8., i tako opet svesti oba transformatora na zajednički kriterij. Ti računi nisu, naravno, osobito točni, osim ako nisu udopunjeni sa raznim mjerenjima i pokusima, koji zahtijevaju mnogo vremena i sredstava pa rijetko kada dolaze u obzir.

Osim propisa o zagrijavanju postoje i mnogi drugi propisi, kao npr. propisi o stepenu izolacije namota. Tu se dva transformatora, gradjena po raznim propisima, uopće ne mogu svesti na zajednički kriterij, jer, ako je jedan od njih gradjen za manji stepen izolacije, prema svojim propisima, ne može ga se uopće svesti na kriterij propisa drugog transformatora. Može se samo uzeti u obzir da će biti toliko manje otporan prema udarnim valovima prenapona, koliko mu je manji stepen izolacije.

Iz gornjih navoda je razumljivo nastojanje u svijetu da se pomoću internacionalnih komisija pokušavaju izjednačiti propisi raznih zemalja, kako to za elektrotehničku struku predstavljaju IEC preporuke.

Dozvoljena zagrijavanja su ovisna i o kvaliteti izolacionog materijala, pa zato propisi dijele izolacione materijale na razne termičke klase. Na kraju ovog poglavlja je priložen izvadak iz JUS-a o klasifikaciji izolacionih materijala. Iz priloženog izvatka, koji odgovara preporukama IEC, je vidljivo da su svi izolacioni materijali podijeljeni u 7 termičkih klasa: Y, A, E, B, F, H, C, a za svaku klasu je određena dozvoljena granična temperatura na najtoplijem mjestu.

Kod primjene u JUS-u navedenih izolacionih materijala klase Y, A, E i B u gradnji transformatora, prijedlog za JUS propise određuje dozvoljena granična zagrijavanja transformatora prema temperaturi rashladnog sredstva; ako se drugačije ne navodi, smatra se da rashladno sredstvo ne prelazi slijedeće granične temperature:

- kod transformatora hladjenih vodom najviša temperatura rashladne vode na ulazu u hladionik smije iznositi 25°C ;
- kod transformatora hladjenih zrakom smije iznositi:
 - najviša temperatura okolnog zraka 40°C
 - srednja temperatura zraka 30°C
 - srednja godišnja temperatura zraka 20°C

Prema ovim temperaturama rashladnog sredstva tabela prijedloga JUS propisa za granična zagrijavanja (granične nadtemperature) izgleda ovako :

T a b e l a 1

Dozvoljene nadtemperature u °C za transformatore
po prijedlogu za JUS propise

1	D i o t r a n s f o r m a t o r a		Klasa izolacionog mate- rijala				Mjerenje zagrija- nja	
			Y	A	E	B		
2	Namot hladjen zrakom		40	55	70	75	Promje- nom otpora	
3	Namot u ulju	hla- dje- nje	N, Z	-	60	-		-
4			Z U	-	65	-		-
			V U	-				
5	Ulje u naj- gornjem sloju	Ulje kotla zaštićeno od dodira sa zrakom	55				Termometrom	
6		Ulje kotla u dodiru sa zrakom	50					
7	Magnetski limovi i ostali dijelovi		Zagrijanje ne smije štetno djelovati na magnetska svoj- stva transformatorskog lima, niti na izolaciju lima i svor- nika te susjedne dijelove					

U tabeli 1 su navedene oznake N, Z, ZU i VU a one znače slijedeće :

- N = naravno hladjenje transformatora
- Z = hladjenje prisilnom ventilacijom
- U = hladjenje prisilnom cirkulacijom ulja kroz hladionik
- ZU = ulje hladjeno prisilnom ventilacijom zraka i prisilnom cirkulacijom ulja
- VU = ulje hladjeno vodom i prisilnom cirkulacijom ulja

Kod transformatora s prisilnom cirkulacijom ulja, bez obzira da li je ulje hladjeno zrakom ili vodom, odabire se isto granično zagrijavanje namota, usprkos tome što je granična temperatura rashladnog zraka viša za 15° C od granične temperature vode. Smanjenje granične temperature namota za 15° C kod transformatora hladjenih vodom, smatra se rezervom za eventualno onečišćenje hladionika.

Navedeni prijedlog JUS propisa se gotovo u potpunosti podudara sa IEC preporukama za granična zagrijavanja transformatora.

VDE propisi imaju gotovo istu klasifikaciju izolacionih materijala po termičkoj klasi. Jedinu iznimku čini rasčlanjavanje klase A iz IEC preporuka (odnosno JUS standarda) u dvije klase kod VDE propisa, i to u : klasu A koja je jednaka klasi A iz IEC preporuka samo se isključuje uronjavanje u transformatorsko izolaciono ulje,

i klasu A₀ koja ima dozvoljenu graničnu temperaturu 115° C, a obuhvaća materijale klase A iz IEC preporuka uronjene u transformatorsko izolaciono ulje.

VDE propisi za transformatore odredjuju dozvoljena granična zagrijavanja po tabeli 2 uz uvjet da :

- kod hlađenja ulja vodom ne prelazi temperatura rashladne vode 25° C;
- kod hlađenja zrakom ne prelazi maksimalna temperatura zraka 35° C.

T a b e l a 2

Dozvoljene nadtemperature u °C za transformatore po VDE propisima

D i o t r a n s f o r m a t o r a		Klasa izolacionog materijala					
		A	A ₀	E	B	F	H
1	Namoti	60	70	75	85	110	135
2	Ulje u najgornjem sloju	-	60 ^{*)}	-	-	-	-
3	Željezna jezgra i ostali dijelovi	Nadtemperatura ne smije štetno djelovati na magnetska svojstva željeznih jezgri, na izolaciju limova i svornika te na susjedne dijelove.					

^{*)} Ova vrijednost je utvrđena obzirom na starenje ulja. Ograničenjem ove temperature ipak nije sigurno da će biti ograničena i dozvoljena nadtemperatura namota.

Usporedimo li dozvoljene granične srednje temperature namota u ulju (klasa A u JUS odnosno klasa A₀ u VDE propisima) iz tabela 1 i 2 razabiremo da VDE propisi dozvoljavaju graničnu srednju temperaturu $70 + 35 = 105^{\circ}\text{C}$, dok prijedlog JUS propisa (odnosno preporuka IEC) dozvoljava graničnu srednju temperaturu $60 + 40 = 100^{\circ}\text{C}$. Prema tome razlika iznosi 5°C .

Veća je, međjutim, razlika između granično dozvoljenih temperatura na najtoplijem mjestu namota. Dok JUS propisi odnosno IEC preporuke, prema prilogu na kraju ovog poglavlja, dozvoljavaju za A klasu graničnu temperaturu za namote sa zračnim hlađenjem i namote uronjene u ulje 105°C , VDE propisi dozvoljavaju za A klasu sa zračnim hlađenjem namota isto tako 105°C , ali za namote uronjene u ulje 115°C (klasa A₀), tj. za 10°C više. Prema tome razlika u granično dozvoljenoj temperaturi najtoplijeg mjesta namota uronjenog u ulje između JUS i VDE propisa iznosi 10°C .

Međjutim, na zadnjoj sjednici Komiteta IEC u Londonu donešen je zaključak da se za namote u ulju, bez obzira na vrstu hlađenja, dozvoljava srednja nadtemperatura 65°C , pa u pogledu granične srednje temperature ne bi bilo razlike između VDE propisa i IEC preporuka, jer bi obe iznosile 105°C . Nakon ove odluke ko-

misije IEC nije jasno da li namot u ulju ostaje i dalje u klasi A (105°C na najtoplijem mjestu). O ovome ne raspolažemo sa bilo kakvim podacima, jer IEC komisija nije o tome donijela nikakove odluke, a potpuno je nelogično da nema razlike između granične srednje temperature i granične temperature najtoplijeg mjesta, jer po toj najnovijoj odluci obe ove temperature iznose 105°C . Radi toga treba sačekati definitivno utvrdjenu odluku IEC komisije.

Osim VDE propisa i IEC preporuka te naših JUS propisa postoji još niz propisa drugih zemalja; radi usporedbe prikazujemo u tabeli 3 vrijednosti za dozvoljena zagrijavanja namota transformatora prema propisima VDE, JUS, ASA, BSS itd.

Iz tabele 3 razabiremo da VDE propisi predviđaju nešto nižu temperaturu okoline, što za područje srednje i sjeverne Evrope odgovara. U drugim zemljama, gdje su klimatske prilike lošije i temperatura zraka viša, bilo je potrebno postrožiti uvjete, odnosno sniziti dozvoljene nadtemperature za nekoliko stupnjeva.

T a b e l a 3

Poredbeni prikaz dozvoljenog graničnog zagrijavanja transformatora prema različitim propisima

P r o p i s i	Maks. temp. ras- hladnog zraka		Granične nadtemperature kod trajnog tereta		Kla- sa izo- la- cije
	Zrak $^{\circ}\text{C}$	Voda $^{\circ}\text{C}$	Namoti srednje vrijednosti $^{\circ}\text{C}$	Ulje maksim. vrijednos. $^{\circ}\text{C}$	
VDE 0532/1.59	35	25	70	60	A ₀
Prijedlog JUS Preporuke IEC	40	25	55 - 65 (prema vrsti hladjenja)	50 - 55	A
ASA (American Standards Association)	40	30	55 - 60 (prema teretu)	50 - 55	A
BSS (British Standard Specification)	40	25	60 - 70 (prema vrsti hladjenja)	50	A
DEK (Dansk Elektroteknisk Komite)	40	25	60 - 65 (prema vrsti hladjenja)	50	A
SEM (Svenska Elek- trotekniska Normer)	35	25	60	50	A
UTE (Union Technique de l'Electricité)	40	25	60 - 65 (prema vrsti hladjenja)	50	A

Ovaj standard odgovara preporuci IEC, publikacija 85 od 1957 godine.

1. O p s e g

Ovim standardom utvrđuju se smjernice za klasifikaciju materijala koji služe za izolaciju električnih rotacionih strojeva, transformatora i aparata. Klasifikacija se zasniva na termičkoj postojanosti materijala, a ne na njihovom kemijskom sastavu.

Standard obuhvaća i privremeni informativni popis najpoznatijih izolacionih materijala po klasama. Taj popis nije obavezan za određivanje graničnih temperatura.

2. Opće napomene

Trajnost izolacionih materijala električnih rotacionih strojeva, transformatora i aparata zavisi od mnogih faktora, kao što su temperatura, električna i mehanička naprezanja, vibracije, škodljive atmosfere i kemikalije, vlaga i nečistoća. Sa gledišta trajnosti električnih strojeva, transformatora ili aparata najutjecajniji od ovih faktora je temperatura. Zato se ova klasifikacija zasniva na sposobnosti izolacionih materijala da izdrže izvjesne propisane maksimalne temperature.

Pojedini izolacioni materijali ne mogu neograničeno dugo izdržati temperature propisane ovom klasifikacijom. Ipak su te temperature takve da se, uz povremeno smjenjivanje sa nižim temperaturama, postiže zadovoljavajuća trajnost izolacije. Pri utvrđivanju ovih temperaturnih granica uzeta je u obzir činjenica da su za dvije osnovne klase, naime A i B, već mnogo godina usvojene i svuda u svijetu priznate maksimalno dozvoljene granične temperature od 105°C odnosno 130°C.

Osim gore navedenih osnovnih faktora, trajnost izolacije nekog električnog stroja, transformatora ili aparata kao cijeline zavisi u pogonu i od niza drugih okolnosti. To su, npr. vrsta pogona i radni ciklus, vrsta i primjena tog stroja, transformatora ili aparata, njegova izloženost okolini, hladjenje, impregnacija i drugo. Nadalje, trajnost za koju se neki objekt projektira, zavisi mnogo i od zahtjevanosti pouzdanosti u pogonu, od trajnosti druge opreme dotičnog postrojenja, od važnosti težine samog proizvoda ili od drugih ekonomskih okolnosti. Takve i druge okolnosti (vidi tačku 3) mogu da učine opravdanim da se u izvjesnim slučajevima izuzetno utvrde više ili niže maksimalne temperature od temperatura prema ovom standardu.

Iskustvo je pokazalo da pod uobičajenim radnim uvjetima električni strojevi, transformatori i aparati, građeni prema standardima sa graničnim temperaturama kakve su ovdje navedene, postižu u dielektričnom i mehaničkom pogledu normalni ekonomski životni vijek tj. 10 do 30 godina, već prema njihovoj vrsti.

Pod izrazom "uobičajeni radni uvjeti" se podrazumijeva :

- a) da temperatura okoline, odnosno sredstva za hladjenje, vjerovatno ne će dugo vremena zadržati svoju maksimalnu vrijednost,
- b) da ciklusi opterećenja, uzevši općenito, budu takvi da prosječno opterećenje za razdoblje od više dana ili više mjeseci bude znatno niže od nazivne snage stroja ili transformatora,
- c) da preopterećenja budu umjerena i kratkotrajna.

3. Termičke klase izolacije

Granične temperature izolacionih materijala, propisane ovom klasifikacijom jesu načelno temperature najtoplije točke koju postiže neki izolacioni dio. To su najviše temperature za koje se dotična izolacija smije upotrebljavati pod uobičajenim radnim uvjetima.

Klasifikacijom je propisano ovih 7 klasa :

K l a s a	Granična temperatura u °C
Y	90
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
C	iznad 180

Obično se u praksi temperatura najtoplije točke izolacije ne može mjeriti neposredno, pogotovo na namotajima u žljebovima (utorima) električnih rotacionih strojeva. Zato posebni standardi za električne strojeve, odnosno transformatore i aparate, po ovim istim klasama propisuju dozvoljena povišenja temperature za pojedine vrste i veličine strojeva ili transformatora, kao i za njihove pojedine namotaje i dijelove. Pod dozvoljenim povišenjem temperature podrazumijeva se razlika između temperature izoliranog dijela odnosno stroja i temperature okoline ili sredstva za hladjenje. Zbir temperature okoline ili sredstva za hladjenje i dozvoljenog povišenja temperature je nešto niži od granične temperature izolacionog materijala. Ova razlika utvrđuje se prema iskustvu. Ti posebni standardi, u kojima su propisana dozvoljena povišenja temperatura, uzimaju u obzir sve one

druge faktore i okolnosti (prikazane u toč.2) koji utječu na sposobnost izolacije za izvršavanje njenih zadataka. Pritom je, na primjer, važno i to da li neki izolacioni materijal služi kao dielektrikum, naime, da li je izložen znatnom električnom naprezanju, ili služi samo za mehaničko odvajanje uz neznatno električno naprezanje, u kom je slučaju dozvoljena primjena na višoj temperaturi. Rad na višoj temperaturi bit će moguć, na primjer, i onda kada je mehanička konstrukcija takva da je isključeno međusobno pomicanje vodiča i pored toga što je izolacija, pod utjecajem temperature, eventualno i nešto primijenila svoju strukturu.

Termička postojanost, odnosno sposobnost nekih materijala za primjenu u izvjesnoj termičkoj klasi zavisi i od načina kako su kombinirani sa drugim materijalima, a nekih i od funkcija koju imaju da vrše.

U svakoj klasi izolacije je dozvoljen i udio materijala niže termičke klase, ali samo u strukturne svrhe (npr. kao nosilac ili pojačanje), ako su pritom zadržana zadovoljavajuća električna i mehanička svojstva za vrijeme primjene na maksimalno dozvoljenoj temperaturi.

Termičke klase materijala iz popisa u točki 6 vrijede uz pretpostavku da se materijali upotrebljavaju u zraku (osim ako je izričito navedeno drugačije). Naprotiv, ako se oni primjenjuju uz isključenje kisika, mogu se kod nekih materijala dozvoliti i znatno više maksimalne temperature, barem što se tiče njihove termičke postojanosti.

Pri izboru materijala za neku određenu svrhu treba imati u vidu i činjenicu da se mnogi materijali mogu dobiti u varijantama različite termičke postojanosti, prema kojoj se svrstavaju u odgovarajuće klase.

Većina izolacionih materijala stari u toku upotrebe, a neki materijali osim toga, kada su zagrijani na svoju maksimalno dozvoljenu temperaturu, postaju mekani i električno slabiji (ili samo električno slabiji), ali nakon hlađenja opet poprimaju svoja prvobitna svojstva. Ovu činjenicu također treba uvažiti pri odlučivanju da li će se takav materijal upotrebiti za izvjesnu svrhu.

4. Impregnacija, vezivo i lakiranje

Postojanost prema toplini i trajnost neke izolacije u praktičnoj primjeni zavisi i od slijedećih okolnosti :

- da li je taj izolacioni materijal upotrebljen sa vezivom i kakovo je to vezivo,
 - da li su bilo taj izolacioni materijal, bilo svitak ili namotaj impregnirani ili asfaltirani (kompaundirani), i
 - da li postoji zaštitno lakiranje ili ne postoji.
- 4.1 Neki određeni izolacioni materijal, svitak ili namotaj smatra se da je prikladno impregniran ako neka podesna supstanca (npr. impregnacioni lak) umjesto zraka ispunjava u dovoljnoj mjeri šupljine između vlakana, listova ili čestica izolacije, tako da su sastavni dijelovi izolacije povezani i da na površini postoji zadovoljavajući zaštitni film protiv vlage i nečistoće. Ta impregnaciona supstanca smatra se podesnom,
- ako ima dobra izolaciona svojstva,
 - ako potpuno pokriva odnosno obuhvaća vlakna i povezuje ih međusobno i sa vodičem,
 - ako u njoj ne nastaju šupljine kada se isparuje rastvarač (otapalo), niti iz kog drugog razloga (npr. uslijed kemijske reakcije),
 - ako ne rastvara materiju kojom je izoliran vodič,
 - ako potječe iz iste termičke klase u koju je svrstan i taj impregnirani materijal i iz neke više klase, i
 - ako je točka kapanja iznad granične temperature te klase.
- 4.2 Neki određeni izolacioni materijal, svitak ili namotaj smatra se da je prikladno asfaltiran (kompaundiran) ako neka podesna, termički dobro vodljiva materija (asfaltna kompaund masa ili smola bez razredjivača) potpuno ispunjava sve šupljine između vodiča. Ta materija mora inače zadovoljiti sve uvjete za impregnacione supstance, propisane pod 4.1.
- 4.3 Neki određeni izolacioni materijal, svitak ili namotaj smatra se da je prikladno lakiran, ako taj lak ili kakav drugi materijal, koji može sadržavati i razredjivače, stvara neprekidni površinski film, koji izolaciju u pogonu dovoljno štiti od vlage i nečistoće, djelomično ispunjava šupljine i povezuje čestice izolacije.
- 4.4 Primjena nekog veziva ili impregnacione supstance može često biti ograničena ne termičkom postojanošću, nego kakvim drugim faktorima, kao što su npr. mehanička svojstva na radnim temperaturama. Tako npr. neke epoksidne i poliesterne smole, pri jakim mehaničkim naprezanjima, često mogu biti ograničene na klasu A.

5. Određivanje termičke postojanosti

Najsigurniju osnovu za prosuđivanje termičke postojanosti izolacija u pogonu daje iskustvo iz praktične upotrebe i odgovarajući pokusi. Najpouzdaniji je pokus izvršen na isto takovom stroju, transformatoru ili aparatu u kakvom će dotični materijal biti i primjenjen. Ako bi to bilo neekonomično onda se mogu vršiti prikladni i priznati pokusi na jeftinim modelima (npr. motoretima) koji vjerno imitiraju praktičnu primjenu izolacije. Kritom se neki već poznati materijal zamijeni onim koji treba ocijeniti, pa ako potonji traje barem isto toliko koliko i onaj poznati, smatra se da on odgovara klasi tog poznatog materijala. Ispravnije je promatrati sve izolacione materijale u nekom namotaju kao jedan funkcionalno jedinstven izolacioni sistem, a ne svaki pojedini materijal posebno.

6. Popis izolacionih materijala

U točkama od 6.1 do 6.7 dat je popis izolacionih materijala. U tom popisu su pojedini izolacioni materijali navedeni prvenstveno po svojim općim tehničkim, odnosno kemijskim nazivima, ali su cilju lakše praktičke orijentacije za neke materijale navedeni i njihovi komercijalni nazivi, ukoliko su opće dobro poznati.

Oblici ili izrade u kojima se pojedini materijal u praksi primjenjuje nisu spominjani u popisu da bi se izbjeglo suviše ponavljanje i da bi tekao bio sažetiji. Svi vlaknasti materijali (npr. pamuk, svila, sintetička svila, staklena svila, azbest) upotrebljavaju se u obliku strojnog prediva ili opleta žica, u obliku tkanina, vrpca i navlaka. Papir se upotrebljava u obliku strojnog ovoja žica, uskim tankim vrpčama ili u obliku listova, traka ili vrpca; prešani komadi u obliku ploča, cijevi, profila i oblikovanih dijelova; proizvodi od liskuna (tinjca) i neki sintetički materijali u obliku folija, vrpca, traka, ploča itd.

U ovom tabelarnom popisu materijali su po klasama svrstani u glavne i dopunske. Kao glavni smatraju se oni, koji su opće prihvaćeni u dotičnoj klasi, a kao dopunski oni su kojima postoje izvjesno iskustvo, ali koji nisu opće prihvaćeni u dotičnoj klasi.

Ovaj popis materijala naravno nije potpun. Na osnovu razvoja i upotrebe novih materijala u budućnosti, kao i proba odnosno postupaka za njihove ispitivanje, popis će se po potrebi dopunjavati odnosno revidirati.

6.1 KLASA Y, granična temperatura 90° C

Pamuk, svila, papir i slični organski materijali ili njihove kombinacije bez impregnacije kao i drugi odgovarajući materijali ili kombinacije.

Izolacioni materijal		Vezivo, impregnacija ili premazni lak upotrebljen pri samoj fabrikaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namotaja
T E M P E R A T U R A	Pamuk	nema	Nepotrebna.
	Prirodna svila		
	Vlakna regenerirane celuloze (viskozna svila)		
	Vlakna celulozna acetata		
	Poliamidna vlakna (npr. najlon, perlon)		
	Papir i njegovi proizvodi		
	Kartonit običan (prešpan)		
	Kartonit oplemenjen (npr. antivolton, transformerbord)		
	Letheroid		
	Vulkanfiber		
	Drvo		
	Anilin-formaldehidne smole		
	Urea-formaldehidne (karbamidne) smole		
T E M P E R A T U R A	Poliakrilati	zbog omekšavanja mogu biti ograničeni ispod 90° C	
	Polietylen (politen)		
	Polistiren (polistiro)l		
	Polivinilklorid sa omekšivačem (plastifikatorom) ili bez njega		
T E M P E R A T U R A	Vulkanizirana prirodna guma		

6.2 KLASA A, granična temperatura 105° C

Pamuk, svila, papir i slični organski materijali ili njihove kombinacije posebno impregnirani ili lakirani, ili zaronjeni u tečan dielektrikum, npr. ulje; drugi odgovarajući materijali ili kombinacije

Isolacioni materijal		Vezivo, impregnacija ili premazni lak upotrebljeni pri samoj fabricaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namota ja
Glavni	Pamuk Prirodna svila Vlakna regenerirane celuloze (viskozna svila) Vlakna celuloznog acetata Poliamidna vlakna (npr. najlon, perlon) Papir i njegovi proizvodi Kartonit običan (prešpan) Kartonit oplemenjen (npr. antivolten, transformerbord) Letheroid Vulkanfiber Drvo	Nema	Sušivi uljaj lakovi od prirodnih smola; šelak, kopal i druge prirodne smole; rastvori (etopine) ili suspenzije celuloznih estera i estera.
	Lakirani (uljni) tekstili od pamuka, prirodne svile, regenerirane celuloze, celuloznog acetata ili poliamida (npr. uljajno platno, uljna svila) Lakirani papir (uljni papir)	Sušivi uljaj lakovi od prirodnih ili sintetičkih smola	Supstance iz viših termičkih klasa
	Slojevito (laminirano) drvo	Fenol-formaldehidna smola	
	Folije od celuloznog acetata Folije od celuloznog acetobutirata Poliesterne smole poprečno ulančane Uljni žični lak } emajl Poliamidni žični lak } za žicu	Nema	Isolaciono ulje i sintetički tečni dielektrikumi
	Polihloropren elastomeri Butadien-akrilonitril elastomeri (npr. perbunan)	sintetičke gume	
Dopunski			

6.3 KLASA E, granična temperatura 120° C

Isolacioni materijal		Vezivo, impregnacija ili premazni lak upotrebljeni pri samoj fabricaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namota ja
Glavni	---	---	---
	Sintetički žični lakovi (emajli za žicu), od polivinilformala (polivinilacetata), poliuretana (poli-izocianata), ili epoksida (npr. lak-šice: formeks, rupseko, durofleks, sinobel, sinel)	Nema	
	Prešani komadi sa celuloznim punilima (npr. bakelit) Slojeviti prešani komadi sa pamučnom tkaninom (npr. tekstolit, kanvasit, novotekst) Slojeviti prešani komadi sa papirom (npr. delit, pertinaks, repelit)	Sintetičke smole melaminformaldehid, fenolformaldehid, fenoplast i fenolfurfural	Uljno modificirani asfaltni i uljno modificirani sintetički smolni lakovi; poliesterne smole poprečno ulančane; epoksidne smole (etoksilin, npr. araldit)
	Poliesterne smole poprečno ulančane Folije od celuloznog triacetata Folije ili vlakna od polietilen tereftalata (terilen)	Nema	Supstance iz viših termičkih klasa
	Lakirani tekstili od polietilen tereftalata (terilen)	Uljno modificirani alkidni lakovi	
Dopunski			

6.4 KLASA B, granična temperatura 130° C

Neorganski (mineralni) materijali kao što su liskun-tinjac(mika), staklo, azbest i njihove kombinacije sa prikladnim vezivima; drugi pa i nemineralni materijali, ukoliko termički odgovaraju.

Izolacioni materijal		Vezivo, impregnacija ili premazni lak upotrebljeni pri samoj fabricaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namotaja
Glavni	Staklena vlakna Azbest	Nema	Uljno modificirani asfaltni i uljno modificirani sintetički lakovi; asfaltna kompaund-mase; poliesterne smole poprečno ulančane; epoksidne smole (etoksilin npr. araldit). (Kod velikih mehaničkih naprezanja mogu gore navedeni materijali biti i nepodešani pa će event. biti potrebne nemodificirane fenolne smole) Supstance iz viših termičkih klasa
	Lakirana staklena tkanina lakirani azbest	Uljno modificirani lakovi sintetičkih smola	
	Proizvodi od liskuna-tinjca (sa nosiocem ili bez njega) npr., mikafolij, mikaniti, mika - vrpce, samika - materijali	Šelak, asfaltne ili bitumenske smjese Uljno modificirane sintetičke smole Alkidne smole (npr. gliptal) Polimerne smole poprečno ulančane Epoksidne smole (etoksilin, npr. araldit)	
	Slojeviti materijali od staklenih vlakana Azbestni slojeviti materijali Prešani komadi sa mineralnim punilima	Sintetičke smole (duroplasti) i to melamin-formaldehid i fenolformaldehid	
Dopunski	Prešani komadi sa mineralnim punilima	Polimerne smole poprečno ulančane	
	Polimonoheklortrifluoretilen	Nema	

6.5 KLASA F, granična temperatura 155° C

Eventualno potrebni nosilac mora biti neorganski

Izolacioni materijal		Vezivo, impregnacija ili premazni lak upotrebljeni pri samoj fabricaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namotaja
Glavni	---	---	---
Dopunski	Staklena vlakna Azbest	Nema	Smole alkidne (npr. gliptal), epoksidne (etoksilin), poliesterne poprečno ulančane, poliuretanske, sve sa povišenom termičkom postojanošću Silikon-alkidne i Silikon-fenolne smole Supstance iz viših termičkih klasa
	Lakirana staklena tkanina Lakirani azbest Proizvodi od liskuna - tinjca (sa nosiocem ili bez njega)	Smole alkidne (npr. gliptal), epoksidne (etoksilin), poliesterne poprečno ulančane, poliuretanske, sve sa povišenom termičkom postojanošću Silikon-alkidne smole	

6.6 KLASA H, granična temperatura 180° C

Eventualno potrebni nosilac mora biti neorganiki

Isolacioni materijali		Vezivo, impregnacija ili premasni lak upotrebljeni pri samoj fabricaciji izolacionog materijala	Impregnaciona supstanca potrebna pri izradi svitaka ili namotaja
Glavni	Staklena vlakna Azbest	Nema	Prikladne silikonske smole
	Lakirana staklena tkanina	Prikladne silikonske smole	
	Lakirani azbest	Silikon elastomeri	
	Proizvedi od liskuna - tinjca (sa nosiocem ili bez njega)	Prikladne silikonske smole	
	Slojeviti materijali od staklene tkanine		
Azbestni slojeviti materijali			
Dopunski	Silikon elastomeri (silikonske gume)	Nema	
	---	---	---

6.7 KLASA C, granična temperatura iznad 180° C

Glavni	Liskun - tinjao (mika) Porculan i druga keramika Staklo Kvarc (Maksimalna radna temperatura može biti ograničena fizičkim, hemijskim i električkim svojstvima na radnoj temperaturi)	Nema	Neorganika veziva kao što su staklo i cement
	Preparirana staklena tkanina Preparirani azbest Proizvođi od liskuna		
Dopunski	Politetrafluoretilen (teflon) (iznad 250° C postojanost ograničena)	Nema	Silikonske smole povišene termičke postojanosti (iznad 225° C postojanost ograničena)

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

• Prof. ing. ANTON DOLENC

T R A N S F O R M A T O R I

Svezak II

Zagreb 1961.

4. KONSTRUKCIJA TRANSFORMATORA

4.1 Limovi

Jezgre transformatora se sastoje od limova, koji moraju biti međusobno izolirani. Ovi limovi se danas proizvode ili u pločama sa standardiziranim dimenzijama (klasični način proizvodnje) ili u obliku trake, koja se namata na koture; ovaj posljednji način se sve više primjenjuje, jer je mnogo prikladnije i brže rezanje i štancanje na automatskim strojevima lima iz trake, koja neprekidno teče, nego iz lima u pločama, a i transport lima u koturima je mnogo lakši i jednostavniji.

Za transformatore se skoro isključivo upotrebljavaju visokolegirani limovi debljine 0,35 mm; iznimno se kod malih transformatora uzimaju u upotrebu i limovi debljine 0,5 mm, koji inače služe za gradnju rotacionih električkih strojeva (dinamo-limovi).

U poglavlju koje obrađuje struju magnetiziranja i gubitke u željezu (vidi poglavlje 2.31.) su u dijagramima na sl. 2.31-3 b) i c), 2.31-4 b) i c), 2.31-7 b) i c) i 2.31-8 b) i c) date osnovne karakteristike limova koji se najčešće upotrebljavaju u gradnji transformatora. Specifični gubici kod ovih normalnih visokolegiranih limova imaju za praksu upotrebljive sljedeće vrijednosti, dobivene na Epstein-ovom aparatu kod 50 Hz:

	P_{Fe1} kod 1 T	$P_{Fe1,5}$ kod 1,5 T
toplo valjani lim	0,93 W/kg	2,4 W/kg
hladno valjani lim	0,5 W/kg	1,10 W/kg

Efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja, odnosno specifična jalova snaga (vidi pogl. 2.31.), potrebna za magnetiziranje normalnih visokolegiranih transformatorskih limova, iznosi /vidi sl. 2.31-7 b) i c)/:

	H_1 za 1 T	$H_{1,5}$ za 1,5 T	P_{Fe1} za 1 T	$P_{Fe1,5}$ za 1,5 T
toplo valjani lim	85 A/m	1960 A/m	2,48 VA/kg	86 VA/kg
hladno valjani lim	20 A/m	35 A/m	0,58 VA/kg	1,5 VA/kg

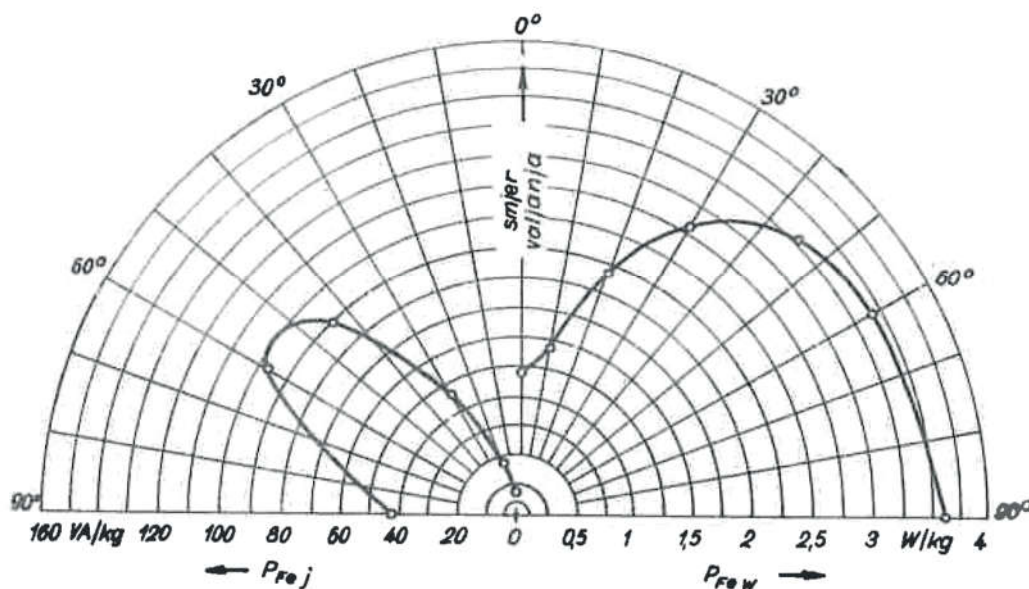
Kod najboljih visokolegiranih limova iznose specifični gubici, efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja i jalova snaga za

magnetiziranje:

	Specifični gubici W/kg		Efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja A/m		Specifična ja- jalova snaga VA/kg	
	P_{Fe_w1}	$P_{Fe_w1,5}$	H_1	$H_{1,5}$	P_{Fe_j1}	$P_{Fe_j1,5}$
	kod 1T	kod 1,5T	kod 1T	kod 1,5T	kod 1T	kod 1,5T
toplo va- ljani lim	0,83	2,02	59	590	1,8	24
hladno va- ljani lim	0,43	1,1	18,8	29	0,52	1,3

Navedeni podaci su dobiveni mjerenjem na Epstein-ovom aparatu i vrijede samo za najbolje limove.

Kod mehaničke obrade (rezanje i šfancanje) limova nastaju unutar-
nja mehanička naprezanja, koja znatno povećavaju specifične gubitke.
Najizrazitiji porast specifičnih gubitaka nastupa kod obrade hladno
valjanih limova, koji se baš radi ove pojave moraju nakon završene
obrade termički normalizirati izžarivanjem kod cca 800 °C. Steza-
nje i slaganje limova u jezgru uzrokuje daljnje povećanje specifič-
nih gubitaka, tako da nakon završetka svih radova na jezgri treba



Sl. 4.1-01

Specifični gubici i specifična jalova snaga magnetiziranja za hladno
valjani lim M7x kod 1,5 T i 50 Hz u ovisnosti od pravca silnica
u odnosu na pravac valjanja

P_{Fe_j} - specifična jalova snaga

P_{Fe_w} - specifični gubici

općenito računati sa prirastom specifičnih gubitaka od cca 10 do 30 % u odnosu na gubitke dobivene na Epstein-ovom aparatu.

Znatan utjecaj na veličinu specifičnih gubitaka ima smjer magnetiziranja u odnosu na smjer valjanja. Kod toplo valjanih limova mogu gubici pri magnetiziranju okomito na pravac valjanja biti za 10 - 20 % veći od gubitaka pri magnetiziranju u smjeru valjanja; što je lim kvalitetniji to su razlike veće. Kod hladno valjanih limova dolazi do još većih razlika, kako to prikazuje dijagram na sl. 4.1-01; iz ovog dijagrama je vidljivo da se gubici od 1,22 W/kg pri magnetiziranju u smjeru valjanja povećavaju na 3,41 W/kg tj. za 180 %, pri magnetiziranju okomito na smjer valjanja.

Kod hladno valjanih limova je potrebna snaga za magnetiziranje strogo ovisna o smjeru toka silnica u odnosu prema smjeru valjanja. Pri toku silnica u smjeru valjanja iznosi snaga za magnetiziranje pri 1,5 T 3 VA/kg, pri kutu magnetiziranja od 55° se penje na 102 VA/kg, a u smjeru okomitom na smjer valjanja iznosi svega 43 VA/kg (vidi sl. 4.1-01). Napadno je povećanje snage za magnetiziranje od 3 VA/kg pod kutem 0° na 102 VA/kg pod kutem od 55° (što predstavlja 34,7-struko povećanje), dok pod kutem od 90° dolazi do svega 14,4-struko povećanja.

Prije upotrebe, odnosno prije obrade za upotrebu, se lim mora s jedne strane izolirati. Klasični način izoliranja se provodi oblijepljivanjem lima sa svilenim papirom od 0,03 mm debljine. Nešto moderniji proces je lakiranje lakom sa 0,025 mm debljine ili presvlačenje sa slojem vodenog stakla od 0,015 mm. Izoliranje se provodi samo sa jedne strane lima.

Limovi izolirani vodenim staklom ne smiju stajati na skladištu duže od 6 mjeseci, jer nakon dužeg stajanja počinje opadati izolacioni sloj, dok nakon ugradnje lima u jezgru ova opasnost više ne postoji.

Navedene organske izolacije se ne mogu primjenjivati kod hladno valjanog lima, jer se on mora nakon obrade izžarivati na cca 800°C, što bi sloj organske izolacije potpuno uništilo. Izoliranje hladno valjanog lima se vrši odmah nakon valjanja presvlačenjem vrlo tankim slojem anorganske izolacije.

Stavljanje izolacije na limove, nejednolika debljina lima te hrapavost površine lima, koja ne može biti apsolutno glatka, uzrokuju smanjenje aktivnog presjeka jezgre, što se izražava faktorom punjenja paketa f_{Fep} .

Faktor punjenja ovisi o debljini lima i o vrsti izolacije kojom je lim izoliran; za limove debljine 0,35 mm iznosi faktor punjenja:

toplo valjani lim izoliran sa svilenim papirom	0,85
toplo valjani lim izoliran sa lakom	0,89
toplo valjani lim izoliran vodenim staklom	0,91
hladno valjani lim izoliran anorganskom izolacijom	0,96

Povećanjem presjeka jezgre raste veličina napona po zavoju, te se javlja opasnost oštećenja ili proboja izolacije lima, što bi dozvolilo zatvaranje električkog kruga vrtložnim strujama. Da bi se ova opasnost što više smanjila, kod većih transformatora se ulaže u

željezni paket na svakih 30 do 50 mm prešpan debljine 0,5 do 1 mm ; time se ostvaruje osiguranje od topljenja željeza uslijed prevelikih vrtložnih struja, ali se ujedno snižuje i ukupni faktor punjenja željeza.

4.2 Zračni raspor u jezgri

Efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja za magnetiziranje željezne jezgre sa indukcijom od 1 T iznosi prema dijagramu na sl. 2.31-7 :

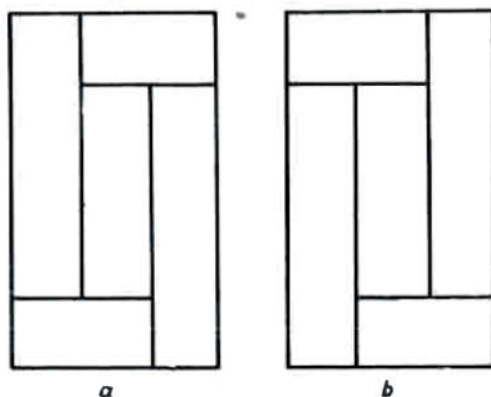
$$H_{Fe} = 85 \text{ A/m} \quad \text{dok je za zrak potrebno}$$

$$H_{zr} = \frac{B}{0,4 \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 10^{-6}} = 56 \cdot 10^4 \text{ A/m}$$

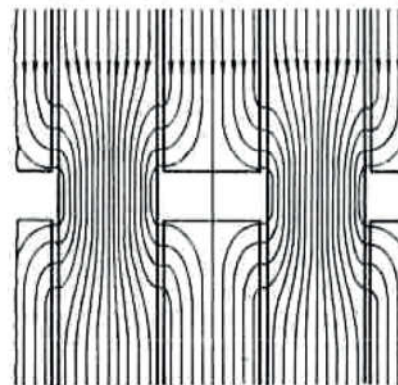
Očito je da za postizanje iste indukcije od 1 T kod jednake dužine željeza i zraka treba magnetski napon za zrak biti cca

$7 \cdot 10^3$ -struko veći od magnetskog napona za željezo. Zato je razumljivo da se kod transformatora, barem kod manjih, pokušava zračni raspor sniziti na što je moguće manji iznos.

Jezgra bez zračnog raspora predstavlja preskupo rješenje, jer bi se namot morao namatati neposredno na zatvorenu jezgru, a limovi bi se morali štancati sa prozorom za namot, što bi dovodilo do prevelikog otpada lima. Kod najmanjih specijalnih transformatora se nailazi i na takova rješenja, ali se praktički uvijek rješava problem smanjivanja zračnog raspora prekrivanjem limova kod slaganja, kako to prikazuje sl. 4.2-01. Prekrivanjem se magnetske silnice prisile da većim dijelom obidju zračni raspor preko susjednih limova, kako



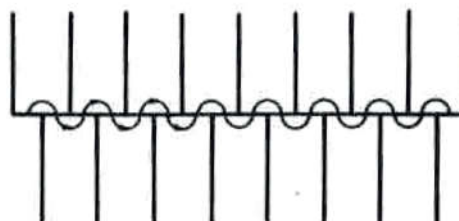
Sl. 4.2-01
Slaganje limova
a) prvi sloj
b) drugi sloj



Sl. 4.2-02
Prelaz silnica kod prekrivenih limova

je prikazano na sl. 4.2-02. U ovom slučaju silnice moraju proći dva puta kroz raspor, odnosno kroz izolaciju limova, ali je gustoća mag -

netskog toka, radi relativno vrlo velike površine na kojoj silnice prelaze izolaciju, daleko manja nego što bi bila u slučaju direktnog prelaza iz lima na lim preko zračnog raspora. Iz sl. 4.2-02 se vidi, da pri prelazu silnica iz lima u lim dolazi na vrlo kratkom dijelu lima do približno dvostruke indukcije u željezu; međutim, ekvivalentni zračni raspor za ovakav način prelaženja silnica iznosi približno 0,04 mm, dok se tupim spajanjem stupa i jarma, uz prethodnu finu obradu dodirnih površina, postizava ekvivalentni zračni raspor od cca 0,05 mm. Razlike u magnetskom otporu gotovo ne bi ni bilo, ali kod tupog spajanja postoji velika opasnost da se po cijeloj dodirnoj površini dobije kratki spoj između pojedinih limova (vidi sl. 4.2-03), što bi dovelo do stvaranja velikih vrtložnih struja, do velikog zagrijavanja, pa čak i do topljenja paketa, a time do najtežeg oštećenja pa i uništenja transformatora. Da bi se uklonila ova opasnost, nužno je kod tupog spoja uložiti između paketa izolaciju, koja mora biti dovoljno čvrsta da izdrži bez oštećenja mehaničke sile, koje nastupaju pri montaži jezgre i pri vibracijama u pogonu. No, ni ova mjera zaštite ne zadovoljava u potpunosti, jer već pri obradi dolazi do kratkog spoja između limova, pa bi se i obrada morala izbjegavati; kod neobradjenog tupog spoja se povećava ekvivalentni zračni raspor, a time je i potrebni magnetski napon, odnosno broj amperzavoja, daleko veći nego kod prekrivenog spoja.



Sl. 4.2-03
Mogućnost kratkog spoja
između limova kod tupog
spoja paketa

U konstruktivnom pogledu je jedina prednost tupog spoja jednostavno sastavljanje jezgre i mogućnost vrlo prikladnog rastavljanja i sastavljanja gornjeg jarma pri skidanju odnosno umetanju namotaja na stup nakon izvršenog popravka kvara. Nasuprot ovoj prednosti kod prekrivenog spoja se jezgra sama u sebi učvršćuje, dok su kod tupog spoja potrebni dodatni konstruktivni elementi, koji pojedine pakete jezgre međusobno učvršćuju.

U razvoju gradnje transformatora tupi se je spoj sve više napuštao te se danas vrlo rijetko upotrebljava.

Kod nas ne postoje propisi, koji bi ograničavali struju magnetiziranja; ni IEC preporuke a niti "VDE" i "JUS" propisi ne propisuju granične vrijednosti struje magnetiziranja. Francuski "EDF" propisi i čehoslovački propisi propisuju granične vrijednosti, pa se prema njima može odrediti bar red veličine najviše dozvoljene struje magnetiziranja u procentualnim iznosima prema nominalnoj struji.

Francuski EDF propisi propisuju maksimalno dozvoljene struje magnetiziranja u odnosu na nominalnu struju za razne veličine snaga trofaznih transformatora prema tabeli 1.

Kod trofaznog transformatora sa prekrivenim spojem otpadaju na svaku fazu dva spoja, odnosno dva zračna raspore u ekvivalentnom iznosu od 0,04 mm; magnetski napon, koji je potreban za ove zračne raspore, iznosi npr. kod trofaznog transformatora snage 100 kVA sa indukcijom u željezu od 1,4 T i sa cca 4 V/zavoju:

$$\frac{2 \cdot \sigma_{kv} \cdot B \cdot 10^{-3}}{0,4 \pi \cdot 10^{-6} \sqrt{2}} = \frac{2 \cdot 0,04 \cdot 14 \cdot 10^{-3}}{0,4 \pi \cdot 10^{-6} \sqrt{2}} \approx 65 \text{ A}$$

dok ukupni nominalni amper-zavoji, odnosno ukupno protjecanje nominalne struje u jednoj fazi iznosi:

$$I_w = \frac{P \cdot w}{U_f \cdot 3} = \frac{P}{U_{nom} \cdot 3} = \frac{100000}{4 \cdot 3} \approx 8300 \text{ A}$$

T a b e l a 1

Maksimalno dozvoljene struje magnetiziranja trofaznih transformatora u ovisnosti o snazi prema EDF propisima

Snaga transformatora kVA	Maksimalno dozvoljena struja magnetiziranja u % nominalne struje
25	9,5
40	8
63	6,2
100	5,7
160	5
250	5
400	4,2
630	4,2

Po navedenom računu zračni raspor kod navedenog transformatora zahtijeva cca 0,8 % od ukupnog protjecanja nominalne struje; EDF-propisi za transformator snage 100 kVA dozvoljavaju struju magnetiziranja 5,7 % od iznosa nominalne struje, te se ovaj iznos u navedenom primjeru dijeli na zračni raspor 0,8 % i na željezo 4,9 %.

Razmotri li se mijenjanje procentualnog iznosa magnetskog napona za zrak i za željezo po zakonima sličnosti kod transformatora različitih snaga, ali pod uvjetom jednake konstrukcije i istih specifičnih opterećenja (vidi pogl. 5.3), dobiva se slijedeće:

Ukupno protjecanje nominalne struje se mijenja proporcionalno sa promjenom presjeka bakra; to znači, da je njegova promjena proporcionalna promjeni kvadrata linearnih dimenzija, odnosno proporcionalna promjeni drugog korijena iz snage.

Magnetski napon za zračni raspor se ne mijenja sa promjenom dimenzija, pa je promjena njegove procentualne vrijednosti obrnuto proporcionalna promjeni drugog korijena iz snage.

Magnetski napon potreban za željezo raste sa duljinom silnica, pa je prema tome proporcionalan s promjenom linearnih dimenzija transformatora, odnosno njegov procentualni iznos se mijenja obrnuto proporcionalno sa promjenom četvrtog korijena iz snage.

Ako se po gornjim izvodima proračunaju magnetski naponi za raz-

ličite snage transformatora dobiva se:

Snaga transformatora	Magnet.napon za Fe	Magnet.napon za zrak
kVA	$A_{Fe} = \frac{I_{\mu Fe} \cdot w}{I_{nom} \cdot w} \cdot 100$ %	$A_{zr} = \frac{I_{\delta} \cdot w}{I_{nom} \cdot w} \cdot 100$ %
10 000	1,55	0,08
630	3,1	0,3
100	4,9	0,8
25	6,9	1,6
1	15,5	8

Iz navedene tabele se vidi da kod transformatora velike snage nema problema sa strojem magnetiziranja, dok kod transformatora manjih snaga ona postaje veliki problem, koji zahtijeva snižavanje specifičnih opterećenja u željezu. Tako se npr. mora kod transformatora snage 1 kVA sniziti indukcija od 1,4 T na 1,1 T da bi se magnetiski napon, potreban za zrak, snizio na $8 \cdot 1,1/1,4 = 6,3 \%$, a magnet-ski napon za željezo na $15,5 \cdot 300/1500 = 5,2 \%$; ovim snižavanjem magnetske indukcije se dobije ukupni iznos potrebnih amperzavoja za magnetiziranje 11,5 % od iznosa ukupnog protjecanja nominalne struje, što se može smatrati snošljivim.

Kod jezgri za magnetska pojačala, koja su osobito osjetljiva na veličinu zračnog raspora, rješava se problem struje magnetiziranja pomoću jarmova sa dvostrukom visinom, jer se time na prelaznim mjestima snizuje indukcija na polovičnu vrijednost. Naprotiv, kod malo većih transformatora šteti se rado vrijeme potrebno za slaganje limova istovremenim ulaganjem dvaju limova u jezgru, jer zračni raspor u jezgri kod većih transformatora ne pravi većih poteškoća.

4.3 Oblik jezgre

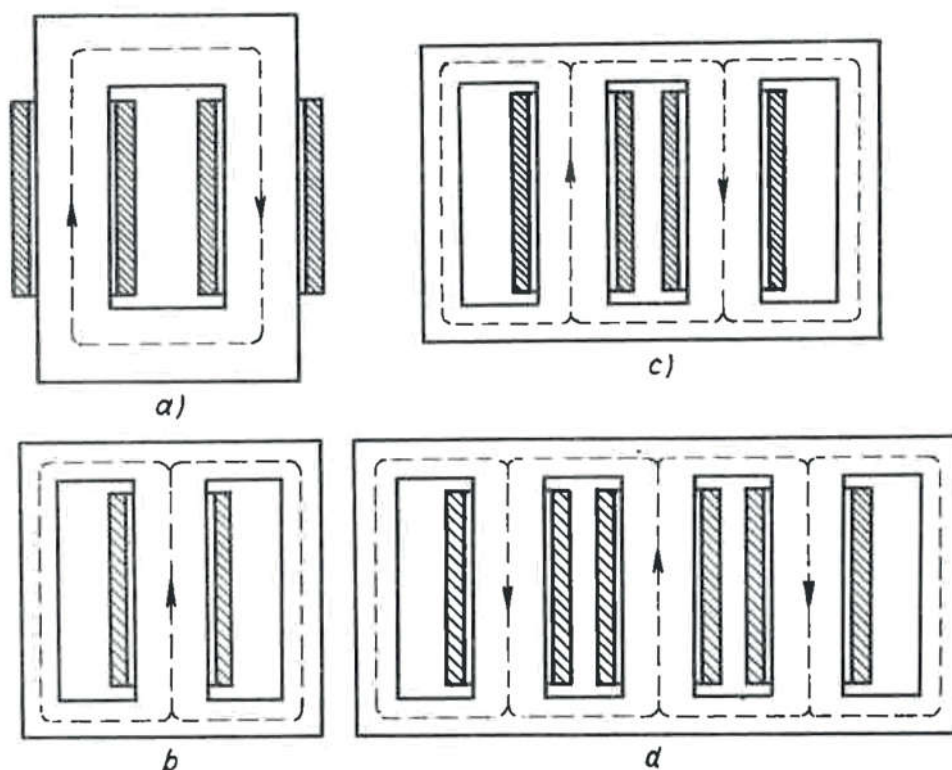
Jezgra transformatora se sastoji iz stupova koji nose namote, i iz jarmova koji povezuju stupove. Iznimno se jarmovi, koji leže paralelno sa stupovima, označuju kao stupovi; tako se npr. naziv "peterstupni transformator" daje trofaznom transformatoru sa 5 stupova, od kojih samo 3 nose namote.

Otvor između stupova i jarmova se naziva prozor jezgre, a služi za smještaj namota; veličinu prozora određuju presjeci namotaja, koji zauzimaju presjek prozora; veći presjek namota zahtijeva veći prozor i dulje jarmove.

Prema konstruktivnoj izvedbi jezgre razlikujemo:

- jezgrasti tip i
- ogrnuti tip transformatora

Oblici jezgre, koji se općenito upotrebljavaju za jednofazne transformatore, prikazani su na sl. 4.3-ol. Oblik c) i d) iz sl. 4.3-ol dolazi u obzir samo kod jednofaznih transformatora najvećih snaga, kod kojih se radi otežanog transporta mora što više sniziti visina transformatora.



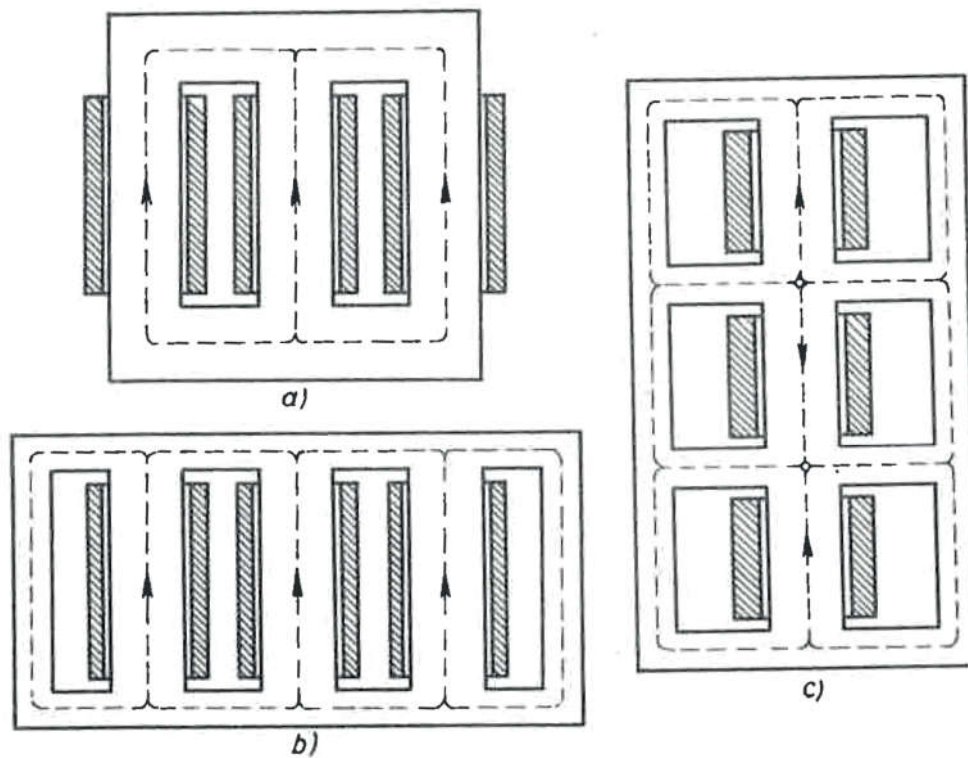
Sl. 4.3-01
Jednofazni transformatori

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| a) jezgrasti tip | c) ogrnuti tip sa 4 stupa |
| b) ogrnuti tip | d) ogrnuti tip sa 5 stupova |

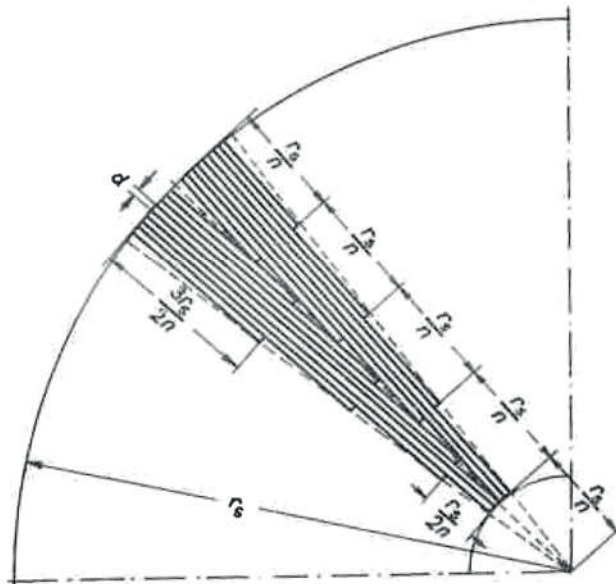
Spajanjem triju jednofaznih transformatora u jedan od trofaznih spojeva dobiva se trofazna grupa, koja kao cjelina predstavlja odnosno zamjenjuje trofazni transformator. Takove grupe se upotrebljavaju u Americi, dok se u Evropi grade trofazni transformatori prema sl. 4.3-02.

U posljednje vrijeme se i u Evropi nailazi na primjenu jednofaznih jedinica u trofaznoj grupi kod velikih snaga, jer se time samo sa jednim jednofaznim transformatorom ostvaruje 100-postotna rezerva, a ponekad otešćani transport zahtijeva upotrebu isključivo jednofaznih jedinica u trofaznoj grupi. Tome nasuprot se u Americi sve više prelazi na upotrebu trofaznih jedinica, jer su one cca 20 % jeftinije od trofazne grupe jednofaznih jedinica.

Primjena peterostupnog transformatora dolazi u obzir kod velikih transformatora radi transportnih poteškoća; visina jarma peterostupnog transformatora iznosi samo 58 % visine jarma trostupnog transformatora, pa je za transport mnogo prikladnija peterostupna izvedba. Ako se iz bilo kojeg razloga traži slobodan magnetski povratni put, kako je to npr. slučaj kod malih transformatora za dozemnu zaštitu, tada i kod malih transformatora dolazi do primjene peterostupnog transformatora. Osim navedenih klasičnih oblika jezgre treba

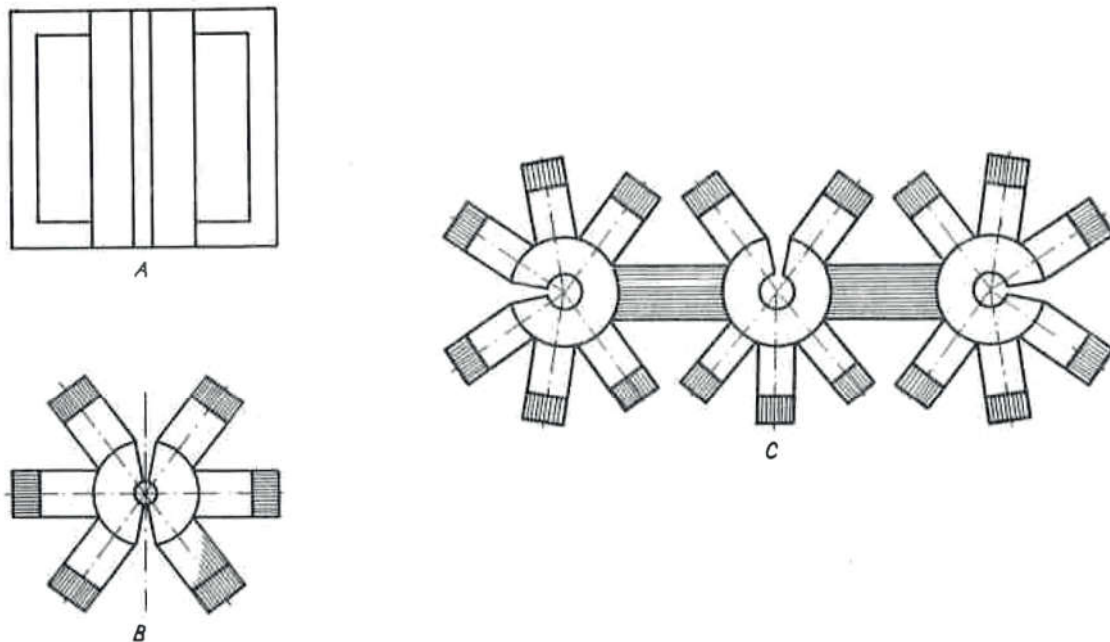


Sl. 4.3-02
Trofazni transformatori
a) jezgrasti tip
b) peterostupni jezgrasti tip
c) ogrnuti tip



Sl. 4.3-03
Presjek stupa sa radijalnim limovima
 d - debljina lima; r_s - radijus stupa;
 n - diobeni broj

napomenuti još i radijalni tip ogrnutog transformatora, kod kojeg su stupovi sastavljeni iz radijalno složenih limova prema sl. 4.3-03, a jarmovi zatvaraju magnet-ski tok u više radijalnih pravaca, kako prikazuje sl. 4.3-04.



Sl. 4.3-04

Radijalni tip jednofazne i trofazne jezgre

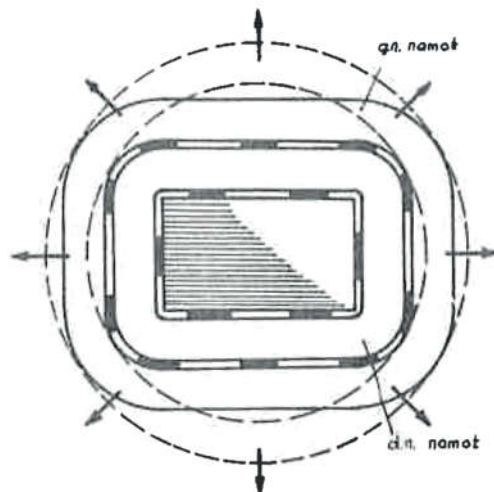
- A - nacrt jednofazne jezgre
- B - tlocrt jednofazne jezgre
- C - tlocrt trofazne jezgre

4.4 Presjek stupa i konstrukcija jezgre

Stup je obuhvaćen namotom. Što je veći faktor punjenja stupa to je manja srednja duljina zavoja, odnosno manja potrošnja bakra. Zato se presjek prostora, koji obuhvaća namot, mora što bolje ispuniti željeznim paketom stupa i time faktor punjenja stupa ($f_{Fe\ st}$) učiniti što višim.

Tehnološki je najjednostavnije napraviti stup sa pravokutnim presjekom, jer je u tom slučaju širina svih limova jednaka. Ako se na takav stup smjesti namot pravokutnog oblika, dobit će se visok faktor punjenja stupa i time bolje iskorišćenje materijala. Nažalost, ovakova izvedba se rijetko može korisno primijeniti. Kod manjih transformatora, koji se namataju sa relativno tankim vodičima i izradjuju u vrlo velikim serijama, namotavanje se vrši sa vrlo velikom brzinom; ovim načinom je namotavanje svitka pravokutnog oblika vrlo otežano nejednolikom brzinom vodiča, koju uzrokuje stalna promjena promjera svitka pri vrtnji nosioca svitka pravokutnog oblika, pa je vodič stalno izvrnut trzajima, koji ga mogu oštetiti ili prekinuti. Da bi se izbjegla ova poteškoća svitak se namata u obliku valjka, iako se time snizuje faktor punjenja stupa. Kod većih transformatora, kod kojih se svici namotavaju sa debljim vodičem i znatno manjom brzinom nego svici manjih transformatora, moglo bi se namotavanje izvršiti u pravokutnom obliku, kad bi to dopustile dinamičke sile. Di-

namičke sile kod uobičajenih cilindričnih namota djeluju radijalno, pa bi one deformirale pravokutni oblik svitka na način prikazan na sl. 4.4-01. Zato kod iole većih transformatora sa cilindričnim namotom pravokutni oblik svitka ne dolazi u obzir.



U tehnici gradnje velikih transformatora se ponekad upotrebljavaju plošni namoti (samo kod transformatora ogrnutog tipa), kod kojih sile kratkog spoja djeluju paralelno sa osi namota, odnosno stupa, pa se redovito namoti i stupovi izvedu u pravokutnom obliku.

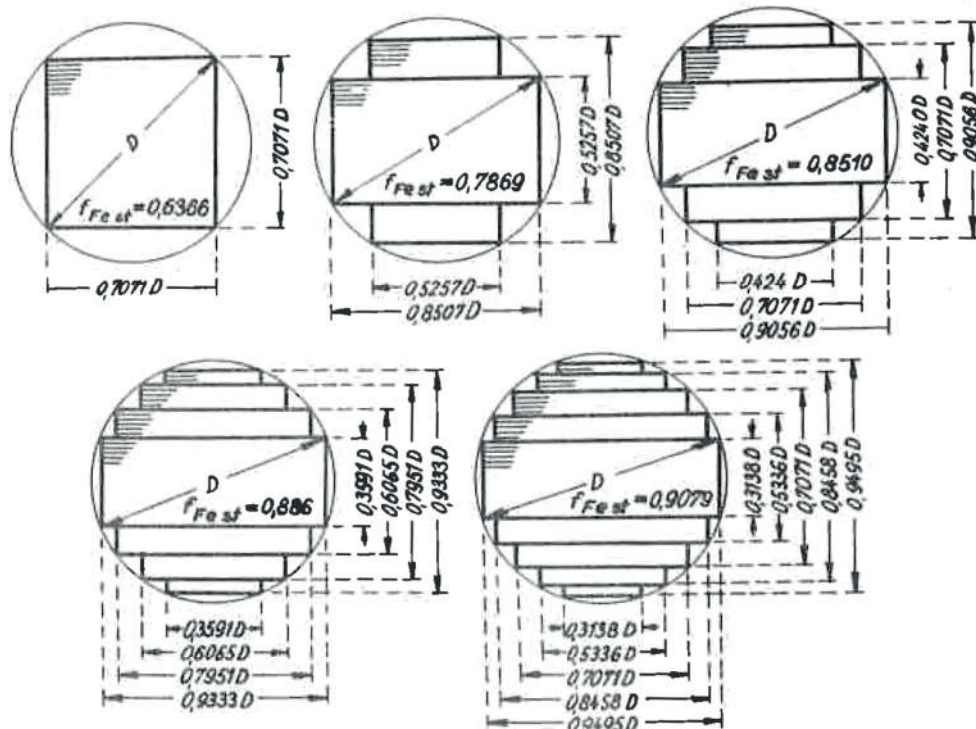
Ako se kod okruglog namota upotrebi stup kvadratičnog presjeka, izgubi se cca 37 % raspoloživog prostora za stup, pa se dobije faktor punjenja stupa

$$f_{Fe\ st} = 0,63$$

Sl. 4.4-01

Deformacija pravokutnog svitka uslijed radijalnih sila u kratkom spoju

Ovakovo rješenje dolazi u obzir samo kod najmanjih transformatora, jer se kod njih ne isplati graditi jezgru iz limova različitih širina. Kako raste veličina transformatora, tako se želi postići što veći faktor punjenja stupa. Optimalno rješenje prilagodjivanja oblika presjeka stupa obliku kruga sa do pet različitih širina limova prikazuje sl. 4.4-02.



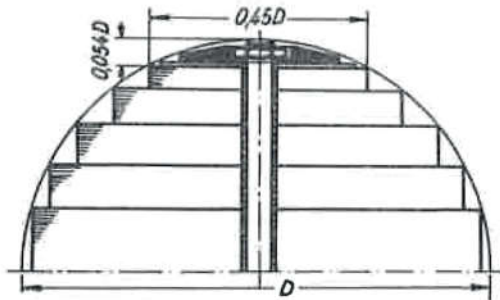
Sl. 4.4-02

Optimalno dimenzioniranje stupa obzirom na njegov promjer

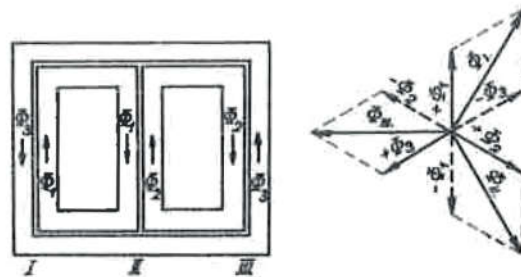
Postoji rješenje kojim se postizava najveći faktor punjenja stupa rezanjem svakog slijedećeg lima na toliko veću širinu, da se pri slaganju limova dobije kružni presjek stupa; ovo se postiže sa škarama sa automatskom promjenom širine svakog slijedećeg lima.

Jezgra transformatora mora nakon slaganja i stezanja predstavljati potpuno čvrsto tijelo. Sila stezanja po jedinici površine mora biti, teoretski, proporcionalna debljini paketa lima. Praktički se sa tlakom ide do najviše 10^6 N/m^2 (cca $10 \cdot 10^4 \text{ kp/m}^2$).

Kod malih transformatora su pritisci maleni, pa je dovoljno stupove nakon stezanja odgovarajućim spravama bandažirati vrpcom (ili "Rebschnur"-om). Za transformatore snage iznad 100 kVA upotrebljavaju se zakovice ili vijci sa većim podložnim pločicama. Stupovi vrlo velikih transformatora se učvršćuju tlačnim pločama sa vijcima, kako to prikazuje sl. 4.4-03, pa u ovim slučajevima širina najužih limova ne bi trebala biti manja od 0,45 D, što treba



Sl. 4.4-03
Presjek stupa stegnut s tlačnim pločama



Sl. 4.4-04
Trofazna okvirna jezgra

uzeti u obzir pri slaganju limova po sl. 4.4-02.

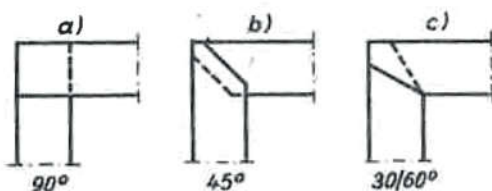
Uvjeti pri stezanju jarmova su povoljniji, jer se ne mora odviše štediti na prostoru kao kod stupova. Kod malih uljnih transformatora do snage od nekoliko stotina kVA se obično upotrebljava pravokutni profil od drva (crvena bukva), kojeg treba prije upotrebe dobro ispariti (parena bukovina), da izadju sve kiseline, koje bi mogle sniziti probojnu čvrstoću ulja. Kod većih transformatora upotrebljavaju se za stezanje jarma željezni profili, a kod transformatora najvećih snaga prelazi se na varene konstrukcije. Varena konstrukcija se kod stupova proširuje tako, da može na sebe preuzeti i aksijalne sile namotaja, koje mogu biti vrlo velike u kratkom spoju. Ova proširenja se osiguravaju od aksijalnih sila sa aksijalnim vijcima, koji povezuju konstrukciju između jarmova.

Kod velikih jezgri treba površinu hladjenja povećati sa kanalima u jezgri. Tehnološki najlakše rješenje je izvedba uzdužnih kanala paralelno sa površinom limova; jednostavnim ubacivanjem distancionih komada postiže se željeni broj i veličina uzdužnih kanala. No, poprečni kanali su za hladjenje daleko korisniji, jer toplina do njih ne mora prolaziti preko međujazlacija limova, nego prelazi neposredno iz željeza na ulje u njima.

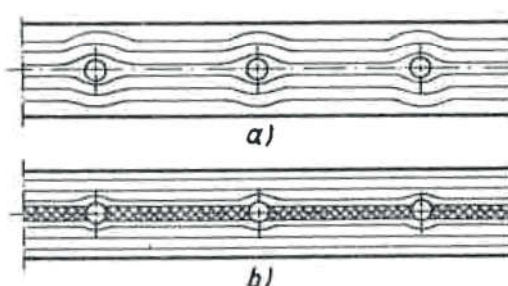
Kod velikih jezgri se pojavljuje i problem širokih limova, jer otežavaju sastavljanje jezgre, a pogotovo otvaranje i zatvaranje gornjeg jarma pri ugradnji namota. Oba navedena problema rješava okvirna jezgra, koja se dijeli na još tri jezgre, od kojih svaka za sebe povezuje po dvije faze. Ta jezgra smanjuje širinu limova i izdašno povećava rashladnu površinu, ali kod trofaznih transformatora donosi i novi problem, jer se tokovi dvaju okvira na zajedničkom putu ne mogu zbrojiti geometrijski radi zračnog rasporeda između okvira, nego povećavaju indukciju u željezu tako, kao da se zbraja aritmetički (vidi sl. 4.4-04). Prelaz silnica preko zračnog rasporeda između okvira smanjuje donekle indukciju, no ipak treba računati sa ukupnim povišenjem indukcije za cca 5 %.

Klasični prekriveni spojevi pod kutem 90° kod toplo valjanih limova ne prave nikakvih poteškoća. Kod hladno valjanih limova, radi njihove magnetske orijentiranosti u uzdužnom pravcu, treba u spojevima računati sa dodatnim gubicima u željezu i sa povećanom strujom magnetiziranja. Primjena koso prekrivenog spoja, najčešće pod kutem od 30° ili 45° , kod orijentiranog lima daje povoljnije rezultate, ali iziskuje veći otpad, komplicira i poskupljuje rezanje lima, te otežava međusobno sastavljanje stupova i jarma. Navedeni prekriveni spojevi su prikazani na sl. 4.4-05.

Postoje i drugi oblici kosih spojeva, ali optimalno rješenje će donijeti iskustvo u budućnosti; nije isključeno da će se za primjenu najboljim pokazati klasični spoj pod kutem od 90° .



Sl. 4.4-05
Prekriveni spojevi



Sl. 4.4-06
Tok silnica kroz lim sa rupama
a) toplo valjani lim
b) hladno valjani lim

Provrti u jezgri, koji služe za prolaz i smještaj vijaka za stezanje i učvršćivanje jezgre, stvaraju nemale probleme. Vijke treba sa velikim stepenom sigurnosti izolirati od željeznog paketa, kako ne bi došlo do kratkog spoja između limova i kako bi se prekinuo električki krug oko magnetskog toka, jer bi u suprotnom slučaju došlo do velikih zagrijavanja a čak i do topljenja željeza paketa na mjestima učvršćenja. Osim ove poteškoće, provrti smanjuju aktivni presjek jezgre i time povišuju indukciju; probijanjem rupa u limu za provrt povećavaju se gubici radi srha i radi stvorenih unutrašnjih napona na mjestu rezanja. Kod hladno valjanih limova ovome se pridružuje i utjecaj ogromnog povećanja magnetskog otpora pod kutem od 55° (vidi sl. 4.1-04), što prisiljava silnice, koje uvijek traže put najmanjeg magnetskog otpora, da obilaze provrte u ravnoj liniji uzduž lima tako, da zapravo i nema skretanja ispred i iza provrta, tj. silnice se ponašaju kao da u šrafiranom području prema

sl. 4.4-o6 nema lima. Ovo povisuje indukciju po cijeloj duljini jezgre, a time se povećava i struja magnetiziranja i gubici u željezu.

Da bi se izbjegao loš utjecaj rupa u limovima, odnosno provrta u jezgri, pokušava se učvršćenje jezgre provesti međusobnim spajanjem limova sa ljepilom iz umjetnih smola (araldit), što bi trebalo dati jezgri čvrst oblik a zamijeniti sva ostala učvršćenja.

4.5 Izolirani vodič

Za namotavanje namota transformatora upotrebljava se čisti elektrolitski bakar. Aluminiij se ne upotrebljava, jer je gradnja transformatora s njim neekonomična; dolazi u obzir samo u iznimnim slučajevima, kad se iz bilo kojih razloga bakar ne smije ili ne može upotrebiti.

Namotavanje se vrši redovito sa mekanim bakrom, jer je rad s njim najlakši; kod vrlo velikih transformatora prisiljava nas bojazan od velikih sila kratkog spoja na upotrebu tvrdjeg bakra sa većom čvrstoćom.

Do promjera od cca 3 mm uzima se okrugli profil vodiča, a preko toga pravokutni, koji mora imati zaobljene bridove; kvadratni profil se nerado upotrebljava radi sukanja.

Vodič se skoro uvijek izolira. Debljina izolacije se označava sa prirastom odnosno sa razlikom dimenzija izoliranog i golog bakra. Za suhe transformatore dolazi u obzir:

kod klase A - izolacija od pamuka opletena ili opredena impregnirana sa impregnacionim lakom, prirast od 0,16 mm na više; izolacija od natron papira u ulju sa prirastom od 0,22 mm na više;

kod klase E - izolacija od laka na bazi umjetnih smola sa prirastom od 0,04 mm na više;

kod klase B - izolacija od staklenog prediva impregnirana lakom klase E sa prirastom od 0,16 mm na više;

kod klase H - izolacija od staklenog prediva impregniranog sa silikonskim lakom, prirast od 0,16 mm na više.

Kod uljnih transformatora se vodič izolira skoro isključivo sa natron-papirom debljine 0,05 mm, dok se iznimno za izolaciju upotrebljava lak. Razlog gotovo isključive upotrebe natron-papira kod uljnih transformatora leži u slijedećem:

Napon između dvije elektrode, koje su međusobno izolirane sa dvije vrste izolacije, se podijeli na izolatore proporcionalno njihovoj debljini a obrnuto proporcionalno njihovim relativnim dielektričnim konstantama. Relativne dielektrične konstante imaju slijedeće iznose za :

ϵ' ulje	= 2,3
ϵ' natron papir	= 3,2
ϵ' natron papir u ulju	= 2,5
ϵ' prešpan	= 4,5
ϵ' tvrdi papir	= 4,5 - 5

Dielektrična konstanta krutih izolacija je prema gornjim podacima znatno veća od dielektrične konstante ulja; probojna čvrstoća krutih izolacija je takodjer veća, čime se još više povećava bojazan od proboja u ulju. Da bi se napon što povoljnije raspodijelio na krutu izolaciju i ulje mora dielektrična konstanta krute izolacije biti što bliža dielektričnoj konstanti ulja, ako već ne može biti jednaka ili niža od nje. Ovom zahtjevu najbolje odgovara natron papir u ulju, dok se prešpan i tvrdi papir izbjegavaju. Njihovo izbjegavanje neka ukratko obrazloži slijedeći kratki račun:

Dvije ravne metalne ploče dijeli sloj izolacije ulja od duljina $= 10^{-2}$ m debljine i

- u prvom slučaju sloj tvrdog papira od $d_{tp} = 4 \cdot 10^{-2}$ m debljine, odnosno
- u drugom slučaju sloj natron papira iste debljine kao pod a) $d_{np} = 4 \cdot 10^{-2}$ m.

Napon između ploča u oba slučaja iznosi 100 000 V.

Za slučajeve a) i b) će jakost električnog polja u ulju iznositi

$$F_a = \frac{U}{\epsilon'_{ulja} \left(\frac{d_{ulja}}{\epsilon'_{ulja}} + \frac{d_{tp}}{\epsilon'_{tp}} \right)} = \frac{100\,000}{2,3 \left(\frac{10^{-2}}{2,3} + \frac{4 \cdot 10^{-2}}{5} \right)} = 3,520\,000 \text{ V/m}$$

odnosno

$$F_b = \frac{U}{\epsilon'_{ulja} \left(\frac{d_{ulja}}{\epsilon'_{ulja}} + \frac{d_{np}}{\epsilon'_{np}} \right)} = \frac{100\,000}{2,3 \left(\frac{10^{-2}}{2,3} + \frac{4 \cdot 10^{-2}}{2,5} \right)} = 2,140\,000 \text{ V/m}$$

Jakost polja u ulju je za 64 % veća u slučaju a) kod upotrebe tvrdog papira prema slučaju b) gdje je upotrebljen natron papir u ulju.

Izolacija vodiča papirom se obavlja jednostavnim omotavanjem trake papira oko vodiča; veći prirast se dobiva sa više slojeva papirne trake.

4.6 Namot

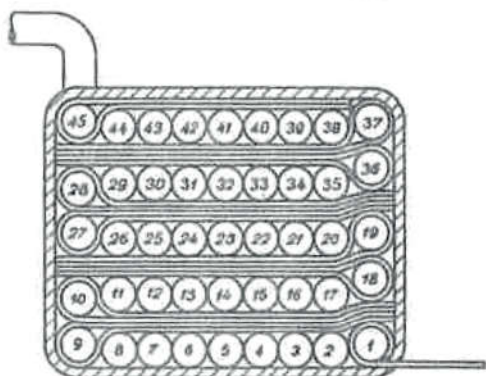
4.61 Općenito

Prema smjeru toka energije kroz transformator namoti se dijele na primarni i sekundarni; prema visini napona učinjena je podjela

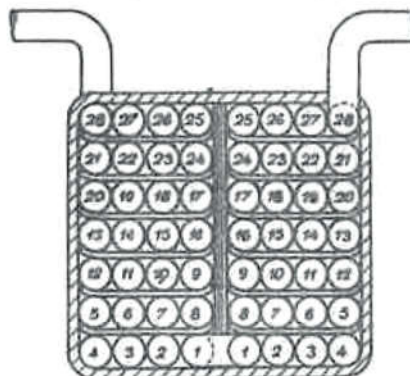
na donjo-naponski (dn) i gornjonaponski (gn) namot. Kod gradnje transformatora radje se upotrebljava podjela na "dn" i "gn" namot, jer ona jednoznačno, bez obzira na primjenu odnosno na smjer toka energije kroz transformator, određuje namote.

4. 62 Svici

Namot se sastoji iz većeg ili manjeg broja svitaka. Kod manjih presjeka vodiča prave se tzv. polusvici; u većini slučajeva je potrebno krajeve polusvitaka imati izvedene na vanjskoj strani pa se početak polusvitka izvodi napolje pomoću bakrene trake, kako je to prikazano u sl. 4.6-01. Ako se dva takova polusvitka, koji su u protivnim smjerovima motani, na počecima spoje, dobije se cijeli svitak. Umjesto da se počeci moraju spajati, mogu se polusvici izvesti tako, da se kod početka namatanja prvog polusvitka ostavi to-



Sl. 4.6-01
Polusvitak sa izvodom od
bakrene trake

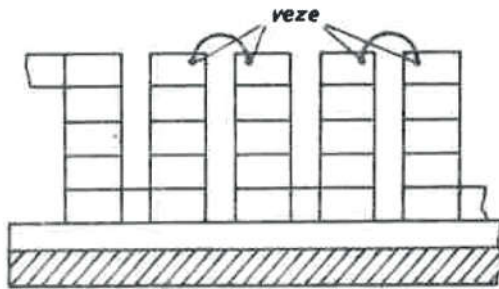


Sl. 4.6-02
Svitak sastavljen od dva polu-
svitka bez prekida u namatanju

lika duljina vodiča, da se od nje može namotati drugi polusvitak; nakon svršetka namatanja prvog polusvitka, sa ostavljenim vodičem se namata drugi polusvitak, pa time otpada izvodjenje spoja između polusvitaka, a svitak se dobije namotan sa vodičem bez prekida i bez spajanja, kako to prikazuje sl. 4.6-02. U slikama 4.6-01 i 4.6-02 je prikazan i red zavoja sa redoslijedom brojeva kod namatanja.

Radi hlađenja svitak ne smije imati prevelike dimenzije, jer toplina mora sa određenim padom temperature, koji je i kod malih i kod velikih transformatora praktički isti, izaći iz unutrašnjosti napolje. Zato se kod većih transformatora sastavljaju namoti iz većeg broja ovakvih svitaka, odnosno polusvitaka. U takovom svitku postoji više slojeva i u svakom sloju više zavoja.

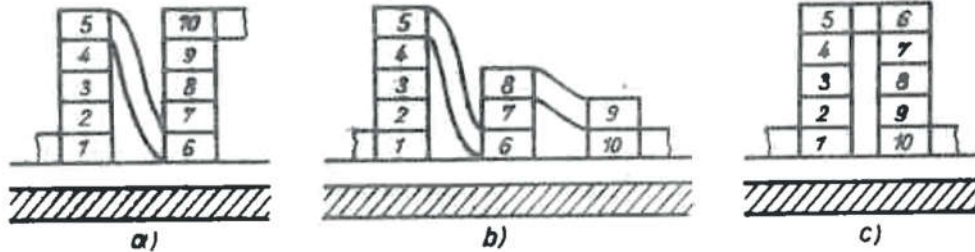
Kod namatanja svitaka sa vodičem većeg presjeka i pravokutnog oblika, polusvitak ima samo jedan zavoj u svakom sloju, kako je na sl. 4.6-03 prikazano. Kod ovakovog načina namatanja na svako spojno mjesto dolazi relativno mali broj zavoja, što se može izbjeći namatanjem iz jednog vodiča prema sl. 4.6-04. Kod namatanja preloženog namota svaki drugi polusvitak se samo provizorno namota (a), obrnuto preloži (b) i zatim pomicanjem i zatezanjem smjesti u određenom razmaku uz prethodni svitak (c). Po ovom postupku je



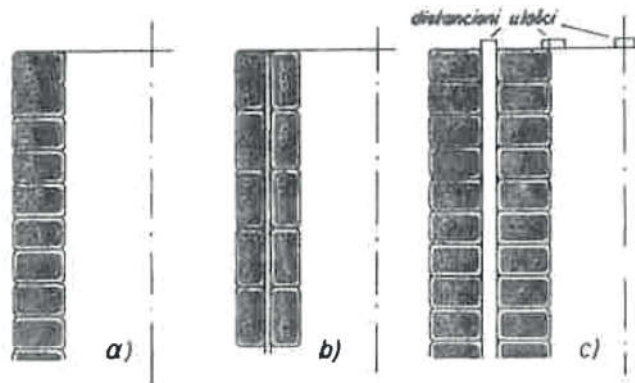
Sl. 4.6-03
Namot sastavljen iz plosnatih
svitaka

namot dobio ime "preloženi
namot".

Kod mnogo većih presjeka
plosnatog vodiča i relativno
malenog broja zavoja namata
se tzv. cilindrički namot (i-
li cijevni namot), kod kojeg
cijeli namot predstavlja jed-
na spirala, koja je razmješte-
na po cijeloj visini namota
kako je na sl. 4.6-05 a) pri-
kazano; spirala može biti iz-
vedena u dva sloja namatana
jedan preko drugoga (b) ili
sa razmakom za hlađenje (c).



Sl. 4.6-04
Izrada preloženog namota



Sl. 4.6-05
Cijevni namot za niske napone

4.63 Svici za velike struje

Velike struje zahtijevaju velike presjeke bakra, pa u tom slučaju dolazi do znatnog potiskivanja struje, što dovodi do velikih dodatnih gubitaka, (vidi pogl. 5.7). Upotrebom snopa vodiča umjesto jednog profila izbjegava se potiskivanje struje; u snopu međusobno izoliranih vodiča se po duljini vrši na više mjesta cikličko izmjenjivanje mjesta između pojedinih izoliranih vodiča (vidi sliku 4.6-06), a na kraju se svi vodiči kratko spoje.

Ovim postupkom izmjene mjesta između međusobno izoliranih vodiča svaki pojedini vodič prelazi podjednako sve položaje pri na-

8	1
7	2
6	3
5	4



7	8
6	1
5	2
4	3



6	7
5	8
4	1
3	2

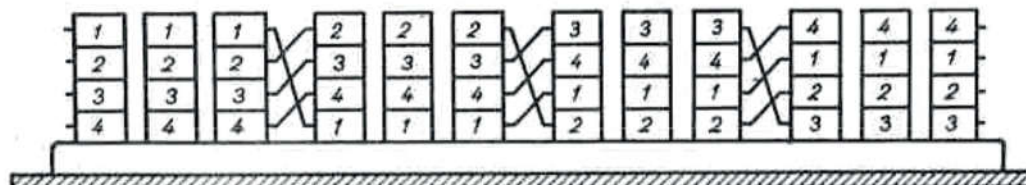
matanju oko stupa, pa je utjecaj rasipnih silnica u svim vodičima isti, tj. u svakom vodiču se inducira jednako velik napon od rasipnog polja, pa se dobivaju i jednake raspodjele struje po pojedinim vodičima.

Opisani način cikličkog zamjenjivanja mjesta u snopu vodiča se zamjenjuje namatanjem namota sa više paralelnih vodiča, koji takodjer u toku namatanja izmjenjuju u cikličkom redoslijedu mjesta, kako je na sl. 4.6-o7 prikazano.

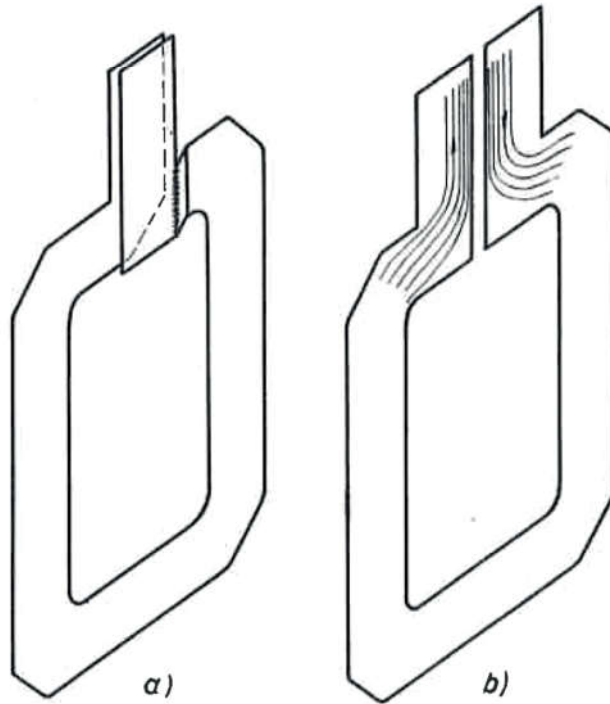
Za naročito velike struje se upotrebljavaju tzv. limeni svieci, kod kojih jedan zavoj predstavlja bakrena limena ploča izrezana i oblikovana prema sl.4.4-o8 a) iz koje se vidi da jedan izvod treba privariti na jedan od krajeva limenog zavoja. Jednostavnija izvedba bez zavarivanja izvoda je prikazana na sl. 4.6-o8 b), ali se kod ove izvedbe javlja snažno potiskivanje struje prema sredini obaju izvoda (kako je na sl. 4.6-o8 b) prikazano), pa se time stvaraju i jaka lokalna zagrijavanja. Potiskivanje struje prema unutrašnjim stranama izvoda dolazi zbog slijedećeg:

Struja za svoje protjecanje traži uvijek najmanji otpor, a najmanji induktivni otpor kod struja suprotnog smjera se ostvaruje sa što manjim razmakom između njih, jer se time postizava najmanja veličina magnetskog toka.

Sl. 4.6-o6
Ciklička izmjena mjesta
među vodičima u snopu



Sl. 4.6-o7
Namotavanje namota od 12 zavoja sa 4 paralelne žice uz
cikličko izmjenjivanje mjesta



Sl. 4.6-08
Limeni svitak

Limeni svici se mogu upotrebljavati samo kod plosnatog namota (vidi pogl. 4.4 i sl. 4.4-01) i ogrnutog tipa jezgre.

4.64 Konstrukcija svitka

Tri zahtjeva, koji se postavljaju na svaki svitak, odredjuju njegov oblik i dimenzije.

- Prosječna nadtemperatura bakra u svitku kod suhih transformatora ne smije preći vrijednost koju ograničavaju propisi prema upotrebljenoj klasi izolacije (npr. kod upotrebe izolacije klase A ne smije prosječna nadtemperatura bakra prema okolnom zraku iznositi više od 55°C). Kod uljnih transformatora prosječna nadtemperatura svitka prema temperaturi ulja ne smije biti veća od 20°C do 25°C . Svitak mora biti izveden tako, da ga rashladno sredstvo (zrak ili ulje) u dovoljnoj mjeri oplakuje i da prema njemu bude što je moguće manje termički izoliran. Zahtjev što manje termičke izoliranosti se protivi idućem zahtjevu (zahtjevu b), jer termičku izolaciju odredjuju potrebe električne izolacije.
- Svitak mora biti tako električki izoliran da odolijeva svim naponima, koji u pogonu mogu nastupiti.
- Svitak mora biti dovoljno čvrst i krut da odolijeva svim mehaničkim naprezanjima u pogonu a naročito u kratkom spoju.

Navedena 3 zahtjeva se stalno isprepliću, pa je teško bilo kojeg izdvojiti i odvojeno analizirati.

Za hladjenje svitka treba između njih predvidjeti kanale, koji će omogućiti zadovoljavajuće strujanje rashladnog sredstva; pri tom treba obratiti pažnju na širinu kanala, da se ne bi strujanje rashladnog sredstva odviše prigušilo. U zraku treba širina kanala iznositi najmanje 10 - 15 mm a u ulju 4 - 6 mm.

Isolacija vodiča mora kao najminimalniji zahtjev izdržati napone koji nastupaju između zavoja tj. napon jednog zavoja. Pogonski napon jednog zavoja je relativno malen; kod najvećih transformatora iznosi nešto više od 100 V, dok valevi prenapona, koji udaraju na transformator iz mreže, mogu među pojedinim zavojima prouzrokovati neusporedivo veće napone prema naponu jednog zavoja (vidi pogl. 6.8). Ovi prenaponi su kratkotrajni a i sadržaj energije im je neznatan, pa prvi proboji, osobito kod uljnih transformatora, ne vode do trajnog spoja među zavojima, jer odmah nakon proboja ulje zalije mjesto proboja a u papirnoj izolaciji ostaje samo sitna crna točkica kao oznaka mjesta proboja. Rastavi li se transformator, koji je bio duže vremena u pogonu, može se naći mnogo takovih sitnih mjesta proboja, a ona se obično nalaze na određenim mjestima namota na kojima nastupaju najveći prenaponi. Najvećim prenaponima su osobito izvrgnuti početni zavoji namota. Tek nakon mnogih proboja dolazi do električnog luka i do trajnog spoja između zavoja, pa se u mnogo slučajeva pokušava višestruko pojačati izolacija početnih zavoja; pri ovom pojačavanju izolacije treba imati u vidu smanjivanje kapaciteta povećavanjem razmaka između zavoja, a time se povećavaju prenaponi (vidi pogl. 6.8).

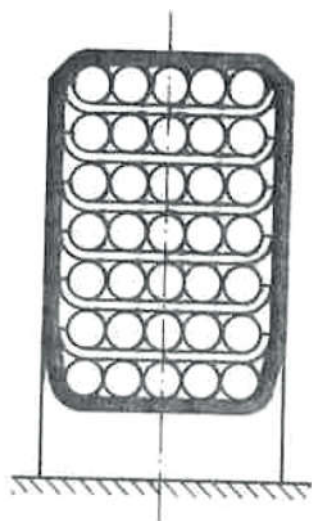
Obostrani prirast izolacije kod okruglih vodiča do 3 mm promjera - izoliranih papirom u ulju - iznosi 0,3 mm. Kod profilnih vodiča je prirast izolacije ovisan o veličini presjeka; što je presjek vodiča veći to su i mehanička naprezanja pri namatanju veća, pa je potreban veći prirast izolacije. Obostrani prirast izolacije kod profilnih vodiča iznosi približno:

0,4 mm	za profilne vodiče sa presjekom do 15 mm ²
0,6 mm	za profilne vodiče sa presjekom od 15-35 mm ²
0,8 mm	za profilne vodiče sa presjekom od 35-50 mm ²
1,0 mm	za profilne vodiče sa presjekom od 50-75 mm ²

Ako je potreban veći presjek od 75 mm², namotavanje se vrši sa dva, tri ili više paralelno spojenih vodiča sa presjekom do 75 mm².

U većini slučajeva izolacija vodiča ne može izdržati prenapone između dva sloja zavoja, pa se zato između slojeva vodiča umeće posebna slojna izolacija, kako je u sl. 4.6-09 prikazano. Debljina slojne izolacije se može izračunati tako, da se najveći nastupajući ispitni napon, koji prilikom ispitivanja nastupa između dva susjedna sloja vodiča, podijeli sa dozvoljenom jakosti električnog polja obzirom na probojnu čvrstoću upotrebljenog materijala za slojnu izolaciju.

Mehanička čvrstoća svitaka se povećava impregniranjem sa odgovarajućim lakovima. Kod suhih transformatora se u toku namatanja pojedini slojevi mažu cinkovim bjelilom, a cijeli svitak se još natopi u izolacioni lak a zatim suši u peći; nakon ovih operacija svitak dobiva dovoljnu čvrstoću, koja je dva do tri puta veća nego kod svitka koji se samo impregnira izolacionim lakom.



Sl. 4.6-09
Svitak sa slojnom izolacijom

Kod uljnih transformatora se upotrebljavaju specijalni lakovi na bakelitnoj bazi sa kojima se svici impregniraju u vakuumu.

Na stupovima većih transformatora se nalazi mnogo svitaka; aksijalne sile mogu biti vrlo velike a postoji i opasnost od stalnih vibracija frekvencije 100 Hz, uzrokovane pogonskom frekvencijom od 50 Hz; naročito su opasni veliki strujni udarci, koje uzrokuje teški pogon koji transformatori napajaju (npr. valjaonice). Među svicima se nalazi mnogo izolacionih komada, koji vremenom stare i gube na debljini; promjene debljine su vrlo male, ali kod velikih visina namota ipak dovoljne da dođe do olabavljenja namota, što dovodi do njegovog potpunog razaranja. Zato se pri konstrukciji transformatora mora predvidjeti mogućnost stezanja namota sa vijcima, a pri montaži treba grijanjem, sušenjem i

stalnim stezanjem namot dovesti u trajno stanje. Ako ni ove mjere ne daju punu sigurnost, potrebno je nakon nekoliko mjeseci pogona transformator otvoriti i stegnuti mu namote. Kod velikih transformatora se, radi postizanja što veće sigurnosti, ugradjuju jaka pera, koja stalno drže svitak na stupu pod pritiskom.

4.65 Izolacija namota

Namoti moraju biti izolirani međusobno, prema jezgri i prema konstrukciji. Izolacija mora biti dimenzionirana za ispitni napon, koji odredjuju propisi.

Kod uljnih transformatora sa koncentričnim namotom, koji se skoro redovito upotrebljava kod velikih napona, susreću se slijedeća dva tipična slučaja:

- a) Izolacija u rasporu između donjonaponskog i gornjonaponskog namota i izolacija između visokonaponskih namota susjednih faza izvrnuta je djelovanju približno homogenog električnog polja, pa treba računati samo sa probojnom čvrstoćom izolacionih slojeva. Za ulje se može grubo računati sa probojnom čvrstoćom za ispitni napon sa cca $4,5 \cdot 10^3$ kV/m, jer se ipak mora uzeti u obzir nepotpuna homogenost električnog polja; cilindar od tvrdog papira podnosi cca $11 \cdot 10^3$ kV/m. Minimalne dimenzije izolacionih razmaka g_n i d_n namota te razmaka među fazama g_n namota kod uljnih transformatora su prikazane u tabeli 2.

Kad se slojevi ulja i tvrdog papira kombiniraju, tada treba uzeti u obzir raspodjelu napona na pojedine slojeve prema debljini i dielektričnoj konstanti (vidi pogl. 4.5).

T a b e l a 2

Minimalne dimenzije izolacionih razmaka
kod uljnih transformatora

Donjonaponski namot

Napon namota kV		Izolacija prema stupu		Izolacija prema jarmu	
Redni	Ispitni	Razmak mm	Oblik izolacije	Razmak mm	Oblik izolacije
do 1	5	5	uljni kanal	kao razmak namota gn prema jarmu	ležišta namota od dr- va ili elektrokartona
3 i 6	18 i 25	12	uljni kanal s		ležišta namota od elektrokartona
10	35	18	cilindrom od		
15	45	20	tvrdog papira		
35	85	30	deblj. 3 - 6 mm		

Gornjonaponski namot

Napon namo- ta kV		Izolacija prema namotu dn		Izolacija prema jarmu		Izolacija medju fazama gn		Izolacija prema stijeni kotla	
Redni	Ispit- ni	Razmak mm	Oblik izolacije	Razmak mm	Oblik izolacije	Razmak mm	Oblik izolacije	Razmak mm	Oblik izolacije
6	25	8,5	uljni ka- nal s ci- lind. od	20	ležišta namota od	10	uljni kanal	25	uljni kanal
10	35	12	tvrdog pa- pira deblj.	30	elektrokar- tona (do 6 kV event.	14	s pregra- dom od e- lektrokar- tona deblj.	30	
35	85	27	3 - 6 mm	60	od drveta	30	2 - 3 mm	75	
110	230	57	uljni ka- nal s ci- lindrima	110	ležišta na- mota od	70	uljni ka- nal s pre- gradama od	150	uljni ka- nal s
220	460	130	od elek- trokartona deblj. 6 mm kape od e- lektrokar- tona deblj. 8 mm	130	elektro- kartona	-	elektrokar- tona		pregradama od elek- trokartona

OPASKE:

1) Kod dimenzija namota prema stijeni kotla nisu uzeti u obzir izvodi. Uz upotrebu veće količine tvrde izolacije, razmak namota gn prema kotlu može biti smanjen.

2) Kod rednih napona 6 - 110 kV spojevi se izvode iz prvog svitka počimajući od gornjeg jarma. Kod napona 220 kV spojevi se izvode iz sredine namota.

3) Uz upotrebu papirnatih cilindara kod 110 i 220 kV, koji potpuno popunjuju razmak između gn i dn namota i čiji krajevi se nastavljaju u kapu, moguće je znatno smanjiti izolacione razmake namota gn prema namotu dn i jarmu. Za 400 kV-transform. mora se konstrukcija izvesti na taj način.

- b) Izolacija prema jarmu, gdje ne postoji homogeno električno polje, se mora računati sa tangencijalnim naponskim naprezanjima na površini izolacionih slojeva, odn. sa kliznim putevima za električni proboj od namota do jarma. Kod transformatora za napone do 60 kV mogu se klizni putevi od namota do jarma relativno lako osigurati. Potrebna duljina kliznog puta, kojom se osigurava da ne dodje do proboja, raste skoro sa trećom potencijom napona, kako to prikazuje sljedeća tabela:

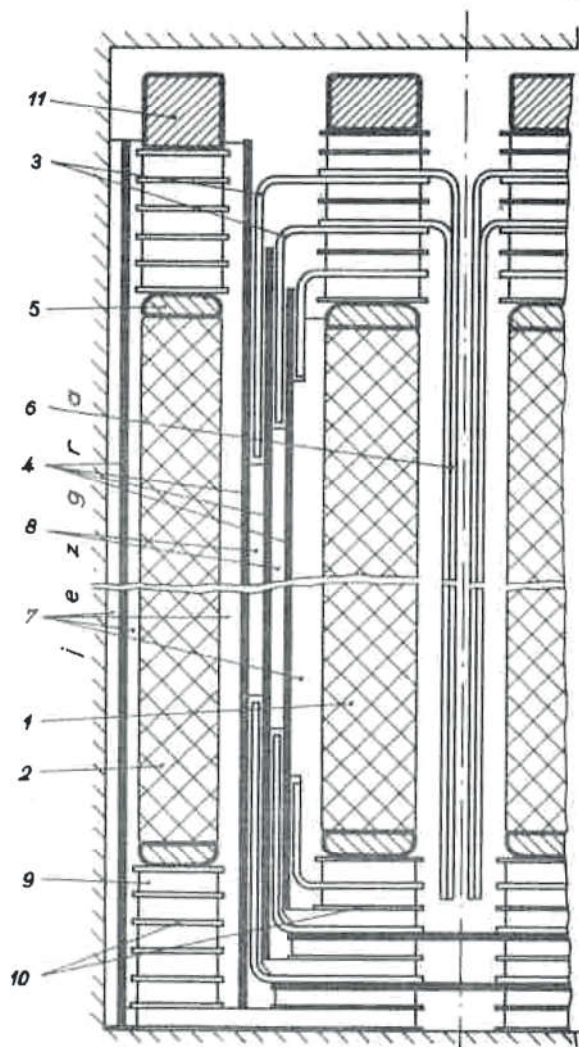
Pogonski napon kV	Ispitni napon kV	50 Hz	Duljina kliznog puta mm
1	2,5		-
10	28		30
30	70		75
60	140		176
110	230		360
220	460		nije još odredjen
380	nije odredjen		nije još odredjen

Duljina kliznog puta se ostvaruje pomoću razmaka između jarma i namota; gdje je razmak, kojeg zahtijeva klizni put, odviše velik, umeću se izolacione kape (vidi sl. 4.6-10) i time ostvaruje potrebna dužina kliznog puta uz smanjenu udaljenost između namota i jarma. Minimalni razmaci između namota i jarma (sa ili bez izolacionih kapa) te namota i kotla su navedeni u tabeli 2.

Izolacija namota se izvodi na dva načina:

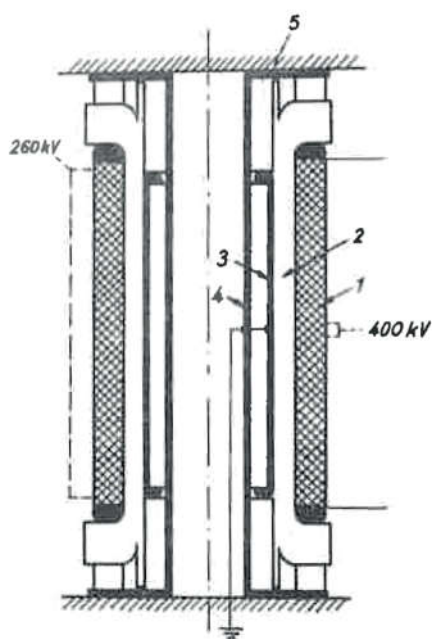
- a) Ostvarivanje izolacije u slojevima, koje sačinjavaju obično cilindri ili kape od tvrdog papira i ulje. Kako raste napon, tako raste i broj cilindara, jer veći broj cilindara podnosi veći napon nego jedan cilindar sa ekvivalentnom debljinom. Do 50 kV uzima se jedan cilindar, za 110 kV tri, a za 220 kV pet cilindara. Prema jarmu se izolacija produžuje tzv. kapama od tvrdog papira, koje se umeću između cilindara i jarma tako, da ostane još i slobodan prolaz rashladnom sredstvu. Između cilindara i kapa dolaze distancioni komadi od tvrdog papira ili prešpana, koji određuju međusobni položaj kape i cilindra i učvršćuju namot zajedno sa izolacijom. Takova izvedba izolacije prikazana je na sl. 4.6-10.
- b) Ostvarivanjem pune izolacije u cijelom presjeku raspoređeno papira natopljenog u ulju. Ova izolacija ima veću probojnu čvrstoću, pa se za isti napon može ostvariti manji raspor. Loša osobina ove izolacije je sprečavanje strujanja ulja, pa se stvara opasnost od tzv. toplotnog proboja. Do pojave toplotnog proboja dolazi uslijed prevelikih dielektričkih gubitaka u punoj izolaciji, koji zagrijevaju izolaciju i snižavaju time njezinu probojnu čvrstoću sve do proboja. Za hlađenje se u takovim slučajevima moraju predvidjeti vertikalni kanali u samom namotu.

Ovakova izolacija dolazi u obzir samo za transformatore najviših napona; kao primjer neka posluži slučaj 400 kV transformatora sa izolacijom prema sl. 4.6-11.



- 1 Gornjonaponski namot
- 2 Donjonaponski namot
- 3 Izolacione kape
- 4 Izolacioni cilindri
- 5 Potencijalni prsteni
- 6 Medufazna pregrada
- 7 Kanalne letvice
- 8 Distanzione letvice
- 9 Ležišne podloge
- 10 Ležišni prsteni
- 11 Tlačni prsteni

Sl. 4.6-10
Shematski prikaz izvedbe izolacije
u slojevima gn i dn namota trans-
formatora



- 1 - gornjonaponski namot
- 2 - glavna izolacija
- 3 - donjonaponski namot
- 4 - stup
- 5 - jaram

Sl. 4.6-11
Shematski prikaz izolacije namota
za model transformatora 400 kV sa
punom izolacijom

4.66 Stupanj izolacije

Stupanj izolacije (Si) je oznaka stupanja izolacione čvrstoće transformatora. Stupanj izolacije je određen tjemnom vrijednošću podnosivog udarnog napona punog vala primijenjenog kod ispitivanja transformatora udarnim naponom (vidi pogl. 6.8.), kao i efektivnom vrijednošću podnosivog napona pogonske frekvencije primijenjenog jednu minutu (vidi tabelu 3.)

Stupanj izolacije suhog transformatora je određen ispitnim stranim naponom, kao i ispitivanjem induciranim naponom. Suhi se transformatori redovno grade samo za stupnjeve izolacije do Si 24.

Stupanj izolacije uljnog transformatora je određen podnosivim udarnim naponom punog vala, kao i ispitnim naponima pogonske frekvencije.

Najviši pogonski napon mreže. Najviši pogonski napon mreže je najveća efektivna vrijednost linijskog napona, koji se pojavljuje u bilo kojem trenutku i na bilo kojoj točki mreže u normalnim pogonskim uvjetima. Ova vrijednost ne uzima u obzir prolazne promjene napona zbog smetnji i naglog isključenja velikih tereta.

Način uzemljenja mreže. Uobičajeni načini uzemljenja mreže mogu se svrstati u dvije grupe:

- a) Nultočka mreže izolirana ili spojena sa zemljom preko otpora, reaktancija ili svitaka za gašenje (gasilica), a nultočka ima u normalnom pogonu potencijal zemlje.
- b) Nultočka mreže čvrsto uzemljena.

Izbor stupnja izolacije. Propisani stupanj izolacije je određen najvišim dopustivim pogonskim naponom mreže (vidi tabelu 3) i načinom uzemljenja mreže. Ukoliko naručilac drugačije ne odredi, odabire se onaj stupanj izolacije, koji odgovara najvišem pogonskom naponu mreže. Napon praznog hoda na pojedinim odvojcima transformatora smije prelaziti odgovarajući najviši dopustivi pogonski napon mreže a da zbog toga nije potrebno odabrati slijedeći viši stupanj izolacije ili povisiti ispitne napone.

Osnov za određivanje ispitnih napona je najviši dopustivi pogonski napon mreže odnosno stupanj izolacije. Ako pogonski napon mreže prelazi najviši dopustivi napon, ispitne napone treba odrediti prema slijedećem stupnju izolacije. I u slučaju kad su pogonski uvjeti vrlo oštri (npr. smještaj transformatora na mjestu jako izloženom djelovanju groma), preporuča se odabrati viši stupanj izolacije, i to za 1 ili više stupnjeva iznad propisanog.

Stupanj izolacije označuje se kraticom Si, iza koje slijedi broj stupnja, a ovaj broj je identičan iznosu najvišeg dopustivog pogonskog napona mreže u kV. Ako je mreža čvrsto uzemljena, dodaje se još slovo "s".

Kod mreža, čiji najviši pogonski napon ne prelazi 72,5 kV, bez obzira kakav je način uzemljenja nultočke mreže i nultočke transformatora (ako postoji), stupanj izolacije namota je puni a izolacija namota podjednaka.

Kad najviši pogonski napon mreže prelazi 72,5 kV, postoje dvije različite vrste stupnja izolacije :

- a) smanjeni stupanj izolacije
- b) puni stupanj izolacije

Izolacija namota od kraja na strani nultočke do kraja na strani linije, kod svakog od navedenih dvaju stupnjeva izolacije, može biti izvedena kao podjednaka ili kao postepena.

a) Smanjeni stupanj izolacije transformatora je dozvoljen u onim slučajevima, kad za vrijeme pojava nastalih zbog ukapčanja, zemnog spoja ili drugih pogonskih smetnji, najviši efektivni napon između stezaljki transformatora i zemlje kao i prenaponske zaštite i zemlje na prelazi 80 % linijskog napona.

Smanjeni se stupanj izolacije može primjeniti kod čvrsto uzemljenih mreža, tj. kod mreža, gdje se upotrebljava odvodnik prenapona za 80 % stupnja izolacije.

Smanjeni stupanj izolacije se može dakle primjeniti, kad svi transformatori u mreži imaju namote spojene u zvijezdu i direktno vezane na mrežu, dok su nultočke čvrsto uzemljenim i u slučaju kad se između nultočke transformatora i zemlje nalazi jednozavojni strujni transformator. Kad strujni transformator ima više zavoja, potrebno je ispitati posebno ovakav slučaj.

Kad pojedini namoti transformatora nemaju čvrsto uzemljene nultočke ili su namoti spojeni u trokut, smanjena se izolacija može primjeniti ukoliko su ispunjeni uvjeti, da kod svih pogonskih promjena nastalih ukapčanjem, terećenjem i iskapčanjem mreže mora omjer nulte reaktancije prema direktnoj reaktanciji biti manji od 3, a omjer nultog otpora prema direktnoj reaktanciji manji od 1, sve promatrano sa gledišta linijskih stezaljki.

b) Puni stupanj izolacije se mora upotrijebiti u svim slučajevima, gdje nije dopušten smanjeni stupanj izolacije prema točki a).

Jednofazni transformatori za trofaznu mrežu. Jednofazni transformatori, predviđeni da čine trofazne grupe, moraju imati stupanj izolacije koji odgovara načinu uzemljenja i najvišem dopustivom pogonskom naponu trofazne mreže, bez obzira na vrst spoja te grupe (trokut ili zvijezda).

Propisani stupanj izolacije za namote i provodnike kao i pripadni podnosivi naponi pogonske frekvencije i podnosivi udarni naponi, navedeni su u tabeli 3. Navedeni ispitni naponi za namote u skladu su sa ispitnim naponima za nutarnju izolaciju, a ispitni naponi provodnika u skladu su sa ispitnim naponima za vanjsku izolaciju prema JUS propisima.

Podnosivi naponi navedeni u tabeli 3 primjenjuju se na dovršene i dobro sušene transformatore, ispitivane u radionici proizvođača.

Kod stupnjeva izolacije do uključivo Si 72,5, predviđa se samo puni stupanj izolacije, dok za stupanj izolacije Si 123 puni i smanjeni stupanj izolacije. Kod stupnja izolacije Si 245 ne predviđa se puni stupanj izolacije, jer su mreže ovog stupnja redovno čvrsto uzemljene.

Podnosivi napon pogonske frekvencije je različit za namot i provodnik transformatora, dok je podnosivi napon punog udarnog vala za namot i provodnik jednak.

Kad transformator nije dovoljno zaštićen, može se pokazati potreba da se odabere viši stupanj izolacije.

T a b e l a 3
Propisani stupnjevi izolacije
transformatora

1	2	3	4	5	6	7	8
Stupanj izolacije	Najviši dopustivi napon mreže kV	Podnosivi napon pogonske frekvencije kroz 1 minutu kV (ef.)				Podnosivi udarni napon punog vala 1/50 kV (max)	
		Namoti (Nutarnja izolacija)		Provodnici (Vanjska izolacija)			
		Puni stupanj	Smanjeni izolacije	Puni stupanj	Smanjeni izolacije		
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 123 s	123	-	185	-	185	-	450
Si 245 s	245	-	395	-	395	-	900

4.67 Faktor punjenja bakra

Odnos izmedju zbroja svih presjeka čistog bakra g_n i d_n namota i presjeka prozora se zove faktor punjenja bakra a označava se sa f_{Cu} . On je daleko niži od faktora punjenja željeza, jer kod bakrenih namotaja veliki dio presjeka prozora zauzimaju izolacioni razmaci.

Ako se uzme u promatranje f_{Cu} kod malog niskonaponskog transformatora, koji ne zahtijeva skoro nikakvu izolaciju a ima namote izvedene iz okruglog vodiča, dobije se samo radi okruglog oblika vodiča faktor punjenja:

$$\frac{d^2 \overline{\pi}}{4 d^2} = 0,79$$

tj. gubi se na presjeku 21%. Ako se uzme najtanja izolacija sa pri-
rastom od 0,16 mm na vodiču se promjerom 1,5 mm, tada se samo
uslijed izolacije vodiča dobiva faktor punjenja:

$$\frac{1,5^2}{1,66} = 0,82$$

tj. gubi daljnjih 18% na presjeku. Na izolaciju između namota i
između namota i jezgre, koja i kod niskonaponskih transformatora
mora biti dimenzionirana za ispitni napon od 2 kV, se gubi najma-
nje cca 15 - 20 % presjeka prozora. Mora se uzeti u obzir da po-
stoje razlika između teoretsko-geometrijski izračunatog i stvarno
praktički dostizivog faktora punjenja; ova razlika oduzima barem
5 - 10 % od presjeka prozora.

Ako se svi, ovako grubo dobiveni pojedinačni faktori punjenja
pomnože, dobiva se faktor punjenja bakra:

$$f_{Cu} = 0,79 \cdot 0,82 \cdot 0,85 \cdot 0,95 = 0,528$$

Na presjeku prozora se dakle gubi najmanje 50 % .

Faktor punjenja bakra uglavnom ovisi o veličini transformatora
i o veličini napona, za koji je transformator gradjen.

Povećavanjem snage transformatora sve manje dolazi do izražaja
presjek koji zauzimaju izolacioni razmaci između namota i između
namota i jezgre; međjutim, kako redovito sa snagom raste i napon
transformatora, povećavaju se i apsolutne vrijednosti izolacionih
razmaka, te se može praktički zaključiti da je nemoguće postići
bolji faktor punjenja od 0,5 ; kod viših napona i manjih snaga
opada f_{Cu} čak ispod 0,1 .

Za svaki pojedini slučaj se pri projektiranju određuje faktor
punjenja bakra, ali za približnu procjenu može poslužiti tabela 4.

T a b e l a 4

Faktori punjenja bakra za transformatore različitih
snaga i napona

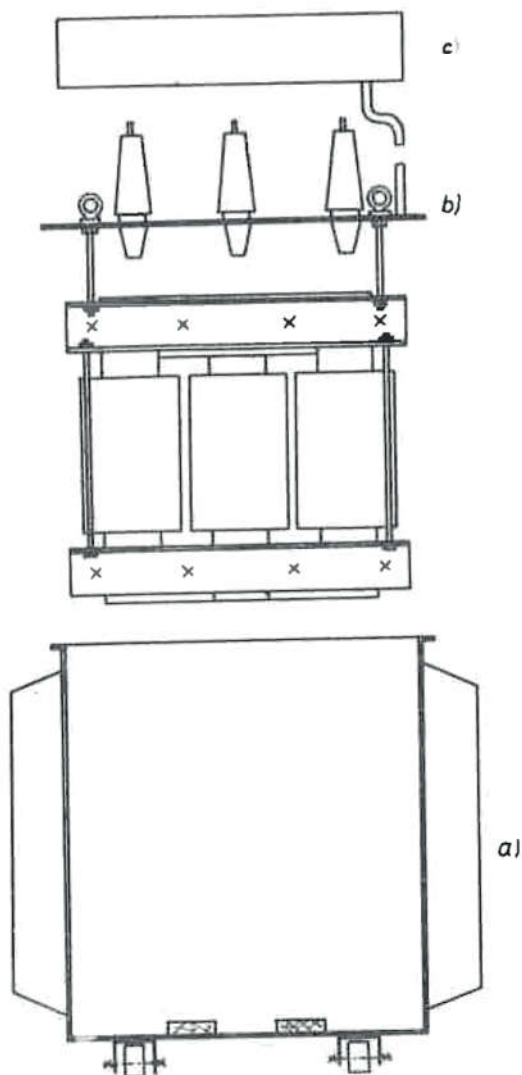
snaga	gn napon		
	10 kV	30 kV	110 kV
20 kVA	0,249	0,219	0,124
100 kVA	0,265		
1 000 kVA	0,25		
10 000 kVA			
12 500 kVA			0,128
20 000 kVA			0,165
31 500 kVA			0,169
40 000 kVA			0,168
50 000 kVA			0,182

4.7 Kotao

4.7.1 Općenito

Skoro se svi transformatori snage, od nekoliko kVA pa do najviših snaga, grade kao uljni transformatori, pa im je kotao jedan od glavnih sastavnih dijelova.

Kotao u širem smislu obuhvaća: kotao za smještaj ulja, poklopac sa provodnim izolatorima i konzervator (vidi sl. 4.7-01).

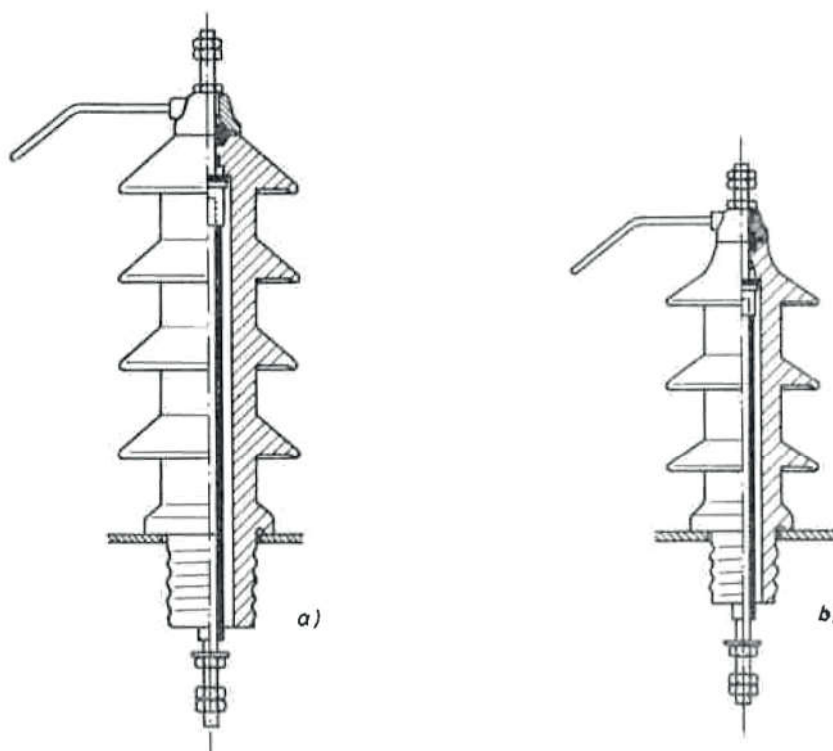


Sl. 4.7-01
Sastavni dijelovi kotla uljnog transformatora

- a) kotao za ulje
- b) poklopac sa provodnim izolatorima
- c) konzervator

Aktivni dio transformatora, tj. jezgra sa namotom, je redovito učvršćen sa poklopcem tako, da se može pomoću ušica na poklopcu zajedno sa njim izvaditi ili staviti u kotao. Aktivni dio transformatora je sa vijcima tako učvršćen na poklopac, da pri stavljanju u kotao jezgra sjeda na dno kotla u isti čas kad poklopac priliježe na prirubnicu. Time se najveći dio težine aktivnog dijela prenosi neposredno na dno kotla, odnosno na postolje transformatora, pa se poklopac i kotao ne moraju dimenzionirati za cijelu težinu aktivnog dijela transformatora.

Radi opasnosti od požara, a i radi smanjenja građevinskih troškova, nastoji se, gdje god je moguće, uljne transformatore postavljati na slobodnom, otvorenom prostoru. Transformatori za postavljanje na slobodnom prostoru se razlikuju u konstrukciji od transformatora za postavljanje u građevinski zatvorene objekte samo po izvedbi provodnih izolatora. Sl. 4.7-02 prikazuje odgovarajući provodni izolator transformatora za postavljanje u slobodnom prostoru i provodni izolator transformatora za unutarnji smještaj. Iz navedene slike je vidljivo da se provodni izolatori za unutarnji



i vanjski smještaj razlikuju samo po veličini i po broju rebara.

Sl. 4.7-02
Provodni izolatori transformatora
a) za vanjski smještaj
b) za unutarnji smještaj

4.72 Kotao sa postoljem

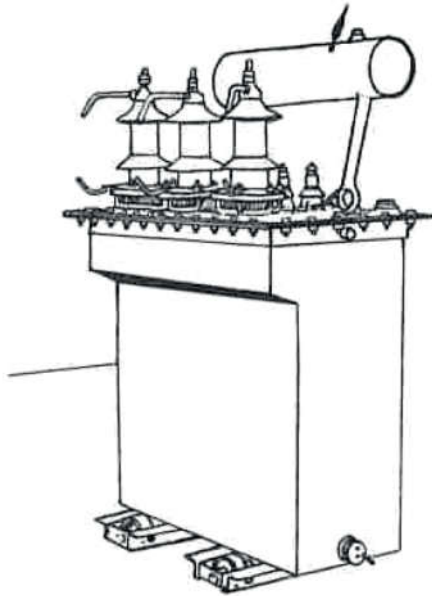
Kod transformatora za snage veće od 50 kVA se redovito traži da budu prevozivi na vlastitim kotačima. Na veće transformatore se postavlja vrlo često zahtjev za mogućnost premještanja kotača za poprečni i uzdužni pravac kretanja.

Postolje mora biti tako dimenzionirano da simetrično prenosi svu težinu transformatora na kotače; ono je obično sastavljeno iz unakrsno složenih željeznih profila.

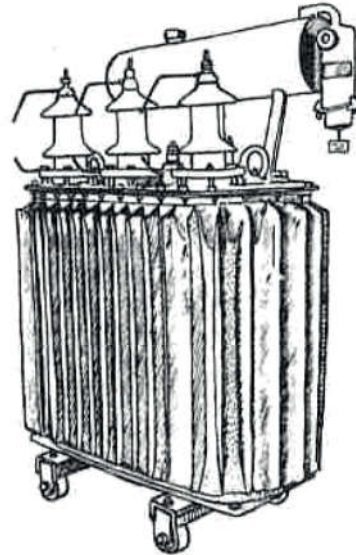
Kotao za smještaj ulja ima glavni zadatak da nosi ulje i da provodi toplinu iz transformatora u okolni zrak; iznimku čine transformatori većih snaga, koji imaju prigradjene ili odvojeno postavljene hladnjake, koji odvođe toplinu iz ulja bilo u okolni zrak bilo u rashladnu vodu.

Kod zračnog hladjenja uljnih transformatora do snage 30 kVA dovoljno je prirodno hladjenje glatke vanjske površine kotla, kako to prikazuje sl. 4.7-03.

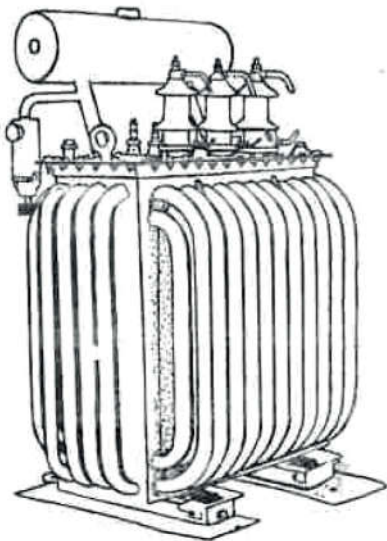
Povećavanjem dimenzija, odnosno snage transformatora, rastu gubici a time i potrebna rashladna površina. Dok gubici rastu sa trećom potencijom, rashladna površina raste samo sa drugom potencijom promjene linearnih dimenzija, pa se rashladna površina stranica kotla



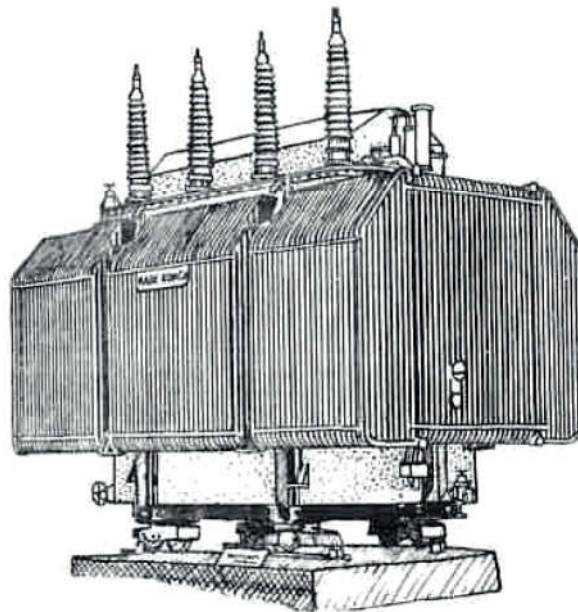
Sl. 4.7-03
Transformator sa glatkim stijenama kotla



Sl. 4.7-04
Transformator sa rebrima



Sl. 4.7-05
Transformator sa prigradjenim cijevima za povecanje rashladne površine kotla



Sl. 4.7-06

mora relativno povećati bilo izvedbom sa rebrastim limovima (vidi sl. 4.7-04), bilo izvedbom sa cijevima prema sl. 4.7-05 i 4.7-06 ili pak prigradnjom radijatora, koji su jednaki radijatorima za centralno grijanje prostorija ili su im vrlo slični po izvedbi, koja je prilagođena specifičnim uvjetima gradnje i rada transformatora.

Kod još većih snaga, od cca 10 000 kVA na više, povećava se izdašnost rashladnih površina ventilacijom; kod transformatora na sl. 4.7-06 se može ispod sloga cijevi postaviti nekoliko ventilatora da tjeraju rashladni zrak prema gore, pa će se time pospješiti odvod topline; na sl. 4.7-07 je prikazan još jedan način hladjenja ulja ventilacijom: na kotao su prigradjeni posebni hladnjaci ulja, kroz koje pušu ventilatori.

Kod većih i najvećih transformatora se hladjenje ulja, radi manjih troškova, rado provodi pomoću rashladne vode (vidi sl. 4.7-08), ako to uvjeti rada i postojanja rashladne vode omogućavaju. U takvim slučajevima je potrebna prisilna cirkulacija, koja se provodi pomoću posebnih uljnih crpki, koje su zajedno sa elektromotorima ugrađene u krugotok ulja. Da bi se vodeni hladionik bez prekida pogona mogao povremeno čistiti od nečistoća koje donša voda, predviđaju se dvije kompletne garniture hladnjaka.

Rashladne naprave se obično prigradjuju na kotao, tako da sa transformatorom čine kompletnu cjelinu. Kod velikih jedinica se nailazi i na rješenje u kojem su rashladni uređaji postavljeni odvojeno od transformatora, kako je na sl. 4.7-09 prikazano.

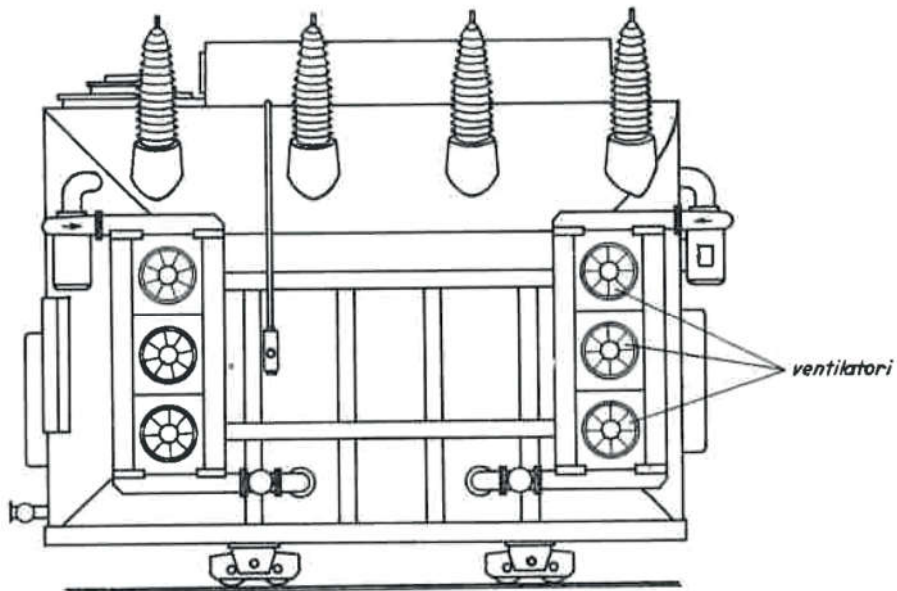
Kod rashladnih uređaja sa ventilatorima nailazi se i na rješenje automatskog ukapčanja i iskapčanja ventilatora u času kad temperatura ulja predje određenu granicu. U takvom slučaju može transformator podnositi npr. 80% tereta bez rada ventilacionog uređaja, pa se time štedi energija, koja bi se utrošila na pogon ventilatora za vrijeme u kojem hladjenje ventilatorima nije potrebno.

Kotao, odnosno stijene kotla se dimenzioniraju tako da podnose i pritisak ulja pri transportu, a to je najmanji zahtjev koji bezuvjetno mora biti ispunjen. Kod malih transformatora sa rebrastim limovima je dovoljna debljina lima od 0,8 mm, pa da ovaj zahtjev bude ispunjen. Za veće transformatore potrebne su slijedeće debljine stijenki:

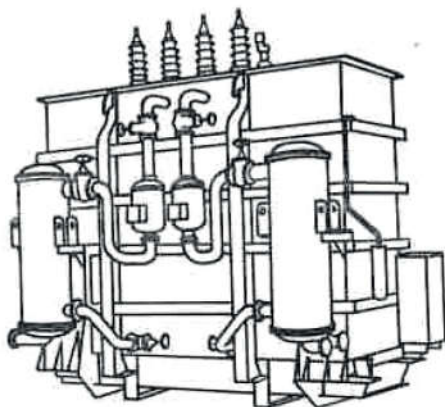
za 100 kVA	1 mm
za 250 kVA	1,2 mm

a kod primjene hladjenja sistemom cijevi potrebna debljina stijenki kotla iznosi 4 mm, a debljina stijenke cijevi 1,5 mm.

Kod transformatora za najviše napone (od 110 kV na više) postavljeno je pravilo da kotao mora podnositi vakum. Ovim je omogućeno čišćenje ulja od vlage pod vakumom na mjestu postavljanja transformatora a ne samo u tvornici. Naime, kod manjih transformatora za napone do 35 kV je dovoljno da se vakum drži u samom uređaju za čišćenje ulja, dok kod većih transformatora viših napona se mora i kotao staviti u vakumsko stanje. Zahtjev, koji traži da kotao mora podnositi vakum, je mnogo teži nego bi se u prvi čas moglo pomisliti. Na svaki m² ravne površine mora kotao izdržati pritisak od 10 000 kp pa lim mora imati debljinu od najmanje 8 mm sa kosturom od teških čeličnih profila.

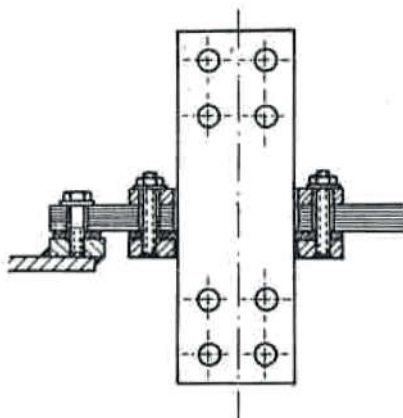


S1. 4.7-o7
 Transformator sa prigradjenim hladnjacima ulja hladjenog
 zrakom pomoću ventilatora



S1. 4.7-o8
 Transformator sa prigradje-
 nim hladnjacima ulja koje
 se hladi pomoću vode

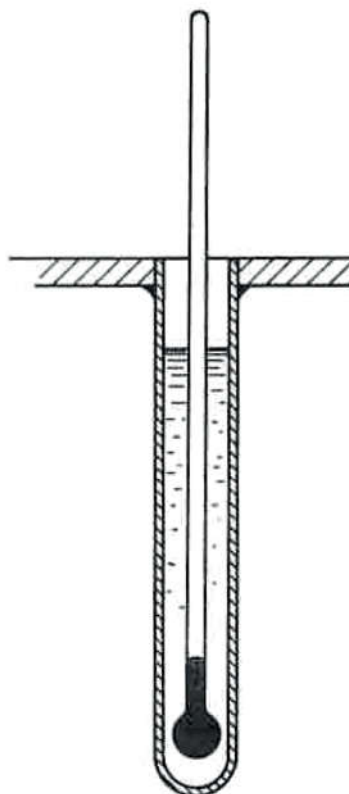
Provodni izolatori se redovito postavljaju na poklopac; iznimku čine putujući transformatori i transformatori za električne peći. Kod putujućih transformatora se izolatori postavljaju prema sl. 4.7-12, kako ih se pri transportu željeznicom radi željezničkog profila ne bi trebalo skidati. Ako se želi radi velikih struja kod transformatora za električne peći štedjeti na duljini spojnih vodo-va, provodni izolatori se postavljaju na stranicu kotla prema sl. 4.7-13.



Kod transformatora za vrlo velike struje treba imati na umu da bi one u željeznoj ploči, na koju se postavljaju provodni izolatori, prouzrokovale jaki izmjenični magnetski tok i time visoke gubitke vrtložnih struja. Zato se u takovim slučajevima moraju provodni izolatori svih faza postaviti na nemagnetsku ploču, koja se tek sa odgovarajućim brtvljenjem učvršćuje na poklopac ili stranicu kotla, kako to prikazuje sl. 4.7-14

Sl. 4.7-14
Postavljanje provodnih izolatora kod transformatora za velike struje

Na poklopu transformatora treba predvidjeti udubinu prema sl.4.7-15 za smještaj termometra, kojim se mjeri temperatura ulja ispod poklopca.



Sl. 4.7-15
Smještaj termometra na poklopu transformatora

4.74 Konzervator

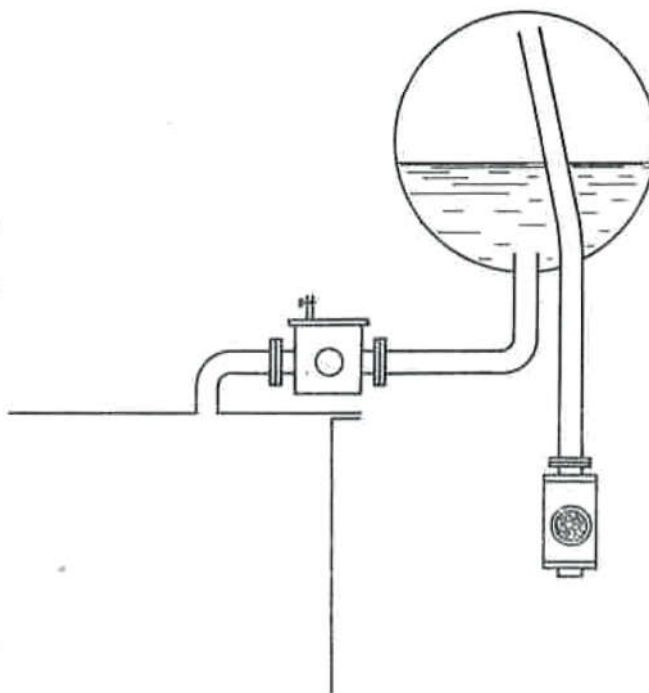
Probojna čvrstoća ulja zavisi najviše od sadržaja vlage u njemu. 0,01 % vlage u ulju snižuje probojnu čvrstoću od 130 kV/cm na 50 kV/cm (mjereno između kugala promjera 12,5 mm sa razmakom od 5 mm).

Toplo ulje je mnogo više higroskopno od hladnog. Zato se u gradnji uljnih transformatora redovito upotrebljavaju konzervatori, koji su prema sl. 4.7-16 sa relativno tankom cijevi vezani sa kotlom tako, da ne postoji termosifonska cirkulacija ulja, pa iako je ulje u kotlu transformatora toplo, ulje u konzervatoru ostaje hladno.

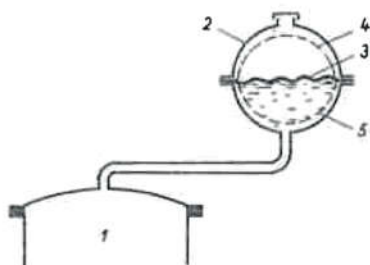
Ulje se kod zagrijavanja rasteže za 0,8 % svog volumena kod promjene temperature za 1 °C. Pošto promjene temperature ulja iznašaju cca 100 °C, mora volumen konzervatora iznositi najmanje 10 % od

ukupnog volumena ulja u hladnom stanju.

U konzervatoru dolazi zrak u doticaj sa hladnim uljem. Kako bi se što bolje spriječio ulaz vlage kroz konzervator, postavlja se kod većih transformatora u dovodnu cijev zraka dehidrator (vidi sl. 4.7-16). To je posuda sa hemikalijama koje su jako higroskopske i oduzimaju zraku svu vlagu prije ulaza u konzervator. Obično se upotrebljava Silicagel (SiO_2 u jako poroznom obliku), koji može upijati vlagu u iznosu od $1/3$ svoje težine. Silicagel u suhom stanju ima plavu boju, a kod navlaženja poprima sve više ružičastu boju, tako da mu se može na oko ocijeniti zasićenje vlagom, i time istrošenost; u tu se svrhu plašt dehidratora mora napraviti iz stakla. Silicagel se može regenerirati sušenjem, tj. grijanjem i time više puta upotrebiti.



Sl. 4.7-16
Priključak konzervatora sa kotlom transformatora



Sl. 4.7-17
Pokušaj odvajanja ulja od zraka gumenom membranom

1. Transformator
2. Konzervator
3. Gumena membrana
4. Gumena membrana kod maks. nivoa ulja
5. Gumena membrana kod minim. nivoa ulja

Kod izrade konzervatora se mora paziti da cijev, koja vodi iz kotla u konzervator, ne svršava odmah na ulazu u konzervator, nego se za koji centimetar produlji, kako to prikazuje sl. 4.7-16; time se spriječava da eventualno kondenzirana voda sa dna konzervatora ne ulazi u sam kotao.

Konzervator mora biti opremljen sa pokazivačem nivoa ulja i sa oznakom potrebne visine nivoa ulja kod određene temperature.

U razvoju tehnike gradnje transformatora ima pokušaja potpunog odvajanja ulja od zraka. Zanimljiv je pokus sa gumenom membranom prema sl. 4.7-17

4.8 Ulje

Gotovo isključivu upotrebu ulja kao rashladnog i izolacionog sredstva u gradnji transformatora omogućavaju njegove osnovne prednosti :

- a) izdašnost pri hladjenju konvekcijom radi velike specifične topline

$$(c_{\text{ulja}} = 0,45 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C} = 1883 \text{ Ws/}^{\circ}\text{C kg}) \quad i$$

- b) visoka probojna čvrstoća.

Ulje vrlo rado podliježe kemijskim promjenama koje su poznate pod nazivom "starenje ulja"; ovo starenje je to brže što je viša temperatura ulja. Starenjem se mijenjaju fizikalna svojstva ulja, a time mu se smanjuje sposobnost odvođenja topline.

Probojna čvrstoća ulja ovisi uglavnom o sadržaju vlage i o sadržaju nečistoće. Čišćenje ulja od nečistoća i vode se vrši filtriranjem i centrifugiranjem, dok se vlaga otklanja zagrijavanjem (sušenjem). Kod toga je važno, da temperatura ulja na nijednom mjestu ne smije preći temperaturu od 110°C , jer bi se inače ulje brzo kvarilo. Prema tome i grijača tijela ne smiju imati na svojoj površini veću temperaturu od navedene. Zato se kod normalnog zračnog pritiska teško iz ulja izvlači vlaga, pa je potrebno sušenje vršiti pod što većim podtlakom. Zato kod transformatora za napone od 110 kV na više treba sušiti najprije namot i jezgru pod vakuumom od najmanje 4 torra a poslije tog sušenja tek napuniti kotao sa isušanim uljem i ponovno provesti sušenje cijelog transformatora pod vakuumom, dok se ne postigne dovoljna probojna čvrstoća.

Po VDE propisima traži se za novo ulje probojna čvrstoća od 125 kV/cm, a kod transformatora u pogonu najmanje 80 kV/cm. Kod popravaka, kod kojih se iz ulja vadi jezgra sa namotom, treba jezgru, nakon skidanja namota koji je u kvaru, odmah vratiti natrag u ulje, jer jezgra brzo upije vlagu iz zraka, a vlagu je vrlo teško iz jezgre izvući sušenjem. Jezgre i namoti natopljeni uljem se, radi prevelikog razvijanja uljnih para, moraju sušiti samo u ulju, a sušenje može trajati i mjesec dana, dok se sva vlaga izvuče iz njih. Obično se događa da se kod sušenja doduše dosta brzo postigne zadovoljavajući rezultat obzirom na probojnu čvrstoću ulja, no nekoliko dana kasnije je opet toliko vlage izašlo iz jezgre u ulje, da sušenje treba ponoviti.

Kod transformatora za visoke napone treba provoditi sušenje sve dok se ne postigne probojna čvrstoća barem 200 kV/cm.

Svako ulje se mora sušiti neposredno prije punjenja, jer se u njega duljim transportom i uskladištenjem može uvući vlaga, bez obzira na kvalitet ulja.

Na probojnu čvrstoću ulja mogu u velikoj mjeri utjecati primjese u ulju, niti pamuka, papira itd. koje se radi elektrostatskih sila postavljaju između mjesta raznih potencijala i stvaraju tzv. "vodljivi most". Zato se naročito kod viših napona svi dijelovi izolacije impregniraju lakom, kako se ne bi mogli sitni djelići izolacije odvajati i plivati po ulju i kako bi površina bila glatka, jer sitne čestice na površini, koje ne plivaju slobodno u ulju, mogu pod utjecajem elektrostatskih sila, postavljene okomito na podlogu, djelovati kao šiljci za električno pražnjenje.

5. PRORAČUN TRANSFORMATORA

5.1 Nominalne vrijednosti

5.11 Natpisna pločica

Svaki transformator je definiran sa svojim nominalnim ili nazivnim vrijednostima, koje moraju po propisima biti na transformatoru vidno označene na tzv. natpisnim pločicama. Prema prijedlogu JUS propisa traži se da svaki transformator mora nositi natpisnu pločicu smještenu tako, da se podaci na pločici mogu za vrijeme pogona lako pročitati. Podaci na pločici moraju odgovarati stvarnim podacima

transformatora i moraju biti nanoseni trajnim postupkom. Ako se ne traži drugačije, natpisna se pločica kod uljnih transformatora nalazi na donjonaponskoj strani.

Na svakoj natpisnoj pločici moraju biti navedeni slijedeći podaci:

- 1) Naslov ili znak proizvođača
- 2) Tipna oznaka
- 3) Tvornički broj transformatora
- 4) Nazivni ulazni (primarni) napon. Nazivni ulazni napon naveden na natpisnoj pločici je napon, primjenjen na cijeli ulazni namot pod normalnim uvjetima. Ako ulazni namot ima odvojke, ulazni se nazivni napon odnosi na glavni odvojak. Nazivni ulazni napon je osnov za sva ispitivanja, osim za ispitivanje izolacije.
- 5) Nazivni izlazni (sekundarni) napon. Nazivni izlazni napon naveden na natpisnoj pločici je napon koji nastaje u praznom hodu na cijelom izlaznom namotu, kad je ulazni namot spojen na nazivni ulazni napon. Kod izlaznog namota s odvojcima izlazni nazivni napon odnosi se na glavni odvojak.
- 6) Nazivna frekvencija. Nazivna frekvencija je frekvencija za koju je transformator gradjen.
- 7) Nazivna snaga. Nazivna snaga transformatora je karakteristična veličina u VA, kVA ili MVA, kojom se jamči da će transformator davati nazivnu izlaznu struju, kada je na glavne ulazne stezaljke priključen nazivni napon i frekvencija i to u trajanju koje je određeno prema vrsti pogona (vidi pogl. 3.3), a da se pri tome ne prekorači granično zagrijavanje koje određuju propisi (vidi pogl. 3.9).

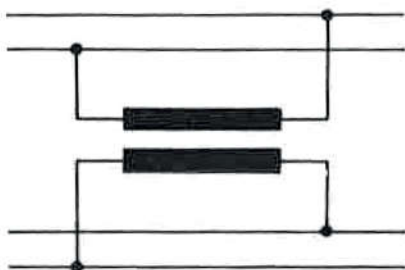
Nazivna snaga se prema većini propisa dogovorno izračunava na osnovu nazivnog izlaznog napona, tj. napona praznog hoda, i nazivne izlazne struje, te prema tome predstavlja u stvari nominalnu ulaznu snagu, jer je:

$$U_{20} \cdot I_2 = \frac{W_1}{W_2} \cdot U_1 \cdot \frac{W_2}{W_1} \cdot I_1 = U_1 \cdot I_1$$

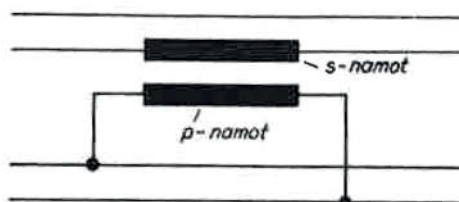
Ta definicija snage transformatora nije logična, odnosno nije u skladu sa inače kod strojeva upotrebljavanom pojmom nominalne snage, koja je definirana kao čista izlazna snaga, a ta bi se morala kod transformatora izračunavati izlaznim naponom kod nominalnog a ne kod praznog hoda. Zato postoje i propisi (npr. talijanski), koji nominalnu snagu definiraju kao čistu izlaznu snagu. Međutim, kod toga postoji poteškoća jer je izlazni napon pod teretom ovisan o faktoru snage tereta, pa se nominalna izlazna snaga može definirati samo za određeni faktor snage tereta; većina propisa u svijetu to izbjegava tako, da snagu transformatora dogovorno defini- ra kao ulaznu snagu, koja je neovisna o faktoru snage tereta.

- 8) Nazivna izlazna struja. Nazivna izlazna struja je struja na izlaznim stezaljkama transformatora. Iznos struje se izračunava na osnovu nazivne snage i nazivnog izlaznog napona.
- 9) Nazivna ulazna struja. Nazivna ulazna struja je struja na ulaznim stezaljkama transformatora. Iznos struje se dobije dijeljenjem nazivne izlazne struje prijenosnim omjerom.

- 10) Nazivna struja kratkog spoja. I_{kn} je navedena kao višekratnik nazivne struje (samo kod dodatnih i štednih transformatora).
- 11) Dozvoljeno trajanje kratkog spoja.
- 12) Napon kratkog spoja.
- 13) Oznaka spoja.
- 14) Stupanj izolacije Si prema pogl. 4.66
- 15) Klasa izolacije (samo kod suhih transformatora).
- 16) Oznaka vrste transformatora prema načinu vezanja na mrežu i to:
 - a) Transformatori snage (TS). Namoti su priključeni paralelno na pripadne mreže prema sl. 5.1-01, a međusobno su električki izolirani. Ukupna snaga se prenaša induktivnim putem.

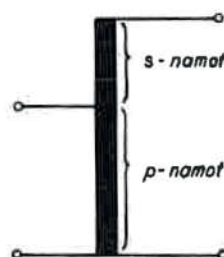


Sl. 5.1-01



Sl. 5.1-02

- b) Dodatni transformator (DT). Izlazni namot je serijski uključen u mrežu (s-namot) a ulazni je paralelno vezan (p-namot) na pripadnu mrežu (vidi sl. 5.1-02). Namoti su međusobno električki izolirani a dodatna snaga se prenaša induktivno.
 - c) Štedni transformator - autotransformator (aTS). Oba su namota spojena električki jedan na drugi. Jedan od namota (s-namot) uključen je serijski u mrežu, a drugi (p-namot) paralelno je spojen s pripadnom mrežom (vidi sl. 5.1-03). Prolazna snaga se prenaša djelomično vodljivo a djelomično induktivno.
- 17) Oznaka vrste hlađenja, i to:
 - a) s naravnim hlađenjem (N) - transformator je hlađen prirodnom konvekcijom, te isijavanjem;
 - b) s prisilnom ventilacijom zraka (Z) - rashladni zrak je prisilno tjeran ventilatorima, koji pripadaju hladioniku transformatora;
 - c) s prisilnom cirkulacijom ulja kroz hladionik (U) - rashladno ulje je prisilno tjerano pumpom a ulje može biti hlađeno:



Sl. 5.1-03

- naravno zrakom (NU)
- prisilno ventilacijom zraka (ZU)
- vodom (VU).

- 18) Ukupna težina transformatora.
- 19) Težina ulja (kod uljnih transformatora iznad 100 kVA).
- 20) Godina izrade.
- 21) Broj standarda odnosno pravila, ako transformator u cjelosti odgovara dotičnim pravilima.

Navedeni podaci transformatora trebaju biti razmješteni na natpisnoj pločici prema sl. 5.1.-04

ZNAK I NAZIV PODUZEĆA									
400		kVA	Tip	Broj					
1	10 500		Frekv	50	Hz	God.	1956		
2	10 250		Si	38/12		Vrst	TS		
3	10 000	400/231	V Spoj	Yz5		Hlad.	N		
4	9 750		u_k	4,4	%	Klizol.			
5	9 500		I_{kn}		* I_n	T_k	2,1	s	
	23,1	577	A Ulje		t	Ukup.	2,0 t		

Sl. 5.1.-04

U slučaju da transformator bude pregradjen, djelomično ili potpuno premotan, ili da transformatoru bude promjenjen spoj, to izvršilac pregradnje transformatora mora uz prvobitnu natpismu pločicu staviti još i svoju natpisnu pločicu. Ova natpisna pločica mora nositi naslov izvršioca pregradnje, kao i sve nove podatke.

Transformatori koji imaju odvojene hladionike ulja, moraju nositi posebnu natpisnu pločicu hladionika. Ova pločica može biti spojena s natpisnom pločicom transformatora i nosi slijedeće podatke :

Za hladionike ulja hladjene zrakom :

1. iznos odvedenih gubitaka u kW,
2. granično zagrijavanje ulja na izlazu iz transformatora;

za hladionike ulja hladjene vodom još i :

3. potrebna količina rashladne vode u l/min,
4. najviša dozvoljena temperatura rashladne vode na ulazu u hladionik;

kod prisilne cirkulacije ulja još i :

5. količina ulja u l/min.

5.12 Definicija nominalne snage

Definicija u kojoj se nominalna snaga definira kao snaga za koju je transformator gradjen, ne pokazuje na prvi pogled što zapravo predstavlja nominalnu snagu. Do pravog shvaćanja tog pojma dolazimo najlakše tako, da pokušamo odrediti nominalnu snagu transformatora, koji nema natpisne pločice. Ispitivanjem ili proučavanjem moramo ustanoviti nominalni napon i nominalnu struju za koje je transformator gradjen, a na osnovu tih podataka se izračuna nominalna snaga. Nominalni napon je prema gore ograničen s jedne strane s krivuljom magnetiziranja tj. time da struja magnetiziranja mora ostati u snosljivim granicama, dok je s druge strane ograničen stupnjem izolacije ("Si" prema pogl. 4.66). Transformator ne možemo ispitivati do proboja te tako ustanoviti za koji stupanj izolacije je gradjen, jer bi ga time uništili; jedino možemo iz izolacionih razmaka zaključiti na stupanj izolacije i time na nominalni napon. Karakteristika praznog hoda može pružiti sigurniju osnovu za odredjivanje nominalnog napona. Na svaki način nominalni napon se treba nalaziti ispod koljena karakteristike praznog hoda $E = f(i_m)$, koju možemo lako snimiti. Pošto su naponi standardizirani, može se na osnovu te karakteristike donekle sa sigurnošću zaključiti na nominalni napon, jer iz karakteristike praznog hoda možemo napon ocijeniti sa točnošću $\pm 10\%$, a ne postoje dva standardizirana napona koji bi bili tako blizu jedan drugome.

Ako smo na taj način ustanovili nominalni napon, možemo kod tog napona teretiti transformator sa sve većom strujom do one struje, kod koje zagrijavanje namota u trajnom pogonu dostiže po propisima određenu dozvoljenu nadtemperaturu. Propisi time osiguravaju transformatoru određenu životnu dob. Ako transformator trajno više oteretimo, pa se više zagrijava, smanjuje se njegova životna dob (vidi pogl. 3.6). Prema tome je nominalna snaga obzirom na napon određena zasićenjem u željezu i probojnom čvrstoćom izolacije, a obzirom na struju - zagrijavanjem namota.

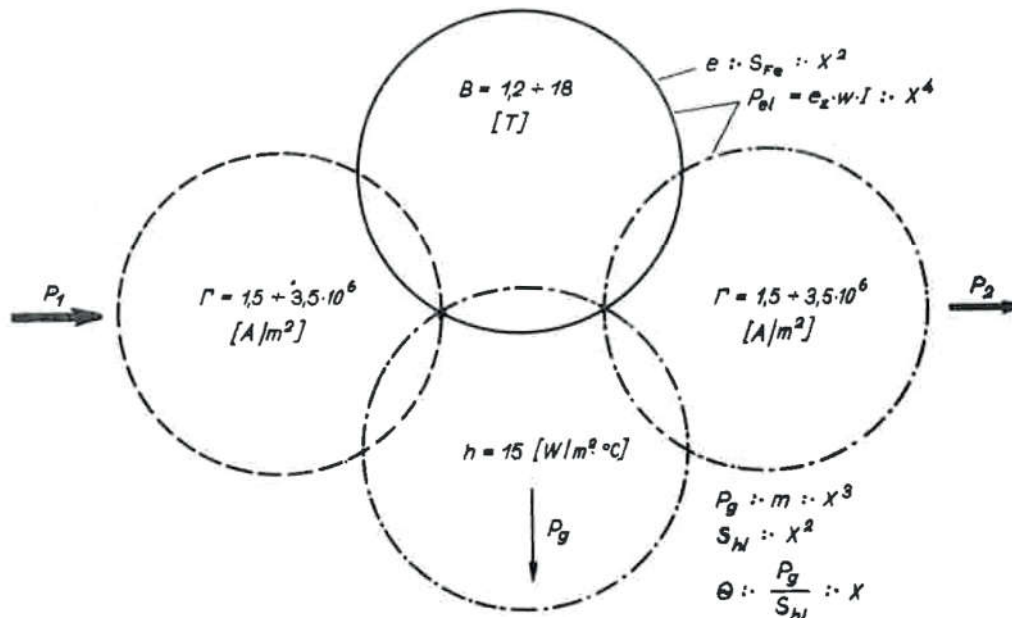
Transformator se može dva pa i više puta preopteretiti. On će pri tome raditi sa odgovarajuće povećanim padom napona za razliku od npr. eksplozionog motora, koji će kod 20% preopterećenja stati, jer ne može da razvije veću snagu. Snaga eksplozionog motora, naime, nije određena zagrijavanjem, nego maksimalnom snagom koju on može razviti, te se njegova nominalna snaga nalazi za izvjestan postotak ispod maksimalne snage jednostavno zato, da ga se može barem donekle preopterećivati. Kod transformatora nije tako. On se može preopterećivati do kratkog spoja, pa ako zanemarimo promjenu napona, jedino njegova životna dob obzirom na zagrijavanje ograničava trajanje i veličinu preopterećenja. To je bitna razlika između shvaćanja pojma nominalne snage kod transformatora i donekle kod ostalih električkih strojeva, prema pojmu nominalne snage kod strojeva u strojarstvu.

Nominalne snage transformatora su standardizirane sa serijom normnih brojeva $R 10$ ($X = 10\sqrt{10}$) i to na slijedeće snage u kVA: 10, 12,5, 16, 20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, itd.

5.2 Osnovni principi projektiranja

Zadatak projektanta i konstruktora transformatora je da oblikuju i dimenzioniraju transformator tako, da njihovo rješenje bude najekonomičnije obzirom na iskorišćavanje transformatora u pogonu, tj. da godišnji troškovi transformatora budu što manji, a nasuprot tome da pogonska sposobnost za određene nominalne podatke bude osigurana za odgovarajuću životnu dob. Što je manji, što lakši i time što jeftiniji transformator, to je materijal više specifično opterećen, te je teže postići potrebnu pogonsku sigurnost. Jedan zahtjev se dakle protivi drugome. Ipak, usavršavanjem kvalitete upotrebljenih materijala iz kojih se grade transformatori, strojevi i aparati, te sve boljim oblikovanjem, postizemo da razvojem tehnike specifična težina transformatora tj. težina po jedinici snage, stalno opada. Kao što postoji grubo pravilo da se potrošnja električne energije u svijetu svakih 10 godina podvostručuje, tako se može postaviti gruba tvrdnja, da se težina transformatora, električkih strojeva i aparata svakih 20 - 30 godina snižuje na polovicu.

Na sl. 5.2-01 prikazan je rad transformacije električkog transformatora sa četiri kruga. Prvi krug predstavlja primarni namot transformatora u kojeg ulazi električka energija, drugi krug predstavlja magnetski tok, koji posreduje prenos električke energije na sekundarni namot, koji je prikazan trećim krugom i iz kojeg izlazi transformirana električka energija. U namotima kao i u jezgri razvijaju se gubici, što predstavlja neželjenu no nužnu drugu transformaciju električke energije u toplinu, koja je prikazana na sl. 5.2-01



Sl. 5.2-01

četvrtim krugom, iz kojeg energija u vidu topline izlazi napolje. Pogonska sigurnost transformatora sastoji se u tome, da transformator za određenu životnu dob sa odgovarajućim faktorom sigurnosti odolijeva električkim, magnetskim, termičkim i mehaničkim naprezanjima, koja u pogonu transformatora nastupaju. Dozvoljena naprezanja ovise o kvaliteti materijala i o oblikovanju transformatora. Glavno izolaciono sredstvo u transformatoru u gotovo 99% slučajeva predstavlja ulje, koje prema VDE propisima mora izdržati jakost električkog polja od najmanje 120 kV/cm. Kombinirano sa slojevima papira možemo postići još daleko veće probojne čvrstoće. Pravilnim oblikovanjem možemo kod upotrebe iste kvalitete izolacionog materijala postići jednoličniju raspodjelu električkog polja među dijelovima pod naponom, te prema tome dobiti daleko veći probojni napon nego kod nehomogenog polja (šiljci i sl.), ili obrnuto, manje dimenzije izolacije uz istu probojnu čvrstoću izolacionog materijala. Sva pogonska sigurnost transformatora može se, prema tome, svesti na problem probojne čvrstoće izolacionog materijala. Ne bojimo se npr. prevelikih mehaničkih naprezanja zato što bi se bojali da će doći do prekida namota ili slično, već se bojimo i najmanjih deformacija, jer kod toga izolacija trpi i može doći do proboja. Zato u slučaju kratkog spoja transformatora tražimo da mehanička naprezanja u bakru ne prelaze cca 800 kp/cm², kako ne bi došlo do deformacija, koje bi naškodile izolaciji.

Isto tako je sa zagrijavanjem. Ne bojimo se da se transformator uslijed prevelikog zagrijavanja zapali, već se bojimo starenja izolacionog materijala, odnosno smanjenja probojne čvrstoće radi starenja, što opet dovodi do proboja izolacije i do onesposobljenja transformatora za rad. Već relativno niska pogonska temperatura, koja je daleko ispod temperature zapaljenja, ali je iznad propisima dozvoljene temperature, ima za posljedicu brzo starenje izolacionog materijala i smanjenja životne dobi transformatora na nekoliko mjeseci, dok praktički tražimo životnu dob od najmanje 20 - 30 godina.

Iz svega toga slijedi da se specifična naprezanja materijala u transformatoru moraju držati u određenim granicama. Tako npr. znamo već iz iskustva da kod današnjih konstruktivnih rješenja u gradnji uljnih transformatora možemo ići sa specifičnim naprezanjima aktivnog materijala na 3 do $3,5 \cdot 10^6$ A/m² u bakru namota i na 1,2 do 1,5 T kod jezgara iz toplo valjanih limova, te na 1,6 do 1,8 T kod hladno valjanih limova. U pravilu se može reći: što je veći transformator to veća su specifična opterećenja. Gubici u bakru i željezu rastu sa kvadratom specifičnih opterećenja, pa iz toga možemo donekle zaključiti da se navedena specifična naprezanja ne će moći mnogo mijenjati, jer male promjene specifičnih opterećenja prouzrokuju velike promjene u gubicima. K tome dolazi još činjenica da sa specifičnim opterećenjem u željezu ne možemo ići više i radi povećanja struje magnetiziranja. Struja magnetiziranja kod toplo valjanih limova i navedenih indukcija raste već skoro sa desetom potencijom povećanja indukcije. Tako npr. ako želimo kod toplo valjanih limova od 1,5 T povećati indukciju samo za 10%, povećava se struja magnetiziranja čak za 155% tj. na 2,5 puta veću vrijednost (1,19,6).

Tehnički nema zapreke da se specifično opterećenje u bakru poveća i preko $5 \cdot 10^6$ A/m². Međutim, time se gubici u bakru povećavaju skoro na trostruku vrijednost, a u pogl. 5.6 pokazuje računica da se ekonomska gustoća struje kreće negdje oko $3 \cdot 10^6$ A/m²,

pa prema tome neko bitno povećanje specifičnog opterećenja transformatora ne dolazi u obzir.

Ako su prema gornjim izlaganjima specifična opterećenja u bakru i željezu manje više određene vrijednosti, koje se mogu vrlo malo mijenjati, onda je razumljivo da ona predstavljaju polaznu točku za proračun transformatora. Specifična opterećenja, međutim, predstavljaju, iako dragocjenu, ipak samo polaznu točku, jer transformator kod istih specifičnih napreznja možemo različito oblikovati. Moramo zato, kao slijedeći korak u pravcu projektiranja i konstruiranja transformatora, pozabaviti se sa problemom određivanja njegovih glavnih dimenzija.

5.3 Zakoni sličnosti

Prilikom proračuna transformatora rado se služimo timo da iskustva dobivena na jednom transformatoru određenih dimenzija i određenih parametara prenosimo na slične transformatore s drugim parametrima. Možemo zamisliti da transformator u svim dimenzijama povećamo ili smanjimo X puta. Kako se kod toga mijenjaju parametri transformatora? Kod ovog razmatranja pretpostavljamo da se specifična opterećenja u bakru i željezu ne mijenjaju a takodjer ni faktori punjenja.

Prilikom računa polazimo od jednadžbe za nominalnu snagu transformatora:

$$P = E \cdot I = 4,44 \cdot f \cdot S_{Fe} \cdot B_m \cdot w \cdot q \cdot \Gamma_1$$

gdje je S_{Fe} = netto presjek željeza u stupu
 q_1 = presjek bakrenog vodiča primarnog namota

Pomoću faktora punjenja možemo izraziti presjek bakra i presjek željeza sa glavnim dimenzijama transformatora:

$$S_{Fe} = D^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot f_{Fe}$$

gdje je k_{Fe} = tzv. faktor punjenja željeza

Ako pretpostavimo jednako specifično opterećenje u bakru primarnog i sekundarnog namotaja, onda je:

$$w_1 \cdot q_1 = w_2 \cdot q_2$$

pa je prema tome ukupni presjek bakra u prozoru S_{Cu} jednak:

$$S_{Cu} = w_1 \cdot q_1 + w_2 \cdot q_2 = 2w_1 \cdot q_1$$

Pomoću faktora punjenja prozora možemo izračunati netto presjek bakra iz površine prozora.

$$S_{Cu} = a' \cdot b' \cdot f_{Cu}$$

gdje je: a' = širina prozora
 b' = visina prozora

pa za ukupni presjek bakra primara dobijemo:

$$w_1 q_1 = \frac{1}{2} a' b' f_{cu}$$

Uvrštavanjem jednadžbi (5.3-2) i (5.3-3) u (5.3-1) dobijemo:

$$P = 4,44 \cdot f \cdot D^2 \frac{\pi}{4} f_{Fe} B_m a' b' \frac{1}{2} f_{cu} \Gamma \cdot 10^{-3} [kVA]$$

Ako pretpostavimo konstantna specifična opterećenja i konstantne faktore punjenja, jednadžbu možemo napisati u obliku

$$P = k \cdot a' b' D^2$$

Povećamo li sve linearne dimenzije X puta dobijemo:

$$P = k \cdot a' X \cdot b' X \cdot D^2 X^2 = P \cdot X^4$$

Razumljivo je da se volumen, pa prema tome i masa transformatora mijenja sa trećom potencijom linearnih dimenzija tj.:

$$V' = V \cdot X^3 \quad ; \quad m' = m \cdot X^3$$

Iz toga možemo odmah zaključiti da se masa, a prema tome i cijena transformatora po jedinici snage mijenja obrnuto proporcionalno sa linearnim dimenzijama.

$$\frac{m'}{P'} = \frac{m \cdot X^3}{P \cdot X^4} = \frac{1}{X} \cdot \frac{m}{P} \quad ; \quad \frac{C'}{P'} = \frac{1}{X} \cdot \frac{C}{P}$$

Transformator za veću snagu je relativno lakši i jeftiniji. Ako uzmemo kao polaznu točku da uljni transformator od 100 kVA ima masu cca 700 kg, odnosno specifičnu masu 7 kg/kVA, onda možemo iz toga zaključiti da kod svakog povećanja snage za 10 puta dobijemo za $\frac{1}{\sqrt[3]{10}} = \frac{1}{1,75}$ smanjenu specifičnu masu, te tako dobijemo za

transformator od:	10 kVA	$7 \cdot 1,75$	= 12,2	kg/kVA	$m =$	122 kg
	100 kVA		7	kg/kVA	$m =$	700 kg
	1 000 kVA	$7/1,75$	= 4	kg/kVA	$m =$	4 000 kg
	10 000 kVA	$4/1,75$	= 2,28	kg/kVA	$m =$	22 800 kg
	100 000 kVA	$2,28/1,75$	= 1,32	kg/kVA	$m =$	132 000 kg

Današnji podaci za transformatore u "Rade Končar-u" su slijedeći:

10 kVA	$m =$	265 kg	26,5 kg/kVA
100 kVA	$m =$	710 kg	7,1 kg/kVA
1 000 kVA	$m =$	3 900 kg	3,9 kg/kVA
10 000 kVA	$m =$	54 000 kg	5,4 kg/kVA

Ako usporedimo teoretski izračunate i u praksi ostvarene vrijednosti vidimo da se one prilično podudaraju za transformatore iste serije (10 - 1000 kVA). Transformator od 10 000 kVA nema više sličnu konstrukciju, jer mu je nominalni napon 110 kV a ne 10 kV kao kod onih manjih. Osim toga postoje još i drugi razlozi, koje ćemo kasnije objasniti, koji još jače djeluju na povećanje mase transformatora za 10 000 kVA i 110 kV.

Kod nepromijenjenih specifičnih opterećenja su gubici po jedinici mase konstantni, pa možemo iz toga zaključiti da se gubici kod promjene dimenzija mijenjaju jednako kao masa tj.:

$$P_g' = \chi^3 \cdot P_g$$

Sa omjerom snage koju transformator sekundarno daje u mrežu, prema snazi, koju primarno uzima iz mreže, definiran je faktor korisnosti transformatora, kojeg označujemo sa η . Faktor korisnosti ovisan je o $\cos \varphi$ tereta, no ukoliko nije ništa posebno navedeno, pretpostavlja se opterećenje transformatora sa čistim radnim teretom ($\cos \varphi = 1$).

Kod električkih strojeva uobičajeno je da se faktor korisnosti računa po formuli:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_g}$$

gdje je P_2 = snaga koju stroj daje. Kod rotacionih električkih strojeva je nominalna snaga definirana kao izlazna snaga, pa je ta formula pogodna i za račun nominalnog stepena djelovanja, a logično je da se i općenito upotrebljava, jer kad god govorimo o snazi nekog električkog stroja, mislimo na snagu koju on daje. Ako hoćemo računati nominalni stepen djelovanja transformatora zgodnije je poslužiti se formulom:

$$\eta = \frac{P_1 - P_g}{P_1}$$

jer je nominalna snaga prema pogl. 5.1 definirana kao snaga koju transformator uzima iz mreže. Prema tome iznosi nominalni stepen djelovanja transformatora:

$$\eta_n = \frac{P_n - P_{gn}}{P_n}$$

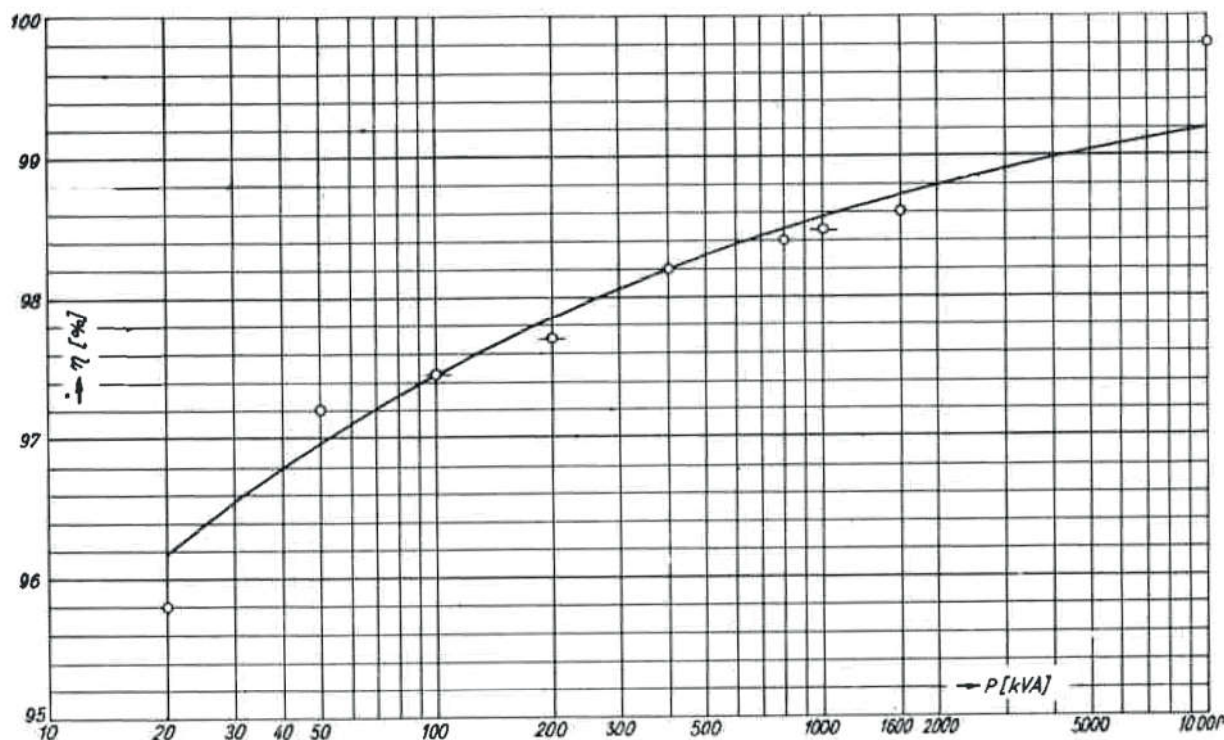
gdje je P_n - nominalna snaga, a P_{gn} - nominalni gubici transformatora. Ako χ puta povećamo dimenzije transformatora dobijemo transformator sa stepenom djelovanja:

$$\eta' = \frac{P_1' - P_g'}{P_1'} = \frac{P \chi^4 - P_g \chi^3}{P \chi^4} = \frac{P - \frac{1}{\chi} P_g}{P}$$

Ako opet polazimo od podataka za transformator od 100 kVA, koji ima stepen korisnosti 0,975, onda možemo nacrtati dijagram $\eta = f(P')$ stavljajući u jednadžbu (5.3-11) izraz:

$$\chi = \sqrt[4]{\frac{P'}{100}}$$

Taj dijagram je prikazan na sl. 5.3-01 na kojoj su za usporedbu ucrtani faktori korisnosti transformatora "Rade Končar".



Sl. 5.3-01

Za snage 20 - 1600 kVA uzeti su podaci niza transformatora nominalnog napona 10 kV, dok transformator 10 000 kVA ima nominalni napon 110 kV. Kako vidimo rezultati teorije sličnosti se vrlo dobro poklapaju za transformatore iste serije koji su slične konstrukcije. Transformator nominalne snage 10 000 kVA i ovdje znatno odstupa i na njega ćemo se još posebno osvrnuti.

Iz ovog razmatranja vidimo da je nominalni faktor korisnosti kod sličnih transformatora i kod nepromijenjenih specifičnih opterećenja ovisan samo o snazi transformatora.

Možemo postaviti pitanje: Kako se mijenja faktor korisnosti ako se mijenjaju ne samo dimenzije transformatora, već i njegovo specifično opterećenje u bakru (Γ) i željezu (B_m)? Uzmimo da specifična opterećenja promijenimo Y puta, tj.:

$$\Gamma' = Y \cdot \Gamma \quad B_m' = Y \cdot B_m$$

Ako Y puta povećamo specifično opterećenje bakra biti će struja Y puta veća, a ako Y puta povećamo indukciju u jezgri biti će magnetski tok, a prema tome i inducirani napon Y puta veći. Gubici u bakru rastu sa kvadratom struje, pa prema tome sa Y^2 . Ako promjene dimenzija nisu prevelike, gubici u željezu takodjer rastu

sa kvadratom indukcije tj. sa Y^2 . Tako dobijemo :

$$\eta' = \frac{P \cdot X^4 \cdot Y^2 - P_g \cdot X^3 \cdot Y^2}{P \cdot X^4 \cdot Y^2} = \frac{P - \frac{1}{X} P_g}{P} \quad (5.3-13)$$

Ako usporedimo jednađbe (5.3-11) i (5.3-13) dolazimo do iznenađujućeg rezultata. Ako povisujemo ili snizujemo specifična opterećenja bakra i željeza u istom omjeru, faktor korisnosti se ne mijenja, već jedino snaga transformatora. Faktor korisnosti je dakle funkcija samo dimenzija slično gradjenih transformatora.

Postavimo sada pitanje: Koliko će biti teži transformator npr. snage 100 kVA, ako tražimo da njegov nominalni faktor korisnosti ne bude samo 0,975, kako je to prema sl. 5.3-01 prirodno za transformator te snage, već da bude 0,986, kako to prirodno odgovara transformatoru od 1000 kVA ? Da to postignemo moramo povećati dimenzije transformatora. Ako transformatoru ostaje ista nominalna snaga, promijenit će mu se specifična opterećenja. Kako promjena specifičnih opterećenja ne će utjecati na stepen djelovanja nego samo promjena dimenzije, vrijedit će opet jednađba (5.3-12). To možemo dokazati i na ovaj način. Uz istu snagu P vrijedit će kod promjene dimenzija:

$$Y = \frac{1}{X^2}$$

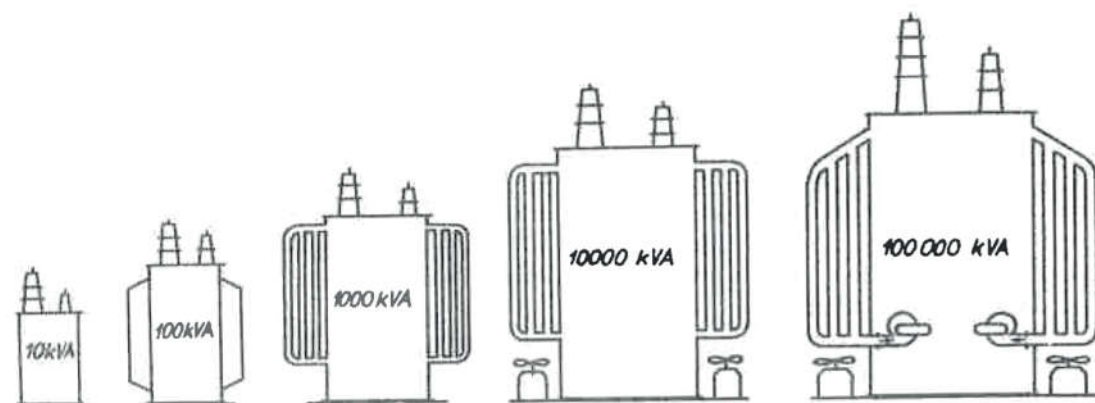
pa ako to uvrstimo u jednađbu (5.3-13) dobijemo opet jednađbu (5.3-12), koja vrijedi za nominalne stepene djelovanja sličnih transformatora u ovisnosti o njihovoj snazi. Prema tome odgovor na postavljeno pitanje je: Transformator od 100 kVA koji bi imao isti nominalni stepen djelovanja kako prirodno ima transformator od 1000 kVA, mora biti isto toliko težak i skup kao i transformator od 1000 kVA. To je naravno mnogo, i već po osjećaju vidimo da predstavlja skupo rješenje za koje će se teško netko odlučiti. Na svaki način ulazimo time već u problematiku ekonomike, koju ćemo kasnije obraditi. Za sada konstatiramo da je nominalni faktor korisnosti transformatora ovisan samo o njegovim dimenzijama bez obzira na njegovu nominalnu snagu.

Ako nakon ovog izlaganja razmotrimo podatke Končarevog transformatora od 10 000 kVA bit će nam jasno da je upravo zbog povećanja stepena djelovanja sa 0,992 na 0,999 njegova specifična masa porasla sa 2,28 kg/kVA na 5,4 kg/kVA. To je, dakle, glavni razlog zašto njegovi podaci odstupaju od onih dobivenih iz teorije sličnosti.

Gubici proizvode toplinu, a ona mora izlaziti iz transformatora sa razlikom temperature bakra i temperature okolnog zraka. Ta razlika temperature, tj. nadtemperature bakra, je po propisima određena. Tako npr. po VDE propisima za transformatore u ulju ne smije nadtemperatura prekoračiti granicu od 60 ili 65 °C, a ista je za velike kao i male transformatore. Pošto je odvod topline iz kotla transformatora u okolinu praktički proporcionalan nadtemperaturi, i rashladnoj površini, a dozvoljena nadtemperatura je konstantna, slijedi zaključak da se rashladna površina mora mijenjati proporcionalno sa gubicima ili se mora umjetno povećavati

faktor odvoda topline pomoću dodatne ventilacije.

Ustanovili smo već da gubici rastu proporcionalno sa X^3 a rashladna površina sličnih transformatora naravno raste samo proporcionalno sa X^2 . Dolazimo do disharmonije koju rješavamo na taj način da kod većih transformatora umjetno povećavamo površinu kotla, bilo valovitim limom, bilo prigradjenim hladionicima, a kod velikih transformatora pribjegavamo još upotrebi ventilatora, dok kod najvećih upotrebljavamo i uljne pumpe za cirkulaciju ulja, kako je to prikazano na sl. 5.3-02.

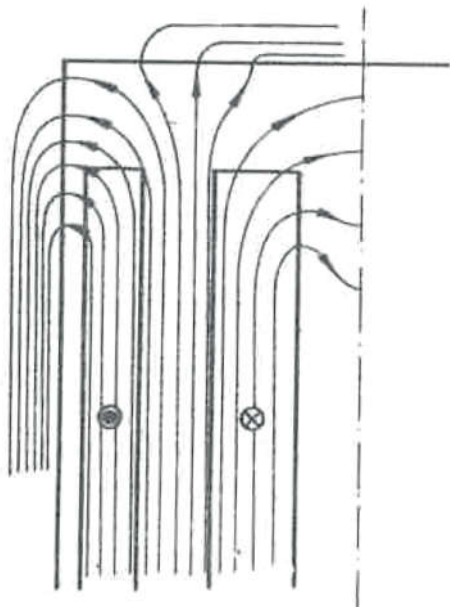


Sl. 5.3-02

5.4 Proračun rasipanja

Da bi mogli izračunati rasipne induktivitete transformatora moramo poznavati sliku magnetskog polja transformatora. Na sl. 2.4-1 vidjeli smo magnetsko polje opterećenog transformatora sa cilindričkim namotom. Računati rasipne induktivitete u ovom slučaju bilo bi vrlo teško, jer je teško odijeliti rasipne silnice od silnica glavnog toka, pošto su silnice kompliciranog oblika i teško pristupačne računu, a osim toga primarni i sekundarni rasipni tok radi struje magnetiziranja nisu iste faze, što takodjer otežava račun. Zato za proračun rasipnih induktiviteta promatramo transformator u takovom pogonskom stanju kod kojeg postoje samo rasipni tokovi, a glavnog toka uopće nema. To je slučaj tzv. idealnog kratkog spoja, kojeg dobivamo tako, da kod transformatora sa jednakim brojem zavoja primarnog i sekundarnog namota ($w_1 = w_2$) kroz oba u seriju spojena namota pustimo jednu te istu struju I_k . Namoti moraju biti spojeni tako da se proticanja obaju namota poništavaju. U tom slučaju ne će doista moći postojati glavno polje, nego samo oba rasipna polja. Takvo stanje možemo dobiti i kod transformatora sa bilo kojim omjerom zavoja, ako kroz primar pustimo struju I_k a kroz sekundar struju $\frac{w_2}{w_1} I_k$ i to tako da se njihova proticanja poništavaju. Kod svih pogonskih stanja transformatora, kod kojih se može zanemariti struja

magnetiziranja (kratki spoj, nominalno opterećenje), bit će raspored rasipnih polja približno isti kao kod idealnog kratkog spoja, pa će i vrijednosti rasipnih induktiviteta dobivene promatranjem idealnog kratkog spoja približno vrijediti i za ta pogonska stanja. Na sl. 5.4-01 vidimo sliku magnetskog polja transformatora kod idealnog



Sl. 5.4-01

kratkog spoja. Magnetske silnice idu po različitim kompliciranim krivuljama, pa je i ta slika za proračun vrlo nezgodna. Da olakšamo račun nadomještavamo takovu sliku polja sa poljem prikazanim na sl. 5.4-02 a. Tu smo pretpostavili da je namot sa svih strana opkoljen željezom i da silnice rasipnog polja idu kroz željezo. Osim toga, pretpostavljeno je da je permeabilitet željeza beskonačan, pa je magnetski otpor puta kroz željezo jednak nuli, tj. čitav magnetski napon se troši na svladavanje puta kroz zrak. Međutim, zbog toga što ovakva slika polja ne odgovara stvarnosti, kod proračuna magnetskog polja ne smijemo sada više računati sa duljinom puta kroz zrak jednakoj visini prozora transformatora b , nego sa nešto većom vrijednošću b'' koja iznosi

$$b'' = \frac{b}{k}$$

gdje je "b" visina namota, a "k" faktor korekcije.

Prema teoretskim istraživanjima Rogowskog iznosi za cilindrični namot prema slici 5.4-02 faktor "k";

$$k = 1 - \frac{1}{2\pi x} + \frac{1}{2\pi x e^{2\pi x}}$$

Za x moramo kod cilindričkog namota uzeti:

$$x = \frac{b}{2(\sigma + a_1 + a_2)}$$

gdje je:

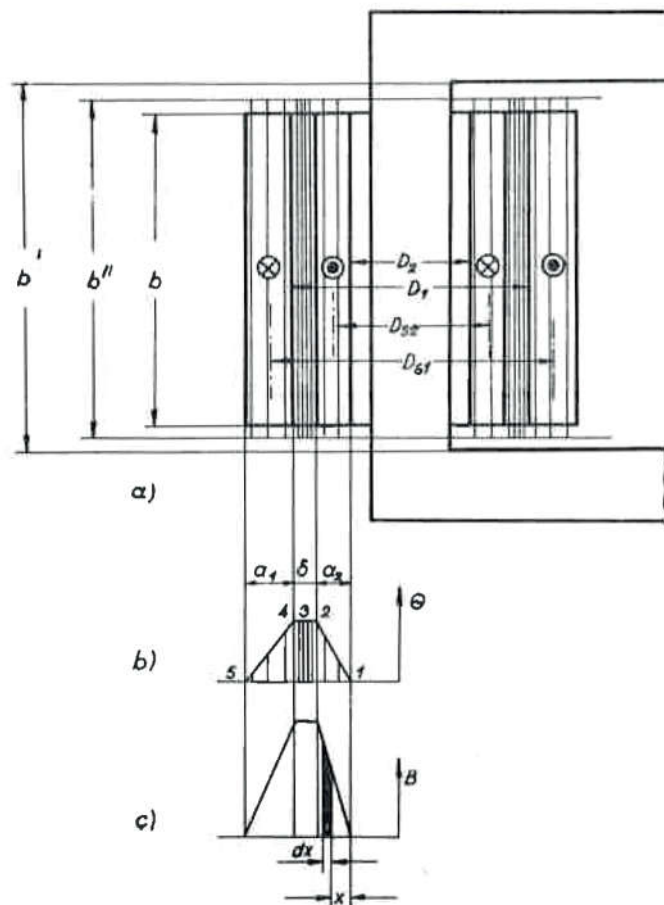
- a_1 = širina primarnog namota
- a_2 = širina sekundarnog namota
- σ = raspor medju namotima
- b = visina namota

Umjesto gore navedene komplicirane formule može se sa dovoljnom

točnošću koristiti slijedeća pojednostavnjena formula:

$$k = 1 - \frac{a_1 + a_2 + d}{\pi \cdot b}$$

koja je dobivena zanemarenjem trećeg člana u jednadžbi (5.4-1). Vrijednost "k" kreće se u granicama od 0,90 do 0,97. Kod većine cilindričkih namota je visina namota mnogo veća od njegove širine, pa se za "k" može praktički uzeti vrijednost 1. To znači da možemo računati sa duljinom silnica koja je jednaka visini namota.



Sl. 5.4-02

Promotrimo kako izgleda krivulja protjecanja rasipnog polja za cilindrički namot. Unutar željezne jezgre i u rasporu između jezgre i primarnog namota nema magnetskog polja, jer se oba proticanja poništavaju, jer je

$$I_{k1} \cdot W_1 = I_{k2} \cdot W_2$$

U dijagramu protjecanja nacrtanom na sl. 54.-2 b) je radi toga ordinata jednaka nuli sve do točke 1 tj. do početka unutrašnjeg cilindra. Tu počinje protjecanje rasti, jer se razmjerno sa udaljenošću "x" povećava broj zavoja koje silnice obuhvaćaju i koji tvore to protjecanje. Kako je to povećanje linearno, rasti će i protjecanje na dijelu od 1 do 2 po pravcu. Unutar zračnog raspora "d" protjecanje je konstantno a onda od točke 4 do točke 5 pada linearno zbog suprotnog smjera struje u sekundarnom svitku. U krajnjoj točki 5 sekundarnog svitka postaje protjecanje opet jednako nuli.

Kako su magnetske silnice pravci, a osim toga polje prolazi kroz zrak koji ima konstantnu permeabilnost, imat će krivulja magnetske indukcije $B = f(x)$ (sl. 5.4-02 c) isti oblik kao i krivulja protjecanja. Izvan namota polje je jednako nuli, a maksimalnu vrijednost postiže u rasporu između svitaka. Maksimalna vrijednost jakosti magnetskog polja iznosi:

$$H_d = \frac{I_{k1} \cdot w_1}{b''}$$

Prema tome maksimalna vrijednost magnetske indukcije je jednaka :

$$B_d = \mu_0 \cdot H_d = \mu_0 \cdot \frac{I_{k1} \cdot w_1}{b''} \quad (5.4-3)$$

Ovu vrijednost ima indukcija na cijeloj širini zračnog raspora "d". Na nekoj drugoj silnici, koja prolazi kroz primarni namot na udaljenosti x od unutrašnjeg ruba namota, indukcija iznosi :

$$B_x = B_d \frac{x}{a_1} \quad (5.4-4)$$

Da bi izračunali primarni i sekundarni rasipni induktivitet, potrebno je još odrediti koliki dio od ovog ukupnog rasipnog toka otpada na primar a koliki na sekundar. Kod idealiziranog magnetskog kruga je iz razloga simetrije logično da se polovica toka zatvara oko primarnog, a polovica oko sekundarnog namota. To se vidi iz sl. 5.4-01 koja pokazuje stvarnu sliku polja. Silnice, koje se zatvaraju oko primarnog namota, čine primarno rasipno polje i uzbuđene su od primarnog namota, dok silnice koje se zatvaraju oko sekundarnog namota tvore sekundarno rasipno polje.

Sada možemo izračunati rasipni induktivitet primarnog namota kao ukupno ulančenje primarnog rasipnog toka sa zavojima primarnog namota kod struje $I_k = 1$ A.

Unutar primarnog namota ograničimo na udaljenost "x" od unutrašnjeg ruba elementarni tok " $d\phi_x$ " pomoću dva cilindra sa razmakom "d x". Elementarni presjek toka iznosi :

$$d\phi_x = \pi \cdot D_x \cdot dx = \pi (D_1 + 2x) dx \quad (5.4-5)$$

Unutar primarnog namota mijenja se indukcija po zakonu :

$$B_x = \mu_0 \cdot \frac{I_{k1} w_1}{b''} \cdot \frac{x}{a_1}$$

pa prema tome iznosi elementarni tok:

$$d\phi_x = B_x \cdot dF_x = \mu_0 \cdot \frac{I_{k1} \cdot w_1}{b^2} \cdot \frac{x}{a_1} \pi (D_1 + 2x) dx$$

Taj tok obuhvaća slijedeći broj primarnih zavoja:

$$w_x = w_1 \cdot \frac{x}{a_1}$$

Elementarno ulančenje bit će dakle jednako:

$$d\psi_x = w_x \cdot d\phi_x = \mu_0 \cdot I_{k1} \cdot \left(w_1 \cdot \frac{x}{a_1}\right)^2 \cdot \frac{\pi (D_1 + 2x)}{b^2} dx$$

Ukupno ulančenje ovog dijela magnetskog toka bit će:

$$\psi_{a_1} = \int_0^{a_1} d\psi_x = \mu_0 \cdot \frac{w_1^2}{b^2} \cdot \pi \cdot \frac{a_1}{3} \left(D_1 + \frac{3}{2} a_1\right) I_{k1} \quad (5.4-6)$$

Osim toga trebamo još izračunati ulančenje onog dijela primarnog rasipnog toka, koji se razvio u rasporu medju namotima na širini " σ ". Silnice toga toka su ulančene sa svim zavojima primarnog namota. Ukupno ulančenje toga toka bit će:

$$\psi_{\sigma_1} = \int_{a_1}^{a_1 + \sigma/2} B_{\sigma} \cdot dF_x \cdot w_1 = \int_{a_1}^{a_1 + \sigma/2} \mu_0 \cdot \frac{I_{k1} \cdot w_1}{b^2} \cdot \pi (D_1 + 2x) \cdot w_1 \cdot dx \quad (5.4-7)$$

$$\psi_{\sigma_1} = \mu_0 \cdot \frac{w_1^2}{b^2} \cdot \pi \cdot \frac{\sigma}{2} \left(D_1 + 2a_1 + \frac{\sigma}{2}\right) I_{k1}$$

Ukupno ulančenje rasipnog toka primara iznosi:

$$\psi_{\sigma_1} = \psi_{a_1} + \psi_{\sigma_1} = \mu_0 \cdot \frac{w_1^2}{b^2} \cdot \pi \left[\frac{a_1}{3} \left(D_1 + \frac{3}{2} a_1\right) + \frac{\sigma}{2} \left(D_1 + 2a_1 + \frac{\sigma}{2}\right) \right] I_{k1} \quad (5.4-8)$$

To je točan izraz za primarno ulančenje. Izraz možemo pojednostavniti tako, da umjesto da računamo sa izrazima u okruglim zagradama, računamo sa srednjim promjerom primarnog namota D_{s1} . To nam ne će mnogo umanjiti točnost računa, koja ionako iznosi prema rezultatima dobivenim mjerenjima 4 - 5 %. Tako dobijemo za ukupno ulančenje primarnog rasipnog toka:

$$\psi_{\sigma_1} = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi D_{s1}}{b^2} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{\sigma}{2} \right) I_{k1}$$

Rasipni induktivitet primarnog namota bit će, dakle:

$$L_{\sigma_1} = \frac{\Psi_{\sigma_1}}{I_{n_1}} = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{s1}}{b^n} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{d}{2} \right) \quad (5.4-9)$$

Ako bi na isti način proveli račun za sekundarni namot dobili bi za sekundarni rasipni induktivitet:

$$L_{\sigma_2} = \mu_0 \cdot w_2^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{s2}}{b^n} \left(\frac{a_2}{3} + \frac{d}{2} \right) \quad (5.4-10)$$

Ukupni rasipni induktivitet transformatora reduciran na primar bit će:

$$L'_K = L_{\sigma_1} + L'_{\sigma_2} = L_{\sigma_1} + \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^2 \cdot L_{\sigma_2}$$

$$L'_K = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi}{b^n} \left[D_{s1} \left(\frac{a_1}{3} + \frac{d}{2} \right) + D_{s2} \left(\frac{a_2}{3} + \frac{d}{2} \right) \right]$$

Ako umjesto da računamo sa srednjim promjerom pojedinih namota, provedemo proračun sa srednjim promjerom "D_s" cijelog namota, dobijemo za ukupni rasipni induktivitet slijedeći iznos:

$$L'_K = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b^n} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + d \right) \quad (5.4-11)$$

Ako sve dimenzije namota uzmemo u metrima, dobijemo slijedeću numeričku relaciju:

$$L'_K = 0,4\pi \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b^n} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + d \right) \cdot 10^{-6} \text{ [H]} \quad (5.4-12)$$

Iz ovoga dobijemo konačno induktivni otpor kratkog spoja izražen u omima:

$$X'_K = 7,92 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b^n} \cdot d_r \cdot 10^{-6} \text{ [\Omega]} \quad (5.4-13)$$

gdje je

$$d_r = \frac{a_1 + a_2}{3} + d \quad (5.4-14)$$

Veličina "d_r" zove se reducirana širina zračnog raspóra. Ona nam može poslužiti da jednadžbu za ukupno ulančenje rasipnog toka redu-

cirano na primar tj. veličinu:

$$\psi' = \psi_{\sigma_1} + \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 \cdot \psi_{\sigma_2}$$

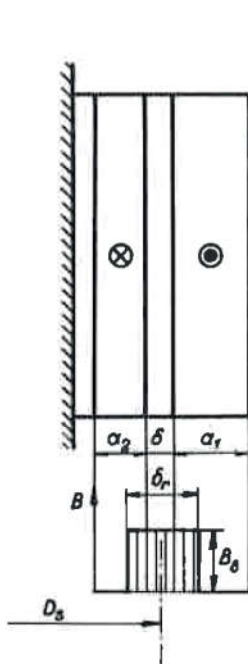
napišemo u pojednostavnjenom obliku, pa tako za ukupno ulančenje toka sa zavojima dobijemo izraz:

$$\psi' = \mu_0 \cdot \frac{I_{K1} \cdot w_1}{b^2} \cdot \pi \cdot D_s \cdot \sigma_r \cdot w_1$$

ili:

$$\psi'' = B_{\sigma} \cdot \pi \cdot D_s \cdot \sigma_r \cdot w_1 \quad (5.4-15)$$

Iz ove jednadžbe vidimo da možemo rasipni tok prema slici 5.4-02, koji je trapezoidalno razdijeljen po cijeloj svojoj širini $a_1 + a_2 + \sigma$ smatrati u njegovom djelovanju jednakim fiktivnom toku koji na širini " σ_r " ima konstantnu indukciju B_{σ} i ulančen je sa svim primarnim zavojima (vidi sl. 5.4-03). Na ovaj način pojednostavnjen je proračun ukupnog rasipnog ulančenja i induktiviteta, pa ćemo se time moći poslužiti kod proračuna rasipnog induktiviteta drugih oblika namota.



Sl. 5.4-03

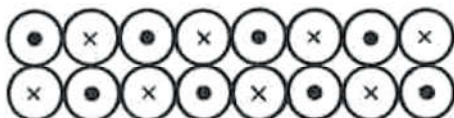
Pogledamo li sada malo поближе posljednji izraz, što smo ga dobili za induktivni otpor rasipanja, možemo lako uvidjeti što sve i kako utječe na taj otpor. Upadamo u oči da je X_k funkcija geometrijske razdiobe namota, jer je X_k to veće što je veća magnetska vodljivost prostora u kome se polje razvija. Budući da je ova vodljivost ovisna o geometrijskim veličinama polja, to oblikovanjem puta, kojim će prolaziti magnetski rasipni tok, imamo mogućnost da utječemo kod konstrukcije transformatora na veličinu njegovog rasipanja.

Rasipanje će prema tome biti manje što je duljina puta " b " veća, a to je veće što su veći " σ_r " i " D_s ". Ovdje je osobito zanimljiva veličina " σ_r ". Ona nam daje uvid u to, koliko su efektivno međusobno udaljeni primarni i sekundarni namotaji jedan

od drugoga, jer je ona u neku ruku veličina efektivnog raspورا. Vidimo da ne sačinjava samo stvarni raspор " σ " ovu veličinu " σ_r " nego i širine namota " a_1 " i " a_2 " donose svoj dio k povećanju tog fiktivnog razmaka među svicima, i to svaka sa jednom trećinom svoje

stvarne veličine.

Tako možemo stvoriti slijedeću sliku. Kada bi nam uspjelo širinu reduciranog raspóra " δ_r " smanjiti na vrijednost nula, ne bi uopće imali nikakav rasipni tok. To bi, dakle, značilo da su namotaji prostorno jedan tik uz drugoga, tj. svaki vodič koji vodi primarnu struju morao bi biti na istom mjestu gdje je i sekundarni vodič. Dakako, to je nemoguće. Najveće približavanje jednog namota drugome bi mogli izvesti tako da uz svaki zavoj primarne strane leži odmah sekundarni zavoj (vidi sl. 5.4-04).



Sl. 5.4-04

Tim bi načinom praktički posve odstranili rasipne tokove, jer bi nam ovakav namot u kratkom spoju bio indentičan sa bifilarno motanim svitkom. Tu bi još imali rasipno polje samo unutar bakra pojedinih vodiča. Svakako je očito da bi izvedba ovakvog namota kod tehničkih transformatora bila neobično teška, a kod transformatora visokog napona i nemoguća zbog probojne čvrstoće izolacije.

No, u praksi se i ne ide za tim da se rasipanje smanji do nule, jer u gotovo svakom slučaju želimo da transformator ima ipak neki rasipni otpor. To je zato, da u slučaju kratkog spoja ne nastaju prejake struje, koje bi mogle uništiti transformator. Budući da je svako povećanje omskog otpora vezano uz povećane toplinske gubitke, to nam ovdje baš dobro dodje induktivni otpor, jer on smanjuje struju bez gubitaka energije. I radi drugih razloga potrebno nam je često da imamo određenu veličinu rasipanja. Tada se služimo različitim izvedbama namota, kod kojih su pojedini dijelovi primarnog ili sekundarnog namota smješteni više ili manje blizu jedan drugome, pa tako geometrijskom izvedbom utječemo na veličinu rasipanja, kao što je naprijed bilo rečeno.

Kao prvu izvedbu, koja ima za cilj da smanjuje rasipanje, spominjemo razdjeljen cilindrički namotaj (bikoncentrički namotaj) prema sl. 6.4-05. Stvaran raspored silnica rasipnog polja ovakvog namota predočuje nam sl. 5.4-05, dok je na sl. 5.4-06 nacrtana za taj slučaj krivulja rasipnog polja $B_m = f(x)$.

Ukupni spoj toka sa zavojima, odnosno ulančenje dobit ćemo ako zbrojimo obje polovice ulančenja. U tom slučaju dobivamo da je otpor X_k jednak zbroju oba otpora, koji odgovaraju jednom i drugom osnovnom trapezu. Jedino moramo paziti da kod toga u jednadžbe uvedemo ispravne veličine. Opet ćemo sa " w_1 " označiti ukupni broj zavoja primarnog namota, sa " w_2 " ukupni broj zavoja sekundara, sa " b " dužinu silnica u zraku, sa " δ " širinu svakog raspóra među svicima, sa " a_1 " ukupnu širinu jednog i sa " a_2 " ukupnu širinu drugog namota. Jednom trapezu odgovara kombinacija od polovine primarnih i polovine sekundarnih zavoja, pa tako u račun moramo uzeti umjesto ukupnog broja zavoja primara w_1 samo polovicu tj. $w_1/2$. Kako nam je prema oznakama na sl. 5.2-06 reducirani raspór jednak:

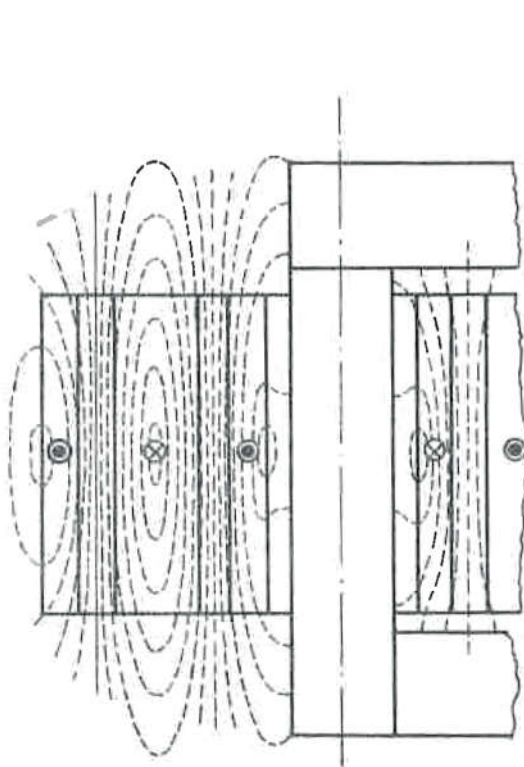
$$\delta_r = \delta + \frac{a_1/2 + a_2/2}{3} = \delta + \frac{a_1 + a_2}{6}$$

to dobijemo kao ukupni rasipni induktivitet reduciran na primar za bikoncentrični namot izraz:

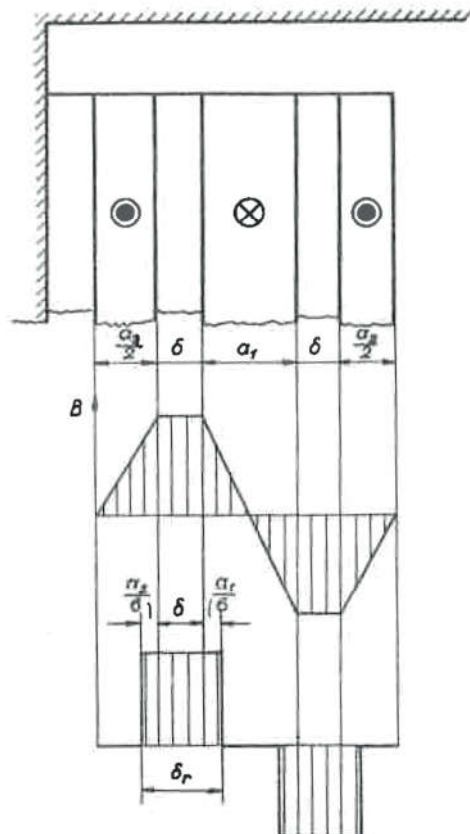
$$X'_k = 2 \left[7,92 \cdot f \left(\frac{w_1}{2} \right)^2 \frac{\pi \cdot D_s}{b''} \left(d + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \right] \cdot 10^{-6} \quad (5.4-16)$$

$$X'_k = 3,96 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b''} \left(d + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega]$$

Iz ove se jednadžbe razabire da je induktivni otpor rasipanja ovakve razdijeljene izvedbe znatno manji nego što bi uz jednake uvjete bio kod običnog cilindričnog namota.



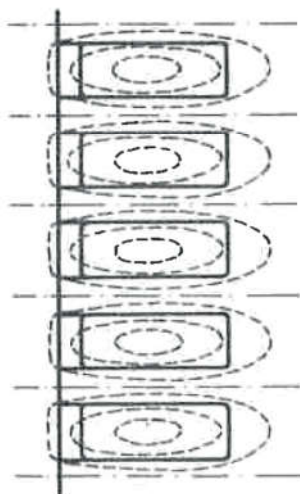
Sl. 5.4-05



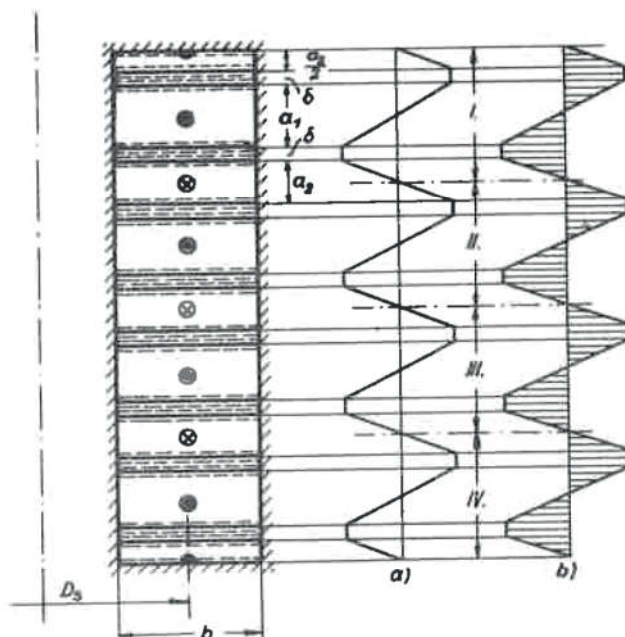
Sl. 5.4-06

Pogledajmo sada plosnati namot. Kod plosnate su izvedbe oba namota višestruko razdijeljena uz pojedine svitke, pa se uvijek jedan sekundarni svitak umeće između dva primarna. Ovim mješanjem svitaka znatno se smanjuje rasipanje, pa je ono to manje, što je miješa-

nje potpunije. Za izračunavanje otpora rasipanja kod plosnatog namota opet ćemo umjesto prave slike polja rasipanja, koja je prikazana na sl. 5.4-07 za nekoliko svitaka plosnatog namota, uzeti da je kao i prije namot opkoljen sa željezom. Time dobijemo i za plosnati namot jednostavnu sliku polja, gdje su silnice paralelni pravci (sl. 5.4-08), samo je sada smjer silnica okomit na os stupa, tj.



Sl. 5.4-07



Sl. 5.4-08

silnice prolaze radijalno kroz namote. Inače se u svemu mogu opet provesti ista razmatranja kao i kod cilindričkog namota, pa tako dobijemo kao krivulju proticanja slomljenu crtu "a", dok nam crta "b" na sl. 5.4-08 predočuje krivulju magnetskog polja.

Naglasiti moramo da se kod plosnatog namota stavlja uvijek uz željezo jarma niskonaponski svitak. Da izvedba bude simetrična uzimaju se kao krajnji niskonaponski svici dva polovična svitka. Time je dobivena simetrija ne samo u konstrukciji nego i u krivulji polja. Vidimo da se i ovdje dobije trapez kao osnovni element iz kojeg je sastavljena krivulja polja. U sl. 5.4-08 imamo oznake, koje su iste kao kod razdijeljenog cilindričkog namota. Primarni i sekundarni namoti su podijeljeni na po četiri svitka. U računima možemo uzeti općeniti slučaj da je i primarni i sekundarni namot razdijeljen na "n" pojedinih svitaka i uz to je niskonaponskom namotu jedan svitak razdijeljen na dva polovična svitka. Svakom cijelom pojedinačnom svitku odgovara, dakle, broj zavoja w/n . Sada se u općenitom slučaju ukupni rasipni tok sastoji od $2n$ skupina kakve smo imali kod cilindričkog namota prema sl. 5.4-02. Za ove vrijedi jednadžba (5.2-13), koju smo prije dobili tj.:

$$X_k' = 7,92 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_3}{b^n} \cdot d_f \cdot 10^{-6} \quad [Q]$$

Za reduciranu širinu zračnog raspora moramo prema oznakama na sl. 5.4-08 uzeti slijedeću vrijednost:

$$\zeta = \sigma + \frac{a_1/2 + a_2/2}{3} = \sigma + \frac{a_1 + a_2}{6}$$

Kako je sada broj zavoja svake pojedinačne skupine $2n$ puta manji od ukupnog broja zavoja, to se umjesto w_1 mora u jednadžbu staviti iznos $w_1/2n$. Tako smo dobili ukupni rasipni otpor jedne skupine. Da dobijemo induktivni otpor rasipanja cijelog namota moramo rezultat pomnožiti sa brojem skupina tj. sa $2n$, te tako dobijemo:

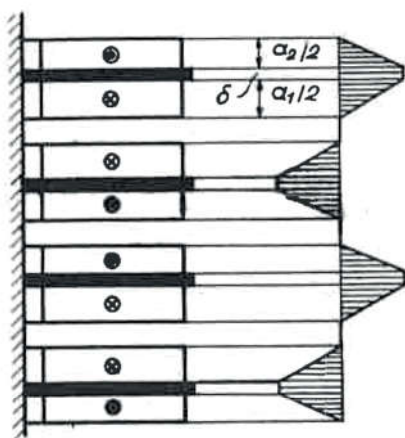
$$X'_k = 2n \cdot 7,92 \cdot f \left(\frac{w_1}{2n} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b''} \left(\sigma + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$X'_k = 3,96 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{n \cdot b''} \left(\sigma + \frac{a_1 + a_2}{6} \right) \cdot 10^{-6} \quad [\Omega] \quad (5.4-17)$$

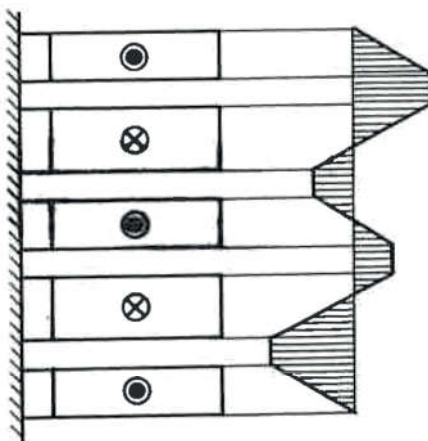
Za dužinu silnica vrijede i ovdje jednadžbe (5.4-1) i (5.4-2), koje je dao Rogowski, samo što se kod plosnatog namota mora za $\mathcal{R}$ staviti slijedeći iznos:

$$\mathcal{R} = \frac{b}{2\sigma + a_1 + a_2}$$

Iz jednadžbe (5.2-17) vidimo da je rasipanje to manje, što je veći broj pojedinačnih svitaka, jer se time postizava savršenije mješanje primarnih i sekundarnih zavoja. Rasipni induktivitet pada brže nego proporcionalno sa " n ", jer se kod nekog namota uz istu visinu stupa i isti broj zavoja povećavanjem broja " n " smanjuje istodobno i veličina " $(a_1 + a_2)$ " ali nešto poraste " D_s ". Veličinu " σ " ne smijemo smanjivati, jer bi se tako smanjila probojna čvrstoća transformatora i uz to još pogoršalo hladjenje namota. Da se ipak omogući smanjenje rasipnog induktiviteta i na taj način, izvodi se namot prema sl. 5.4-09. U toj izvedbi razdijeljen je svaki pojedini svitak na dva polusvitka, pa su primarni i sekundarni polusvici stavljeni što bliže, da se smanji rasipanje, a da se time ne smanji probojna čvrstoća, umetne se između njih dodatna kruta izolacija. U sredini između dva polusvitka, koji pripadaju istom namotu, ostavlja se dovoljno širok raspor za hladjenje namota. Kako na tom mjestu nema magnetskog rasipnog polja, ne će veličina tog raspora utjecati na rasipni induktivitet namota. Međutim, kod ovakve izvedbe sa kanalima među polusvicima istog namota, moramo biti oprezni, da ipak ne dobijemo i u ovim rasporima silnice rasipnog toka. Do ovog dolazi ako namot nije simetričan, jer se u tom slučaju prema sl. 5.4-10 dobije za nesimetričnu izvedbu ovakvog plosnatog namota krivulje polja posve drugačije nego za simetričan namot prema sl. 5.4-09. Općenito, nesimetrija na bilo kojoj vrsti plosnatog namota zbog dodatnih polja, koja nastaju u rasporu, povećava rasipni induktivitet, a osim toga povećavaju se kod kratkog



Sl. 5.4-09

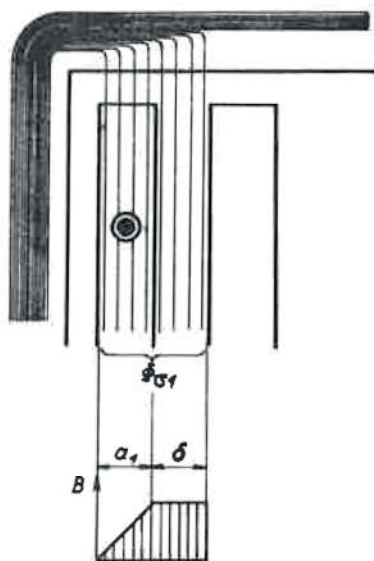


Sl. 5.4-10

spoja i mehaničke sile medju namotima.

Tako smo na nekoliko karakterističnih primjera pokazali kako se proračunava rasipanje kod transformatora. Ukoliko bismo imali kakovu drugačiju izvedbu namota, lako ćemo uvijek moći odrediti koliki je induktivni otpor rasipanja, ako se kod proračuna poslužimo istim metodama, koje smo ovdje pokazali.

Spomenimo još jedno. Ako bi htjeli izračunati totalni rasipni induktivni otpor X_k reduciran na sekundar (tj. $X_2 + X_1'$), vrijedit će, kako se lako može pokazati, opet iste jednadžbe, samo se umjesto primarnog broja zavoja w_1 može staviti broj sekundarnih zavoja w_2 .



Sl. 5.4-11

Promotrimo sada rasipni induktivitet transformatora u praznom hodu. Na sl. 5.4-11 nacrtano je za to pogonsko stanje idealizirano magnetsko polje transformatora, tj. polje sa pravolinijskim silnicama. Iz našeg razmatranja ispustimo silnice glavnog toka i promatrajmo samo rasipni tok. Kao rasipne silnice smatramo pri tome samo one silnice, koje su ulančene sa samo jednim namotom. Zbog toga što imamo struju samo u primarnom namotu, postoji samo primarni rasipni tok Φ_{G1} koga čine sve silnice koje se zatvaraju izmedju unutarnjeg promjera primarnog i unutarnjeg promjera sekundarnog namota. Za silnice koje se zatvaraju kroz primarni namot bit će proticanje pa i indukcija opet proporcionalni sa udaljenošću od unutarnjeg ruba namota,

jer se proporcionalno toj udaljenosti mijenja broj zavoja koje silnice obuhvaćaju i koji uzbuđuju to polje. Unutar zračnog rasporeda proticanje i indukcija zadržavaju opet konstantnu vrijednost. Za magnetsko polje će, dakle, vrijediti iste jednadžbe koje smo imali kada smo promatrali idealni kratki spoj transformatora.

Ako računamo ulančenje onog dijela rasipnog toka koji se zatvara kroz primarni namot, dobijemo istu vrijednost kao kod idealnog kratkog spoja, tj.:

$$\psi_{a_1} = \mu_0 \cdot \frac{w_1^2}{b^2} \cdot \pi \cdot \frac{a_1}{3} \left(D_1 + \frac{3}{2} a_1 \right) \cdot I_0$$

Kod izračunavanja ulančenja onog dijela toka, koji se zatvara kroz raspor među namotima, zadržat će podintegralna funkcija isti oblik kao prije, samo što ćemo morati promijeniti granice integracije, tj. moramo sada integrirati po cijeloj širini zračnog rasporeda. To ulančenje će biti jednako:

$$\begin{aligned} \psi_{\sigma} &= \int_{a_1}^{a_1+\sigma} \mu_0 \cdot \frac{L_1 \cdot w_1}{b^2} \cdot \pi (D_1 + 2x) \cdot w_1 \cdot dx = \\ &= \mu_0 \cdot \frac{w_1^2}{b^2} \cdot \pi \cdot \sigma (D_1 + 2a_1 + \sigma) I_0 \end{aligned}$$

Ako zbrojimo ta dva ulančenja i ako opet računamo sa nekim srednjim promjerom primarnog namota „ D_{s_1}' “, dobit ćemo za ukupno ulančenje:

$$\psi_{\Sigma} = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{s_1}'}{b^2} \left(\frac{a_1}{3} + \sigma \right) I_0$$

Rasipni induktivitet primarnog namota kod praznog hoda transformatora biti će prema tome jednak:

$$L_{\sigma_1} = \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot \frac{\pi \cdot D_{s_1}'}{b^2} \left(\frac{a_1}{3} + \sigma \right) \quad (5.4-18)$$

Ako ovu jednadžbu usporedimo sa jednadžbom (5.4-9), vidimo da je kod praznog hoda primarni rasipni induktivitet veći nego kod kratkog spoja, što je potpuno jasno, jer se rasipni tok kod praznog hoda mogao razviti po cijeloj širini rasporeda među namotima, a ne samo na jednoj polovici. Za ostala pogonska stanja kretat će se primarni rasipni induktivitet između te dvije vrijednosti. Na račun smanjenja primarnog rasipnog induktiviteta povećava se sekundarni rasipni induktivitet i može se dokazati da kod bilo kakvog opterećenja ukupni rasipni induktivitet X_k ostaje gotovo konstantan. Primarni i sekundarni rasipni induktivitet se pri tome praktički već kod cca 30 % nominalnog opterećenja uz normalne cos ne razlikuju za više od 5% od vrijednosti kakvu imaju kod idealnog kratkog spoja.

Izračunajmo još procentualni induktivni pad napona transformatora:

$$u_{\sigma} = \frac{I_1 X_{\sigma}}{E_1} \cdot 100$$

Pomoću jednadžbe (5.4-13) te uzevši u obzir da je:

$$E_1 = e_z \cdot w_1$$

gdje je: e_z = napon po zavoju transformatora,
dobijemo:

$$u_{\sigma} = 7,92 \cdot f \cdot w_1 \cdot \frac{I_1}{e_z} \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b^n} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + d \right) \cdot 10^{-4} \quad (5.4-20)$$

Proračun procentualnog induktivnog pada napona možemo provesti i na drugi način, tako da ne izračunavamo induktivitet namota, već jednostavno uspoređujemo rasipni tok sa glavnim tokom. Taj način razmatranja je pristupačniji fizikalnom gledanju i zato koristan za brzo rješavanje drugih problema u vezi sa rasipanjem, pa ćemo ga zato ukratko objasniti.

Kod proračunavanja rasipanja mi zapravo kao konačni rezultat tražimo procentualni iznos pada napona kod nominalne struje, kojeg izražavamo u postocima nominalnog napona. U namotu transformatora induciraju napone i glavni i rasipni tok i nema sumnje da su ti naponi proporcionalni tokovima koji ih induciraju. Prema tome možemo logično zaključiti da je procentualni induktivni pad napona jednak:

$$u_{\sigma} = \frac{\Phi_{\sigma}}{\Phi_g} \cdot 100 \quad (5.4-21)$$

odnosno riječima: Koliki procent imamo rasipnog pada napona u odnosu na nominalni napon, točno toliko procent iznosi rasipni tok u odnosu na glavni tok transformatora. Pri tome naravno mislimo na fiktivni nadomjesni rasipni tok ulančen sa svim zavojima primarnog ili sekundarnog namota (vidi sl. 2.4-02 odnosno sl. 5.4-03). U jednadžbu (5.4-21) možemo staviti bilo efektivne ili maksimalne vrijednosti tokova, ali moramo paziti da za oba toka uvrstimo istovrsnu vrijednost.

Provedimo sada taj račun do kraja. Prema sl. 5.4-03 iznosi rasipni tok:

$$\Phi_{\sigma} = B_{\sigma} \cdot \pi \cdot D_s \cdot d_r$$

Pomoću jednadžbe (5.4-3) dobijemo:

$$\Phi_{\sigma} = \mu_0 \cdot \frac{I_1 \cdot w_1}{b^n} \cdot \pi \cdot D_s \cdot d_r \quad (5.4-22)$$

Kako je I_1 efektivna vrijednost struje to i " Φ_{σ} " iz jednadžbe (5.4-22) predstavlja efektivnu vrijednost izmjeničnog rasipnog toka.

Iz glavne jednadžbe transformatora tj. jednadžbe (2.1-3) dobijemo uvodjenjem pojma napona po zavoju " e_z " :

$$\Phi_{gl,m} = \frac{e_z}{4,44 \cdot f}$$

Efektivna vrijednost glavnog toka iznosi :

$$\Phi_{gl} = \frac{e_z}{\sqrt{2} \cdot 4,44 \cdot f}$$

Prema tome, iznositi će procentualni induktivni pad napona :

$$u_G = \frac{\Phi_G}{\Phi_{gl}} 100 = \mu_0 \cdot \frac{I_1 \cdot w_1}{b''} \cdot \pi \cdot D_s \cdot \sigma_r \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 4,44 \cdot f}{e_z} \cdot 100$$

Ako sredimo ovu jednadžbu dobijemo uz pomoć jednadžbe (5.4-14) :

$$u_G = 7,92 \cdot f \cdot w_1 \cdot \frac{I_1}{e_z} \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b''} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + \sigma \right) \cdot 10^{-4}$$

tj. isti rezultat kao računanjem pomoću induktivnog otpora rasipanja.

Pogledajmo sada kako je sa zakonom sličnosti. Kod povećanja dimenzija "X" puta iznositi će novi procentualni induktivni pad napona :

$$u'_G = 7,92 \cdot f \cdot w_1 \cdot \frac{I_1 \cdot X^2}{e_z \cdot X^2} \cdot \frac{\pi \cdot D_s \cdot X}{b'' \cdot X} \left(\frac{a_1 + a_2}{3} + \sigma \right) \cdot X \cdot 10^{-4} = u_G \cdot X \quad (5.4-28)$$

Procentualni pad napona prema tome, raste proporcionalno sa povećanjem linearnih dimenzija transformatora.

Kod gradnje i primjene transformatora nas zapravo ne interesira rasipni pad napona, već napon kratkog spoja :

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_G^2}$$

Promotrimo kako se mijenja procentualni radni pad napona kod promjene dimenzija transformatora. Procentualni radni pad napona iznosi:

$$u_r = \frac{I_1 \cdot R_1}{E_1} \cdot 100 = \frac{I_1 \cdot w_1 \cdot D_{s1}}{\mathcal{K} \cdot q_1 \cdot E_1} \quad (5.4-24)$$

Prema zakonima sličnosti dobijemo :

$$u'_r = \frac{I_1 \cdot X^2 \cdot w_1 \cdot D_{s1} \cdot X}{\mathcal{K} \cdot q_1 \cdot X^2 \cdot E_1 \cdot X^2} = \frac{u_r}{X}$$

Vidimo da protivno rasipnom padu napona omski pad napona pada proporcionalno sa povećanjem linearnih dimenzija transformatora. Kod

transformatora od cca 30 kVA snage je omski pad napona praktični jednak rasipnom padu napona. Povećanjem linearnih dimenzija transformatora povećava se omjer obaju padova napona sa kvadratom linearnih dimenzija, pa je kod transformatora od cca 8000 kVA i više omski pad napona kod izračunavanja napona kratkog spoja praktički zanemariv. Prema tome, raste i napon kratkog spoja praktički proporcionalno sa linearnim dimenzijama transformatora.

Što je veći napon kratkog spoja, to manja je struja kratkog spoja. Iz toga vidimo da možemo sa većim naponom kratkog spoja zaštititi u pogonu transformator i pripadajuća rasklopna postrojenja od neugodnih posljedica prevelikih struja kratkog spoja. S druge strane ima transformator sa velikim naponom kratkog spoja i velik pad napona u pogonu, što je opet neugodno. K tome treba još dodati činjenicu, koju ćemo kasnije razmotriti, da je za paralelan rad transformatora potrebno da imaju napon kratkog spoja jednak u granicama od $\pm 10\%$. Posljedica toga je standardiziranje iskustvom dobivenih vrijednosti napona kratkog spoja, koje su u različitim zemljama različite, ali razlike nisu znatne. Grubo se mogu dati slijedeće vrijednosti :

	do	400	kVA	i	10	kV	u_k	=	4	%
od 400	do	1000	kVA	i	10	kV	u_k	=	4,5	%
	do	400	kVA	i	15	kV	u_k	=	5,5	%
od 400	do	1000	kVA	i	35	kV	u_k	=	6	%
od 1000	do	10000	kVA	i	35	kV	u_k	=	7	%

5.5 Glavne dimenzije i cijena transformatora

5.51 Odnos geometrijskih i električkih veličina

Za istu nominalnu snagu može se graditi transformator koji je visok i uzak ili nizak i širok, a može se transformator tako dimenzionirati, da ima više željeza i manje bakra, ili obrnuto, itd. Dakle, za istu snagu postoje razna rješenja u pogledu dimenzija transformatora, no jasno je da samo jedno rješenje može predstavljati najjeftiniji transformator. Da riješimo taj problem, moramo najprije ustanoviti odnose između električnih veličina transformatora i njegovih glavnih dimenzija.

Za svaki tip odnosno izvedbu transformatora ovi odnosi su drugačiji. Naša daljnja razmatranja se odnose na klasični tip trofaznog jezgrastog transformatora. Izvedba jezgre neka bude takva, da je presjek stupa jednak presjeku jarma, iako to ne mora biti slučaj.

Jednadžba za snagu trofaznog transformatora glasi :

$$P = 3E_f \cdot I_f \quad (5.5-01)$$

Uvrštenjem pripadnih iznosa za fazni napon:

$$E_f = 4,44 \cdot f \cdot W \cdot S_{Fe} \cdot B_m \quad (5.5-02)$$

i za faznu struju:

$$I_f = \Gamma \cdot q = \Gamma \cdot \frac{S_{Cu}}{W} \quad (5.5-03)$$

dobijemo jednadžbu snage u obliku:

$$P = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot S_{Cu} \cdot S_{Fe} \cdot \Gamma \cdot B_m \quad (5.5-04)$$

Efektivni presjek željezne jezgre S_{Fe} i efektivni presjek bakra, tj. namota S_{Cu} , možemo izraziti pomoću glavnih dimenzija transformatora i faktora punjenja.

U sl. 5.5-01 prikazane su glavne dimenzije razmatranog trofaznog transformatora. Presjek stupova sastavljen je od više tako složenih pravokutnih paketa, da se oko njih može opisati kružnica promjera D , kako je to prikazano u sl. 4.4-02. Prema toj slici faktor punjenja stupa f_{Fe} dostiže vrijednost od cca 0,9. Dalje treba uzeti u obzir faktor punjenja paketa prema pogl. 4.1, koji kod toplo valjanih limova 0,35 mm debljine iznosi takodjer oko 0,9. Ukupni faktor punjenja jezgre može prema tome dostići vrijednost od

$$f_{Fe} \leq 0,8 \quad (5.5-05)$$

Prema tome dobijemo

$$S_{Fe} = f_{Fe} \frac{D^2 \pi}{4}$$

Namoti ispunjavaju prozor jezgre, kojemu su prema sl. 5.5-01 dimenzije a' i b' . Namot jedne strane jedne faze ispunjava samo četvrtinu presjeka prozora, pa je njegov presjek

$$S_{cu} = \frac{1}{4} \cdot f'_{cu} \cdot a' \cdot b' \quad (5.5-06)$$

Faktor punjenja f'_{cu} uzima u obzir izolaciju samih vodiča, izolaciju između pojedinih namota i izolaciju između namota i jezgre. Medjutim, taj faktor punjenja je teško unaprijed procijeniti, jer u velikoj mjeri ovisi o visini napona, tj. o razmacima između namota (Δa_2 i Δa_3) te o razmacima između namota i jezgre (Δa_1 i Δb) prema sl. 5.5-01. Zato se po Vidmaru pomaže na taj način, da računamo samo sa faktorom punjenja samih svitaka f_{cu} , a izolacione razmake Δa i Δb uzmemo dimenzionalno u obzir tako, da umjesto sa presjekom prozora ($a' \cdot b'$) računamo sa presjekom svitaka ($a \cdot b$) gdje je

$$a = 2(a_1 + a_2) = a' - 2\Delta a_1 - 2\Delta a_2 - \Delta a_3$$

$$b = b' - \Delta b$$

Za presjek bakra sada dobijemo:

$$S_{cu} = \frac{1}{4} \cdot f_{cu} \cdot a \cdot b \quad (5.5-07)$$

a jednačba za snagu glasi:

$$P = 3.444 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot f \cdot f_{cu} \cdot f_{Fe} \cdot B_m \cdot \Gamma \cdot a \cdot b \cdot D^2 \quad (5.5-08)$$

$$P = 2.62 \cdot f \cdot f_{cu} \cdot f_{Fe} \cdot B_m \cdot \Gamma \cdot a \cdot b \cdot D^2$$

Ovdje faktor f_{cu} označava prosječnu vrijednost faktora punjenja za visokonaponski i niskonaponski namot.

Specifična opterećenja u bakru i željezu možemo barem približno unaprijed procijeniti, te možemo svesti jednačbu (5.5-08) na oblik:

$$P = k_1 \cdot a \cdot b \cdot D^2 \quad (5.5-09)$$

$$k_1 = 2.62 \cdot f \cdot f_{cu} \cdot f_{Fe} \cdot B_m \cdot \Gamma \quad (5.5-10)$$

Uvrštenjem vrijednosti za $f(H_z = \frac{1}{s})$, $B(T = \frac{V_s}{m^2})$ i $(\frac{A}{m^2})$ u jednačbu (5.5-10) dobijemo

$$k_1 = \left(\frac{1}{s} \cdot \frac{V_s}{m^2} \cdot \frac{A}{m^2} \right) = \left(\frac{VA}{m^4} \right)$$

a daljnjim uvrštenjem a , b i D u jednačbu (5.5-09) dobijemo

$$P = \left(\frac{VA}{m^4} \cdot m^4 \right) = (VA)$$

Jednačba snage (5.5-09) ima prema tome tri promjenjive (a , b , D), ako pretpostavljamo da su vrijednosti za frekvenciju (f), specifičnog opterećenja (Γ , B_m) i faktor punjenja (f_{cu} , f_{Fe}) unaprijed određene i prema tome konstantne.

Iz jednadžbe (5.5-09) vidimo kakav je odnos između snage transformatora i njegovih glavnih dimenzija.

Tehnički svakako ima više mogućih rješenja, ali tražiti moramo najjeftinije rješenje.

5.52 Proizvodna cijena transformatora

Transformator se sastoji iz aktivnog (jezgre i namoti) i pasivnog (kotao, ulje, konstrukcioni dijelovi itd.) materijala. Aktivni dio materijala je prema pogl. 5.51 uglavnom određen sa njegove tri glavne dimenzije a , b , D , koje su ovisne o snazi transformatora prema jednadžbi (5.5-09) i sa izolacionim razmacima Δa i Δb , koji su određeni sa stepenom izolacije, odnosno sa nominalnim naponima, za koje je razmatrani transformator gradjen.

Cijena aktivnog željeza je uglavnom ovisna o masi jezgre i cijeni transformatorskog lima, a cijena aktivnog bakra je uglavnom ovisna o masi bakra i cijeni bakrenog vodiča, kojim se transformator namota. Cijena toplo valjanog transformatorskog lima, sa 1,1 W/kg kod 1 T i 50 Hz, kreće se oko 440 Din/kg, a cijena izoliranog bakrenog vodiča oko 1.300 Din/kg. Bakar je prema tome cca 3 puta skuplji od transformatorskog lima.

Iz iskustva možemo reći da je cijena gotovog uljnog transformatora cca 3 puta veća od cijene ugrađenog aktivnog materijala. Prema tome možemo postaviti jednadžbu cijene transformatora:

$$C = 3 \cdot (m_{Cu} \cdot c_{Cu} + m_{Fe} \cdot c_{Fe})$$

m_{Cu} - masa namota

m_{Fe} - masa jezgre

c_{Cu} - cijena po jednom kilogramu mase izoliranog bakrenog vodiča

c_{Fe} - cijena po jednom kilogramu mase transformatorskog lima

Masu možemo izraziti sa dimenzijama transformatora i specifičnim masama (γ_{Cu} , γ_{Fe}) :

$$C = 3 \left[\frac{3\pi}{4} \gamma_{Cu} \cdot f_{Cu} \cdot c_{Cu} \cdot a \cdot b \cdot (2D + a + 4\Delta a_1 + 2\Delta a_2) + \right. \\ \left. + \frac{\pi}{2} \gamma_{Fe} \cdot f_{Fe} \cdot c_{Fe} \cdot D^2 \cdot (2a + 1,5b + 3D + 4\Delta a_1 + 4\Delta a_2 + 2\Delta a_3 + 1,5\Delta b) \right] \quad (5.5-11)$$

5.53 Najjeftiniji transformator

Prema jednadžbi (5.5-11) određena je cijena transformatora kao funkcija glavnih dimenzija a , b , D . Isto tako poznato je iz jednadžbe (5.5-09) da postoji određeni odnos između snage i glavnih dimenzija, koji mora biti ispunjen. Iz tog razloga uvrstit ćemo iznos za a iz jednadžbe (5.5-09)

$$a = \frac{1}{b} \frac{P}{k_i D^2}$$

u jednadžbu za ukupnu cijenu (5.5-11). nadalje, uvesti ćemo slijedeće konstante materijala :

$$k_2 = \frac{3\pi}{4} \cdot \rho_{cu} \cdot l_{cu} \cdot c_{cu} \quad (5.5-12)$$

$$k_3 = \frac{\pi}{2} \cdot \rho_{Fe} \cdot l_{Fe} \cdot c_{Fe} \quad (5.5-13)$$

Jednadžba cijene sada glasi :

$$C = 3 \left[k_2 \cdot \frac{P}{k_1 D^2} \left(2D + \frac{P}{k_1 D^2} \cdot \frac{1}{b} + 4 \Delta a_1 + 2 \Delta a_2 \right) + k_3 D^2 \left(2 \frac{P}{k_1 D^2} \cdot \frac{1}{b} + 1,5b + 3D + 4 \Delta a_1 + 4 \Delta a_2 + 2 \Delta a_3 + 1,5 \Delta b \right) \right] \quad (5.5-14)$$

U ovoj jednadžbi je za određenu snagu P cijena transformatora funkcija od promjenljivih veličina: promjera stupa D i visine namota, dok su ostale veličine konstante ili ih smatramo da su una-prijed određene za određeni tip transformatora. Odredit ćemo optimalne iznose za D i b, kojima će odgovarati minimum cijene C.

Za minimalnu cijenu mora važiti uvjet :

$$\frac{\partial C}{\partial b} = 0 \quad ; \quad \frac{\partial C}{\partial D} = 0$$

$$\frac{\partial C}{\partial b} = 3 \left[-k_2 \left(\frac{P}{k_1 D^2} \right)^2 \frac{1}{b^2} + k_3 D^2 \left(2 \frac{P}{k_1 D^2} \cdot \frac{1}{b^2} + 1,5 \right) \right] = 0$$

$$\frac{2}{3} k_3 D^2 b^2 = k_2 \left(\frac{P}{k_1 D^2} \right)^2 + 2 k_3 D^2 \left(\frac{P}{k_1 D^2} \right)$$

$$b = \sqrt{\frac{2 k_2}{3 k_3 D^2} \left(\frac{P}{k_1 D^2} \right)^2 + \frac{4}{3} \left(\frac{P}{k_1 D^2} \right)} \quad (5.5-15)$$

Trebali bi još izvršiti parcijalnu derivaciju $\frac{\partial C}{\partial D} = 0$. Tada bi imali dvije jednadžbe sa nepoznicama D i b koje bi trebalo odrediti kao funkcije snage P. Ovako određeni D i b za određenu snagu transformatora su optimalne dimenzije, koje onda odgovaraju najmanjoj cijeni transformatora. Ovako provedeni račun (anali-tičko rješenje) izlazi vrlo složeno te ćemo ga zato izvršiti grafički. U ovom slučaju odredit ćemo cijene aktivnih materijala prema jednadžbi (5.5-14), tako da za razne promjere stupa D i za određenu snagu P uvrštavamo u jednadžbu (5.5-14) visinu namota b prema jednadžbi (5.5-15). Dobivena krivulja $c = f(D)$ ima svoj minimum, koji odgovara traženim optimalnim dimenzijama D_0 i b_0 .

Učinimo taj račun za transformatore za 110/10 kV, snage 7,5, 15, 30 i 60 MVA. Pretpostavimo slijedeće vrijednosti :

frekvencija:	$f = 50 \text{ Hz}$
specifična masa bakra:	$\gamma_{\text{Cu}} = 8900 \text{ kg/m}^2$
specifična masa transformatorskog lima:	$\gamma_{\text{Fe}} = 7550 \text{ kg/m}^3$
indukcija u željezu:	$B_m = 1,4 \text{ T}$
gustoća struje:	$j = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$
faktor punjenja jezgre:	$f_{\text{Fe}} = 0,75$
faktor punjenja namota:	$f_{\text{Cu}} = 0,35$
cijena transformatorskog lima:	$c_{\text{Fe}} = 440 \text{ Din/kg}$
cijena bakra:	$c_{\text{Cu}} = 1300 \text{ Din/kg}$

Iz iskustva znamo, da se može cijena uljnog transformatora razdijeliti na cijenu koja ovisi o masi jezgre i iznosi cca 1200.- dinara/kg, i na cijenu koja ovisi o masi namota i iznosi 3600.- dinara/kg.

$$\begin{aligned} \text{izolacioni razmaci: } \Delta a_1 &= 0,02 \text{ m}, & \Delta a_2 &= 0,065 \text{ m} \\ \Delta a_3 &= 0,07 \text{ m}, & \frac{\Delta b}{2} &= 0,15 \text{ m} \end{aligned}$$

Pomoću jednadžbe (5.5-15) i (5.5-14) dobijemo

$$C = f(D)$$

za razne snage.

Po zakonima sličnosti je promjer D proporcionalan $\sqrt[4]{P}$. Da svedemo te funkcije na jedan nazivnik, ucrtane su u sl. 5.5-02 funkcije

$$C = f(D/\sqrt[4]{P})$$

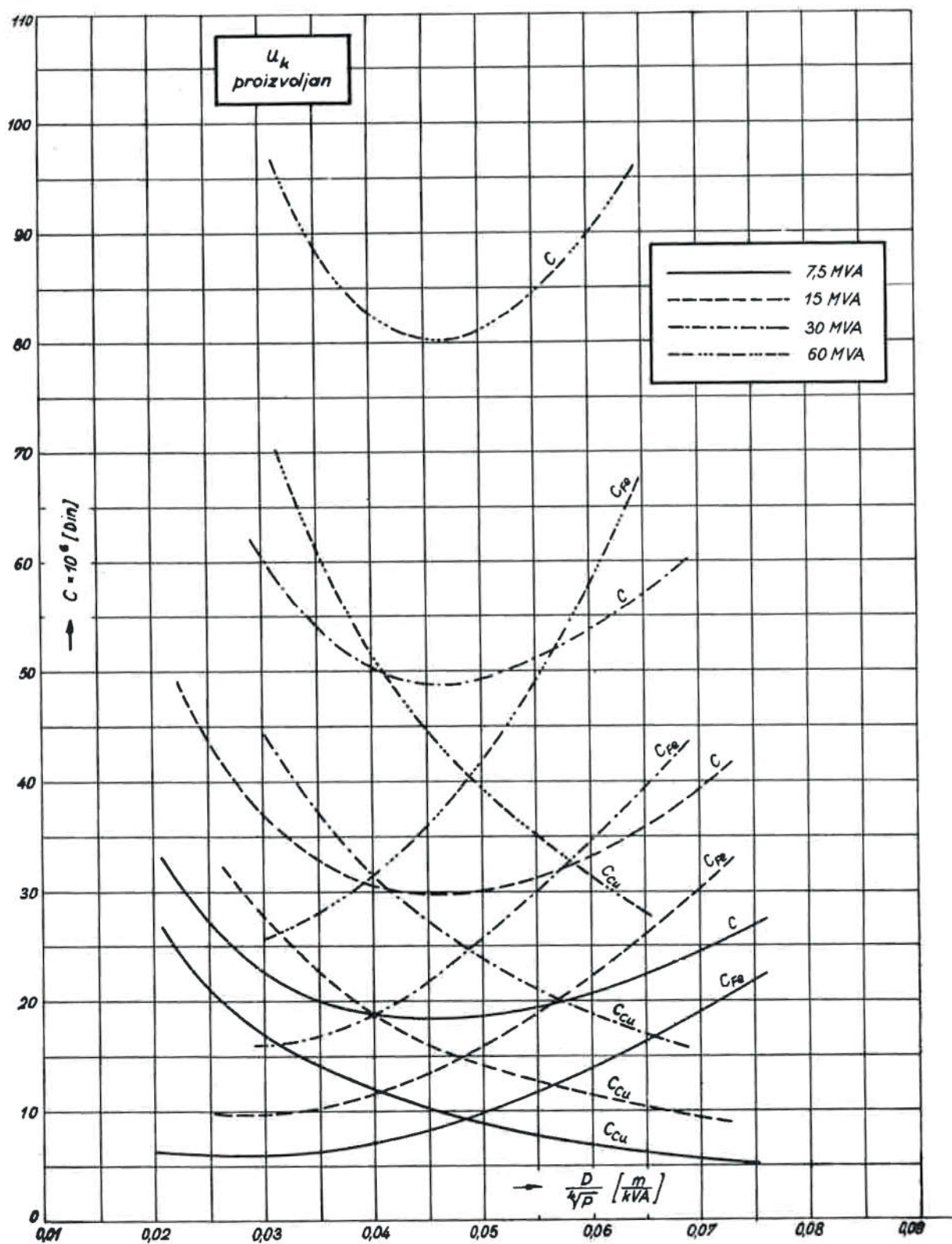
Iz tih dijagrama vidimo da minimum cijena svih transformatora leže na istoj apcisi $D/\sqrt[4]{P} = 0,047$, te da možemo za sve snage praktički dovoljno točno ustanoviti optimalni promjer za najjeftiniji transformator:

$$D_o = 0,047 \sqrt[4]{P} \quad [P = \text{kVA}] \quad [D_o = \text{m}]$$

5.54 Utjecaj napona kratkog spoja na glavne dimenzije transformatora

Do sada su bile razmatrane dimenzije uz uvjet da se dobiju minimalni proizvodni troškovi, bez obzira kakav će napon kratkog spoja u_k imati transformator izveden sa takvim dimenzijama. Napon kratkog spoja je međjutim uvijek unaprijed zadan uz ostale električke veličine, te ga treba uzeti u obzir pri odredjivanju glavnih dimenzija.

Pretpostavit ćemo $u_k = u_x$ jer je za veći transformator u_k znatno veći od u_x . Za cilindrični namotaj iznosi :



$$u_k = 7,92 \frac{f \cdot w_1^2 \cdot I_1}{E_1} \cdot \frac{\pi \cdot D_s}{b} \cdot \sigma_r \cdot 10^{-4} \quad [\%] \quad (5.5-16)$$

Ako u ovu jednadžbu uvrstimo iznose za :

$$I_1 = \Gamma \cdot \frac{S_{cu1}}{w_1} = \frac{\Gamma \cdot a \cdot b}{4 \cdot w_1} \cdot f_{cu}$$

$$E = 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot f_{Fe} \cdot \frac{D^2 \pi}{4} w_1$$

$$D_s = \left(D + \frac{a}{2} + \Delta\right) \quad \text{gdje je} \quad \Delta = 2\Delta a_1 + \Delta a_2$$

$$\sigma_r = \left(\Delta a_2 + \frac{a}{6}\right) = \sigma + \frac{a}{6}$$

Nakon uvrštenja dobivamo :

$$u_k = 7,92 \frac{4 \cdot f \cdot w_1^2 \cdot \Gamma \cdot a \cdot b \cdot f_{cu}}{4 \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot f_{Fe} \cdot D^2 \cdot \pi \cdot w_1^2} \cdot \frac{\pi \left(D + \frac{a}{2} + \Delta\right)}{b} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) 10^{-4}$$

$$u_k = 1,78 \frac{f_{cu}}{f_{Fe}} \frac{\Gamma \cdot a}{B_m \cdot D^2} \left(D + \frac{a}{2} + \Delta\right) \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) \cdot 10^{-4} \quad (5.5-17)$$

Iz ove jednadžbe vidimo da je u_k ovisan osim o električkim veličinama, indukciji B i gustoći struje Γ , također i o geometrijskim veličinama a , D , Δ i σ te da je neovisan o visini namota b i o snazi transformatora.

Poznavajući uz glavne električke veličine Γ , B_m i geometrijske dimenzije Δ i σ kao i faktore punjenja f_{cu} i f_{Fe} koje su određene naponom za koji se gradi transformator ili su pak iskustvene vrijednosti, možemo prema jednadžbi (5.5-17) odrediti dijagram $a = f(D)$ za $u_k = \text{konst.}$

Riješimo li jednadžbu (5.5-17) za D bit će :

$$D^2 - \frac{1,78 \cdot f_{cu} \cdot \Gamma \cdot a}{u_k \cdot f_{Fe} \cdot B_m} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) D - \frac{1,78 \cdot f_{cu} \cdot \Gamma \cdot a}{u_k \cdot f_{Fe} \cdot B_m} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) \left(\frac{a}{2} + \Delta\right) = 0$$

$$D^2 + pD + q = 0$$

$$D = -\frac{p}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{p}{2}\right)^2 - q}$$

$$D = \frac{1,78 \cdot f_{cu} \cdot \Gamma \cdot a}{2 \cdot u_k \cdot f_{Fe} \cdot B_m} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) \pm \sqrt{\left[\frac{1,78 \cdot f_{cu} \cdot \Gamma \cdot a}{2 \cdot u_k \cdot f_{Fe} \cdot B_m} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right)\right]^2 + \frac{1,78 \cdot f_{cu} \cdot \Gamma \cdot a}{2 \cdot u_k \cdot f_{Fe} \cdot B_m} \left(\sigma + \frac{a}{6}\right) \left(\frac{a}{2} + \Delta\right)} \quad (5.5-18)$$

(5.5-18)

Poznavajući odnos $a = f(D)$ možemo prema jednadžbi (5.5-09) odrediti i odnos $b = f(D, P)$, te zatim za razne snage nacrtati dijagram $C = f(D)$. Ako svedemo opet te funkcije za različite snage na jedan nazivnik ($\sqrt[4]{P}$), kako je to prikazano u dijagramu u sl. 5.5-03 možemo iz dijagrama razabrati da se može za sve snage otprilike ustanoviti optimalni promjer za najjeftiniji transformator od 110 kV, $u_k = 11\%$ pomoću jednadžbe :

$$D_0 = 0,048 \sqrt[4]{P}$$

Dakle je optimalni promjer za oca 2 % veći, ako se traži $u_k = 11\%$. Pogledajmo sada kako utiče promjena specifičnih opterećenja željeza i bakra na optimalni promjer stupa. Uzmimo četiri slučaja :

- | | |
|-----------------|------------------------|
| a. $B' = B$ | $\Gamma' = \Gamma$ |
| b. $B' = B$ | $\Gamma' = 1,1 \Gamma$ |
| c. $B' = 1,1 B$ | $\Gamma' = \Gamma$ |
| d. $B' = 1,1 B$ | $\Gamma' = 1,1 \Gamma$ |

U sl. 5.5-04 ucrtani su dijagrami za gornje slučajeve za transformator za 15 MVA, 110 kV i $u_k = 11\%$. Iz tog dijagrama se vidi, da povećanje specifičnog opterećenja za 10 % samo u bakru ili samo u željezu praktički ne mijenja optimalni promjer D_0 , dok kod povećanja specifičnog opterećenja u bakru i željezu za 10 %, dobijemo smanjenje optimalnog promjera za cca 5 %. Sve u svemu dolazimo do zaključka, da je uticaj specifičnih opterećenja relativno malen.

Postavimo sada još pitanje, koliki je optimalni promjer za najlakši transformator sa najmanjim gubicima? Rješenje tog pitanja nadjemo vrlo jednostavno. Dijagram u sl. 5.5-03 se zasniva na pretpostavci da je kilogram namota tri puta skuplji od kilograma jezgre. Ako, dakle, u spomenutom dijagramu snizimo ordinate krivulje, koja pokazuje cijenu namota, na jednu trećinu i zbrojimo sa krivuljom cijene jezgre, dobijemo rezultirajuću krivulju, koja u jednom određenom mjerilo pokazuje težinu transformatora u ovisnosti od promjera. U sl. 5.5-05 ucrtana je ta krivulja, koja pokazuje za transformator od 15 MVA snage optimalni promjer od cca 0,45 m, odnosno $D_0 = 0,041 \cdot \sqrt[4]{P}$.

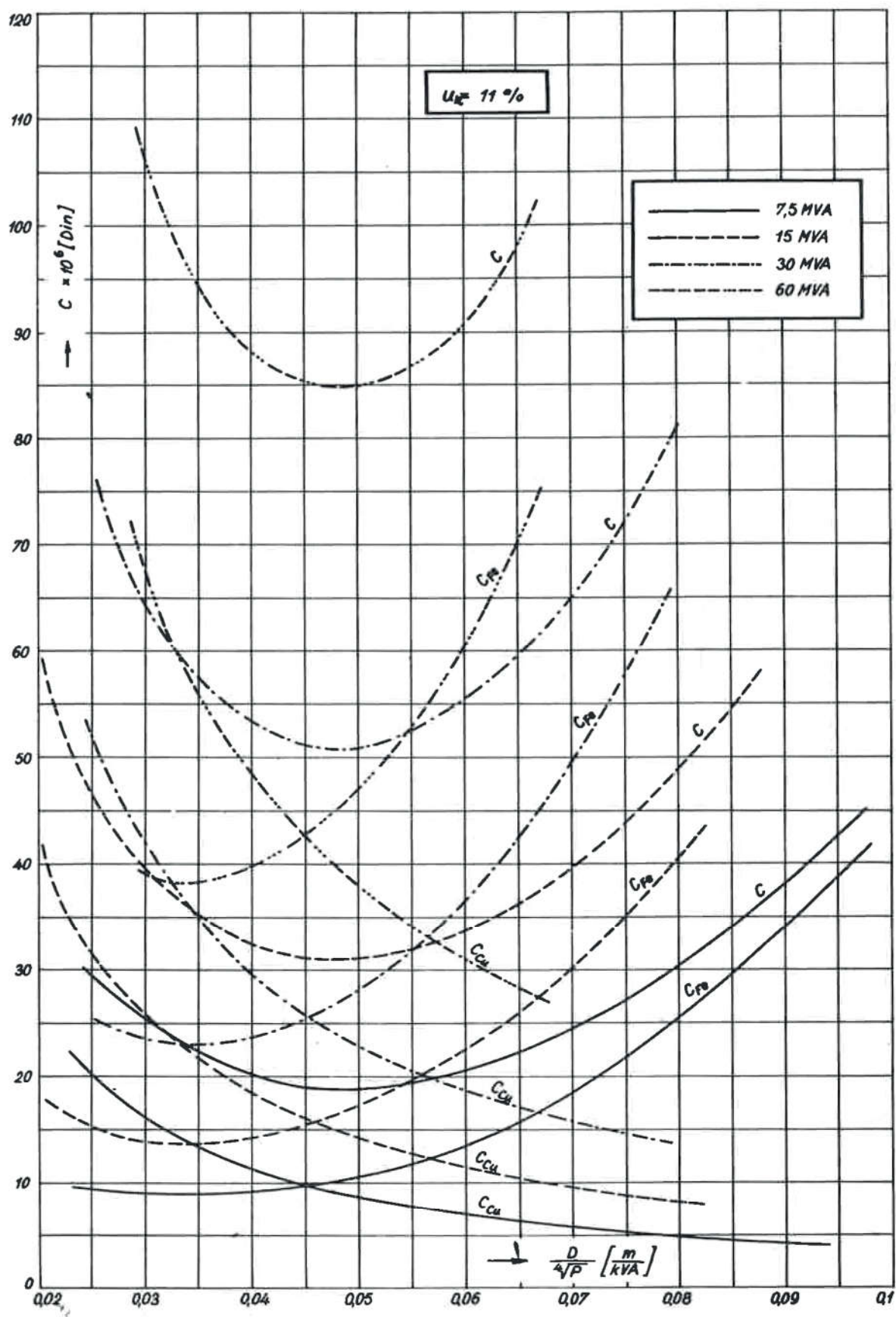
Kod specifičnog opterećenja od $3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ iznašaju specifični gubici u bakru prema stranici 33/I :

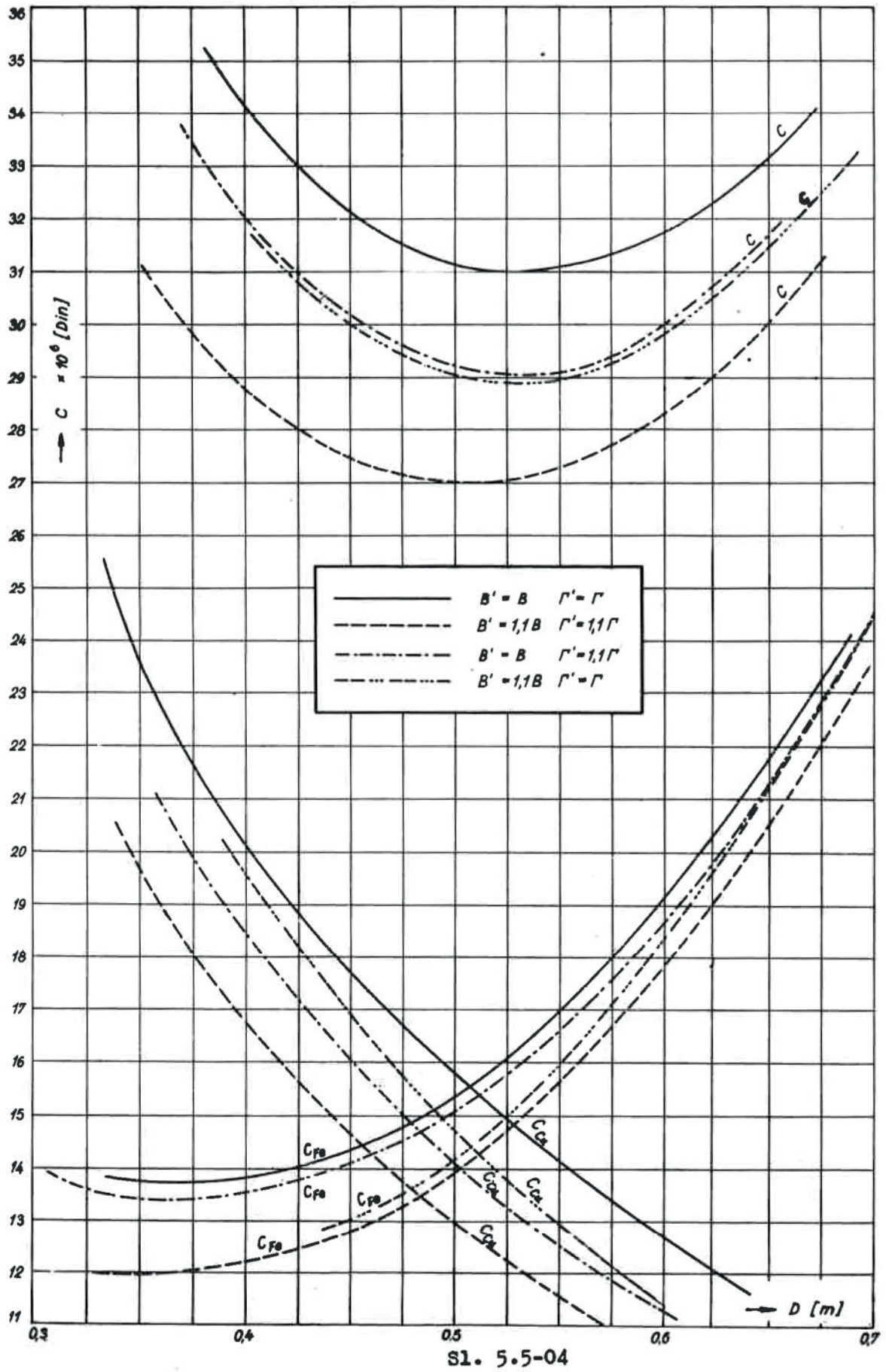
$$2 \cdot 4 \cdot 10^{-2} \Gamma^2 = 21,6 \text{ W/kg}$$

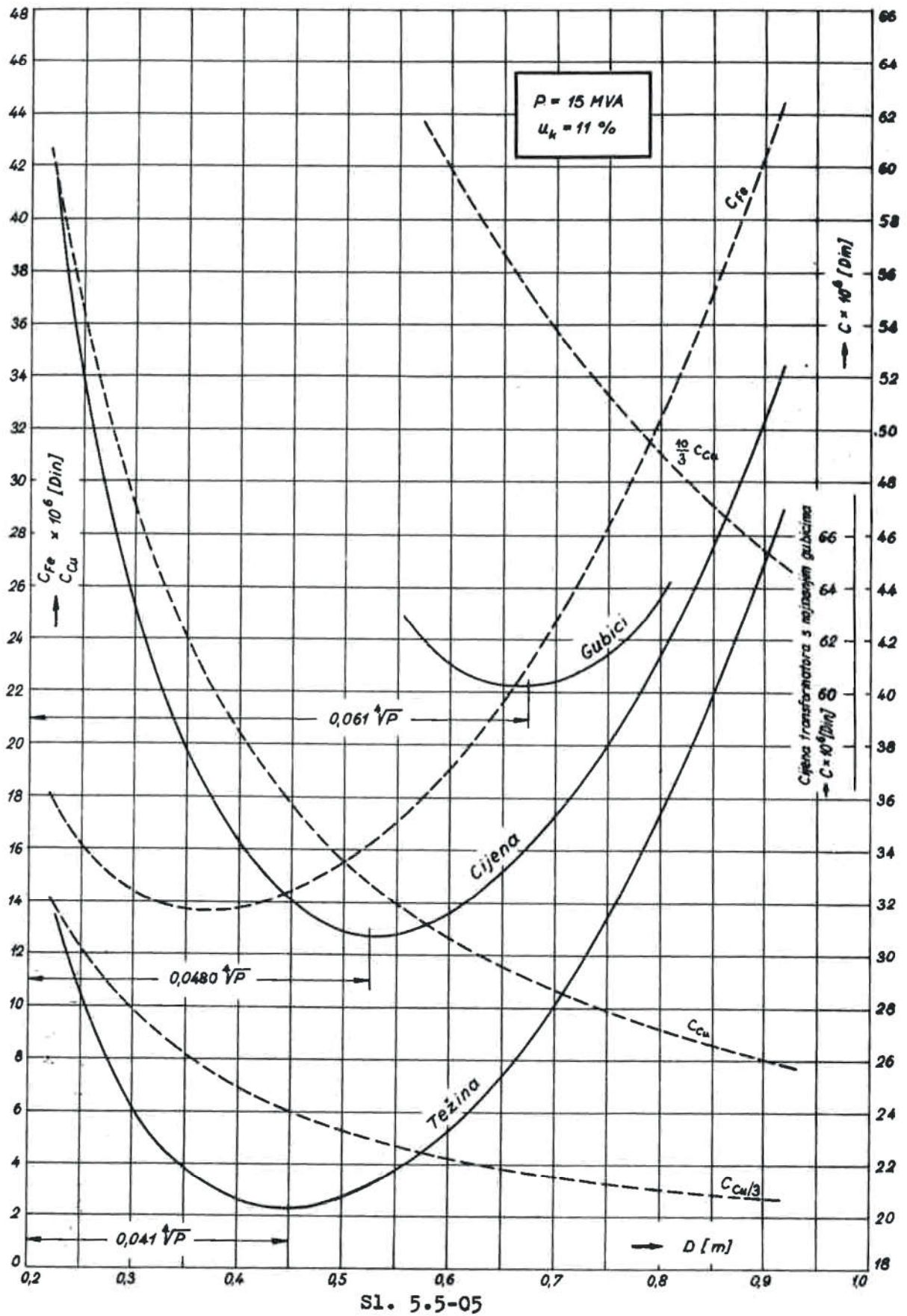
Kod specifičnog opterećenja od 1,4 T i kod normalnog toplo valjanog lima sa 1,1 W/kg kod 1 T, iznašaju specifični gubici u željezu :

$$1,1 \cdot 1,4^2 = 2,16 \text{ W/kg}$$

Prema tome su specifični gubici u bakru po jedinici mase deset puta veći od specifičnih gubitaka u željezu. Ako sada analogno kao prije povisimo ordinate krivulje za bakar $C_{Cu}/3$ na deseterostruku vrijednost i zbrojimo je sa krivuljom za željezo C_{Fe} u sl. 5.5-05, dobijemo na rezultirajućoj krivulji optimalni promjer za najmanje gubitke sa $D_0 = 0,675 \text{ m}$, odnosno $D_0 = 0,061 \cdot \sqrt[4]{P}$.







Iz toga možemo povući pouku, da je za snagu od 15 MVA i 110kV optimalni promjer jezgre za najlakši transformator oca 14 % manji od optimalnog promjera za najjeftiniji transformator, dok je optimalni promjer za transformator za najmanje gubitke za 28 % veći.

5.6 Ekonomika u gradnji transformatora

5.61 Općenito

U prethodnom poglavlju rješavali smo pitanje najjeftinijeg transformatora no time još nije riješeno pitanje najekonomičnijeg transformatora. U ekonomiku ulazi ne samo cijena transformatora, već i svi troškovi pogona. Najekonomičniji je onaj transformator, čiji ukupni godišnji troškovi su najniži.

Godišnje troškove dijelimo na stalne i promjenljive.

Stalni troškovi su:

- a) Kamati na uloženi kapital
- b) Otpisi (amortizacija)
- c) Troškovi za električnu energiju za gubitke u željezu
- d) Drugi poredni troškovi odnosno troškovi za uzdržavanje kao npr. troškovi prostorijske u kojoj je smješten transformator.

Ako se mora u svakom slučaju smjestiti transformator u zgradu troškovi su za prostorijske znatno veći za uljni transformator nego za suhi, jer je uljni transformator požarno vrlo opasan radi ulja, pa treba zato predvidjeti dodatne uređaje. Ako se međjutim, npr. kod većih transformatora, mogu isti postaviti na slobodnom prostoru, onda ima uljni transformator manje troškove, jer suhi ne možemo postaviti na slobodnom prostoru.

Promjenljivi troškovi su:

- a) Troškovi za električnu energiju za gubitke u bakru, koji ovise o teretu, pa su zato promjenljivi.

U slijedećem razmatranju ćemo obraditi samo uljne transformatore, pa ne ćemo voditi računa o stavci d) tj. o porednim troškovima jer su ovi uvijek isti.

Kamati kao i otpisi računaju se u postocima od investicija, tj. od uloženog kapitala.

Jedne i druge skupa označujemo kao kapitalne troškove. Otpisi imaju za svrhu da se vrijednost transformatora otpiše u vremenu u kojem se računa da se transformator istroši, kako bi se mogao nabaviti novi. Ako se npr. računa sa životnom dobí od 20 god., onda se mora godišnje otpisati 5 % od vrijednosti transformatora. Osim toga treba uzeti u obzir i kamate. U tabeli 1 izračunati su postoci za otpise i kamate. Ako npr. tražimo kapitalne troškove za otpis na 20 god. uz kamate od 5 % dobijemo, prema tabeli 1 godišnje kapitalne troškove od 8,024 % ili okruglo 8 %.

Račun cijene za potrošak električne energije za gubitke je vrlo složen. Cijena električne energije se dijeli na cijenu instalirane snage (din/kW) i na cijenu potrošene energije (din/kWh). Te cijene ovise i o tome na kojem mjestu je transformator priključen. U našoj zemlji računa se za 110 kV distributne transformatore

otprilike 25 000 din/kW i 2 din/kWh a za 10 kV distributivne transformatore 55 000 din/kW i 2,5 din/kWh. U Njemačkoj računa-ju za 10 kV distributivne transformatore sa 100 DM/kW i 0,05 DM/kWh. U problematiku ovog računa se ne ćemo upuštati, jer je ona predmet obrade tarifne politike.

T a b e l a 1

K a p i t a l n i t r o š k o v i

Kamati %	G o d i n e o t p i s a			
	10 god.	15 god.	20 god.	25 god.
	% od uloženog kapitala			
5	12,950	9,634	8,024	7,095
6	13,587	10,296	8,718	7,823
7	14,238	10,979	9,439	8,581
8	14,903	11,683	10,185	9,368
9	15,582	12,406	10,955	10,181
10	16,275	13,147	11,746	11,017

Pitanje troškova transformatora je u uskoj vezi sa gubicima u transformatoru. Možemo graditi transformator koji kraj istih ukupnih gubitaka ima veće gubitke u bakru i manje u željezu ili obrnuto. Pitajmo se najprije, kako omjer gubitaka u bakru i željezu uopće utiče na faktor korisnosti transformatora? Razmatrajmo najprije to pitanje za određeni transformator koji je stalno opterećen konstantnim teretom, i mijenjajmo taj omjer time, da ga više ili manje opteretimo.

5.62 Faktor korisnosti u ovisnosti od tereta

Označimo omjer gubitaka u bakru (P_{Cu}) prema gubicima u željezu (P_{Fe}) sa —

$$\frac{P_{Cu}}{P_{Fe}} = \xi$$

i pitajmo se, kod kojeg tereta će biti faktor korisnosti jednog određenog transformatora najbolji.

$$\eta = \frac{P}{P + P_{Fe} + P_{Cu}}$$

Ako x puta promijenimo teret, mijenjaju se gubici u bakru x^2 puta, dok gubici u željezu ostanu nepromijenjeni. Potražimo sada najbolji η :

$$\eta = \frac{P x}{P x + P_{Fe} + P_{Cu} x^2} = \frac{u}{v}$$

$$\frac{d \cdot \eta}{d \cdot x} = \frac{v \cdot \frac{d \cdot u}{d \cdot x} - u \cdot \frac{d \cdot v}{d \cdot x}}{v^2} = 0$$

$$v \frac{d \cdot u}{d \cdot x} - u \frac{d \cdot v}{d \cdot x} = 0$$

$$P(P \cdot x + P_{Fe} + P_{Cu} x^2) = x P(P + 2x P_{Cu})$$

$$P_{Fe} = x^2 P_{Cu}$$

Dakle, najbolji faktor korisnosti ima svaki transformator kod onog opterećenja, kada su mu gubici u željezu jednaki gubicima u bakru:

$$P_{Fe} = P_{Cu} \quad (5.6-01)$$

Riješili smo time pitanje transformatora, koji je konstantno opterećen nominalnom snagom. Međutim, u ogromnoj većini slučajeva je to drugačije.

5.63 Transformator sa promjenljivim teretom

Svi transformatori u mreži su stalno pod naponom i zato su i gubici u željezu trajni, dok se teret veoma mijenja, pa su gubici u bakru ovisno o kvadratu tereta, pa računajući gubitke za cijelu godinu dobijemo :

$$W_g = W_{Fe} + W_{Cu} \quad [kWh/god] \quad (5.6-02)$$

$$W_{Fe} = T P_{Fe} \quad (T = 8760 \text{ sati})$$

$$W_{Cu} = \int_0^T P_{Cu_n} \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 dt = P_{Cu_n} \int_0^T \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 dt$$

Postavimo:

$$A = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{P}{P_n} \right)^2 dt \quad (5.6-03)$$

i dobijemo:

$$(5.6-04)$$

$$W_{Cu} = P_{Cu_n} \cdot T \cdot A$$

Ako je transformator stalno nominalno opterećen onda je $A = 1$, a ako je manje opterećen onda je A odgovarajuće manji. Zato zovemo A koeficijent opterećenja.

Kod razdijelnih transformatora u industriji i većim gradovima znamo iz iskustva da je koeficijent opterećenja cca $1/3$, u selima, gdje seljak ide rano spavati, a preko dana je transformator opterećen samo za vrijeme vršidbe, koeficijent opterećenja je čak cca $1/6$. Za isto toliko puta su prema jednadžbi (5.6-04) godišnji gubici u bakru manji. Ako sada postavimo pitanje, kada su za određeni transformator kod promjenljivog tereta ukupni godišnji gubici najmanji a time i godišnji faktor korisnosti najbolji, onda bez sumnje vrijede i za taj slučaj jednadžbe u pogl. 5.62 time, da se umjesto snage (P) piše godišnja energija (W), pa se dolazi do zaključka, da su ukupni godišnji gubici najmanji onda, kada su godišnji gubici u željezu jednaki godišnjim gubicima u bakru tj.

$$W_{Fe} = W_{Cu} \quad (5.6-05)$$

$$P_{Fe} \cdot T = P_{Cu} \cdot T \cdot A$$

Do istog rezultata možemo doći na drugi način tako da odredimo kada su godišnji gubici po jedinici korisne prividne snage, tj. njihovi specifični gubici, najmanji

$$\frac{W_g}{P} = \frac{W_{Fe} + W_{Cu}}{P} = \text{minimum} \quad (5.6-06)$$

U sl. 5.6-01 prikazan je dijagram godišnjih gubitaka u ovisnosti od opterećenja transformatora

$$W_g = W_{Fe} + W_{Cu} = f(P)$$

Godišnji gubici u željezu (W_{Fe}) su neovisni od opterećenja i zato prikazani sa pravcem "a" koji je paralelan sa apcismom.

Godišnji gubici u bakru (W_{Cu}) su proporcionalni kvadratu tereta (P) i prikazani parabolom "Cu"b".

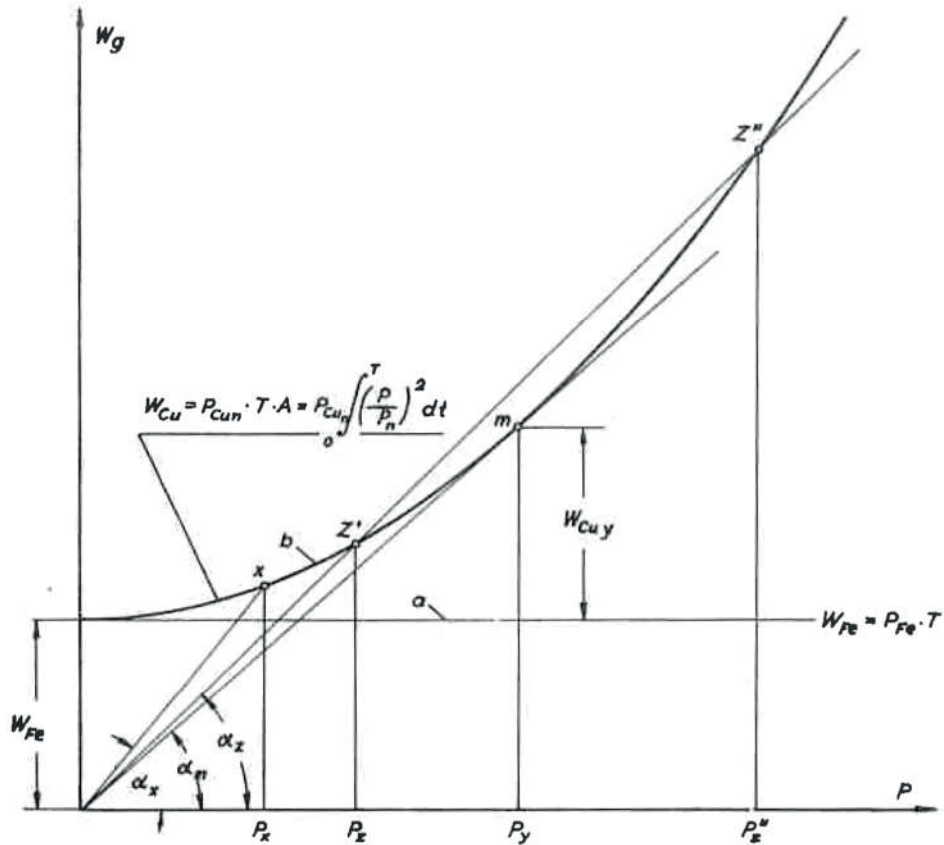
Pretpostavljamo da je faktor opterećenja A konstantan, jer razmatramo konkretan pogonski slučaj. Svakom teretu P_x odgovara na paraboli točka x , koja sa svojom ordinatom pokazuje tom teretu pripadajuće godišnje gubitke. Specifični gubici za taj teret P_x jednaki su :

$$\frac{W_{gx}}{P_x} = \text{tg } \alpha_x \quad (5.6-07)$$

Specifični gubici su najmanji, kada je $\text{tg } \alpha$ najmanji, odnosno kada je kut α najmanji, a to je kut α_m , koji pripada tangenti iz nul-točke koordinatnog sistema na parabolu, koju tangira u točki m.

Može se dokazati da su u točki m parabole, u kojoj suptangenta iz ishodišta koordinatnog sistema dotiče parabolu, godišnji gubici u bakru (W_{Cu}) jednaki godišnjim gubicima u željezu (W_{Fe})

$$W_{Cu} = W_{Fe}$$



Sl. 5.6-01

Ako idemo po paraboli iz točke "y" natrag ili naprijed, nailazimo uvijek na dvije točke sa istim kutem α , tj. sa istim specifičnim gubicima. U dijagramu ucrtane su dvije takve točke Z' i Z'' kojima odgovaraju tereti P_z' i P_z'' , kod kojih su specifični gubici isti. Može se dokazati dalje da je :

$$P_z' \cdot P_z'' = P_m^2 \quad (5.6-08)$$

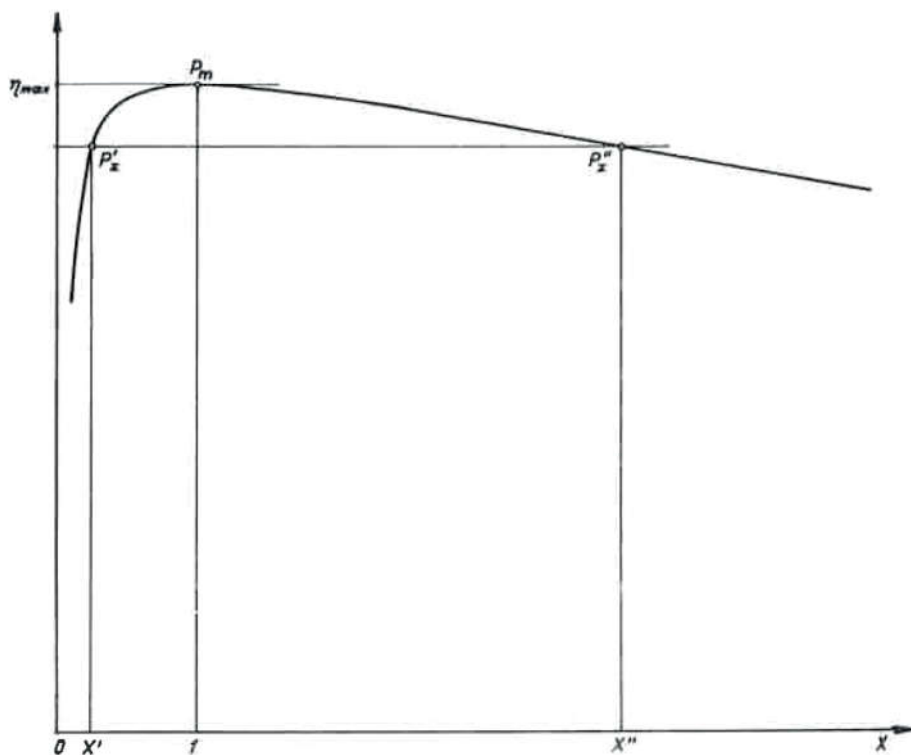
Prema tome, jednako se isplati raditi sa većim P_z'' ili odgovarajuće manjim teretom P_z' , jer su specifični gubici u oba slučaja jednako veći.

Ovaj dijagram prema sl. 5.6-01 vrijedi naravno jednako za godišnje gubitke kao i za momentane gubitke. Iz ovog dijagrama slijedi

zanimljiv zaključak za krivulju faktora korisnosti u ovisnosti od tereta. Ona je određena sa točkom "m" maksimalnog faktora korisnosti za onaj pogonski slučaj, kod kojeg su gubici u bakru jednaki gubicima u željezu. Od te točke na obe strane pada faktor korisnosti tako, da su snage sa jednakim faktorom korisnosti određene jednačinom (5.6-08). Sama krivulja faktora korisnosti određena je zakonom sličnosti prema jednačini:

$$\eta = \frac{P_m \cdot x}{P_m x + P_{Fe} + P_{Cu} x^2} = \frac{100}{100 + \frac{P_{Fe}}{x} + P_{Cu} x} \quad (5.6-09)$$

$$P_{Fe} = 100 \frac{P_{Fe}}{P_m}; \quad P_{Cu} = 100 \frac{P_{Cu}}{P_m}$$



Sl. 5.6-02

Ako P_m označuje teret kod kojeg su gubici u bakru jednaki gubicima u željezu, onda je za maksimalni faktor korisnosti $x = 1$, $P_{Fe} = P_{Cu}$, te dobijemo :

$$\eta = \frac{100}{100 + P_{Fe} \left(\frac{1}{x} + x \right)}$$

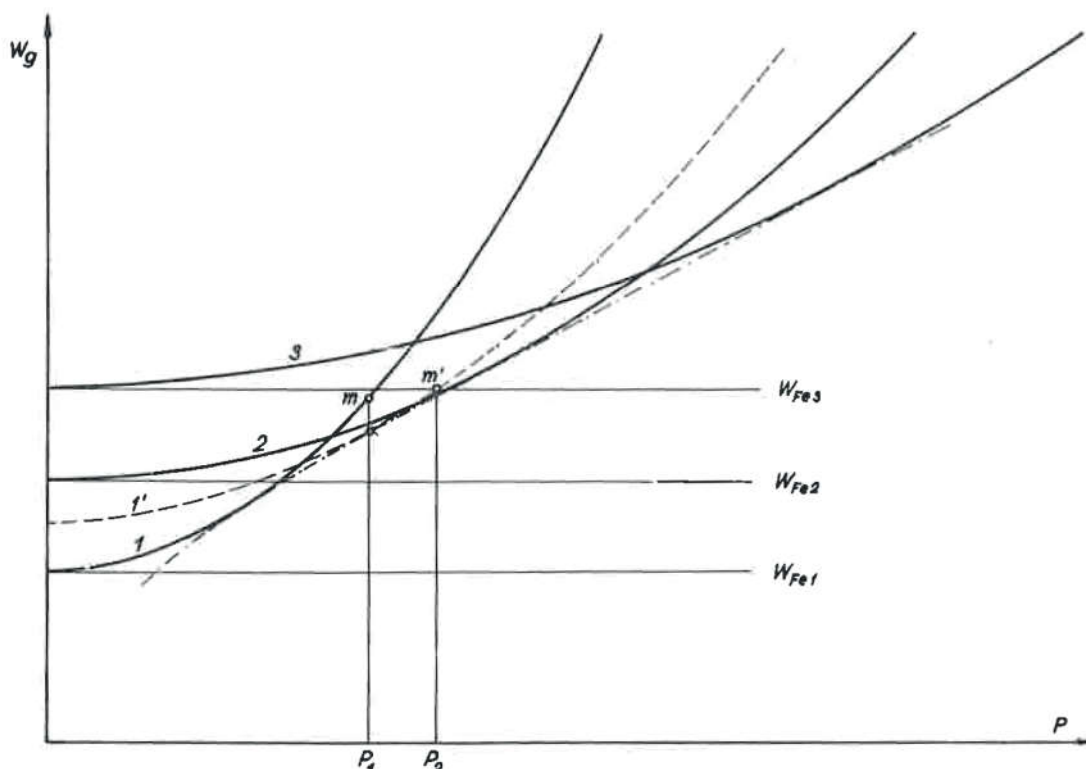
Za $x' \cdot x'' = 1$, dobijemo jednake faktore korisnosti, kako to vidimo u sl. 5.6-02.

Prema tome je sa gubicima u željezu krivulja faktora korisnosti već određena.

5.64 Najekonomičniji transformator za određeni teret.

Sva ova razmatranja vrijede samo za jedan određeni transformator određenih dimenzija, za kojeg se pitamo, kod kojeg tereta on najekonomičnije radi ? Međutim, u praksi je obično obrnuti slučaj, jer redovito imamo određeni teret pa se pitamo, koji transformator od cijelog niza sličnih transformatora, no različitih snaga, predstavlja najekonomičniji transformator za taj određeni teret.

Nacrtajmo još jedanput dijagram godišnjih troškova u ovisnosti od opterećenja, tj. $W = f(P)$, kako smo to nacrtali u sl. 5.6-01, no s tom razlikom da nacrtamo u istu sliku više dijagrama za više sličnih transformatora različitih snaga, te tako dobijemo sl. 5.6-03.



Sl. 5.6-03

Kod toga smo morali uzeti u obzir, da raste snaga sa 4. potencijom linearnih dimenzija, dok gubici rastu 3. potencijom linearnih dimenzija, odnosno, da se gubici mijenjaju sa $3/4$. potencijom snage transformatora.

Ako gledamo tu porodiču krivulja za transformatore raznih nominalnih snaga, onda vidimo da minimalne gubitke predstavlja zapravo envelope tih krivulja, koja je u toj slici crtkano ucrtana. Za određeni transformator, koji je prikazan u tom dijagramu sa krivuljom 1, dobijemo pomoću tangente iz ishodišta točku m , kojoj odgovara teret P_1 . Za taj transformator predstavlja prema tome teret P_1 onaj teret, kod kojeg transformator ima najmanje specifične gubitke. Ako međutim, gledamo na envelope, onda vidimo, da ima jedan veći transformator kod tog istog tereta još manje gubitke, svakako kod jednog manjeg omjera gubitaka u bakru prema gubicima u željezu. Pitamo se, kod kojeg omjera je to slučaj.

Možemo napisati općenitu jednadžbu za specifične gubitke

$$\gamma = \lg \alpha = \frac{a \cdot P^{3/4} + b \cdot P^{3/4} \cdot x}{x \cdot P} = \frac{a \cdot P^{3/4} + b \cdot P^{3/4} \left(\frac{P_t}{P} \right)^2}{P_t}$$

- a - konstanta za gubitke u željezu
- b - konstanta za gubitke u bakru
- P - promjenljiva nominalna snaga
- x P_t - teret = P_t = konstanta (jer tražimo najpovoljniju nominalnu snagu za određeni teret P_t)

Ako tražimo najmanje gubitke, dobijemo deriviranjem :

$$\gamma = \frac{3}{4} a \cdot P^{-1/4} - \frac{5}{4} b \cdot P^{-5/4} \cdot P_t^2 = 0 \quad P = \sqrt{\frac{5}{3} \frac{b P_t^2}{a}}$$

odnosno omjer gubitaka:

$$\frac{P_{cu}}{P_{Fe}} = \frac{b \cdot \frac{P_t^{3/4}}{P_t^2} \cdot P_t^2}{a \cdot P_t^{3/4}} = \frac{b \cdot P_t^2}{a \cdot P_t^2} = \frac{b \cdot P_t^2}{a \left(\frac{5}{3} \cdot \frac{b P_t^2}{a} \right)} = \frac{3}{5}$$

Dakle, od niza sličnih transformatora će za određeni teret raditi sa najmanjim specifičnim gubicima onaj transformator, kod kojeg bude kod tog tereta omjer gubitaka jednak $5/3$.

Pouka iz tog razmatranja je slijedeća:

Ako za određeno konzumno područje tražimo najekonomičniju nominalnu snagu transformatora, onda će to biti onaj transformator, koji kod tog tereta ima omjer stalnih gubitaka prema promjenljivim gubicima jednak $5/3$. Kod projektiranja tog transformatora ćemo, međutim, dimenzionirati rashladni uređaj transformatora tako, da bude sposoban raditi do omjera gubitaka $1/1$, jer ako je transformator već postavljen, moramo računati s time, da ga se isplati dalje opterećivati

barem 10 omjera gubitaka 1/1, jer do te točke njegovi specifični troškovi padaju, iako bi veći transformator imao još manje specifične troškove. Prema tome će nominalna snaga transformatora biti određena s omjerom gubitaka 1/1.

5.65 Usporedjivanje ekonomičnosti transformatora iste snage no različitih cijena i različitih gubitaka

Često dolazimo u situaciju da trebamo usporedjivati ekonomičnost transformatora iste snage ali različitih cijena i gubitaka. Jedan je jeftiniji, dok drugi ima manje gubitke. U takovom slučaju postupamo na taj način, da jednostavno troškove za gubitke kapitaliziramo. Izračunamo onu vrijednost kapitala koju treba uložiti na dan nabave odnosno stavljanja u pogon transformatora, da možemo s njime i njegovim kamatima platiti sve troškove za gubitke za vrijeme životne dobi transformatora, i taj iznos pribrojimo cijeni transformatora. Razlog za različite gubitke može ležati u različitoj konstrukciji ili u primjeni raznih kvaliteta materijala. Promotrimo npr. danas jako aktuelno pitanje transformatora sa hladno valjanim limovima. Hladno valjani limovi su za cca 55 % skuplji od toplo valjanih limova, no s druge strane imaju manje gubitaka. Tako npr. imamo u Njemačkoj standardizirane transformatore sa većim i manjim gubicima u željezu. Uzmimo dva transformatora od 200 kVA snage i 20 kV napon za koje vrijede slijedeći podaci :

	I		II	
Gubici u praznom hodu	0,95	kW	0,57	kW
Gubici u bakru	3,9	kW	3,6	kW
Nabavna cijena	4560	DM	5320	DM

Transformator I ima jezgru iz toplo valjanog lima, a II iz hladno valjanog lima.

Ako hoćemo gubitke transformatora kapitalizirati, postupamo na isti način kako smo to objasnili već u pogl. 5.61, samo obrnuto. Izračunamo naime godišnje troškove za gubitke i iste preračunamo na svotu, tj. na kapital, kojeg bi morali uložiti prvu godinu, a da bi za cijelo vrijeme životne dobi transformatora bili svi gubici unaprijed plaćeni. Računajmo opet sa životnom dobí od 20 godina i sa kamatima od 5 %, pa onda godišnji troškovi iznašaju 8 % od kapitala, odnosno obrnuto, kapital mora biti za $100/8 = 12,5$ puta veći od godišnjih troškova.

Kapitalizirani gubici u željezu i bakru kod cijene za snagu od 100 DM/kW prema tome iznašaju, pod pretpostavkom da je transformator stalno pod naponom i da je koeficijent opterećenja $A = 1/3$:

$$\begin{aligned}
 K_{Fe \text{ I}} &= 0,95 \cdot (100 + 8760 \cdot 0,05) \cdot 12,5 = 6500 \text{ DM} \\
 K_{Fe \text{ II}} &= 0,57 \cdot (100 + 8760 \cdot 0,05) \cdot 12,5 = 3820 \text{ DM} \\
 K_{Cu \text{ I}} &= 3,9 \cdot (100 + 1/3 \cdot 8760 \cdot 0,05) \cdot 12,5 = 11\,900 \text{ DM} \\
 K_{Cu \text{ II}} &= 3,6 \cdot (100 + 1/3 \cdot 8760 \cdot 0,05) \cdot 12,5 = 11\,000 \text{ DM}
 \end{aligned}$$

Ako pribrojimo kapitalizirane gubitke cijenama razmatranih transformatora, dobijemo:

	I	II
Cijena	4 560 DM	5 320 DM
Kapital. gubici F_{C_u}	6 400 DM	3 820 DM
Kapital.gubici C_u	11 900 DM	11 000 DM
	22 860 DM	20 140 DM

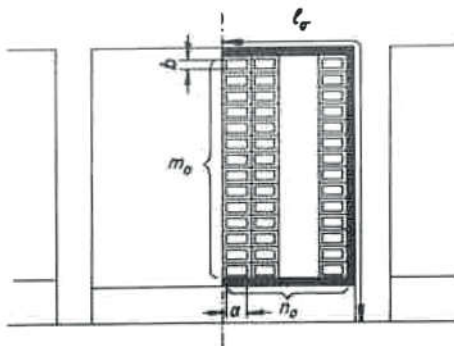
i vidimo da je transformator II sa višom cijenom ipak ekonomičniji puno povoljniji.

Međutim, treba naglasiti da je teško radi troškova, koji nastaju u vremenskom razdoblju gledano 20 godina unaprijed, odmah platiti veću cijenu za transformatore. U gornjem slučaju bi mogao drugi transformator biti za 70 % skuplji, a da bi još uvijek bio ekonomičniji. Zato se danas praktički kapitalizira gubitke na manji broj godina. Njemačke norme se zasnivaju na računici sa 6,7 godina umjesto 20 godina, pa se onda godišnji troškovi pomnože samo sa faktorom 5,55 umjesto 12,5. Naravno, još uvijek izlazi II transformator za 210 DM jeftiniji od I.

Iz gornjeg razmatranja jasno slijedi, kako se kod uspoređivanja transformatora gubici uzimaju u obzir. Sa kojim kamatima se računa i za koliko godina, to je pitanje interesa na kapitalu i gledanja unaprijed, u što na ovom mjestu ne možemo ulaziti.

5.7 Dodatni gubici u bakru

Za namotaj transformatora ne predstavlja problem samo visoki napon koji traži velike izolacione razmake, već i niski napon, koji traži velike struje, time velike presjke vodiča, što ima za posljedicu dodatne gubitke u bakru. Do dodatnih gubitaka dolazi uslijed rasipnog polja, za koje smo vidjeli u pogl. 5.4 da prolazi kroz cijeli namot, pa prema tome i kroz svaki vodič namota. Što je veći presjek vodiča, to više magnetskih silnica prolazi kroz njega, to različitiji je induktivni otpor vodiča sa jedne i druge njegove strane. Razlika impedancija ima za posljedicu nejednaku raspodjelu struje po presjeku vodiča, te tako dolazi do povećavanja gubitaka. Već kod proračuna rasipanja smo pojednostavnili sliku magnet-skog polja na taj način, da smo pretpostavili da sve silnice idu kroz namot paralelno sa rasporedom između visokonaponskog i niskonaponskog namota, pa ako tu sliku kod razmatranja ovog problema zadržimo, dobijemo po Vidmaru faktor povećanja gubitaka (k_d) sa slijedećom jednačinom :



Sl. 5.7-01

$$k_d = 1 + \frac{16}{45} \left(\frac{m \cdot b \cdot f}{p \cdot 10^3 \cdot l_e} \right)^2 (5n^2 - 1) (a \cdot 10^2)^4$$

Pojedine veličine iz te jednadžbe prikazane su na sl. 5.7-ol. Po-
moću faktora k_d računamo stvarne gubitke u bakru sa emskim otporom
mjeranim istosmjernom strujom po slijedećoj relaciji:

$$R_x = k_d \cdot I^2 R$$

6. TRANSFORMATOR U POGONU

6.1 Paralelni rad transformatora

Paralelni spoj dvaju ili više transformatora se ostvaruje spaja-
njem istoimenih stezaljki visokonaponske strane svih transformato-
ra na odgovarajuće faze visokonaponske mreže i spajanjem istoime-
nih stezaljki niskonaponske strane svih transformatora na odgova-
rajuće faze niskonaponske mreže, kako to prikazuje sl.6.1-ol za
slučaj spoja dvaju transformatora. Paralelni rad se može vršiti
preko sabirnica (sl. 6.1-ol) ili preko mreže.

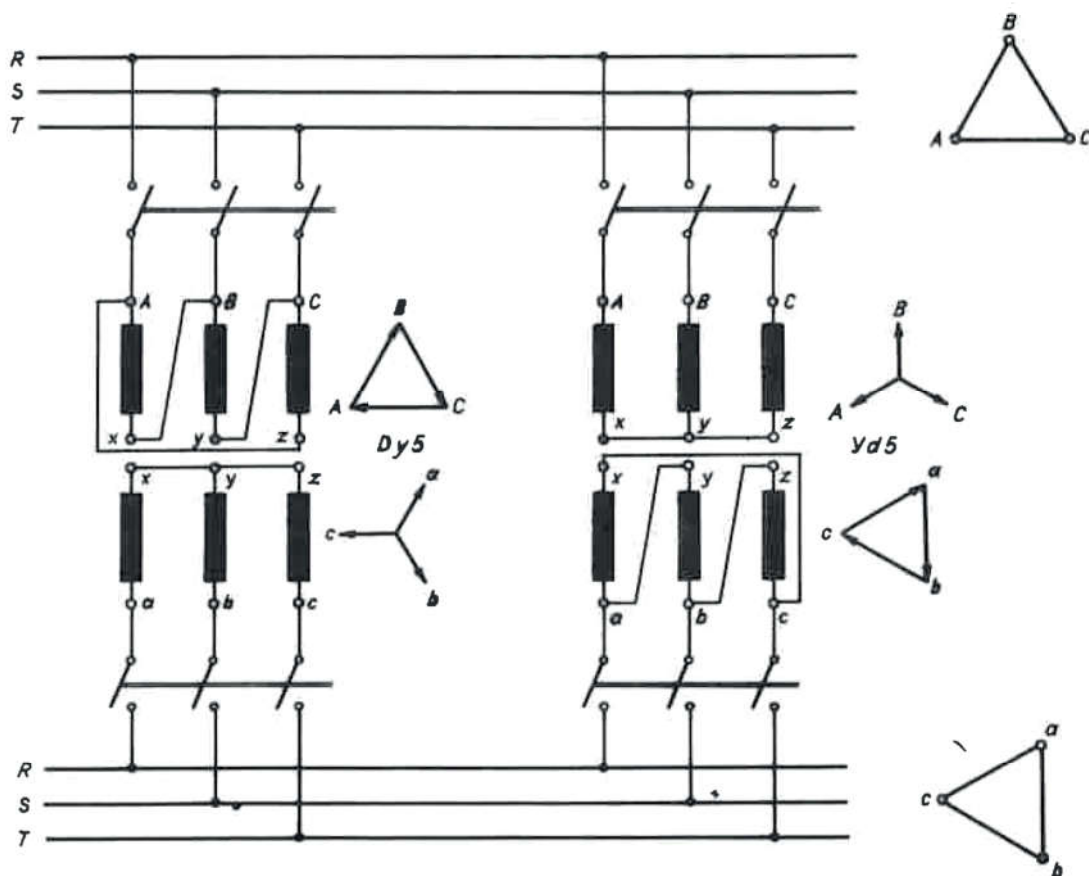
Da bi transformatori mogli raditi u paralelnom radu trebaju is-
punjavati slijedeće uvjete :

- a) Prenosni omjeri, tj. omjeri broja zavoja, moraju biti jednaki

$$\left(\frac{w_1}{w_2} = \frac{w'_1}{w'_2} \right), \text{ a transformatori moraju biti gradjeni za iste}$$

nominalne napone. Pri ovom uvjetu je važno da između prenosnih
omjera broja zavoja ne postoji razlika, dok u veličini nominalnog
napona smije doći do neznatnog odstupanja; tako se npr. mogu spo-
jiti paralelno dva transformatora, koja su gradjena za
10 000 V/380 V i za 10 500 V/400 V ali pod uvjetom da su im
prenosni omjeri broja zavoja isti. Kod nejednakih prenosnih omjera
dolazi do struje izjednačenja, dok je kod nejednakih napona jedan od
transformatora samo naponski više odnosno manje napregnut od drugoga.

Struja izjednačenja kod nejednakih prenosnih omjera paralelno
spojenih transformatora može uz minimalne razlike u omjeru broja



Sl. 6.1-01
Spoj dvaju transformatora u paralelnom radu

zavoja poprimiti vrlo neugodne iznose. Neka za ilustraciju posluži primjer u kojem se pretpostavlja da razlika u prenosnim omjerima dvaju paralelno spojenih transformatora iznosi samo 1 %; sekundarni naponi, u slučaju paralelnog spoja samo na primarnoj strani, bi se razlikovali također samo za 1 %, tj. ako je:

$$\frac{w_1'}{w_2'} \cdot \frac{w_1}{w_2} = \frac{w_1' \cdot w_2}{w_2' \cdot w_1} = 1,01 \quad \text{tada je i}$$

$$\frac{E_1'}{E_2'} \cdot \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1'}{w_2'} \cdot \frac{w_1}{w_2} = 1,01 \quad \text{a uz } E_1 = E_1' \quad \text{proizlazi}$$

da je

$$\frac{E_1}{E_2} = 1,01$$

odnosno napon E_2' je za 1 % manji od E_2 .

Spoje li se i sekundarno ova dva transformatora u paralelan rad, doći će do struje izjednačenja, koju će tjerati navedena razlika sekundarnih napona od 1 %. Veličina struje izjednačenja bi iznosila:

$$I_i = \frac{\Delta U \cdot U}{100 \cdot 2 \cdot Z}$$

gdje je: ΔU razlika sekundarnih napona u postocima nominalnog napona;

U - nominalni sekundarni napon;

Z - impedancija jednog transformatora

Impedanciju odredjujemo iz:

$$u_k = \frac{I_n \cdot Z}{U} \cdot 100 \quad \text{odnosno} \quad Z = \frac{u_k \cdot U}{100 \cdot I_n}$$

Iznos ΔU je već pretpostavljen i iznosi 1 %.

Sada je:

$$I_i = \frac{\Delta U \cdot U}{2 \cdot u_k \cdot U} \cdot \frac{100}{100} I_n = 0,5 \frac{I_n}{u_k}$$

Ako je napon kratkog spoja oba transformatora cca 5 %, tada će struja izjednačenja iznositi:

$$I_i = 0,5 \cdot \frac{I_n}{5} = 0,1 I_n \quad \text{odnosno} \quad 10 \% \quad \text{od iznosa}$$

nominalne struje jednog transformatora.

Provedeni račun se može i jednostavnije prikazati. Imaju li oba transformatora napon kratkog spoja $u_k = 5 \%$, potrebno je na svakom transformatoru 5 % nominalnog napona da bi potekla nominalna struja kroz transformator u kratkom spoju. U slučaju paralelnog spoja će bilo koja razlika napona potjerati u krugu paralelno spojenih transformatora struju izjednačenja, zapravo struju kratkog spoja; tako će npr. razlika napona od $2 \times 5 \%$, tj. 10 % nominalnog napona, potjerati kroz oba transformatora nominalnu struju. Ako razlika napona iznosi samo 1 %, bit će i struja izjednačenja proporcionalno manja, tj. iznositi će 10 % nominalne struje.

- b) Fazni pomak istoimenih sekundarnih faza prema istoimenim primarnim fazama, koji se prema IEC preporukama označuje sa mnogokratnikom od 30° , mora biti isti. Tako npr. transformator grupe spoja Dy5 može raditi u paralelnom radu sa transformatorom grupe spoja Yd5, kako je to i na sl. 6.1-01 prikazano.
- c) Naponi kratkog spoja (u_k) moraju biti jednaki odnosno po IEC preporukama i VDE propisima ne smije među njima biti veća razlika od $\pm 10 \%$; ukoliko je razlika nešto veća, transformator manje snage mora imati veći napon kratkog spoja; kod većih odstupanja je potrebno transformatoru s manjim u_k dodati prigušni svitak.

Kod transformatora, koji imaju jednake napone kratkog spoja, razdijelit će se i pogonske struje u omjeru njihovih nominalnih

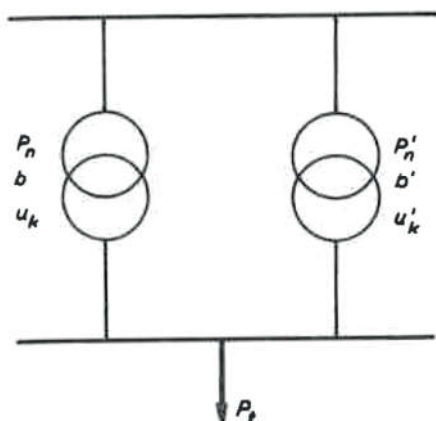
snaga odnosno nominalnih struja; do ovakove razdiobe dolazi radi nužnosti jednakih padova napona na svim transformatorima, pa se pri tome moraju struje na pojedine transformatore podijeliti u obrnutom omjeru njihovih impedancija, koje u slučaju jednakih napona kratkog spoja imaju omjere obrnuto proporcionalne omjerima nominalnih struja odnosno nominalnih snaga.

Ako naponi kratkog spoja nisu međusobno jednaki, doći će do neravnomjerne raspodjele tereta u pogonu, kako to prikazuje slijedeći primjer.

Prema sl. 6.1-02 neka rade u paralelnom radu dva transformatora sa različitim nominalnim snagama P_n i P'_n i različitim naponima kratkog spoja u_k i u'_k . Sa faktorima b i b' će biti označeno njihovo opterećenje u odnosu na njihovu nominalnu snagu

$$b = \frac{P}{P_n}; \quad b' = \frac{P'}{P'_n}$$

Za paralelni rad možemo postaviti relacije:



$$b \cdot u_k = b' \cdot u'_k$$

odnosno, pad napona na oba transformatora mora biti isti. Suma prenesenih snaga mora biti jednaka snazi koju teret uzima:

$$b \cdot P_n + b' \cdot P'_n = P_t$$

Iz ove dvije jednačbe slijedi da je:

$$b = \frac{P_t}{P_n + P'_n \frac{u_k}{u'_k}} \quad \text{odnosno}$$

$$b' = \frac{P_t}{\frac{u'_k}{u_k} P_n + P'_n}$$

Sl. 6.1-02
Transformatori sa različitim u_k i P_n u paralelnom radu

Brojčani primjer će dati još pregledniji prikaz utjecaja nejednakih napona kratkog spoja:

$$P_n = 100 \text{ kVA} \quad u_k = 4 \% \\ P'_n = 200 \text{ kVA} \quad u'_k = 8 \%$$

$$P_t = 300 \text{ kVA}$$

$$b = \frac{300}{100 + 200 \cdot \frac{4}{8}} = 1,5; \quad b' = \frac{300}{\frac{8}{4} \cdot 100 + 200} = 0,75$$

Pri prenosu $P_t = 300 \text{ kVA}$ snaga se razdjeljuje tako da transformator od 100 kVA prenosi:

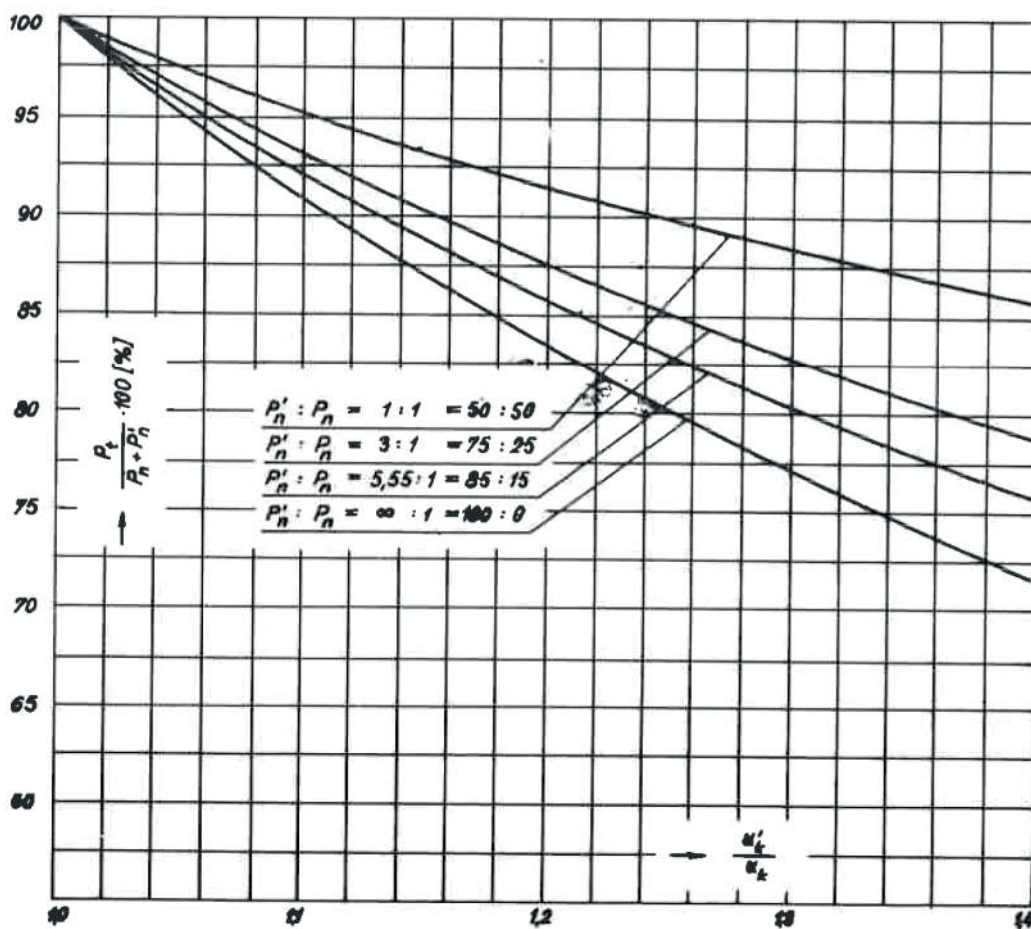
$$P = b \cdot P_n = 1,5 \cdot 100 = 150 \text{ kVA}$$

transformator od 200 kVA prenosi:

$$P' = b' \cdot P_n = 0,75 \cdot 200 = 150 \text{ kVA}$$

Očito je da će transformator snage 100 kVA biti preopterećen za 50 %, dok će transformator od 200 kVA biti tek 75 % iskorišćen u prenosu energije.

- d) Nominalne snage transformatora trebaju biti približno jednake. Prema IEC preporukama i VDE propisima je nesvrishodno povezivanje u paralelni rad transformatora koji imaju omjere snaga veće od 3:1 ; u slučaju da manji transformator ima i " u_k " manji doći će do pogonskog stanja u kojem će manji transformator biti preopterećen a da veći ne će još ni punu nazivnu snagu prenositi (vidi uvjet c.)



Sl. 6.1-03

Iskorišćenje dvaju paralelno spojenih transformatora različitih snaga pri odstupanju u naponima kratkog spoja

- P - nominalna snaga manjeg transformatora
- P' - nominalna snaga većeg transformatora
- u_k - napon kratkog spoja manjeg transformatora
- u'_k - napon kratkog spoja većeg transformatora
- P_t - ukupna prenesena snaga

Osnovno pravilo kod paralelnog rada je: ni jedan od transformatora, koji rade u paralelnom radu, ne smije biti trajno preopterećen. Ovaj zahtjev propisi strogo traže, pa iz njega proizlazi preporuka za ograničenje omjera snaga transformatora u paralelnom radu. Naime, ako se ni jedan transformator ne smije preopteretiti, tada će npr. u slučaju rada dva transformatora sa omjerom snaga 3 : 1 i omjerom napona kratkog spoja kojeg propisi kao gornju granicu dozvoljavaju tj. 1,22 : 1, doći do samo djelomičnog iskorišćenja većeg transformatora. Ukupno prenesena snaga će biti svega 86,6 % od sume nominalnih snaga obaju transformatora (vidi sl. 6.1-03). To znači da je investicija za transformator manje snage donijela svega 100 · (86,6 - 75) / 25 = 46,5 % od njegove nominalne snage. Kod omjera snaga 5,55 : 1 i granično dozvoljenog omjera napona kratkog spoja 1,22 : 1 ukupno prenesena snaga (uz već postavljeni uvjet o nepreopterećenju transformatora) je jednaka nominalnoj snazi većeg transformatora, pa je manji transformator bespotrebno postavljen. Kod manjih razlika u naponu kratkog spoja su prilike nešto povoljnije, ali još uvijek nezadovoljavajuće kod većih omjera snaga (vidi sl. 6.1-03).

U slučajevima preopterećivanja, koja su u skladu sa propisima (vidi VDE 0532 / 31) prilike su još nepovoljnije pri većim omjerima snaga i nepovoljnom omjeru napona kratkog spoja. Dolazi se do zaključka da je preopteretivost paralelno spojenih transformatora jako ograničena transformatorom manje snage i manjeg u_k obzirom na dozvoljenu toleranciju za u_k od $\pm 10\%$; i opet se sve mora svoditi na dozvoljena preopterećenja koja može podnositi manji transformator a ne cijeli sistem paralelno spojenih transformatora.

6.2 Viši harmonici

6.21 Izvor viših harmonika

Izmjenični naponi struje i tokovi su vremenske periodične funkcije, koje možemo po Fourieru rastaviti u sinusne funkcije u obliku reda prema jednadžbi :

$$e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + E_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + E_{3m} \sin(3\omega t + \varphi_3) + \\ + \dots + E_{ym} \sin(y\omega t + \varphi_y)$$

Naponi, koji se induciraju u generatorima, su uglavnom simetrični obzirom na vremensku os i obzirom na simetralu poluvala, pa zato sadrže samo neparne više harmonike prema jednadžbi:

$$e = E_{1m} \sin \omega t + E_{3m} \sin 3\omega t + E_{5m} \sin 5\omega t + \dots$$

U tehnici primjene izmjeničnih struja uvijek pokušavamo što više izbjeći višim harmoničkim članovima, tj. raditi sa što čistom sinusoidom, jer svi harmonici u električkim strojevima prouzrokuju gu-

bitke i poteškoće a ne donose nikakve koristi. Jedino kod potrošača za rasvjetu i toplinu ne može se govoriti o nekom negativnom utjecaju viših harmonika, jer svi oni aktivno sudjeluju u snazi potrošača. Efektivnu vrijednost ovakve izmjenične veličine, bilo napona bilo struje, dobivamo ako načinimo korijen iz zbroja kvadrata efektivnih vrijednosti prema jednadžbi :

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2 + \dots}$$

odnosno :

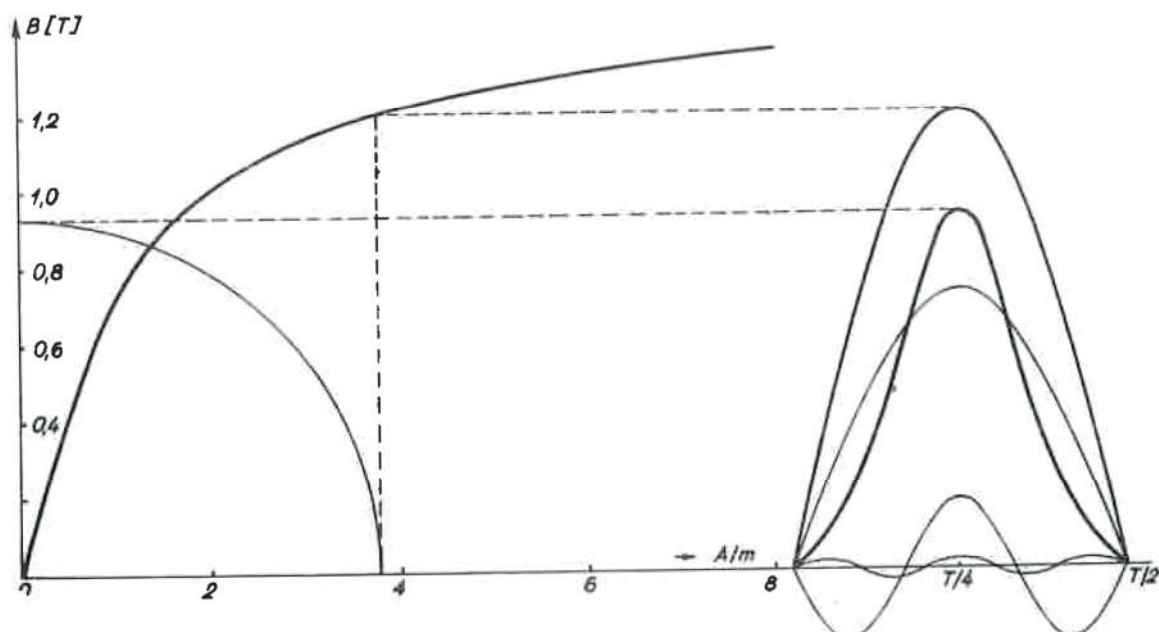
$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}$$

Toplinu, koju proizvodi nesinusoidalna struja i nesinusoidalni napon, možemo izračunati na taj način da jednostavno zbrojimo aritmetički toplinu koje stvaraju pojedini harmonični članovi.

Glavni izvor viših harmonika kod transformatora predstavlja struja magnetiziranja, odnosno prouzrokuje ih nelinearnost odnosa između struje magnetiziranja i magnetskog toka.

Na primarni namot narinut sinusni napon traži sinusni tok, koji mu inducira sinusni protunapon i time stvara uravnoteženo stanje. Pošto prema krivulji magnetiziranja (vidi sl. 2.31-4) struja magnetiziranja nije proporcionalna indukciji, mora struja magnetiziranja imati nesinusni oblik.

Ako je npr. transformator proračunat sa maksimalnom indukcijom od 1,2 T, onda možemo na osnovu krivulje magnetiziranja prema sl. 2.31-4 grafički ustanoviti potreban oblik struje magnetiziranja, koju zahtijeva sinusni oblik toka, kako je to učinjeno na sl. 6.2-01. Dobiveni nesinusni oblik struje možemo harmoničkom anali-



Sl. 6.2-01

zom po Fourier-u rastaviti na osnovni harmonik i više harmonike, i ako amplitudu osnovnog harmonika označimo sa 100 %, dobijemo u tom konkretnom slučaju prema sl. 6.2-01 pojedine amplitude kako slijedi:

1. harmonik	100	%
3. "	24,5	%
5. "	3,43	%
7. "	1,72	%
9. "	0,26	%

Kako je struja magnetiziranja simetrična, u smislu sl. 1-6 otpali su svi parni članovi viših harmonika.

Vidimo da su viši harmonici veoma značajni, no što je viši red harmonika, to je obično manja njegova amplituda, što međutim ne mora uvijek biti slučaj.

Svaki od viših harmonika može biti pozitivan ili negativan.

Viši harmonici mogu postati u mreži, u generatorima i motorima, a pogotovo u vezi sa kondenzatorima, vrlo neugodni. Zato dosljedno pokušavamo da ih što više eliminiramo.

Što je veći transformator, to su veće indukcije, te je željezo jače zasićeno, pa su veći viši harmonici. S druge strane ne smijemo zaboraviti da veći transformatori imaju relativno manje struje magnetiziranja. Potrebni amperzavoji za željezo rastu proporcionalno sa duljinom puta u jezgri, a prema zakonima sličnosti to znači proporcionalno sa linearnim dimenzijama odnosno sa $\sqrt[4]{P}$. Kako amperzavoji nominalne struje rastu sa presjekom bakra, tj. sa kvadratom linearnih dimenzija ($\sqrt[4]{P}$)² to dobijemo da relativna struja magnetiziranja za željezo, u postocima od nominalne struje, raste obrnuto proporcionalno, odnosno pada sa $\sqrt[4]{P}$. To znači da, polazeći od transformatora za 100 kVA, koji treba za uzbuđu željeza cca 4,9 % od njegove nominalne struje, dobijemo za 10 000 kVA transformator:

$$4,9 \sqrt[4]{\frac{100}{10\,000}} = 1,55 \%$$

a za 1 kVA transformator:

$$4,9 \sqrt[4]{\frac{100}{1}} = 15,5 \%$$

U ovim razmatranjima zanemarili smo histerezu, koja deformira struju magnetiziranja u smislu, kako je to prikazano na sl. 2.31-1.

6.22 Viši harmonici u trofaznom sistemu

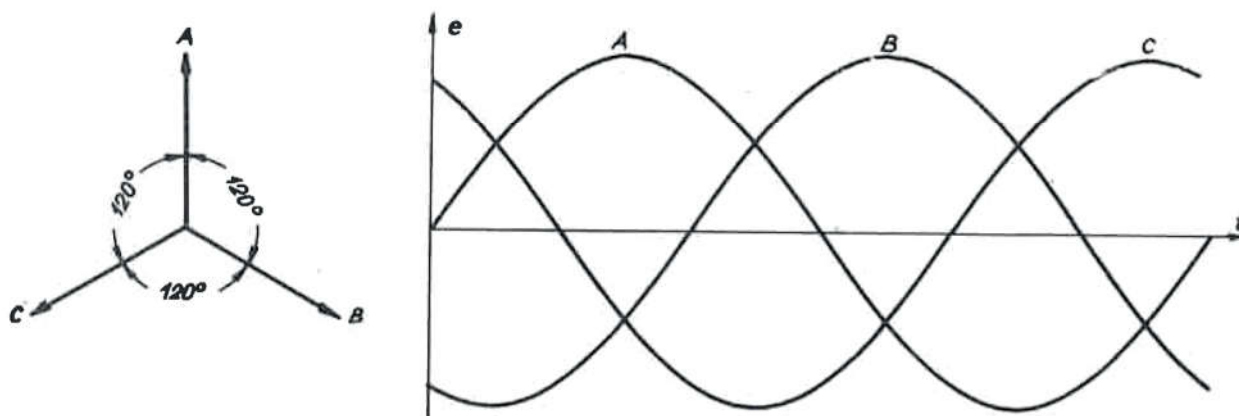
U trofaznom sistemu osnovni harmonici čine simetričan sistem, u kojem svakoj fazi slijedi slijedeća faza, koja je vremenski pomaknuta za 120°, kako je to prikazano u vektorskom dijagramu u

sl. 6.2-02 , odnosno definirano sa jednažbama:

$$e_{1a} = E_{1m} \cdot \sin \omega t$$

$$e_{1b} = E_{1m} \cdot \sin (\omega t - 120^\circ)$$

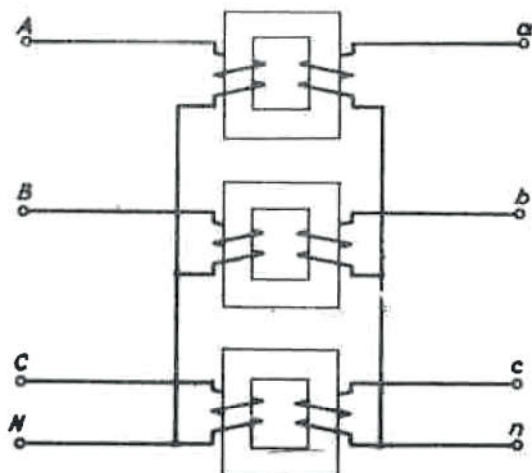
$$e_{1c} = E_{1m} \cdot \sin (\omega t - 240^\circ)$$



Sl. 6.2-02

Ako imamo tri jednofazna transformatora trofazno spojena sa zajedničkim nul-vodom prema sl. 6.2-03 , kako se to upotrebljava u

Americi, onda će svaki od jednofaznih transformatora povući iz mreže osim osnovnog harmonika struje magnetiziranja i sve više harmonike. Ako su osnovni harmonici pojedinih transformatora međusobno pomaknuti za 120° , onda su treći harmonici pojedinih transformatora pomaknuti međusobno za $3 \times 120^\circ = 360^\circ = 0^\circ$, odnosno uopće nisu pomaknuti, već su istofazni kako se to vidi iz sl. 6.2-04 odnosno definirano sa jednažbama:



Sl. 6.2-03

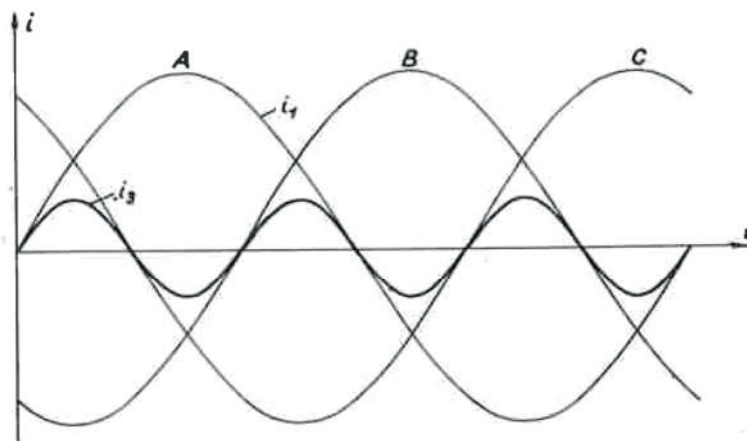
$$e_{3m} = E_{3m} \cdot \sin 3\omega t$$

$$e_{3b} = E_{3m} \cdot \sin (3\omega t - 3 \cdot 120^\circ) =$$

$$= E_{3m} \cdot \sin 3\omega t$$

$$e_{3c} = E_{3m} \sin(3\omega t - 3 \cdot 240^\circ) = E_{3m} \sin \omega t$$

odnosno : $e_{3a} = e_{3b} = e_{3c} = E_{3m} \sin 3\omega t$



Sl. 6.2-04

Ovo takodjer vrijedi i za sve više harmonike reda $3 \cdot n$, gdje je "n" neparni cijeli broj ; tako npr. 9. i 15. harmonik.

Kod petog harmonika ima isti u drugoj fazi prema prvoj fazi pomak od

$$5 \cdot (-120^\circ) = -600^\circ = -360^\circ - 240^\circ = -240^\circ$$

a u trećoj fazi prema prvoj fazi pomak od :

$$5 \cdot (-240^\circ) = -1200^\circ = 5 \cdot (-360^\circ) - 120^\circ = -120^\circ$$

te prema tome za peti harmonik vrijedi

$$e_{5a} = E_{5m} \sin 5\omega t$$

$$e_{5b} = E_{5m} \cdot \sin(5\omega t - 240^\circ)$$

$$e_{5c} = E_{5m} \cdot \sin(5\omega t - 120^\circ)$$

Iz toga vidimo, da peti harmonik predstavlja opet trofazni sistem sa međusobnim pomakom faza od 120° , sa tom razlikom prema osnovnom sistemu, da je redosljed faza obrnut, tj. da je smjer okretanja 5. harmonika obrnut od smjera okretanja osnovnog harmonika.

Analognim postupkom dobijemo da će 7. harmonik sačinjavati trofazni sistem sa istim smjerom okretanja kao i osnovni sistem prema jednadžbi:

$$e_{7a} = E_{7m} \cdot \sin 7\omega t$$

$$e_{7b} = E_{7m} \cdot \sin(7\omega t - 120^\circ)$$

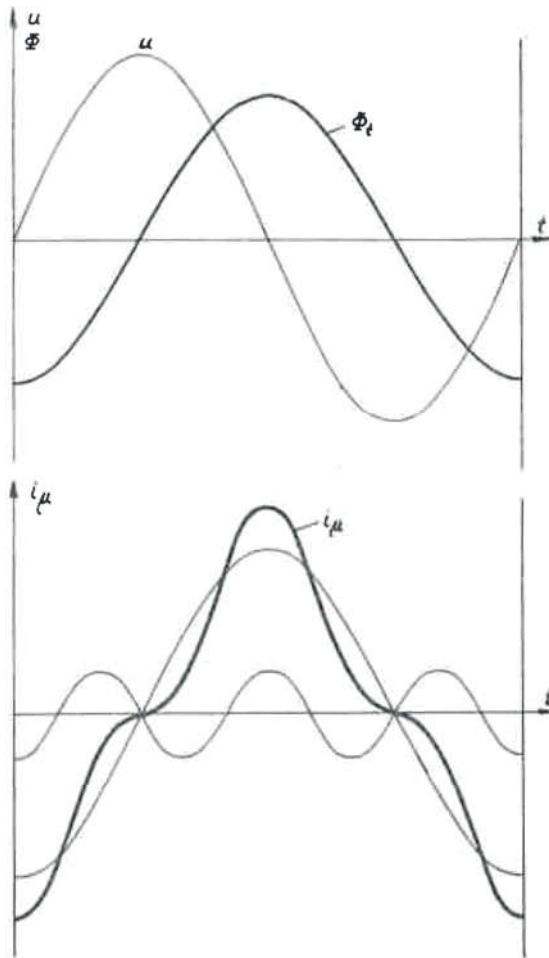
$$e_{7c} = E_{7m} \cdot \sin(7\omega t - 240^\circ)$$

Ako promatramo dalje, onda je 9. harmonik istofazan u svim trim fazama kao i treći, 11. harmonik ima obrnuti redosljed faza kao peti, a 13. harmonik ima opet isti redosljed faza kao sedmi odnosno osnovni harmonik.

6.23 Problematika trećeg harmonika kod spoja zvijezda

Kod spoja transformatora prema sl. 6.2-03 tj. zvijezda sa nul-vodom, i jezgara sa magnetski za svaku fazu za sebe zatvorenim krugom, tj. sa magnetskim povratnim putem, dobijemo kod narinutog sinusoidalnog napona i sinusoidalni tok, no i struju magnetiziranja, koja obiluje višim harmonicima, kako je za 1. i 3. harmonik to prikazano na sl. 6.2-05.

Svi viši harmonici 3. reda (3., 9., 15. itd) su istofazni, pa se zatvaraju preko zajedničkog nul-voda. Taj američki sistem triju jednofaznih transformatora omogućuje prema tome prirodno magnetiziranje jezgre, no vuče sve više harmonike struje magnetiziranja od zadnjeg transformatora do samih generatora. Ti viši harmonici su naravno sa višom frekvencijom, tj. 3. harmonik ima trostruku frekvenciju, 5. peterostruku itd. Induktivni padovi napona u reaktancijama su zato proporcionalno povećanoj frekvenciji veći, pa mogu zato i male struje viših harmonika prouzročiti neugodnosti. Ako generatori daju praktički sinusoidalni napon u mrežu, a to je uvijek



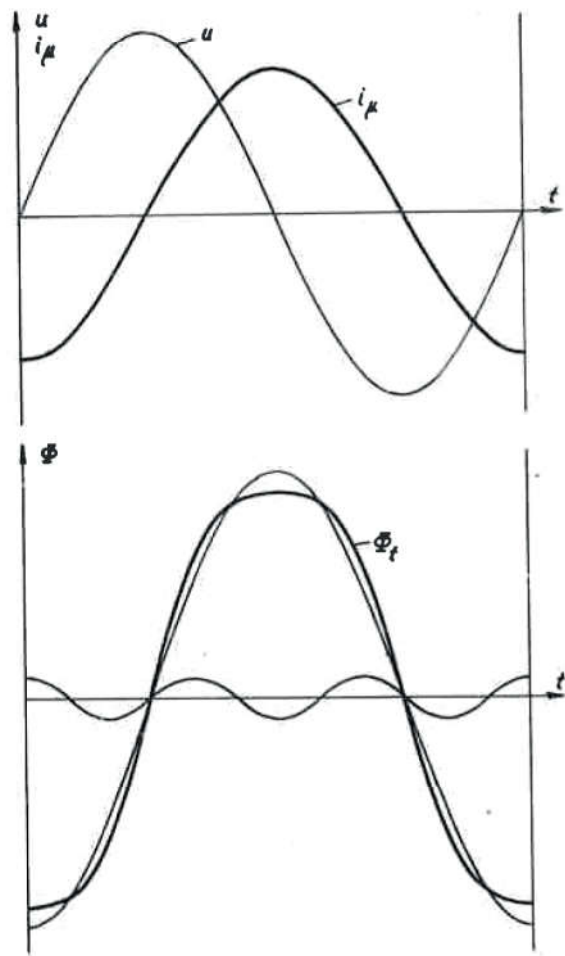
Sl. 6.2-05

slučaj, mogu struje viših harmonika prouzročiti padove napona u dalekovodima, u mreži, a i u rasipnim reaktancijama generatora, koji imaju za posljedicu deformaciju krivulje napona ispred transformatora, a tako deformirana krivulja napona se onda prenaša i preko transformatora u sekundarnu mrežu.

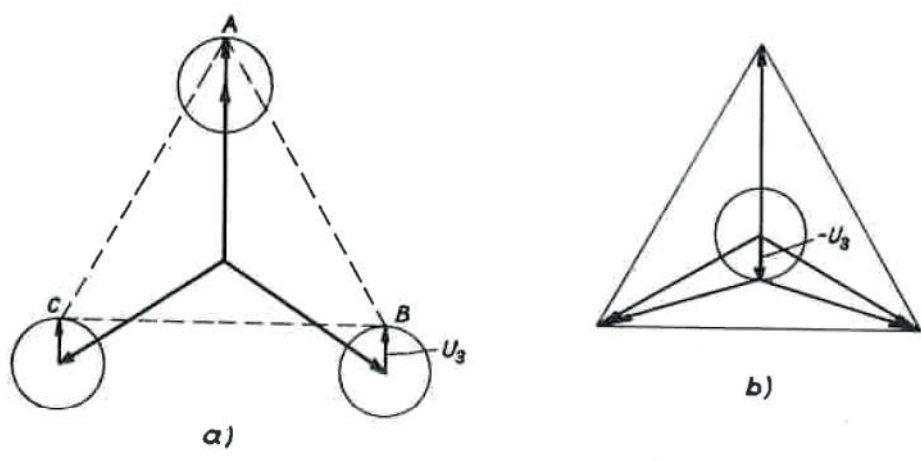
Razmotrimo sada isti slučaj tj. primarno spoj zvijezda no bez nul-voda, ali sa magnetskim povratnim putem (tj. tri jednofazna transformatora, ili trofazni ogrnuti ili peterostupni transformator). Ako nema nul-voda, ne mogu se zatvarati svi viši harmonici trećeg reda. Zanimarimo li peti, sedmi i sve ostale harmonike, koje transformator naravno može vući iz mreže, struja magnetiziranja mora biti sinusna. Ako je struja sinusna, mora tok radi zasićenja u željezu biti nesinusna, kako je to prikazano u sl. 6.2-06.

Taj nesinusni tok dije-

li se na osnovni i treći harmonik. Osnovni harmonik inducira sinusni protunapon, koji drži ravnotežu sa narinutim sinusnim naponom. Preostali treći harmonik toka, koji je u svim stupovima istofazan i koji se može prema pretpostavci zatvarati željeznim putem jezgre, mora isto tako u svim trim fazama inducirati napone sa trostrukom frekvencijom. No, ti naponi su u svim trim fazama istofazni, pa prema tome ne mogu potjerati nikakve struje, jer nema nul-voda. Oni se pribrajaju narinutom naponu, no ne mijenjaju linijski napon, jer trokut ostane nepromijenjen, kako je to vidljivo iz vektorskog dijagrama u sl. 6.2-07 a). Naravno, treba uzeti u obzir da se vremenska linija za vektore trećeg harmonika vrti sa trostrukom kutnom brzinom, pa je zato sa krugovima označena relativna vrtnja tih vektora u odnosu na vektore osnovnog harmonika. Dodavanje napona trećeg harmonika možemo načiniti i u zvijezdištu vektorskog dijagrama. Pošto su vrhovi vektora osnovnog harmonika određeni vektorima narinutog napona, te je kao takav fiksno određen naponom

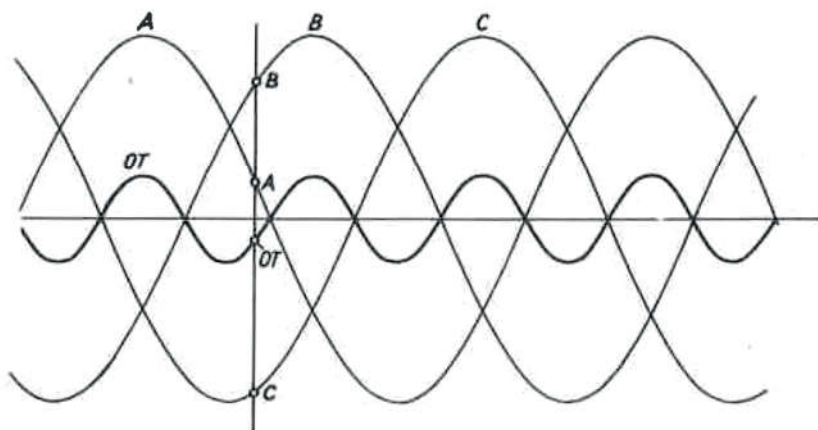


Sl. 6.2-06



Sl. 6.2-07

mreže, pravilnije je u vektorskom dijagramu pribrojiti treći harmonik na dnu vektora osnovnih harmonika, tj. u nul-točki namota, (kako je to prikazano na sl. 6.2-07 b.). Načinimo to tako, da od osnovnog harmonika napona pojedinih faza odbijemo negativni iznos trećeg harmonika (što je naravno isto što i zbrajanje trećeg harmonika). Iz toga slijedi, da zapravo nul-točka namota "pleše" sa trostrukom frekvencijom oko nul-točke trofaznog sistema mreže. Istu sliku dobijemo, ako prema slici 6.2-08 gledamo na vremenski



Sl. 6.2-08

dijagram svih triju faza. U dijagramu je treći harmonik nacrtan negativan, pa tako krivulja trećeg harmonika u ovom dijagramu

(OT) predstavlja istovremeno i nul-točku namota transformatora tako, da u svakom trenutku npr. razmak između krivulje A i OT predstavlja napon u namotu faze A.

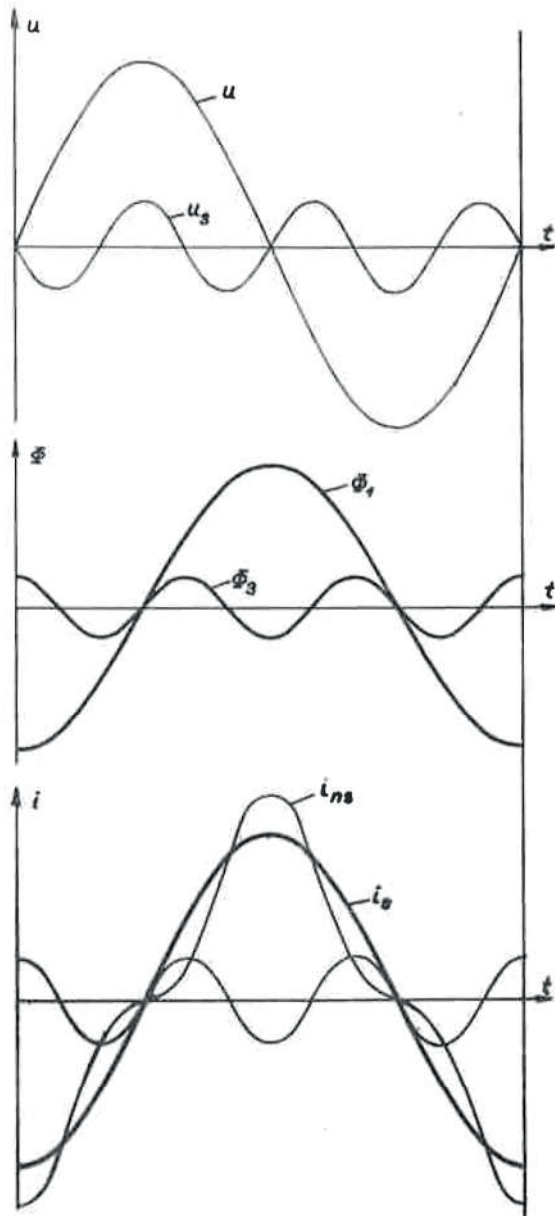
Ako sada upotrijebimo našu sliku još sa pitanjem 5. i 7. harmonika, onda je jasno da će poteći struja magnetiziranja 5. i 7. harmonika, jer ona se može zatvarati unutar triju faznih vodova, pa u toku prema tome ne će biti ovih harmonika. Treći harmonik toka može kod većih zasićenja postići amplitudu koja iznosi 30 % od amplitude osnovnog harmonika i prema tome radi svoje trostruke frekvencije inducirati napon, koji iznosi $3 \times 30 \% = 90 \%$ od narinutog faznog napona. Ta činjenica onemogućuje primjenu spoja zvijezda bez nul-voda kod transformatora sa magnetskim povratnim putem.

Razmotrimo sada spoj zvijezda bez nul-voda i bez magnetskog povratnog puta, tj. slučaj evropskog jezgrastog tipa transformatora i zanemarimo za sada upliv magnetske nesimetrije ove jezgre.

Ako opet zanemarimo 5. i 7. harmonik bit će slika opet kao u sl. 6.2-06 s time, da amplituda trećeg harmonika toka bude mnogo manja, jer se njoj protivi veliki magnetski otpor zraka između oba jarma, jer se ovi istofazni tokovi mogu samo ovim putem zatvarati. Točnije fizikalno gledano dolazimo do toga na slijedeći način.

Narinuti sinusni napon traži sinusni protunapon, za kojega treba tok prema sl. 6.2-09. Kako nema nul-voda, može narinuti napon potjerati samo sinusnu struju (i_s na sl. 6.2-09), a ta struja se može razdijeliti na nesinusnu struju i_{ns} , potrebnu da uzbuđi si-

nusni tok " ϕ " i na suvišak struje, koji predstavlja struju trećeg



harmonika. Kako tokovi trećeg harmonika nemaju kod ove jezgre povratnog puta kroz željezo, nego se moraju zatvarati kroz zrak, to će ovaj treći harmonik struje, (koji predstavlja na transformatoru narinutu struju), radi velikog magnetskog otpora u zraku, od jarma do jarma potjerati jedan relativno slabi tok trećeg harmonika " ϕ_3 ". Taj magnetski otpor od jarma do jarma opet nije tako velik kako bi se očekivalo. Po Vidmaru iznaša magnetski otpor, koji otpada na jedan stup otprilike :

$$R_m = \frac{1}{4\pi \cdot 3 \cdot D_{Fe} \cdot 10^{-7}}$$

odnosno magnetski tok, koji otpada na jedan stup :

$$\phi_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot J_3 \cdot \sqrt{2} \cdot w \cdot 3 D_{Fe}$$

Za transformator od 100 kVA, 6,3 kV koji ima promjer jezgre $D_{Fe} = 15$ cm (broj zavoja primara 850) i struju magnetiziranja 10 % nominalne struje, dobijemo, uzevši u obzir da kod 1,2 T treći harmonik struje magnetiziranja iznosi 25 % od struje magnetiziranja, za tok trećeg harmonika iznos :

$$\phi_3 = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot I_m \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2} \cdot w \cdot 3 D_{Fe}$$

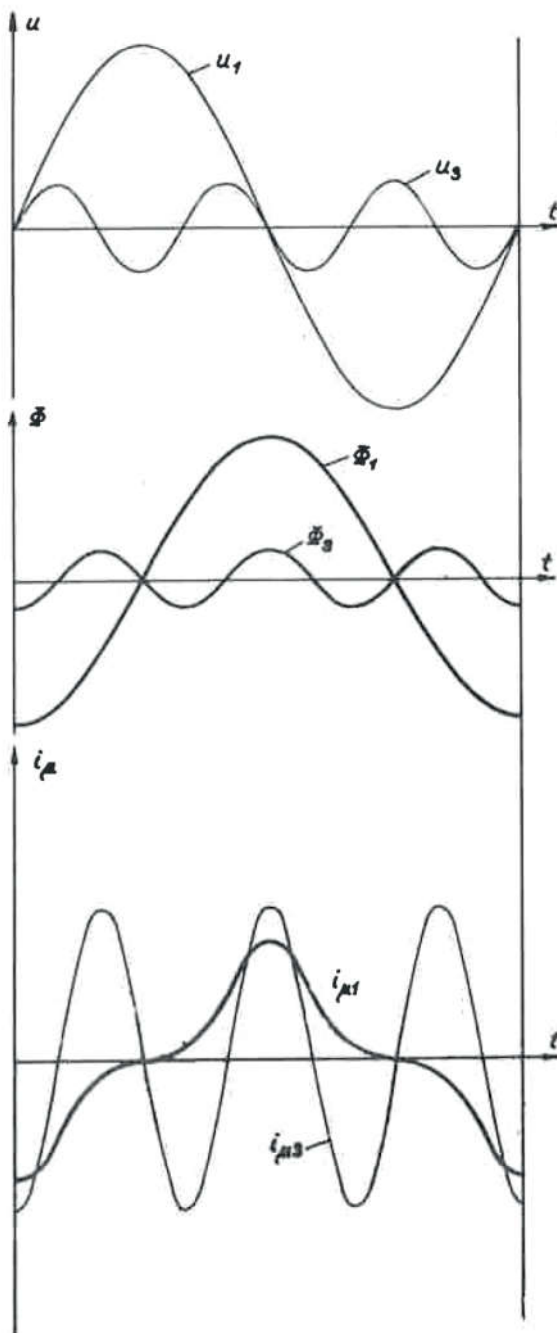
odnosno napon trećeg harmonika :

$$E_3 = 4,44 \cdot f_3 \cdot w \cdot \phi_3 =$$

Sl. 6.2-09

$$= 4,44 \cdot 150 \cdot 850 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 9,17 \cdot 0,1 \cdot 0,25 \cdot \sqrt{2} \cdot 850 \cdot 3 \cdot 0,15$$

$$E_3 = 88 \text{ V}$$



Sl. 6.2-10

Vidimo da je inducirani napon trećeg harmonika tako malen, da nam ne može smetati i tako dolazimo do zaključka, da evropski tip jezgrastog transformatora omogućuje spoj zvezda bez nul-voda, jer praktički skoro potpuno eliminiše napone trećeg harmonika. Što se tiče petog i sedmog harmonika vrijedi isto kao za prethodni slučaj, da se isti pojavljuju samo u struji. U odnosu na nominalnu struju su ovi viši harmonici maleni, te općenito praktički ne dodju do izražaja.

Preostaje još slučaj zvezde sa nul-vodom i magnetski bez povratnog puta. Dobijemo svakako istu sliku kao u sl. 6.2-05. Imat ćemo sinusni tok i nesinusnu struju magnetiziranja.

Time su iscrpljene sve moguće kombinacije sa spojem zvezda na primarnoj strani, a u vezi viših harmonika radi zasićenja u željezu. Međutim, viši harmonici mogu postojati i u mreži. Prema VDE propisima smatra se da je krivulja sinusna, ako odstupanja od osnovne sinusoida ne iznašaju više od $\pm 5\%$ od amplitude prvog harmonika. Pitamo se, kako će se ponašati transformator u spoju zvezda sa nul-vodom i magnetski bez povratnog puta, ako na njega narinemo napon, koji osim prvog harmonika ima i treći harmonik u visini od 5% od prvog harmonika. Naravno da za narinuti napon trećeg harmonika vrijedi isto pravilo kao za prvi harmonik, tj. da on potjera onu struju, koja je potrebna da uzbuđi tok trećeg harmonika, neophodan za induciranje protunapona trećem harmoniku napona mreže. Kako nema magnetskog povratnog puta, mora se taj tok zatvarati po zraku od jarma do jarma. Zato treba

mного amperzavoja i zato može treći harmonik struje magnetiziranja postati puno veći od osnovnog harmonika struje magnetiziranja, kako se to vidi u sl. 6.2-10. pogotovo dobijemo velike struje trećeg harmonika ako transformator ima primarno spoj cik-cak sa nul vodom. U tom slučaju obje polovine namota, koje se nalaze na istom stupu, uzbudjuju sa svojim trećim harmonikom struje jezgru u suprotnim pravcima, pa se tok trećeg harmonika ne može zatvarati kroz jezgru, nego se mora zatvarati po rasipnom putu cik-cak namota, tj. između obje polovine cik-cak namota na svakom stupu kroz raspor "d" (prema sl. 2.9.09 a). Kako je taj raspor veoma uzak, to može treći harmonik struje magnetiziranja dostići i visinu nominalne struje, a u nul-vodu trostruku nominalnu struju. Naravno, nema razloga uzeti primarno spoj cik-cak, no treba računati s time, da se u praksi treba upotrebiti raspoložiti transformator, koji ima cik-cak spoj. U tom slučaju je nužno da se transformator priključi bez nul-voda. Nul-točka cik-cak namota će zato "plesati" za cca 5% napona i sa trostrukom frekvencijom oko nul-točke trofaznog sistema mreže, što se praktički u pogonu ne će osjećati.

Iz ovog razmatranja se vidi, da je obzirom na treći harmonik spoj primarnog namota u zvijezdu u dva slučaja povoljan; električki sa nul-vodom i magnetski sa povratnim putem, ili električki bez nul-voda i magnetski bez povratnog puta. Prvi spoj koristi američki sistem sa nul-vodom u visoko i nisko-naponskim mrežama i sa tri jednofazna transformatora, dok drugi spoj koristi evropski sistem sa visokonaponskim mrežama bez nul-voda, i sa jezgrastim tipom trofaznog transformatora (za napone od 10 do 110 kV).

6.24 Problematika trećeg harmonika kod spoja trokut

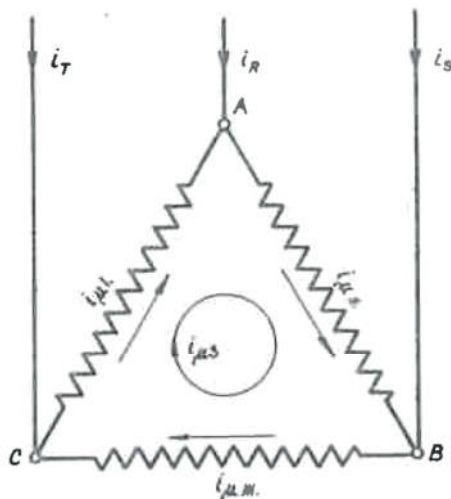
Kod spoja primarne strane transformatora u trokut, mijenjat će se kraj sinusnog napona mreže i tok u jezgrama transformatora sinusno. Ovo je već samo po sebi jasno, jer je svaki od namota priključen direktno na mrežu, pa se u svakom namotu mora inducirati protunapon koji je sinusan. Što se tiče struja magnetiziranja, svaki će namot radi trokutnog spoja uzimati iz mreže nesmetano sve one harmonične komponente, koje treba za uzbuđjivanje sinusnog toka. Svaki namot treba za uzbuđjivanje sinusnog toka uzbuđnu struju.

$$i_{\mu} = i_{\mu_1} + i_{\mu_2} + i_{\mu_3} + \dots$$

Međutim, ipak u linijskim strujama mreže I_R , I_S , I_T komponente trećeg harmonika ne će se opažati, jer je kod trokutnog spoja struja u vodu jednaka diferenciji dviju susjednih faznih struja, npr.

$$i_R = i_{\mu_T} - i_{\mu_S}$$

Kod ovog se odbijanja uvijek eliminira treći nadval i svi ostali reda 3 . n , jer su oni u svakom faznom namotu istog smjera. Međutim, na da struje u mreži ne sadržavaju treći nadval (ako se ograničimo kod svih harmonika reda 3.n samo na taj), ipak on može



Sl. 6.2-11

nesmetano postojati u zatvorenom krugu što ga čine sva tri namota (vidi sl. 6.2-11). Vidimo dakle zanimljivu činjenicu, da spoj u trokut, ma da mreža ne dobavlja treći nadval struje, ima ipak prirodno magnetiziranje, jer transformator sam stvori potrebu izobličenu struju, koju treba za sinusno magnetiziranje. Budući da tok nema trećeg nadvala, nemaju niti inducirani naponi u namotajima komponentu trostruke frekvencije.

6.25 Strujni transformator u naponskom transformatoru

Vratimo se sada opet evropskoj izvedbi trofaznog transformatora. Kako je već objašnjeno, imamo li spoj primarnih namotaja transformatora u zvijezdu sa nul-vodom, a sekundarno zvijezdu sa nul-vodom, bit će kod narinutog sinusnog napona magnetiziranje prirodno i tok ϕ sinusan, jer električki nul-vod dozvoljava svakoj fazi da si iz mreže uzme izobličenu struju magnetiziranja. Sinusni fazni tokovi čine u nul-točkama toka sumu nula i sve je u redu. U tom dakle spoju nema nikakvih poteškoća, no ipak se taj spoj u Evropi, osim kod najviših napona, redovno ne upotrebljava radi prednosti sistema visokonaponskih mreža bez uzemljenog nul-voda, jer bi inače svaki zemni spoj predstavljao puni kratki spoj faze. Budući da su zemni spojevi u razgranatim mrežama vrlo česte pojave, ovaj nul-vod bi bio uzrok čestim prekidima pogona.

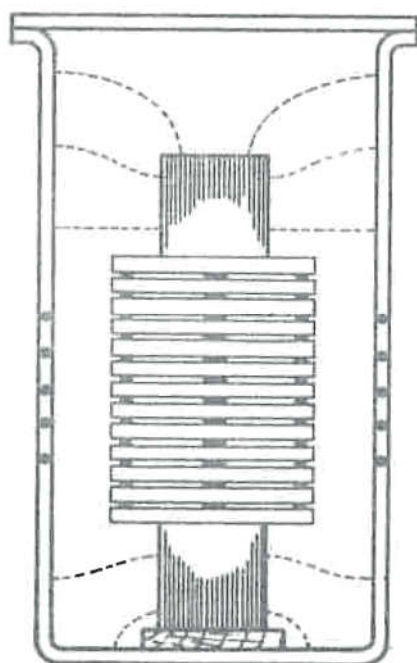
Ako ovaj spoj primarne strane nema nul-voda, to odmah nastupaju prije spomenuta ograničenja: treći nadval struje ne može se pojaviti, pa imamo tzv. prisilno magnetiziranje željezne jezgre. Ako ne uzmemo u obzir neznatne harmonike petog i sedmog reda, bit će struja sinusna. No zato se, kako je već pokazano, pojave nadvalovi toka trostruke frekvencije, ako naime ovi mogu postojati, tj. ako ih dozvoljava magnetski spoj.

Tu se vidi glavna razlika između američanske i evropske konstrukcije trofaznog transformatora. Dok u američanskoj izvedbi mogu viši harmonici magnetskog toka nesmetano postojati u samostalnim jezgrama svake faze, to u evropskoj izvedbi oni nemaju magnetskog povratnog puta. U evropskom je, naime, trofaznom transformatoru odstranjen onaj stup, koji bi mogao služiti kao nul-vod za magnetske tokove. Imamo isti slučaj kao u električnom spoju, da magnetska zvijezda bez nul-voda spriječava put trećem harmoniku toka. No ipak postoji

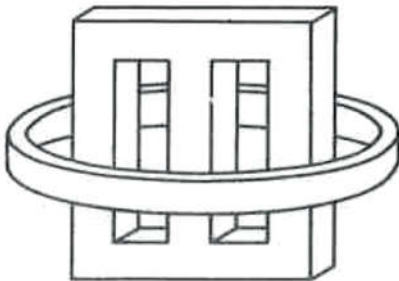
razlika između električnog i magnetskog spoja. Električne struje trostruke frekvencije doista nemaju nikakvi put ako nema nul-voda, jer je izolacija električkih vodiča gotovo savršena, dok za magnetski tok znamo da nema apsolutnog izolatora, pa ga i okolišni zrak također provodi. Tako se treći harmonik toka u ovom slučaju, ma da nema udoban put kroz željezo, ipak zatvori nekako kroz zrak od gornjeg do donjeg jarma. Samo će sada, radi velikog otpora zraka, biti ovaj tok znatno slabiji nego u američanskoj izvedbi.

Uljni transformatori se nalaze, međjutim, u željeznom kotlu, koji ipak omogućuje toku trećeg harmonika da se lakše zatvori od jarma do jarma. Ovo željezo daje trećem harmoniku toka udobniji put da se zatvori (vidi sl. 6.2-12). S druge strane djeluje zatvorena posuda kotla kao kratko spojeni zavoj stavljen oko transformatora kao cjelina. Budući da je cijeli transformator u sva tri stupa sa istofaznom strujom trostruke frekvencije jednofazno uzбудjen, to će se u posudi kao u zatvorenom sekundarnom vitku pojaviti struja kratkog spoja. Utjecaj te struje je dvojak. U prvom redu prigušivat će struja pratkog spoja prvobitni treći harmonik toka, ali ona ujedno prouzrokuje grijanje same željezne posude, što istovremeno povisuje i temperaturu namota transformatora. Da se izbjegne ovom dodatnom ugrijavanju kotla transformatora uslijed trećeg harmonika toka, najjednostavniji bi način bio taj, da se cijeli transformator opkoli debelim bakrenim prstenom (vidi sl. 6.2-13), jer nam sada taj prsten predstavlja za treći harmonik toka kratko spojeni sekundarni zavoj, kojim se taj tok prigušuje. Budući da je otpor ovog bakra znatno manji od otpora željezne posude, bit će i prigušenje

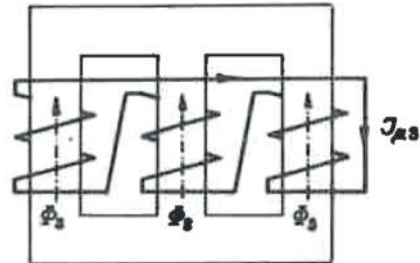
znatno bolje a gubici u bakru znatno manji nego što su bili prije u kotlu. Prema sl. 6.2-09 možemo naime struju, što je transformator uzima iz mreže, rastaviti na struju potrebnu za uzbuđivanje glavnog magnetskog toka, te na dodatnu struju trećeg harmonika prisilno narinutu na transformator. Na tu struju transformator reagira analogno kao strujni transformator. Poznato nam je već da ta struja uzbuđuje istofazno sva tri stupa transformatora, te ćemo u ovisnosti o magnetskom otporu povratnog magnetskog puta dobiti veći ili manji magnetski tok trećeg harmonika. Ako taj tok obuhvaća još zatvoreni namot, inducirat će u njemu struju, koja sa svojim amperzavojima poništava amperzavoje primarno narinute struje, te tako u transformatoru dobijemo manji dodatni magnetski tok. U idealnom slučaju, kada bi ti amperzavoji bili jednaki, dodatni magnetski tok uopće ne bi postojao. To dakako nije moguće, jer neki tok ipak treba preostati da bi inducirao sekundarne protuamperzavoje. Što je manja impedan-



Sl. 6.2-12



Sl. 6.2-13



Sl. 6.2-14

cija namota u kome se protuamperzaciji induciraju, bit će potreban i manji magnetski tok da ih inducira, a to drugim riječima kažemo da je prigušenje znatno bolje. Umjesto prstena kao na sl.6.2-13 može se uzeti i tzv. "tercijarni namot", koji će isto tako prigušivati treći harmonik toka i time spriječiti ugrijavanje posuda. On nije ništa drugo nego kratko spojeni namot malenog otpora, koji je jednolično razdijeljen na sva tri stupa i to tako, da su svi pojedini svi- ci spojeni u seriju kao na sl. 6.2-14, što u stvari predstavlja spoj trokut. Prednosti tog terciarnog namota prema kratkospojnom prstenu je u tome da on leži direktno na stupu i tako sprečava zatvaranje to- ka trećeg harmonika u prostoru između stupova i kotla. Taj namot je, kako ćemo kasnije vidjeti, često potreban i zbog nesimetričnog opte- rećenja transformatora. Budući da je taj namot za glavni trofazni tok identičan sekundarnom namotu spojenom u trokut, to se u njemu ne mogu inducirati od glavnih tokova trofazne struje kratkog spoja osnovne frekvencije, jer je suma svih triju induciranih faznih napo- na jednaka nuli. Za dodatni tok trostruke frekvencije, koji je u svim stupovima iste faze i istog smjera, ima ovaj terciarni namot isto djelovanje kao kratko spojeni sekundarni namot, u kojemu će se stvo- riti struja kratkog spoja trostruke frekvencije i time taj tok pri- gušiti.

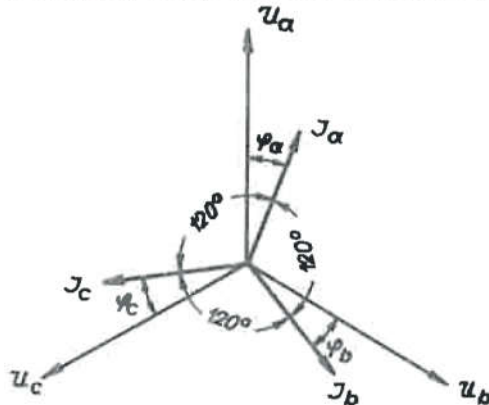
Što je manja impedancija prigušnog namota to je prigušivanje ide- alnije. Kada bi impedancija bila jednaka nuli, bili bi amperzavoji terciarnog namota jednaki amperzavojima trećeg harmonika, pa bi potpuno nestalo trećeg harmonika toka, te bi imali opet potpuno prirodno magnetiziranje. Možemo dakle reći da se prisilno magnetizi- ranje kod primarnog spoja zvijezda bez nul-voda, a sekundarno zvijez- da, može učiniti prirodnim, ako dodamo na transformator terciarni namot, jer će se sada potrebni treći harmonički valovi struje poja- viti kao struja kratkog spoja u ovom zatvorenom namotu.

Analogno tome lako nam je sada zaključiti da će treći harmonik toka nastati i onda, ako je spoj transformatora takav, da mu je bi- lo primarni bilo sekundarni namot spojen u trokut, jer će nam sada zatvoreni trokutni namot djelovati kao prigušni namot, te će u nje- mu teći treći harmonik struje. Tako se treći harmonik toka uopće ne će opaziti, pa ne će biti dodatnog ugrijavanja kotla, ma da mreža ne dobavlja trećeg harmonika struje. Ovaj spoj ima za posljedicu potpuno prirodno magnetiziranje jezgre, te sa stanovišta viših harmonika is- pada kao najpovoljnija varijanta spoja transformatora.

6. 3. Nesimetrične struje u trofaznom jezgrastom transformatoru

6.31 Općenito o nesimetrijama u trofaznom sistemu

Ako su vektori napona ili struje tereta svih triju faza jednaki po vrijednosti i međusobnom faznom pomaku, kako je to prikazano u vektorskom dijagramu na sl. 6.3-01, tada govorimo o simetričnom trofaznom simetričnom sistemu. Kod simetričnog tereta mora prema tome biti:



$$I_a = I_b = I_c$$

$$\varphi(I_a, I_b) = \varphi(I_b, I_c) = \varphi(I_c, I_a)$$

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

Sl. 6.3-01

biti fazno jednako pomaknuti prema pripadajućim vektorima napona, tj. :

$$\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$$

Pošto su vektori faznih napona međusobno pomaknuti za 120° , to iz gornjeg slijedi da vektori struje moraju u tom slučaju

Simetričan teret predstavljaju skoro svi trofazni potrošači. Kod jednofaznih potrošača ne možemo očekivati da su jednako raspoređeni na pojedine faze, niti da njihove struje imaju jednaki fazni pomak prema pripadnom faznom naponu. Posljedica toga je da, iako je napon simetričan, sistem struja ne mora biti simetričan, tj. :

$$I_a \neq I_b \neq I_c$$

$$\varphi(I_a, I_b) \neq \varphi(I_b, I_c) \neq \varphi(I_c, I_a)$$

$$I_a + I_b + I_c \neq 0$$

$$\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$$

kao npr. na sl. 6.3-02.

Kako sa simetričnim sistemima lakše računamo, rastavljamo svaki nesimetrični trofazni sistem pomoću metoda simetričnih komponenta na :

tri istofazne komponente :

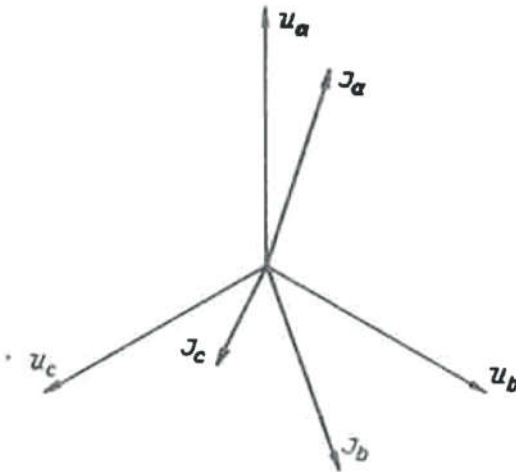
$$I_{a_0}, I_{b_0}, I_{c_0}$$

jedan pozitivni (direktni) simetrični trofazni sistem :

$$I_{a_d}, I_{b_d}, I_{c_d}$$

jedan negativni (inverzivni) simetrični trofazni sistem:

$$I_{a_i}, I_{b_i}, I_{c_i}$$



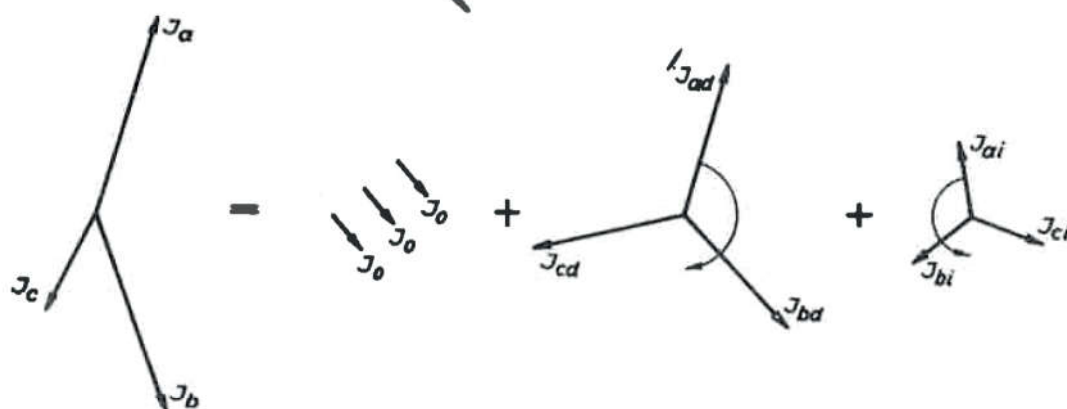
Sl. 6.3-02

Kao direktni trofazni sistem označujemo onaj sistem, kod kojeg je vremenski redoslijed faza u pravcu a-b-c . Kao inverzivni trofazni sistem označujemo sistem sa obrnutim redoslijedom faza, tj. a-c-b .

Ovo rastavljanje je vektorski prikazano na sl. 6.3-03. Ako nema nul-voda ne može biti istofaznih komponenta. Vektorska suma faznih struja mora biti jednaka nuli, tj. :

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

kako je to prikazano na sl. 5.3-04 . Ako imamo nul vod, onda ne mora vektorski zbroj struja pojedinih faza biti jednak nuli, nego je

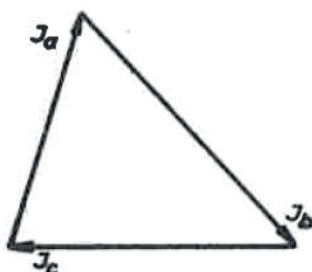


Sl. 6.3-03

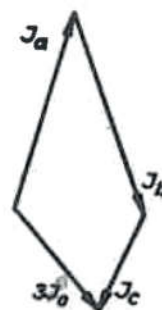
jednak vektorskom zbroju svih triju istofaznih komponenata:

$$J_a + J_b + J_c = 3J_0 \text{ odnosno } J_0 = \frac{1}{3}(J_a + J_b + J_c)$$

kako to vidimo iz sl. 6.3-05.



Sl. 6.3-04



Sl. 6.3-05

Pojedine vektore možemo lako izraziti uvođenjem operatora:

$$a = e^{j120^\circ} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} = -0,5 + j0,866$$

Za razne potencije od "a" dobijemo:

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} = -\frac{1}{2} - j0,866$$

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1 \quad a^5 = a^2 \cdot a^3 = a^2$$

$$a^4 = a^3 \cdot a = a \quad 1 + a + a^2 = 0$$

Tako možemo izraziti pozitivne i negativne simetrične komponente sa:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}_{a_d} &= \mathcal{I}_{a_d} & \mathcal{I}_{a_i} &= \mathcal{I}_{a_i} \\ \mathcal{I}_{b_d} &= \sigma^2 \cdot \mathcal{I}_{a_d} & \mathcal{I}_{b_i} &= \sigma \cdot \mathcal{I}_{a_i} \\ \mathcal{I}_{c_d} &= \sigma \cdot \mathcal{I}_{a_d} & \mathcal{I}_{c_i} &= \sigma^2 \cdot \mathcal{I}_{a_i} \end{aligned}$$

Komponentu pozitivnog sistema dobijemo pomoću jednadžbe:

$$\mathcal{I}_{a_d} = \frac{1}{3} (\mathcal{I}_a + \sigma \cdot \mathcal{I}_b + \sigma^2 \cdot \mathcal{I}_c)$$

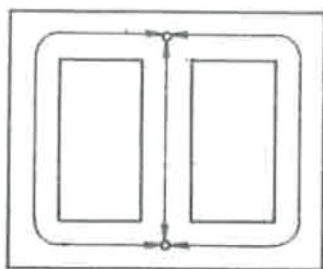
dok komponentu negativnog odnosno inverznog sistema dobijemo pomoću jednadžbe:

$$\mathcal{I}_{a_i} = \frac{1}{3} (\mathcal{I}_a + \sigma^2 \cdot \mathcal{I}_b + \sigma \cdot \mathcal{I}_c)$$

Sva ova razmatranja vrijede i za sve više harmonične članove.

6.32 Nesimetrije u struji magnetiziranja

Evropski jezgrasti tip transformatora je nesimetričan. Duljina magnetskog puta vanjskih faza je veća od duljine magnetskog puta srednje faze kako se to vidi na sl. 6.3-06. Zato srednja faza treba α puta manju struju magnetiziranja. Ako prema Fourieru rastavimo struju magnetiziranja na osnovne i više harmonike, možemo ove svrstati u tri grupe. Prvu grupu sačinjavaju harmonici sa vremenskim redoslijedom faza kao osnovni harmonik (1., 7., 13., itd.), drugu harmonici sa suprotnim redoslijedom faza (5., 11. itd.), dok treću grupu sačinjavaju harmonici koji su istofazni (3., 9., 15. itd.). Zbog nesimetrija u jezgri bit će kod svih harmonika struja srednje faze smanjena " α " puta.



Sl. 6.3-06

ν -tog harmonika:

$$\mathcal{I}_{\nu_0} = \frac{1}{3} (\mathcal{I}_{\nu_a} + \mathcal{I}_{\nu_b} + \mathcal{I}_{\nu_c}) = \frac{\mathcal{I}_{\nu_0}}{3} (1 + \alpha \sigma^2 + \sigma) =$$

$$= \frac{\mathcal{I}_{\nu_0}}{3} \left(1 - \frac{\alpha}{2} - j \frac{\alpha \sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) =$$

Ako po metodi simetričnih komponenata rastavimo harmonike prve grupe dobijemo za istofaznu komponentu (nultu komponentu)

$$= \frac{J_{ya}}{3} (1 - \alpha) \left(\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{J_{ya}}{3} (1 - \alpha) e^{j60^\circ}$$

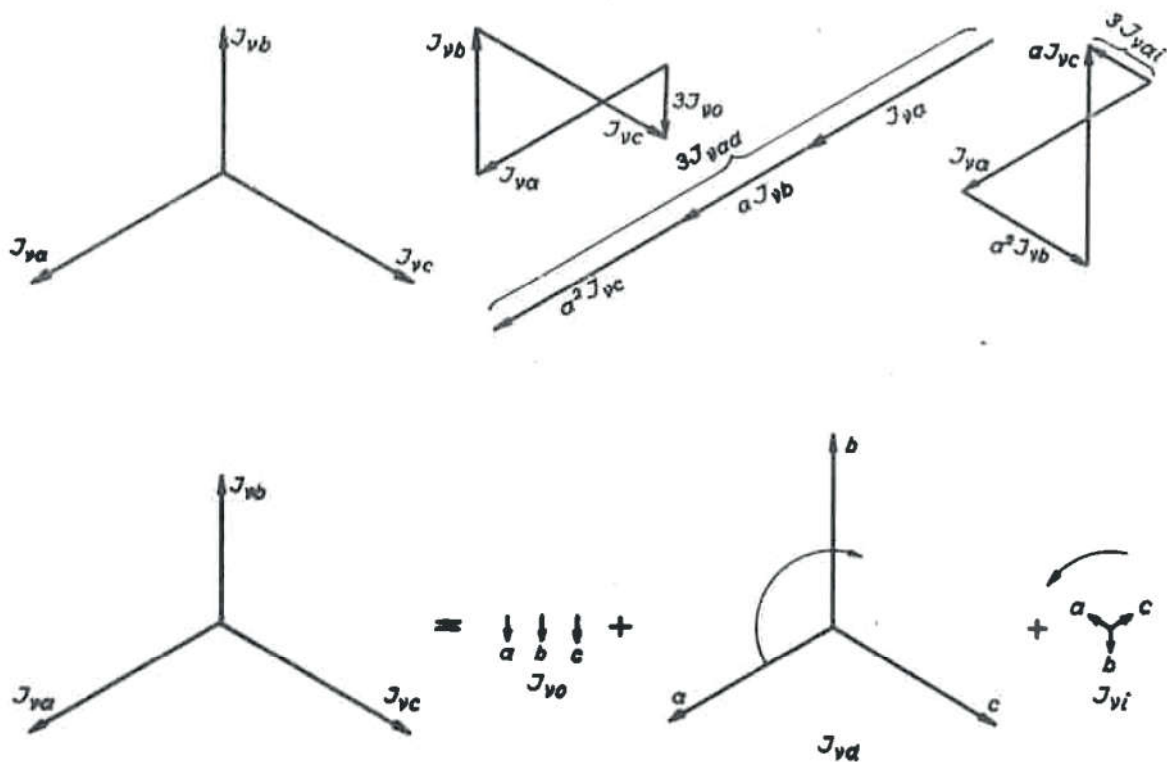
Direktnu simetričnu komponentu prve faze dobijemo ovako:

$$\begin{aligned} J_{yaf} &= \frac{1}{3} (J_{ya} + \alpha J_{yb} + \alpha^2 J_{yc}) = \\ &= \frac{J_{ya}}{3} (1 + \alpha \cdot \alpha^2 \cdot \alpha + \alpha \cdot \alpha^2) = \frac{2 + \alpha}{3} J_{ya} \end{aligned}$$

Inverzna simetrična komponenta prve faze iznosi:

$$\begin{aligned} J_{yai} &= \frac{1}{3} (J_{ya} + \alpha^2 J_{yb} + \alpha J_{yc}) = \frac{J_{ya}}{3} (1 + \alpha \cdot \alpha^2 \cdot \alpha^2 + \alpha \cdot \alpha) = \\ &= \frac{J_{ya}}{3} \left(1 - \frac{\alpha}{2} + j \alpha \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{1 - \alpha}{3} J_{ya} e^{-j60^\circ} \end{aligned}$$

To rastavljanje je grafički prikazano na sl. 6.3-07 .



Sl. 6.3-07

Analogno možemo pristupiti rastavljanju harmonika druge grupe tj. 5., 11., harmonika. Ti harmonici predstavljaju zapravo zrcalnu sliku prijašnjeg slučaja s obzirom na os faze "b", pa su istofazne komponente istog pravca kao i prije. Tako za istofazne komponente dobijemo opet isti rezultat.

Kod 3., 9., 15., harmonika, koji su istofazni ali u srednjoj fazi manji po iznosu, dobijemo za pojedine harmonike struju magnetiziranja kako je prikazano na sl. 6.3-08. Takav nesimetrični sistem struja možemo opet rastaviti na direktni, inverzni i istofazni sistem, te za te harmonike dobijemo kao rezultat općenito:



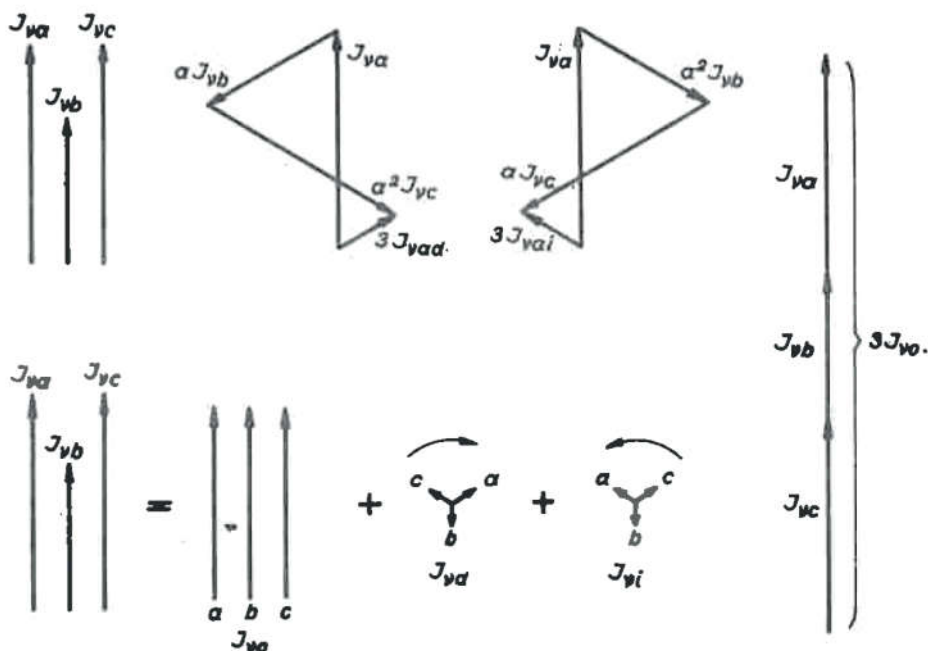
$$J_{v0} = \frac{J_{va}}{3}(1 + \alpha + 1) = \frac{2 + \alpha}{3} J_{va}$$

$$J_{vad} = \frac{J_{va}}{3}(1 + \alpha \cdot a + a^2) = \frac{1 - \alpha}{3} J_{va} \cdot e^{-j60^\circ}$$

Sl. 6.3-08

$$J_{vai} = \frac{J_{va}}{3}(1 + \alpha \cdot a^2 + a) = \frac{1 - \alpha}{3} J_{va} \cdot e^{j60^\circ}$$

kako je vektorski prikazano na sl. 6.3-09 .



Sl. 6.3-09

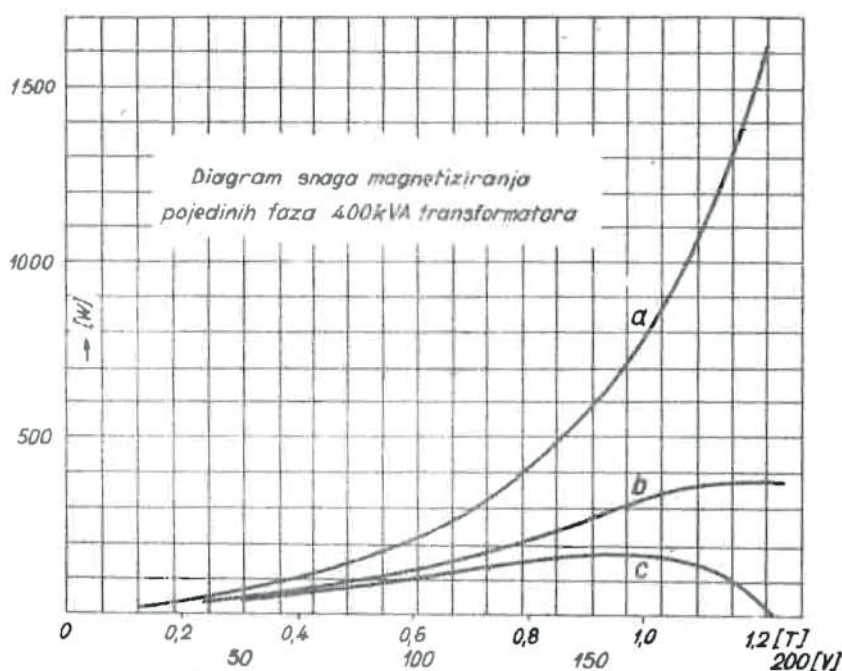
Iz gornjeg razmatranja slijedi da kod evropskog nesimetričnog jezgrastog transformatora imamo u nul-vodu sumu istofaznih komponenta,

svih harmoničnih članova struje magnetiziranja:

$$i_0 = 3 \left[\sum_{k=3,9,15,\dots} \frac{2+\alpha}{3} I_{\phi k} \sqrt{2} e^{j\nu\omega t} + \sum_{k=1,5,7,11,\dots} \frac{1-\alpha}{3} I_{\phi k} \sqrt{2} e^{j\nu(\omega t + 60^\circ)} \right]$$

Ako je transformator simetričan onda je $\alpha = 1$ i otpadaju istofazne komponente 1., 5., 7., harmonika, odnosno ostaju samo 3., 9., 15., itd. harmonik.

Nesimetrije u struji magnetiziranja imaju i svoje posljedice u snazi potrebnoj za magnetiziranje pojedinih faza. Na sl. 6.3-10 pri-



Sl. 6.3-10

kazan je dijagram snaga magnetiziranja pojedinih faza transformatora snage 400 kVA u ovisnosti o narinutom naponu. Iz te slike se vidi da snaga faze "c" može postati kod zasićenog transformatora čak negativna.

Ova razmatranja vrijede za spoj zvijezda sa nul-vodom. Ostaje još pitanje što će se dogoditi ako nul-vod prekinemo. Narinuti sinusni napon ne će moći protjerati za uzbudjivanje sinusnog toka potrebne istofazne komponente struje svih harmoničkih članova, jer nema nul-voda. Medjutim, narinuti sinusni napon zahtijeva bezuvjetno sinusni oblik toka. Moramo zato sinusne struje osnovnog harmonika, te viših harmonika, koje transformator može dobivati iz mreže (5., 7., 11., 13., itd.), razdijeliti na struju potrebnu za uzbudjivanje sinusnog toka i na jedan višak struje, koji kod toga ostaje. Taj višak struje sačinjavaju istofazni harmonici tj. 3., 9. itd. Te istofazne struje predstavljaju višak struje, koji je određen razlikom sinusnih trofaznih struja i traženog nesinusnog oblika struje magnetiziranja. Taj višak struje je narinut transformatoru isto tako, kao što mu je narinut pri-

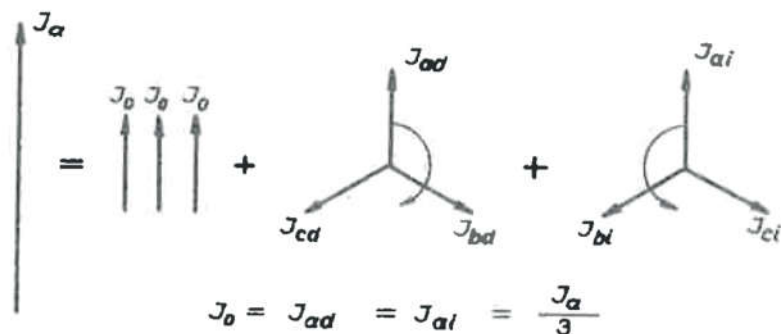
parni napon, pa prema tome predstavlja strujni transformator u naponskom transformatoru; na svakom od tri stupa moramo zamišljati po jedan takav istofazni strujni transformator. Posljedice toga obradjene su u poglavlju 6.33.

Kod svih ovih razmatranja nisu uzeti u obzir parni članovi viših harmonika, jer smo upliv histerese zanemarili.

Nesimetričnost, tj. " α ", u struji magnetiziranja je to veća, što je veći transformator, jer kod većeg transformatora je utjecaj zračnog rasporeda, odnosno njegovog magnetskog otpora, koji je za sve faze jednak, manji. No, što je veći transformator, to je manja relativna vrijednost struje magnetiziranja u odnosu na nominalnu struju, pa zato povećana nesimetričnost kod punog opterećenja dolazi manje do izražaja.

6.33 Nesimetrični teret kod spoja zvijezda - zvijezda sa nul-vodom

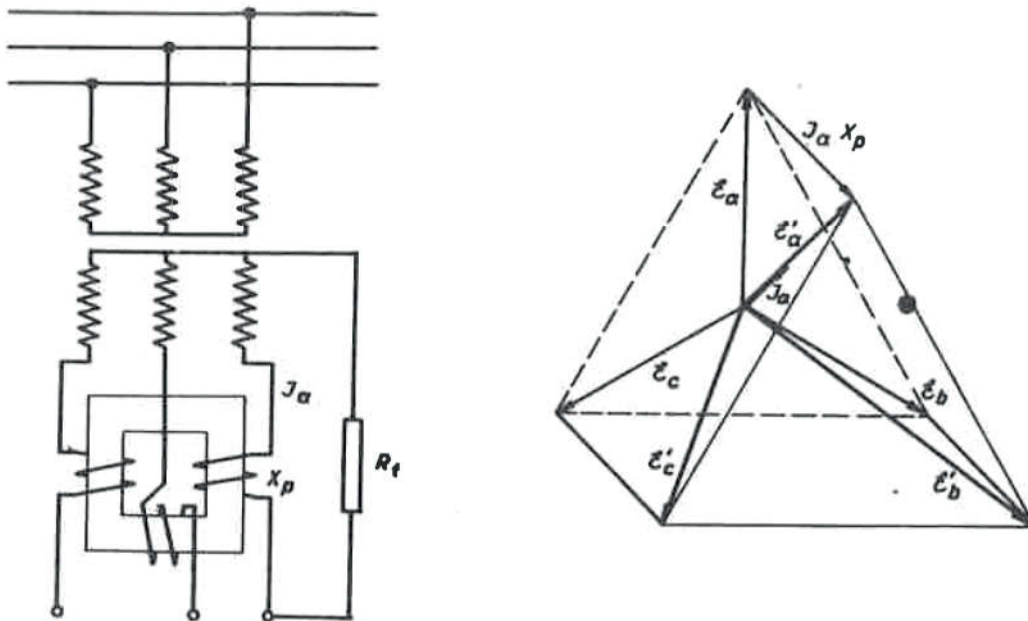
Ako su struje tereta trofaznog transformatora nesimetrične, možemo ih razdijeliti na trofazne i istofazne komponente. Ako je vektorska suma svih triju faznih struja jednaka nuli, nema istofaznih struja. Ako suma svih triju faznih struja nije jednaka nuli, onda je suma struja jednaka struji nul-voda, koja se dijeli na tri jednake istofazne struje u pojedinim fazama ($3 I_0$ prema sl. 6.3-11). Najteži slučaj pred-



Sl. 6.3-11

stavlja puno jednofazno opterećenje, kada sva struja teče kroz nul-vod, pa dobijemo osim direktnih i inverznih simetričnih komponenta u svakoj fazi još i jednu istofaznu komponentu u visini trećine struje opterećenja (vidi sl. 6.3-11), čije amperzavoje primarna strana bez nul-voda ne može kompenzirati. Ovi amperzavoji predstavljaju narinute struje isto kao u prethodnom poglavlju, no s tom razlikom da struje tereta mogu biti daleko veće od struja magnetiziranja, a u jednofaznom kratkom spoju sekundarne strane čak višestruko veće od nominalne struje. Amperzavoji istofazne komponente predstavljaju, kako Vidmar kaže, primarnu stranu nultog strujnog transformatora u naponskom transformatoru. Kod tri jednofazna transformatora, ogrnutog ili peterostupnog trofaznog transformatora ovi amperzavoji potjeraju velike istofazne tokove, koji svojim induciranim naponima snižuju napon inducirane faze. Oni time praktički potpuno onemogućuju pogon u spoju zvijezda-zvijezda sa nul-vodom, jer se kod najmanjeg jednofaznog opterećenja napon opterećene faze sruši. Najlakše si to predstavljamo na taj način, da zamislimo ispred transformatora jednofaznu prigušnicu, koja je namotana na istom stupu sa sve

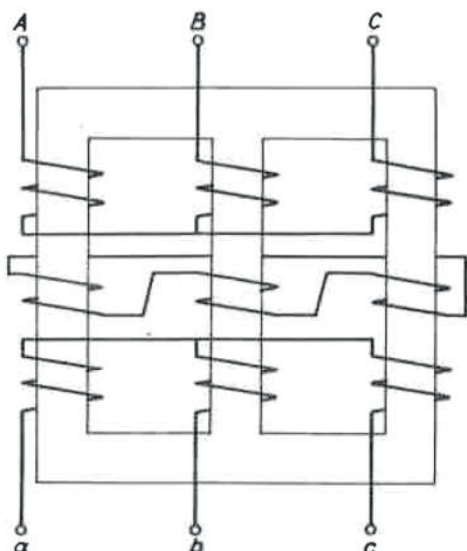
tri faze. Dok je suma svih faznih struja jednaka nuli, nema toka u prigušnici, pa niti pada napona. Ako, međutim, suma svih faznih struja samo malo odstupa od nule, imamo u svakoj fazi velik pad napona, koji radi geometrijskog pribrajanja ruši napon opterećene faze i povećava ostala dva napona, kako je to prikazano za slučaj malog radnog tereta u fazi "a" u vektorskom dijagramu na sl. 6.3-12.



Sl. 6.3-12

Linijski naponi ostanu nepromijenjeni pa zato deformacija faznih napona ne bi smetala trofaznim potrošačima, kao npr. motorima koji su priključeni trofazno bez nul-voda. Za jednofazne potrošače, kao npr. sijalice, bi povećanje napona predstavljalo sigurno izgaranje u kratkom vremenu. Takav pogon sa jezgrom, koja ima magnetski povratni put, je prema tome potpuno nemoguć. Ako, međutim, imamo jezgrasti tip transformatora, čemu odgovara prigušnica sa stupom bez jarma tj. sa daleko većim magnetskim otporom, onda je deformacija napona u podnošljivim granicama do praktički 10 % nominalne struje u nul-vodu. Tamo gdje je nesimetrično opterećenje, odnosno bolje rečeno opterećenje nul-voda manje od 10 %, a to je obično slučaj kod transformatora za industrijske pogone u kojima u velikoj mjeri prevladavaju trofazni potrošači, tamo se bez daljnjega mogu upotrijebiti trofazni transformatori u spoju zvijezda-zvijezda sa nul-vodom.

Ako gledamo nadomjesnu shemu sa prigušnicom kao na sl. 6.3-12 i nehotice nam dolazi pomisao da problem pada napona na prigušnici možemo riješiti na taj način da oko jezgre prigušnice namotamo kratkospojni namot, koji će i kod jednofaznih opterećenja rušiti impedanciju prigušnice. To isto možemo postići i na samoj jezgri transformatora sa jednim namotom spojenim u trokut, kako je to prikazano na sl. 6.3-13. Nulti strujni transformator dobiva time svoj sekundarni namot, kroz kojega će poteći struja kratkog spoja istofazna na svim stupovima, a koja je inducirana od istofaznih tokova u jezgri. Ta kratkospojna struja sa svojim amperzavojima poništava djelovanje istofaznih struja tereta do one mjere, koja je potrebna da sumarni

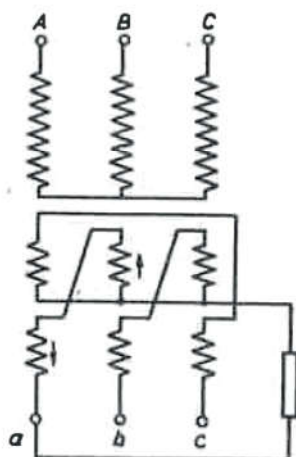


Sl. 6.3-13

formatorima manjih snaga (ispod 250 kVA), kod kojih spoj trokut na primarnoj visokonaponskoj strani traži više zavoja, tanju žicu, više izolacije, te prema tome zahtijeva veće troškove nego spoj zvijezda. Zato se u tim slučajevima upotrebljava radje spoj cik-cak na sekundaru, kako je to već napomenuto u poglavlju 2.92 .

amperzavoji uzbudjuju jedan "ostatni" magnetski tok, koji tu struju kratkog spoja podržava. Taj magnetski tok je toliko manji koliko je manja impedancija trokutnog namotaja. Ovako dodani namot spojen u trokut zovemo tercijski namot.

Običan zaključak iz ovog razmatranja bi bio da treba primarni namot jednostavno uzeti u spoju trokut i time otpada potreba za tercijskim namotom. To stvarno i činimo uvijek kad god je to moguće ili ekonomski opravdano. Međutim, često imamo slučajeve da moramo na obje strane predvidjeti spoj zvijezda-zvijezda, npr. u visokonaponskim distributivnim transformatorima, jer moramo nul-točku transformatora uzemljiti bilo direktno bilo preko Petersenove prigušnice, ili npr. u niskonaponskim trans-



Sl. 6.3-14

Kod spoja cik-cak imamo prema sl. 6.3-14 sekundarno dvije zvijezde, koje svojim amperzavojima djeluju jedna protiv druge. Kod jednofaznog opterećenja imamo na jednom stupu transformatora amperzavoje jednog pravca, a na drugom stupu amperzavoje protivnog pravca. Ako jedne i druge rastavimo metodom simetričnih komponenta na trofazne i istofazne komponente, vidimo da istofazne komponente svakako djeluju u suprotnim pravcima te se poništavaju, pa zato možemo transformator u tom spoju jednofazno opteretiti i do nominalne snage.

Ako se transformator nalazi u ulju, zatvara se magnetski tok između jarma velikim dijelom preko željeznog lima kotla, kako je to prikazano na sl. 6.2-12 . Sam kotao je naravno električki relativno dobar vodič i predstavlja sekundarni namot za strujni nulti transformator. Kod visokonaponskih distributivnih trans-

formatora sa krutim uzemljenjem predstavlja svaki dozemni spoj dalekovoda kratak spoj jedne faze i time maksimalno moguće opterećenje jedne faze. Tok od jarma do jarma preko kotla razvije se u tolikoj mjeri, da sekundarna kratkospojna struja u kotlu može u vrlo kratkom vremenu, pa čak i u vremenu od jedne sekunde, radi prevelikog zagrijavanja ugroziti kotao, pa je u tim slučajevima primjena tercijarnog namota neizbježna. Tercijarni namot dimenzionira se u takvim slučajevima obično za trećinu nominalne snage dotičnog transformatora.

6.4 Kratki spoj

Najveću struju kratkog spoja dobijemo ako kod punog napona na primarnoj strani kratko spojimo stezaljke sekundara. U poglavlju 2.7 definirali smo napon kratkog spoja (U_k , odnosno u_k u % nominalnog napona) kao onaj napon, kod kojeg dobijemo struju kratkog spoja jednaku nominalnoj struji. U omjeru povećanja napona povećat će se i struja kratkog spoja; kod nominalnog napona će iznositi:

$$I_k = \frac{U_n}{U_k} I_n = \frac{100}{u_k} I_n, \text{ jer je } \frac{U_n}{U_k} = \frac{100}{u_k}$$

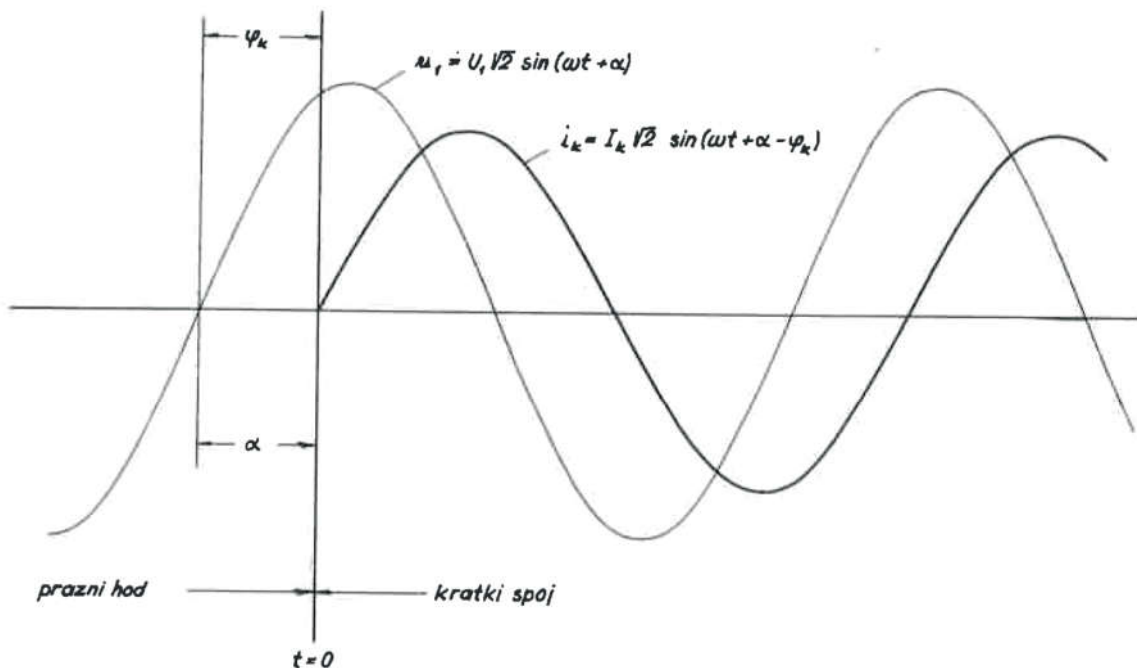
Tu struju zovemo trajnom strujom kratkog spoja, jer ona traje tako dugo dok traje kratki spoj, naravno, pod pretpostavkom da je transformator primarno priključen na krutu mrežu.

Međutim, ako transformatoru u praznom hodu momentano kratko spojimo sekundarne stezaljke, ne može struja trenutno narasti na vrijednost struje kratkog spoja; iznimku čini slučaj u kojem bi odgovarajuća struja kratkog spoja kao izmjenična veličina baš u trenutku spajanja u kratki spoj imala vrijednost nula, kako je u vremenskom dijagramu na sl. 6.4-01 prikazano.

Ako primarno narinuti napon iznosi :

$$u_1 = U_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$$

gdje kut " α " predstavlja vremenski kut za koji napon prethodi pred



Sl. 6.4-01

Vremenski dijagram napona i struje za slučaj kratkog spoja u trenutku u kojem je $\alpha = \varphi_k$

početkom kratkog spoja (radi lakšeg promatranja se uzima za $t = 0$ onaj trenutak, u kojem nastupa kratki spoj), trajna struja kratkog spoja će iznositi :

$$i_k = \frac{U_1 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} = I_k \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

R_k i X_k se mogu izračunati iz ekvivalentne sheme (vidi pogl.2.6), koja za slučaj kratkog spoja izgleda kao na sl. 6.4-02; ako zanemarimo struju magnetiziranja, odnosno njoj odgovarajuće ekvivalentne otpore, dobijemo :

$$R_k = R_1 + R_2'$$

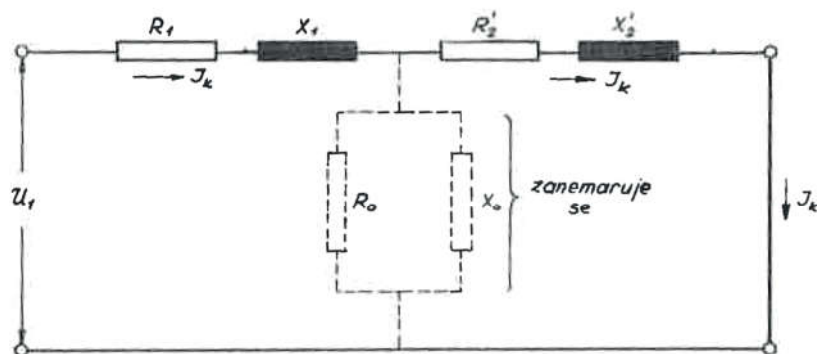
$$X_k = X_1 + X_2'$$

Fazni kut zaostajanja struje J_k za naponom definiran je sa :

$$\varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}$$

Iz sl. 6.4-01 možemo zaključiti da će transformator iz stanja praznog hoda bez prelazne pojave, tj. momentano, preći u stanje kratkog spoja u slučaju kada je $\alpha = \varphi_k$.

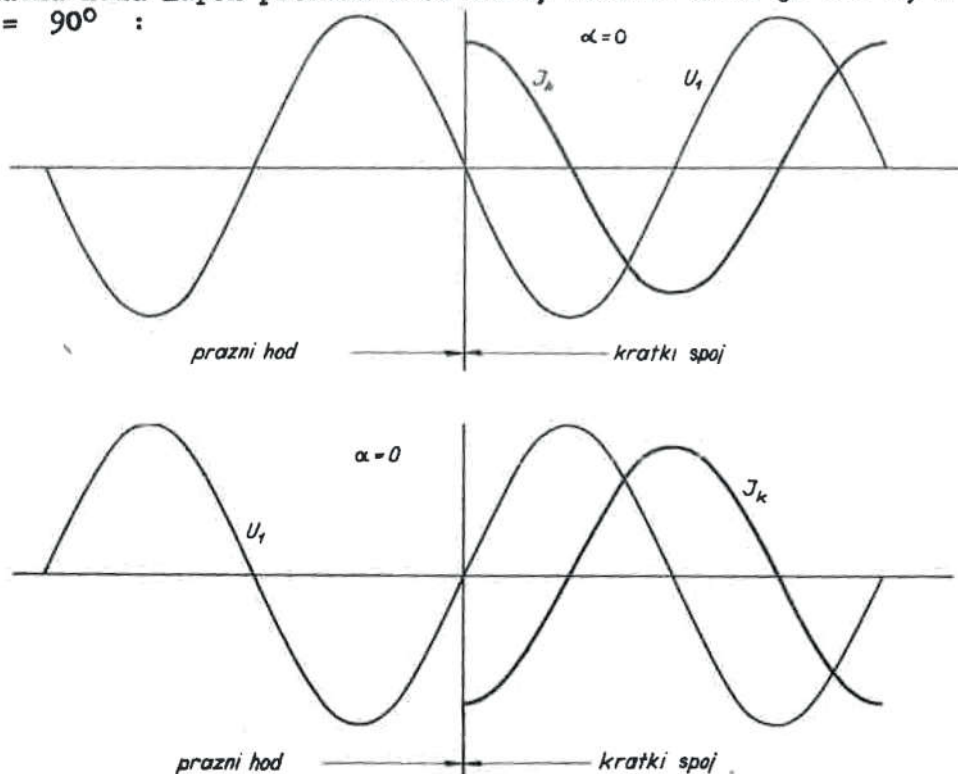
Ako zanemarimo radni otpor R_k , tj. ako je $\varphi_k = 90^\circ$, dolazimo do zaključka da, napravimo li kratki spoj u trenutku kad napon ima maksimalnu vrijednost, prelazi transformator momentano iz stanja praznog hoda u stanje kratkog spoja, jer je $\alpha = 90^\circ = \varphi_k$.



Sl. 6.4-02

Pojednostavnjena ekvivalentna shema transformatora za slučaj kratkog spoja na sekundarnim stezaljkama

Pogledajmo što će se dogoditi ako napravimo kratak spoj baš u trenutku kada napon prolazi kroz nulu, odnosno kada je $\alpha = 0$, a $\varphi_k = 90^\circ$:



Sl. 6.4-03

Vremenski dijagram napona i struje kratkog spoja za slučaj $\alpha = 0$, $\varphi_k = 90^\circ$

Prema sl. 6.4-03 bi morala struja kratkog spoja momentano narasti na svoju maksimalnu vrijednost. Momentana promjena struje je nemoguća, jer bi se inducirao po jednadžbi $e = -w \frac{di}{dt}$ beskonačno velik napon, koji se toj promjeni protivi. Prema tome moramo očekivati prelaznu pojavu. Da odredimo oblik prelazne pojave ne zanemarujući R_k , postavimo diferencijalnu jednadžbu za slučaj prelaza iz praznog hoda u kratki spoj. U svakom trenutku moraju svi naponi u promatranom krugu (vidi sl. 6.4-02) biti u ravnoteži, tj. po Kirchhoffovom zakonu suma svih EMS mora biti jednaka sumi svih padova napona:

$$u_k - i_k R_k - L_k \frac{di_k}{dt} = 0$$

Nakon svršetka prelazne pojave dobit će struja i_1 vrijednost prije definirane trajne struje kratkog spoja i_k , koju ćemo ovdje označiti sa i' . Struju i_1 , tj. struju prelazne pojave možemo zamisliti kao sumu trajne struje kratkog spoja i' i neke struje i'' , koja je uvjetovana početnim uvjetima. Tako će npr. za slučaj trenutnog spajanja transformatora iz praznog hoda (zanemarujemo struju praznog hoda) u kratki spoj vrijediti slijedeći početni uvjet:

$$t=0 \quad i' + i'' = i_0 = i_k = 0$$

a pošto je $i' = i_k$ bit će $i'' = -i' = -i_k$

Napisane relacije pokazuju da i'' predstavlja dodatnu komponentu trajnoj struji kratkog spoja i' , i da u trenutku kratkog spoja ($t=0$) ona ima vrijednost negativne trajne struje kratkog spoja; to znači da u trenutku $t=0$ ukupna struja ima vrijednost nula, što je fizikalno jasno, jer u beskonačno kratkom vremenu se struja ne može promijeniti od vrijednosti nula na neku drugu konačnu vrijednost. Dodatnu struju i'' ništa ne održava pa ona mora nestati, te tako dobijemo rješenje prethodno napisane diferencijalne jednadžbe:

$$i_k = \frac{U\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} + C e^{-\frac{R_k}{L_k} t} = i' + i''$$

Sa već navedenim početnim uvjetima dobijemo integracionu konstantu:

$$C = \frac{-U\sqrt{2}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \sin(\alpha - \varphi_k)$$

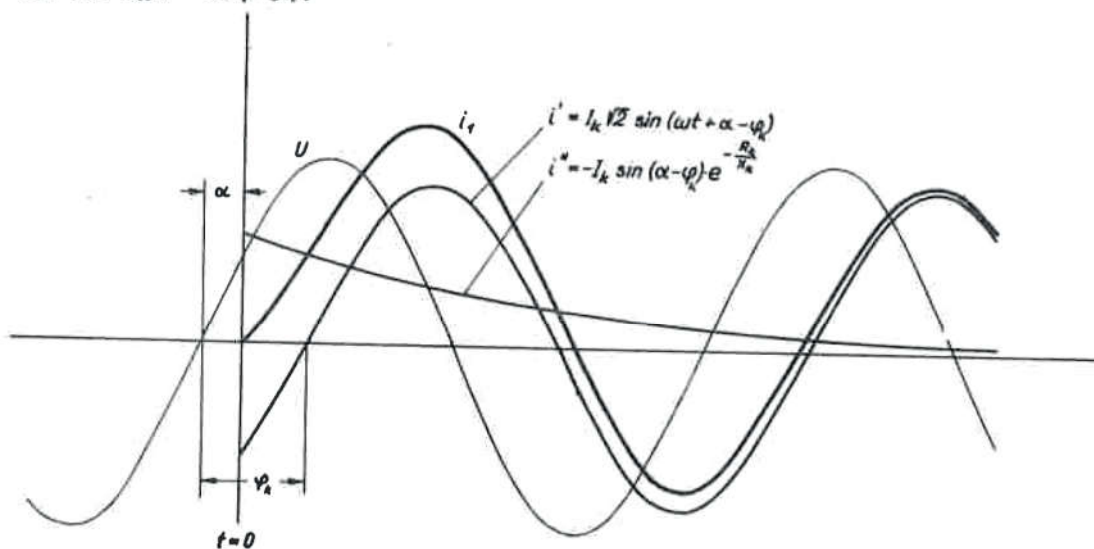
i konačno rješenje:

$$i_k = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \right]$$

Konačno rješenje, prelazne pojave nam pokazuje oblik promjene struje uz pomoć uzetih veličina i' i i'' . Komponenta struje kratkog spoja i' , tj. prvi član u rješenju diferencijalne jednačbe, ima oblik trajne struje kratkog spoja, kako je to već napomenuto, dok druga komponenta i'' ima oblik eksponencijalno padajuće krivulje sa početnom vrijednošću definiranom sa :

$$\frac{-U\sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi_k)}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Ova početna vrijednost struje i'' u stvari predstavlja negativni iznos vrijednosti trajne struje kratkog spoja i' u trenutku $t = 0$. Prelazna pojava i obje komponente i' i i'' su grafički prikazani na sl. 6.4-04.



Sl. 6.4-04

Prelazna pojava struje kratkog spoja u slučaju da je kratki spoj nastupio iz praznog hoda

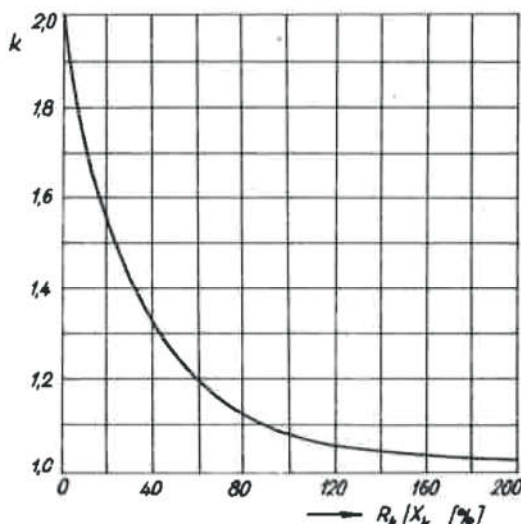
U rješenju za i_1 možemo eksponent prirodnog broja pomnožiti i podijeliti sa kružnom frekvencijom ω , te dobijemo :

$$i_1 = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - \sin(\alpha - \varphi_k) e^{-\frac{R_k}{X_k} \omega t}$$

Iz ovog rješenja slijedi općenito pravilo da u slučaju kratkog spoja u trenutku kada je $(\alpha - \varphi) = -\pi/2$ i u vremenu $\omega t = \pi$ tj. polovicu periode iza početka kratkog spoja, nastupa maksimalna struja kratkog spoja, koju zovemo udarnom strujom kratkog spoja I_{ku} ; ova iznosi

$$I_{ku} = k\sqrt{2} \cdot I_k$$

Faktor "k" je prikazan u sl. 6.4-05 u ovisnosti od omjera ($R_k/X_k \cdot 100 \%$).



Sl. 6.4-05
Ovisnost faktora
k o omjeru

$$\frac{R_k}{X_k}$$

Ako zanemarimo radni otpor R_k onda je $\varphi = \frac{\pi}{2}$ (ako kratki spoj napravimo u trenutku kada naponski val počinje ($\alpha = 0$), dobijemo:

$$i_k = \frac{U\sqrt{2}}{X_k} \left[\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right]$$

Maksimalnu struju i_{kmax} u ovom slučaju dobijemo kod $\omega t = \pi/2 + \varphi = \pi$ i s time:

$$i_{kmax} = \frac{U\sqrt{2}}{X_k} \left[\sin\left(\pi - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) \right] = 2 \frac{U\sqrt{2}}{X_k}$$

Dakle, u slučaju da je $R_k = 0$, faktor "k" poprima maksimalnu vrijednost 2.

Pokušajmo odrediti koliku će vrijednost imati udarna struja kratkog spoja kod transformatora snage 100 kVA ($u_k = 4,3 \%$, $u_r = 2,3 \%$) i transformatora snage 30 000 kVA ($u_k = 10 \%$, $u_r = 0,55 \%$) i kako dugo će trajati prelazna pojava.

U jednadžbi za i_1 omjer L_k/R_k odnosno $X_k/\omega R_k$ predstavlja vremensku konstantu T_k eksponencijalne funkcije, po kojoj opada dodatna struja i'' ; prema tome vremenska konstanta iznosi:

$$T_k = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{\sqrt{u_k^2 - u_r^2}}{\omega \cdot u_r}$$

Za slučaj transformatora snage 100 kVA iznosi T_k :

$$T_k = \frac{\sqrt{4,3^2 - 2,3^2}}{2\pi \cdot 50 \cdot 2,3} = \frac{5}{1000} = 0,005 \text{ sek}$$

Prelazna pojava će za vrijeme $3 T_k$ pasti na 5 % svoje početne vrijednosti, tj. praktički nestati. Kod promatranog transformatora će to vrijeme iznositi $3 T_k = 3 \cdot 0,005 = 0,015 \text{ sek}$ tj. svega 0,75 perioda ako je $f = 50 \text{ Hz}$.

Za transformator 30 000 kVA iznosi T_k :

$$T_k = \frac{\sqrt{10^2 - 0,55^2}}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,55} = \frac{58}{1000} = 0,058, \text{ odnosno}$$

$$3 T_k = 3 \cdot 0,058 \text{ sek} = 8,7 \text{ perioda u slučaju da je } f = 50 \text{ Hz}$$

Vidimo da je vrijeme prelazne pojave dulje ako je snaga transformatora veća, jer relativna vrijednost radnog otpora sa veličinom transformatora opada sa $\sqrt{P}$ (vidi pogl.5.3); u svakom slučaju prelazna pojava traje tako kratko, da se u tom kratkom vremenu ne može razviti toplina opasna za transformator.

Kako je, međjutim, sa visinom trajne i udarne struje kratkog spoja ?

Kod transformatora 100 kVA iznosi trajna struja kratkog spoja:

$$I_{k100} = \frac{100}{U_k} \cdot I_n = \frac{100}{4,3} \cdot I_n = 23,2 \cdot I_n$$

Udarne struja kratkog spoja iznosi:

$$I_{ku100} = k\sqrt{2} \cdot I_k = 1,18\sqrt{2} \cdot 23,2 \cdot I_n = 38,8 \cdot I_n$$

$$k = 1,18 - \text{vidi sl. 6.4-05 za } R_k / X_k = u_r / u_k = 0,635$$

Kod transformatora 300 000 kVA iznose trajna i udarna struja kratkog spoja :

$$I_{k300000} = \frac{100}{U_k} \cdot I_n = \frac{100}{10} \cdot I_n = 10 \cdot I_n$$

$$I_{ku300000} = k\sqrt{2} \cdot I_k = 1,9\sqrt{2} \cdot 10 \cdot I_n = 26,8 \cdot I_n$$

Možemo tvrditi da kod malih transformatora udarna struja kratkog spoja praktički ne prelazi 40-struku, a kod velikih ne 30-struku vrijednost nominalne struje.

Čak i tako velika udarna struja kratkog spoja, radi vrlo kratkog trajanja, ne može termički ugroziti transformator. Problem zagrijavanja od trajne struje kratkog spoja smo već obradili u poglavlju 3.5, pa ga ovdje ne ćemo posebno obrazlagati.

Međjutim, velike struje mogu uzrokovati velika mehanička naprezanja, koja ipak mogu ugroziti radnu sposobnost transformatora (vidi pogl.6.6).

6.5 Struja ukapćanja

Ako transformatorom bez tereta tj. sa otvorenim sekundarnim stepaljkama narinemo na primarni namot napon $u_1 = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$ tada će kroz primar poteći struja praznog hoda :

$$i_0 = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

gdje je

$$\varphi = \arctan \frac{L_1}{R_1}$$

α = vremenski kut zaostajanja momenta ukapćanja za početkom vala napona.

Ako narinemo napon u trenutku kada je :

$$\alpha - \varphi = 0$$

onda nema prelazne pojave, jer u trenutku ukapćanja ionako iznaša struja $i_0 = 0$.

Ako priključimo napon u kojem bilo drugom trenutku, moramo na osnovu opće diferencijalne jednađbe, isto tako kao kod kratkog spoja, računati sa

$$u_1 - i_1 R_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = 0$$

pa dobijemo odgovarajuće rješenje :

$$i_1 = \frac{U\sqrt{2}}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi) e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \right]$$

Iz te jednađbe, kao i kod kratkog spoja, vidimo da ćemo dobiti najveću struju ukapćanja u slučaju kad je :

$$(\alpha - \varphi) = \pm \frac{\pi}{2} \text{ ili } \frac{3}{2}\pi$$

- a ova će nastupiti u vremenu :

$$\omega t = \pi$$

Razlika prema prelaznoj pojavi kratkog spoja je u vremenskoj konstanti, koja je u ovom slučaju mnogo veća jer je omjer.

$\omega L_1 / \omega R_1$ mnogo veći od $X_k / \omega R_k$.

Ako npr. struja magnetiziranja transformatora snage 100 kVA iznosi cca 5 % nominalne struje, a $u_x = 3,6$ %, onda možemo računati omjer induktiviteta transformatora u praznom hodu (L_1) i u kratkom spoju (L_k) :

$$\omega L_k \cdot 0,05 \cdot I_n = U_n$$

$$\omega L_k \cdot I_n = \frac{3,6}{100} U_n$$

a odavde je

$$\frac{L_k}{L_n} = \frac{100}{0,05 \cdot 3,6} = 555$$

Dalje je približno: $\frac{R_1}{R_k} \approx \frac{1}{2}$ pa prema tome dobijemo vrijednost vremenske konstante ukapćanja:

$$T_u = T_k \frac{555}{0,5} = 1110 T_k = 1110 \frac{15}{1000} \approx 16,5 \text{ sek}$$

(za T_k vidi pogl. 6.4).

U toj računici, međjutim, nismo uzeli u obzir da se željezo zasiti, da je prema tome $L_1 = f(B)$. Umjesto sa strujom i induktivnim otporom koji se mijenja sa promjenom magnetske indukcije radje računajmo sa tokom zanemarujući radni otpor R_1 ; dobijemo pojednostavnjenu diferencijalnu jednadžbu:

$$u_k - w \frac{d\Phi_k}{dt} = 0$$

ili u integralnom obliku:

$$\Phi_k = \frac{1}{w} \int_0^t u \cdot dt$$

Pošto je narinuti napon $u = U \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha)$ možemo pisati:

$$\Phi_k = \frac{1}{w} \int_0^t U \sqrt{2} \sin(\omega t + \alpha) dt \quad \text{pa rješenje glasi:}$$

$$\Phi_k = \frac{U \sqrt{2}}{\omega w} [\cos(\omega t + \alpha) - (\cos \alpha)]$$

Izraz $\frac{U \sqrt{2}}{\omega w}$ predstavlja nominalni tok u jezgri transformatora u praznom hodu Φ_n pa je:

$$\Phi_k = \Phi_n [\cos(\omega t + \alpha) - (\cos \alpha)]$$

Maksimalni tok, slično kao i udarna struja kratkog spoja; iznosi:

$$\Phi_{max} = 2 \cdot \Phi_n$$

K tome moramo još uzeti u obzir da je kod ukapčanja u jezgri ostao tok remanencije ϕ_r pa je prema tome:

$$\phi_{max} = 2\phi_n + \phi_r$$

Kod tako velikih tokova, odnosno odgovarajuće povećanih indukcija, raste i struja magnetiziranja. Ako uz radni otpor zanemarimo i rasipanje, mogli bi u najnepovoljnijem slučaju trebati cca 2000 puta više amperzavoja tj. 2000 puta veću struju magnetiziranja; kod promatranog transformatora snage 100 kVA bi struja magnetiziranja u ovom slučaju iznosila

$$\frac{2000 \cdot 5}{100} I_n = 100 \cdot I_n$$

Ako ne zanemarimo radni i induktivni rasipni otpor primara, slika se potpuno izmijeni. Pretpostavimo da na primarnu stranu otpada $u_k/2$. Ako bi primar transformatora priključili na mrežu i ako bi pretpostavili da induktivitet primara ima veličinu rasipnog induktiviteta primara (a to nije slučaj ni kod transformatora bez željezne jezgre), tada bi iznosila maksimalna udarna struja ukapčanja:

$$I_{ou} = \frac{100 \cdot \sqrt{2}}{u_k/2} \cdot I_n = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \frac{100}{u_k} = I_{ku} \quad \text{uz } k=2$$

tj. u najnepovoljnije zamišljenom slučaju bi maksimalna udarna struja ukapčanja dostigla iznos udarne struje kratkog spoja (vidi poglavlje 6.4). U našem primjeru za transformator 100 kVA i $u_k = 4,7\%$ bi dobili za udarnu struju ukapčanja

$$I_{ou} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \frac{100}{4,7} = 42,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_n$$

što je za cca 2 puta manje od prethodno izračunate maksimalne struje magnetiziranja za isti transformator sa zasićenom jezgrom.

Pošto je induktivitet primara znatno veći od rasipnog induktiviteta i u slučaju da je jezgra zasićena, to možemo zaključiti da će maksimalna vrijednost udarne struje ukapčanja biti uvijek niža od vrijednosti udarne struje kratkog spoja.

Iz iznesenog slijedi da je za mehanička naprezanja odlučujuća udarna struja kratkog spoja, a ne udarna struja ukapčanja.

Radi naglog opadanja induktiviteta L_1 pri porastu toka, koji zasiti željezo transformatora, bit će vremenska konstanta mnogo manja od one koju smo prethodno izračunali. Ipak će $3 T_1$ trajati nekoliko sekundi. Kroz tako kratko vrijeme ne će namot transformatora biti termički ugrožen, ali osigurači koji štite transformator mogu vrlo lako izgorjeti, jer je vremenska konstanta njihove rastalne niti daleko manja u odnosu na vremensku konstantu prelazne pojave ukapčanja. Zato je potrebno kod manjih transformatora, koji se priključuju na mrežu preko osigurača, ove dimenzionirati za nekoliko puta veću struju u odnosu na nominalnu struju transformatora. Takovi osigurači služe u tom slučaju samo kao zaštita od kratkog

spoja, dok se zaštita od preopterećenja može predvidjeti na sekundarnoj strani, gdje udarna struja ukapćanja nema utjecaja.

6.6 Sile kratkog spoja

Po Biot-Savart-ovom zakonu djeluje na vodič duljine l , kroz kojeg prolazi struja J i koji se nalazi u magnetskom polju gustoće B sila F prema relaciji

$$F = (J \times B) \cdot l \quad \text{gdje su } J \text{ i } B \text{ vektori a } l \text{ skalar.}$$

U slučaju da su B i J istofazni tada sila ima veličinu:

$$F = B \cdot I \cdot l \text{ (njutn)} = 0,102 \cdot B \cdot I \cdot l \text{ (kp)} \quad (6.6-01)$$

s tim da su jedinice za B (T), I (A) i za l (m).

Postavimo li dva vodiča paralelno i kroz njih pustimo struju J_1 i J_2 u suprotnim pravcima (vidi sl. 6.6-01), oko svakog vodiča će se razviti magnetsko polje. Prema tome će svaki od vodiča ležati u polju svog susjeda, čije će polje na tom mjestu iznositi prema relaciji:

$$B = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{J}{l_s} \quad (6.6-02)$$

gdje je l_s srednja duljina silnice koja prolazi kroz susjedni vodič a iznosi u našem slučaju: $l_s = 2 r \pi$.

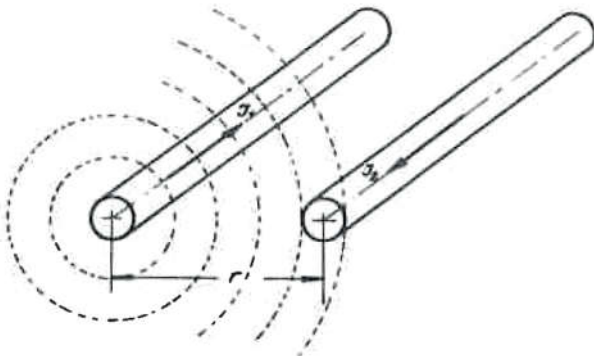
Iz prethodnog zaključujemo da će sila, koja odbija vodiče, u slučaju da su vodiči protjecani istofaznim strujama, iznositi:

$$\begin{aligned} F_1 = F_2 &= 0,102 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{l_s} = 1,28 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{l_s} = \\ &= 1,28 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r} = 2,04 \cdot 10^{-8} \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{r} \text{ (kp)} \end{aligned} \quad (6.6-03a)$$

U slučaju da je $J_1 = J_2 = J$ vrijedi

$$F = 1,28 \cdot 10^{-7} I^2 \frac{l}{l_s} = 2,04 \cdot 10^{-8} I^2 \frac{l}{r} \quad \text{odnosno} \quad (6.6-03b)$$

$$F_{\max} = 2,04 \cdot 10^{-8} \cdot I_{\max}^2 \frac{l}{r} \quad (6.6-03c)$$



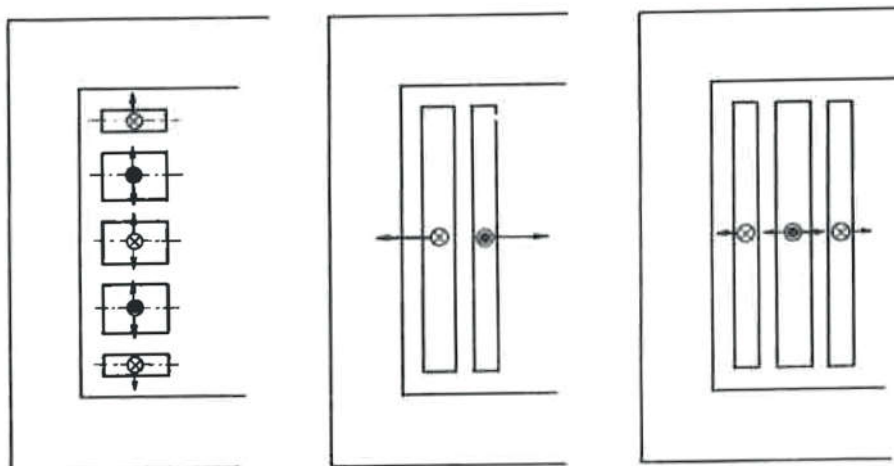
Sl. 6.6-01

Ako kroz vodiče protječe struja u istom pravcu, međusobna sila ne mijenja veličinu, ali postaje privlačna. Prema tome će u namotima transformatora postojati sile koje će zavoje pojedinih namota međusobno stiskati, a primarne i sekundarne namote međusobno odbijati.

Sa silama koje stežu svitke nema poteškoća, što nije slučaj sa odbojnim silama između primarnih i sekundarnih namota. Pošto sile rastu sa kvadratom

struje, odnosno kod svitaka sa kvadratom amperzavoja, mogu postati kod udarnih struja kratkog spoja vrlo neugodne.

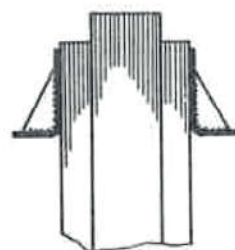
U sl. 6.6-02 prikazan je smjer djelovanja sila kod raznih izvedbi namota.



Sl. 6.6-02
Smjer djelovanja sila kod različitih izvedbi namota

Kod plosnatih namota vidimo da sile imaju takovo djelovanje da hoće svitke u aksijalnom pravcu razmaknuti, pa zato treba konstruktivno na jarmovima predvidjeti jake potpornje, kojima bi se namoti u aksijalnom pravcu stegnuli, kako to prikazuje sl. 6.6-03. Pošto nema radijalnih sila, namoti, pa prema tome i jezgre, mogu imati pravokutni oblik.

Kod cilindričnih i bikoncentričnih namota sile pritišću unutarnji namot na jezgru, pa je potrebno unutarnji namot prema jezgri podložiti; iste sile vanjski namot rastežu, pa se moraju svladavati jedino s vlastitom mehaničkom čvrstoćom bakra namota. Naprezanja u bakru vanjskog cilindričnog namota predstavljaju problem u gradnji velikih transformatora. Kako ćemo poslije vidjeti, sile naprežu bakar i preko granice elastičnosti, pa je potrebno voditi o njima računa. Pošto sile djeluju koncentrično, to moraju cilindrični i bikoncentrični namoti biti okruglog oblika, jer bi se u protivnom slučaju namoti deformirali u pravcu okruglog oblika.



Sl. 6.6-03
Učvršćivanje svitaka u aksijalnom pravcu

Pošto je sila proporcionalna gustoći toka, a ova se linearno mijenja od maksimuma na rubu razmaka između namota do nule na vanjskoj površini namota prema sl. 6.6-04, to su i sile na vodiče vanjskog cilindričnog namota na unutarnjem obodu maksimalne, a na vanjskom obodu jednake nuli.

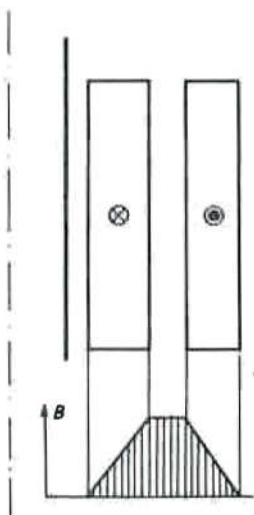
Na cilindrični namot djeluju prema tome sve sile radijalno. One rastežu vanjski namot prema sl. 6.6-05, te možemo prema (6.6-03a) izračunati specifična naprezanja u bakru kako slijedi:

$$\xi F' = F''$$

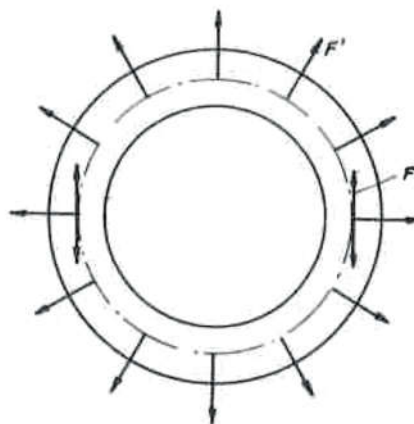
$$F'' = 1,28 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 \cdot w_1 \cdot I_2 \cdot l_{cuv} \cdot w_2}{b''} \cdot \frac{1}{2}$$

gdje je:

- l_{cuv} - srednja duljina zavoja vanjskog namota (m)
- b'' - visina raspora između namota odnosno duljina silnica kroz zrak (m)



Sl. 6.6-04
Raspodjela magnetske indukcije
namota primara i sekundara



Sl. 6.6-05
Djelovanje sila na cilindrični
namot

Duljina silnica l_s u gornjoj jednadžbi je zamijenjena samo sa duljinom silnica kroz zrak b'' (za b'' vidi pogl. 5.4), dok je preostali dio puta, koji vodi kroz željezo, zanemaren radi velike vodljivosti željeza. Za magnetsku indukciju je uzeta $1/2$ od ukupne vrijednosti, jer raspored gustoća magnetskog toka po presjeku svitka linearno pada od maksimalne vrijednosti B na unutarnjem rubu do vrijednosti 0 na vanjskom rubu namota (vidi sl. 6.6-04).

Pošto je $I_1 w_1 = I_2 w_2$ možemo pisati:

$$F''_{max} = 0,64 \cdot 10^{-7} \frac{l_{cuv}}{b''} \cdot w^2 \cdot I_{max}^2 \quad (kD) \quad (6.6-04)$$

s tim da se stavljaju isti indeksi na vrijednosti l_{Cu} , w i I_{max} .

Maksimalna sila koja djeluje u presjeku bakra iznosi prema tome:

$$F_{max} = \frac{F_{max}^u}{2\pi} = S_{Cu} \cdot \sigma_{Cu \max}$$

gdje je:

S_{Cu} - ukupni presjek bakra vanjskog namota (m^2)

σ_{Cu} - specifično naprezanje u bakru (kp/m^2)

$$\sigma_{Cu \max} = \frac{F_{max}^u}{2\pi \cdot S_{Cu}}$$

Ako struju izrazimo sa specifičnim opterećenjem, a presjek bakra s ukupnom masom bakra u transformatoru, dobijemo:

$$\Gamma = \frac{I \cdot W}{S_{Cu}} \text{ (A/m}^2\text{)} \text{ odnosno specifično strujno opterećenje}$$

pri udarnoj struji kratkog spoja: $\Gamma_{ku} = \frac{I_{ku} \cdot W}{S_{Cu}}$

Masa bakra iznosi:

$$m_{Cu} = 2 \cdot m \cdot S_{Cu} \cdot l_{Cu} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \text{ (kg)}$$

gdje je

l_{Cu} - srednja duljina zavoja gornjonaponskog i donjonaponskog namota dok smo sa

l_{Cuv} - označili srednju duljinu vanjskog namota; približno se može postaviti da je $l_{Cu} \approx 0,85 l_{Cuv}$

m - broj faza - u našem slučaju $m = 3$

Naprezanje uslijed udarne struje kratkog spoja I_{ku} bi bilo:

$$\begin{aligned} \sigma_{Cu} &= 1,28 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{l_{Cuv}}{0,85 \cdot 2 \cdot b''} \cdot W^2 \cdot \frac{\Gamma_{ku}^2 \cdot S_{Cu}^2}{W^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot S_{Cu}} = \\ &= 1,28 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{m_{Cu} \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma_{ku}^2}{0,85 \cdot 3 \cdot 8,9 \cdot 2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot b''} \text{ m} \\ \sigma_{Cu} &= 2,24 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{m_{Cu} \cdot \Gamma_{ku}^2}{b''} 10^{-6} \left[kp/m^2 \right] \quad (6.6-05) \end{aligned}$$

Uzmimo za primjer slučaj trofaznog transformatora za 110/10 kV, 25 MVA, koji ima:

$$\Gamma_n = 3 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$$

$$u_k = 10 \%$$

$$m_{Cu} = 5,650 \text{ kg}$$

$$b'' = 1,485 \text{ m}$$

Gustoća struje pri udarnoj struji kratkog spoja I_{ku} iznosi:

$$\begin{aligned} \Gamma_{ku} &= k \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{I_k}{S_{cu}} = k \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{100 \cdot I_n}{u_k \cdot S_{cu}} = \\ &= 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{100}{u_k} \cdot \Gamma_n = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{100}{10} \cdot 3 \cdot 10^6 = 76,5 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2 \end{aligned}$$

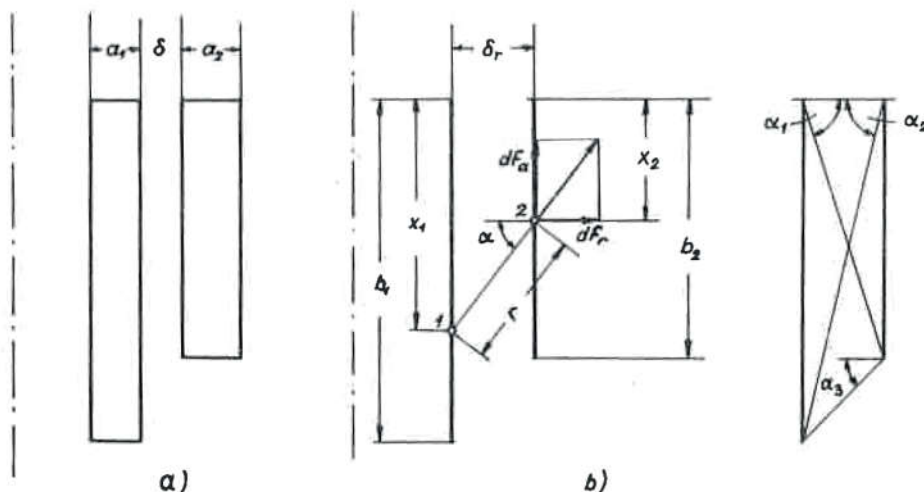
Mehaničko naprezanje bakra od udarne struje kratkog spoja iznosi prema (6.6-05):

$$\sigma_{cu} = 2,24 \cdot 10^{-7} \frac{5650 \cdot 76,5 \cdot 10^6}{1,485} \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^6 \text{ (kp/m}^2\text{)}$$

To je već relativno veliko opterećenje za mekani bakar koji nema prave granice elastičnosti, jer se odmah plastično deformira. Zato se kod mekanog bakra obično smatra da je granica elastičnosti kod onog naprezanja, kod kojeg trajna deformacija ne iznosi više od 0,2 %. Pod tim uvjetom granica elastičnosti za mekani bakar iznosi $6 - 8 \cdot 10^6 \text{ kp/m}^2$. Ako se kod projektiranja velikih transformatora utvrdi da naprezanja mogu biti veća, moramo upotrebiti bakar veće tvrdoće, odnosno čvrstoće.

6.7 Sile kod nesimetričnog namota

Ako je rasporedjenost amperzavoja u aksijalnom pravcu gn namota potpuno izjednačena s rasporedom amperzavoja dn namota kod cilindrične izvedbe, onda nema između namota nikakvih sila u aksijalnom pravcu; sve su sile u tom slučaju radijalne. Ako amperzavoji nisu izjednačeni, kako je to prikazano na slici 6.7-01 a),



Sl. 6.7-01

Cilindrična izvedba sa nesimetričnim položajem namota

onda ta aksijalna nesimetrija nužno mora imati za posljedicu aksijalne sile. Kako bi pojednostavnili proračun aksijalnih sila, pretpostavimo prema sl. 6.7-01 b) ekvivalentnu sliku u kojoj sve amperzavoje oba namota zamišljamo koncentrirane u dva tanka koncentrična valjka, kod kojih je međusobni razmak određen sa ekvivalentnim razmakom d_r :

$$d_r = d + \frac{a_1 + a_2}{3}$$

U točki 1 u odstojanju x_1 od gornjeg ruba namota koncentrirani su amperzavoji:

$$d(a w_1) = I_1 \cdot w_1 \cdot \frac{d \cdot x_1}{b_1}$$

a u točki 2

$$d(a w_2) = I_2 \cdot w_2 \cdot \frac{d \cdot x_2}{b_2}$$

Sila koja djeluje između te dvije točke (dF), djeluje u pravcu koji prolazi kroz te dvije točke, tj. pod kutem α , i dijeli se na aksijalnu komponentu dF_a i radijalnu komponentu dF_r . Pomoću jednadžbe (6.6-03 b) dobijemo:

$$dF = 2,04 \cdot \frac{I^2 \cdot w^2}{b_1 \cdot b_2} \cdot dx_1 \cdot dx_2 \cdot \frac{l_{cu}}{r} \cdot 10^{-8} \quad (kp)$$

$$dF_a = dF \cdot \sin \alpha = dF \cdot \frac{x_1 - x_2}{r}$$

pošto je: $r^2 = d_r^2 + (x_1 - x_2)^2$ možemo pisati

$$dF_a = 2,04 \cdot \frac{I^2 \cdot w^2}{b_1 \cdot b_2} \cdot l_{cu} \cdot \frac{x_1 - x_2}{d_r^2 + (x_1 - x_2)^2} dx_1 \cdot dx_2 \cdot 10^{-8}$$

odnosno

$$F_a = 2,04 \cdot \frac{I^2 \cdot w^2}{b_1 \cdot b_2} \cdot l_{cu} \left[\int_0^{b_1} dx_1 \int_0^{b_2} \frac{x_1 - x_2}{d_r^2 + (x_1 - x_2)^2} dx_2 \right] \cdot 10^{-8}$$

Ako izraz u zagradi integriramo i označimo sa "K", dobijemo:

$$K = b_1 \cdot \ln \sqrt{d_r^2 + b_1^2} - (b_1 - b_2) \ln \sqrt{d_r^2 + (b_1 - b_2)^2} - b_2 \cdot \ln \sqrt{d_r^2 + b_2^2} + d_r \left(\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b_1}{d_r} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b_1}{d_r} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b_1 - b_2}{d_r} \right)$$

Prema jednadžbi (6.6-04) iznose radijalne sile u ovom slučaju:

$$F_r = 0,64 \cdot 10^{-7} \frac{l_{cu}}{\frac{b_1 + b_2}{2}} \cdot w^2 \cdot l^2$$

gdje smo umjesto b uvrstili srednju vrijednost $\frac{b_1 + b_2}{2}$

Ako F_r uvrstimo u jednadžbu za F_a dobit ćemo:

$$F_a = 2,04 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{F_r}{b_1 \cdot b_2} \cdot \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot 0,64 \cdot 10^{-7}} \cdot K$$

$$F_a = 0,319 \cdot F_r \cdot \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_1 \cdot b_2} \cdot K$$

Ako umjesto toga pišemo

$$F_a = k \cdot F_r \cdot \frac{b_1 - b_2}{b_1}$$

onda iznosi:

$$k = 0,319 \cdot \frac{1 + \frac{b_1}{b_2}}{2b_1 \left(1 - \frac{b_2}{b_1} \right)} \cdot K$$

Ako je omjer:

$$\frac{b}{d_r} \approx 10 \text{ do } 30$$

i ako je omjer

$$\frac{b_1 - b_2}{b_1} = 0 \text{ do } 0,2$$

onda je:

$$k \cong 1$$

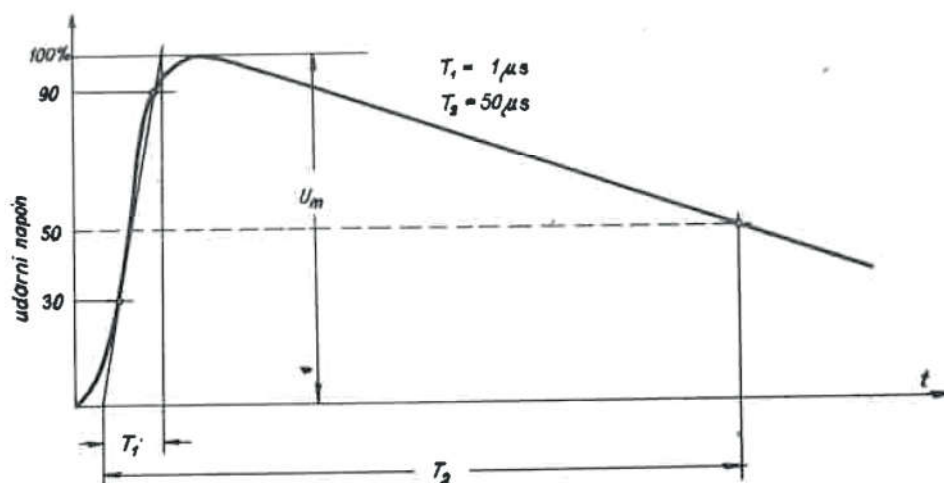
pa dobijemo vrlo jednostavnu jednadžbu

$$F_a \cong F_r \frac{b_1 - b_2}{b_1}$$

Ako je npr. b_2 za 10 % manji od b_1 , tada aksijalne sile iznose cca 10 % od veličine radijalnih sila.

6.8 Prenaponi

Transformatori su u pogonu izloženi udarnim prenaponima, koji nastaju bilo od atmosferskih pražnjenja bilo od isklapanja u mreži na koju je transformator priključen. Valovi prenapona, koji sa mjesta izvora putuju na sve strane, udaraju svojim strnim čelom neposredno na namot transformatora. Da bi ustanovili izolacionu sposobnost protiv udarnih prenapona, na transformatorima vršimo ispitivanja udarnim valovima standardnog oblika prema sl. 6.8-01.



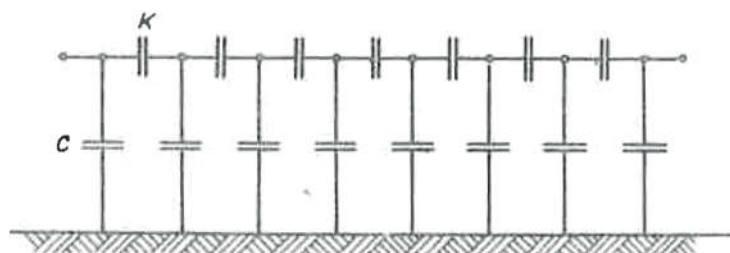
Sl. 6.8-01
Standardizirani oblik udarnog vala

Trajanje čela vala T_1 iznosi 1 mikrosekundu, a trajanje hrpta vala T_2 iznosi 50 mikrosekundi.

Visina napona vala U_m nije određena visinom napona na izvoru tj. visinom napona na mjestu udara groma u dalekovodu, nego nivoom izolacije dalekovoda, rasklopnih postrojenja itd. Iz vodova prenapon prelazi preko izolatora, preko iskrišta, a napose preko prenaponskih odvodnika u zemlju, te preostanu samo prenaponi koji su izolacionim nivoom izolatora, iskrišta i odvodnika određeni, odnosno manji od njih. Iz toga slijedi pouka da je opasno transformator priključiti na dalekovod i rasklopna postrojenja, koja su građena za viši naponski nivo. To se događa u slučajevima kada se postrojenja, radi kasnijeg prelaza na viši napon, grade za viši napon, a rade privremeno s transformatorima za niži napon. U tom slučaju treba odgovarajuće transformatore s prenaponskim odvodnicima zaštititi od previsokih prenapona, ili je na dužini od nekoliko kilometara od transformatorske stanice potrebno zamijeniti izolatore višeg nivoa izolacije s izolatorima onog nivoa izolacije, koji odgovara privremeno ugrađenim transformatorima.

Kad udarni napon nailazi na namot transformatora odvijaju se u prvom trenutku dvije pojave. Najprije se, radi puno većeg valnog otpora namota u odnosu na valni otpor voda, reflektira udarni val i time povisuje svoju tjemenu vrijednost na skoro dvostruki prvobitni iznos. Istovremeno taj isti, reflektirani prenapon u prvom trenutku potjera preko kapaciteta namota struju, pa se napon po duljini namota do nul-točke raspodijeli u ovisnosti od kapaciteta.

Kapacitet namota se dijeli na kapacitete između pojedinih svitaka K i na kapacitet između svitaka i zemlje C , kako je to prikazano u sl. 6.8-02.



Sl. 6.8-02

Nadomjesna shema raspodjele kapaciteta između svitaka (K) i između svitaka i zemlje (C)

Induktivni otpori su za prvi strmi udar prenapona, koji sadržava komponente vrlo visoke frekvencije, tako veliki, da se može struja preko induktivnog otpora zanemariti. Početna raspodjela napona uzduž namota prema zemlji na udaljenosti x od ulaza u namot u trenutku $t = 0$ dana je relacijom:

a) za jednofazni ili višefazni udar i uzemljenu nul-točku:

$$E_p = U \frac{\operatorname{sh} \alpha (1 - \frac{x}{l})}{\operatorname{sh} \alpha}$$

b) za višefazni udar i izoliranu nul-točku:

$$E_p = U \frac{\operatorname{ch} \alpha (1 - \frac{x}{l})}{\operatorname{ch} \alpha}$$

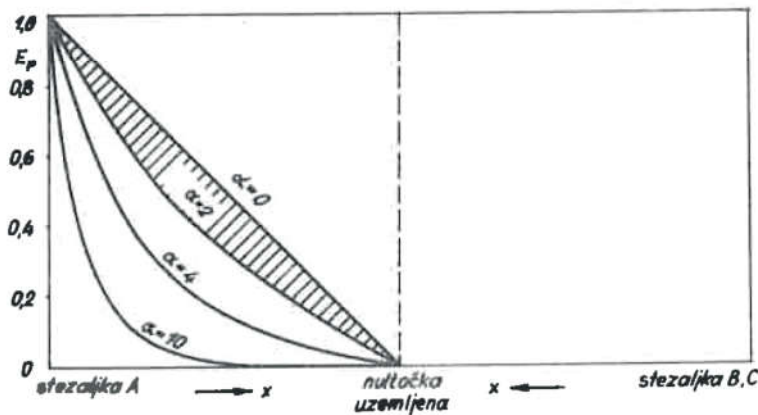
U - amplituda udarnog napona pravokutnog oblika,

l - dužina namota

$$\alpha = l\sqrt{\frac{C}{K}}$$

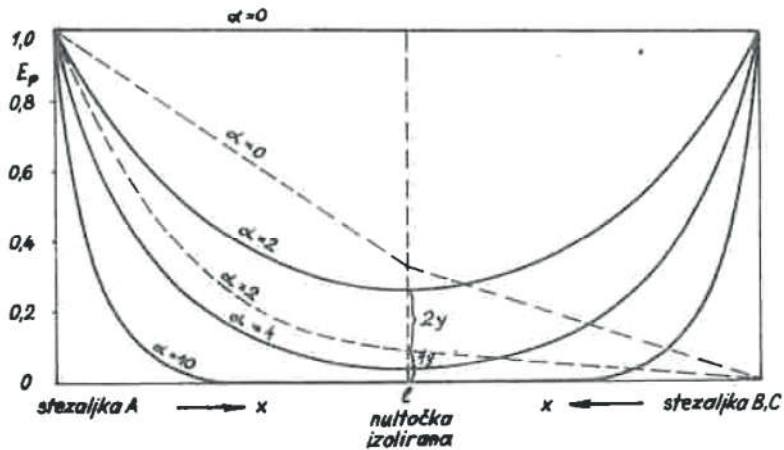
Navedene relacije pokazuju da je početna raspodjela napona ovisna o omjeru kapaciteta C i K te da ima hiperboličan oblik.

U ovisnosti od veličine faktora α dobijemo krivulje početne raspodjele napona prema sl. 6.8-03 i 6.8-04.



Sl. 6.8-03

Početna raspodjela napona E_p u ovisnosti o α u slučaju da je nul-točka uzemljena



Sl. 6.8-04

Početna raspodjela napona E_p u ovisnosti o α u slučaju da je nul-točka izolirana

— trofazni udar

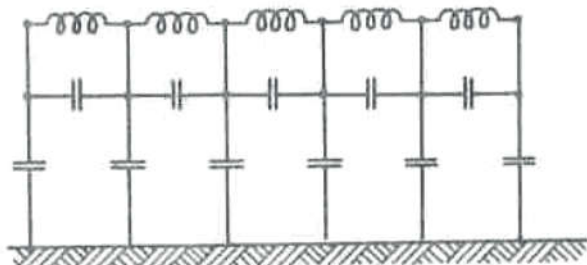
--- jednofazni udar

Namot nije teško izolirati prema tijelu transformatora, ali je zato puno teže na namotu provesti izolaciju između zavoja. Za naprezanje izolacije između zavoja važan je naponski gradijent $\frac{dE_p}{dx}$

koji je to veći što je strmiji oblik krivulje početne raspodjele napona uzduž namota. Kako vidimo iz krivulje u sl. 6.8-03 i 6.8-04, gradijent napona je to veći, što je veći faktor α tj. što je veći omjer C/K . Iz navedenih slika je vidljivo da su najveći gradijenti na ulaznim zavojima namota.

Iz dosadašnjeg razmatranja slijedi da treba kod projektiranja namota ići za ostvarivanjem što većeg kapaciteta medju zavojima i svicima K , dok kapacitet namota prema zemlji C treba što više sniziti; osim toga, ulazne zavoje treba jače izolirati.

Nakon probijanja čela vala prodire u namot hrbat vala, koji sadržava harmoničke komponente niže frekvencije; pri tome dolazi do izražaja induktivitet namota, koji hrptu vala predstavlja mnogo manji induktivni otpor od onog, koji pruža čelu vala. U sl. 6.8-05 je predočena nadomjesna slika po kojoj se treba provoditi račun.



Sl. 6.8-05

Nadomjesna shema raspodjele kapaciteta i induktiviteta namota transformatora

Između kapaciteta i induktiviteta namota dolazi do titrajnih struja i nihanja napona u pojedinim točkama namota.

Pod pretpostavkom pravokutnog oblika udarnog vala sa 100 % napona, i uz

$$\sqrt{\frac{C}{K}} = 10$$

dobije se računskim putem rezultat, iz kojeg se vidi

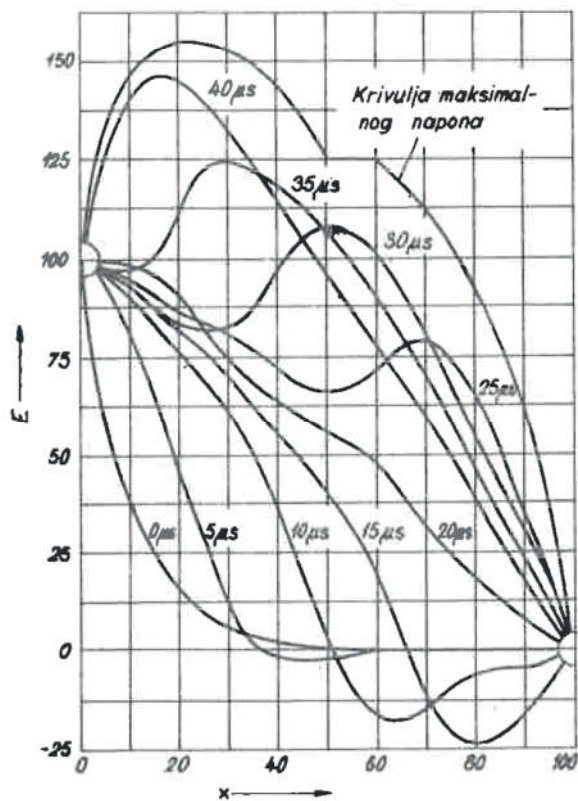
da se slika raspodjele napona uzduž namota svakih 5 mikrosekundi mijenja i to:

- a) za slučaj uzemljene nultočke prema sl. 6.8-06
- b) za slučaj izolirane nultočke prema sl. 6.8-07

Iz tih slika se vidi da uslijed titrajnih pojava nastupaju veliki gradienti napona na svim mjestima namota i da na izoliranoj nultočki udarni napon može postići skoro trostruku vrijednost od svog prvobitnog iznosa.

Donedavno se smatrala nemoguća gradnja transformatora koji bi bili sigurni od udarnih prenapona, koji nastaju od atmosferskih pražnjenja; proboj namota se u slučaju udara groma mogao tumačiti samo kao viša sila. Danas stojimo na stanovištu da te prenapone svladavamo bilo odgovarajućim povećanjem izolacije medju zavojima, bilo takovim oblikovanjem namota, koje snizuje vrijednost omjera C/K . Kod cilindričnih namota postizavaju se bolji rezultati sa namotom u slojevima umjesto sa svicima, kako je to prikazano u sl. 6.8-08 a) i b).

Dalja poboljšanja se postizavaju primjenom posebno oblikovanih štitova prema sl. 6.8-09; štitovi čine kapacitet svih svitaka prema zemlji simetričnim, tako da se poprečne kapacitivne struje prema zemlji ne miješaju sa uzdužnim kapacitivnim strujama preko zavoja, kako je to prikazano u sl. 6.8-10.

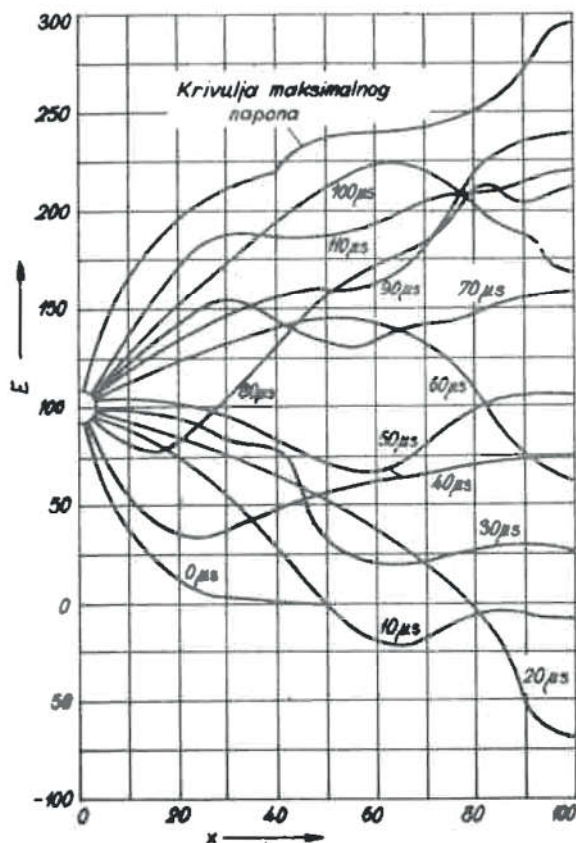


Raspodjela prenapona
uzduž namota u intervali-
ma od 5 s nakon udara
prenapona;

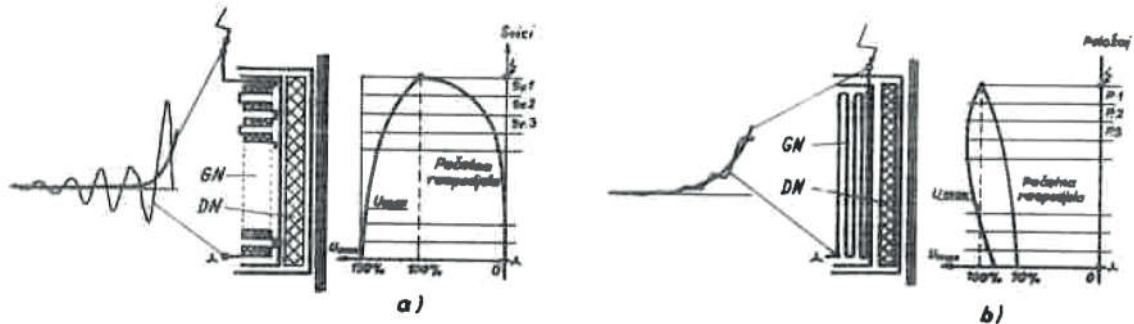
$$\sqrt{\frac{C}{K}} = 10$$

E - napon prema zemlji
u % narinutog prenapona
x - udaljenost od početka
do kraja namota u %

Sl. 6.8-06
- nultočka uzemljena



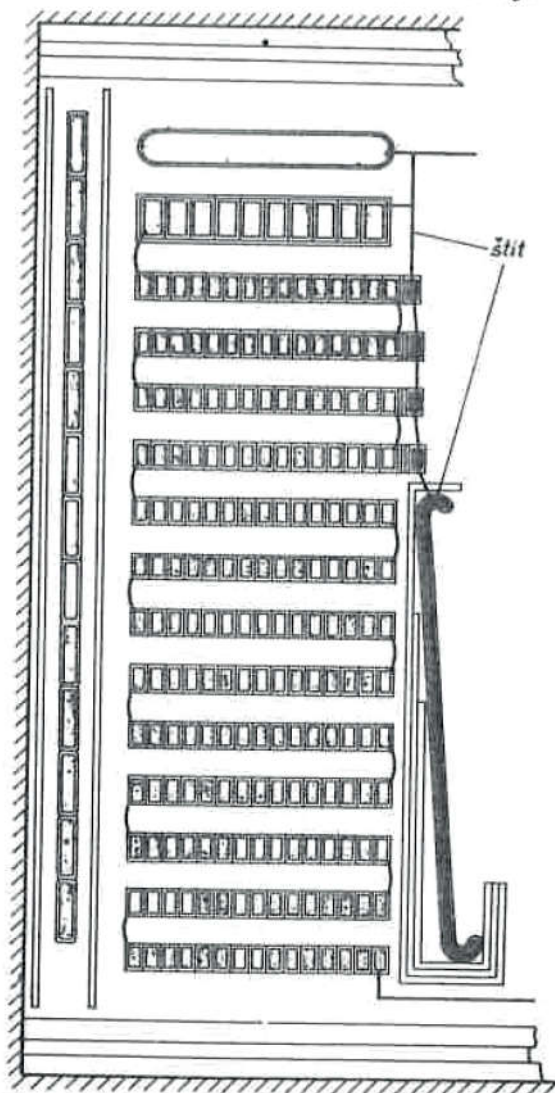
Sl. 6.8-07
- nultočka izolirana



Sl. 6.8-08

Početna raspodjela i najviše vrijednosti udarnog napona prema zemlji kod transformatora sa cilindričnim namotom izvedenim :

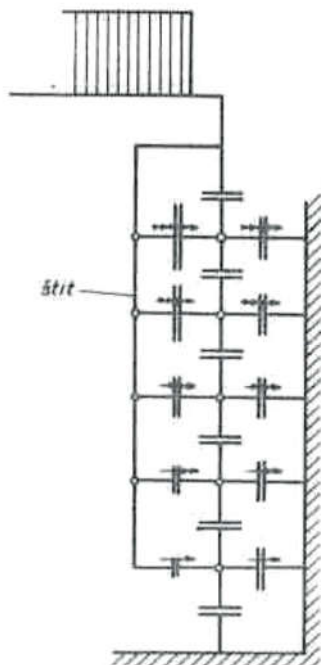
- a) u svecima
- b) u slojevima



Sl. 6.8-09

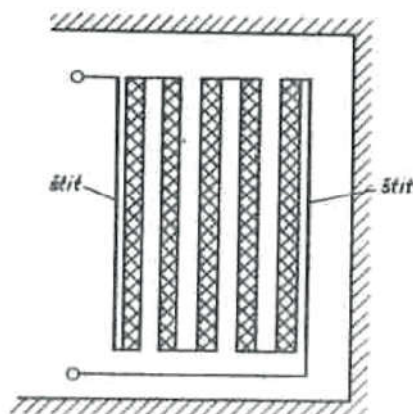
Namot izveden sa štitovima radi povoljnije raspodjele kapaciteta

Još se bolji rezultati postizavaju sa slojnim namotom i štitovima prema sl. 6.8-11 .



Sl. 6.8-10

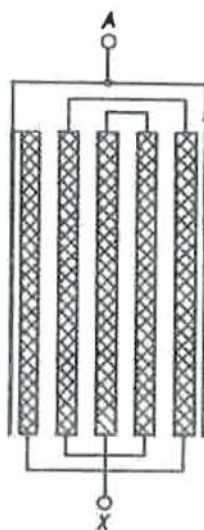
Nadomjesna shema namota sa štitovima prema sl. 6.8-09



Sl. 6.8-11

Slojni namot sa štitovima

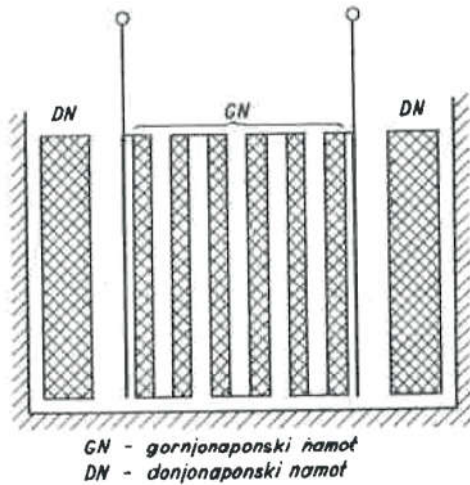
Kapacitet prema zemlji se može potpuno ukloniti sa slojnim namotom prema sl. 6.8-12 ali je u tom slučaju potrebno da namot ima veću slojnu izolaciju. Na taj način se postizava da vrijednost omjera C/K bude čak i manja od 1 .



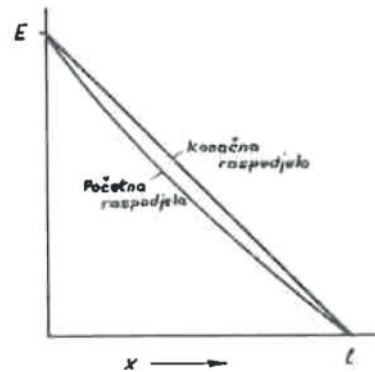
Sl. 6.8-12

Posebna izvedba slojnog namota sa štitovima

Kod ogrnutih transformatora sa plosnatim namotom, ako se visokonaponski namot koncentrira izmedju niskonaponskog namota prema sl. 6.8-13 , postizava se omjer $C/K = 1$, a početna i konačna raspodjela napona prema sl. 6.8-14 .



Sl. 6.8-13
Specijalna izvedba ogrnutog transformatora sa plosnatim namotom otpornog prema pre-naponima



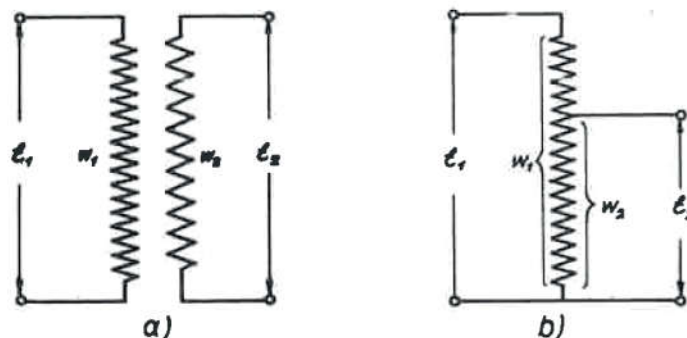
Sl. 6.8-14
Početna i konačna raspodjela prenapona kod transformatora prema sl. 6.8-13:

7.1 Transformator u štednom spoju (autotransformator)

U svakom zavoju primarnog namota inducira glavni tok jednaki protunapon $e_z = E_1/w_1$. Prema tome se može na proizvoljnom broju zavoja w_2 sa primarnog svitka oduzimati napon E_2 u iznosu :

$$E_2 = \frac{w_2}{w_1} E_1$$

Ti se uštedi sekundarni namot i dobije transformator u štednom spoju, prema slici 7.1-01 b) .



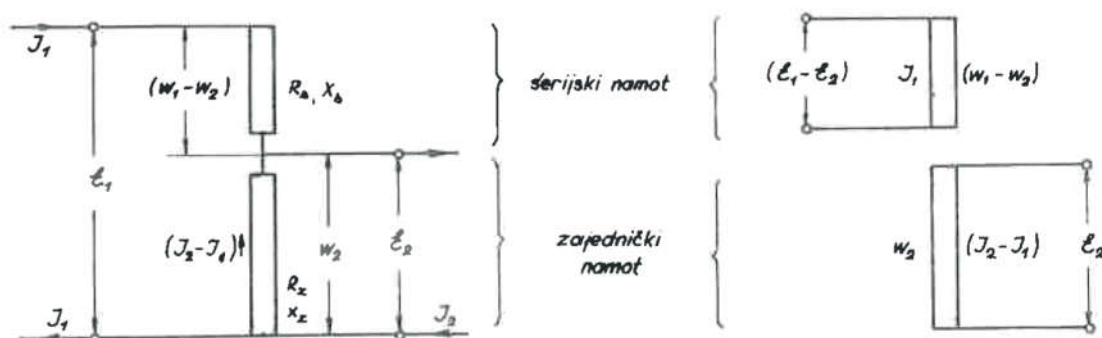
Sl. 7.1-01

- a) dvonamotni transformator
- b) transformator u štednom spoju

U daljnjim razmatranjima će se radi jednostavnosti zanemariti gubici i struja magnetiziranja.

Uvedimo novi pojam: "tipna snaga transformatora"; pod ovim pojmom se podrazumijeva ona snaga, koju može transformator određenih dimenzija i normalne, tj. dvonamotajne izvedbe, pod normalnim uvjetima rada prenositi. Ako je npr. transformator gradjen za kratkotrajni pogon i može kroz vrijeme od 30 minuta biti opterećen sa 160 kVA, a trajno može prenositi samo 100 kVA, tada je njegova tipna snaga, 100 kVA. To znači da je za kratkotrajni pogon kod prenosa snage 160 kVA izabran onaj transformator iz serije normalnih transformatora, koji ima prema listi i prema oznaci tipa (zato "tipna snaga") nominalnu snagu od 100 kVA za trajni pogon, a može pod datim uvjetima za kratkotrajni pogon prenositi teret od 160 kVA.

Primarni namot transformatora u štednom spoju se dijeli u dva dijela: u zajednički namot sa w_2 zavoja i u serijski namot sa $w_1 - w_2$ zavoja, kako je prikazano na sl. 7.1-02 a



Sl. 7.1-02

Transformator u štednoj i normalnoj izvedbi

a) transformator u štednom spoju

b) ekvivalentni dvonamotni transformator

Kroz zajednički namot protječe razlika struja ($I_2 - I_1$), dok kroz serijski namot prolazi samo struja I_1 .

Suma svih protjecanja, odnosno amperzavoja (bez struje magnetiziranja, koja se zanemaruje) mora biti jednaka nuli, što matematski prikazano daje relaciju:

$$I_1 (w_1 - w_2) = (I_2 - I_1) w_2$$

Kod dvonamotnog transformatora uz zanemarenje struje magnetiziranja vrijedi takodjer:

$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

Očito je iz navedenih relacija da se transformator u štednom spoju može promatrati kao dvonamotni transformator sa serijskim namotom kao primarnim i sa zajedničkim namotom kao sekundarnim namotom, što je na sl. 7.1-02 b i prikazano.

Dvonamotni transformator po sl. 7.1-02 b) predstavlja normalni

transformator, pa je njegova tipna snaga:

$$P_t = (E_1 - E_2) I_1 = (I_2 - I_1) E_2$$

U štednom spoju prema sl. 7.1-02 a) snaga tog istog transformatora iznosi:

$$P_p = E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$$

U ovom slučaju se prenesena snaga naziva "prolaznom snagom" P_p .

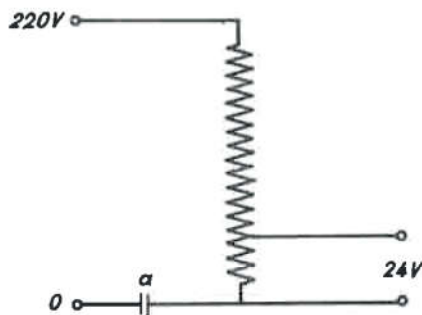
Usporedbom veličina prolazne i tipne snage se dobiva:

$$\frac{P_p}{P_t} = \frac{E_1 I_1}{(E_1 - E_2) I_1} = \frac{E_2 I_2}{E_2 (I_2 - I_1)} = \frac{E_1}{E_1 - E_2} = \frac{I_2}{I_2 - I_1}$$

Što je manja razlika između napona E_1 i E_2 to je veća prolazna snaga u odnosu na tipnu snagu, to veća je ušteda u materijalu.

Kod prenosnog omjera 220/110 iznosi tipna snaga 50 % od iznosa prolazne snage; npr. za transformiranje snage od 2 kVA pomoću transformatora u štednom spoju, potreban je transformator koji ima dimenzije normalnog dvonamotnog transformatora tipne snage 1 kVA.

Galvanska veza između primarne i sekundarne strane je veliki nedostatak transformatora u štednom spoju, jer mu ograničava područje upotrebe. Tako se npr. štedni transformator ne smije upotrebiti kao tzv. zaštitni transformator, kojim se želi sniziti napon mreže na napon neopasan za čovjeka - npr. od 220 na 24 V - kako je na sl. 7.1-03 prikazano. Može se, naime, dogoditi da dodje do prekida u dovodu nulvoda do transformatora (toč. "a" na sl. 7.1-03), a time cijela mreža za 24 V dodje pod puni napon od 220 V prema zemlji.



Sl. 7.1-03

Opasnost od prekida dovoda nulvoda kod upotrebe transformatora u štednom spoju, kao zaštitnog transformatora

Transformator u štednom spoju ima još jedan nedostatak; napon kratkog spoja mu je toliko manji u odnosu na u_k normalnog transformatora, koliko je manja tipna snaga od prolazne snage, odnosno, što je veća ušteda postignuta upotrebom u odnosu na dvonamotni transformator, to je i struja kratkog spoja veća. Slijedeći izvod će pokazati odnose struja kratkog spoja dvonamotnog i štednog transformatora.

Postavimo naponske jednadžbe za autotransformator:

$$U_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) + (I_1 - I_2) (R_2 + jX_2)$$

$$U_2 = E_2 - (I_2 - I_1) (R_2 + jX_2)$$

Ove jednačbe su postavljene na isti način kao one u poglavlju 2.6 .
Reducirajmo primarni napon na sekundarnu stranu:

$$U_1'' = \frac{W_2}{W_1} U_1$$

a ujedno je

$$\mathcal{E}_1'' = \mathcal{E}_2$$

Kako je u početku razmatranja naznačeno, zanemaruje se struja magnetiziranja, pa će tada naponska jednačba primarnog kruga, reducirana na sekundarnu stranu, dobiti oblik:

$$U_1'' = \mathcal{E}_1'' + J_1 (R_1 + jX_1) \frac{W_2}{W_1} - J_2 (R_2 + jX_2) \frac{W_2}{W_1}$$

gdje je

$$J_2 = J_2 - J_1$$

Uzme li se u obzir da je $J_1 = \frac{W_2}{W_1} J_2$ te $J_2 = \frac{W_1 - W_2}{W_1}$ i odbije li se izraz

za U_2 od izraza za U_1'' dobije se izraz za primarni napon:

$$U_1'' = U_2 + J_2 (R_a + jX_a)$$

gdje je

$$R_a = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right)^2 \left[R_2 + \left(\frac{W_2}{W_1 - W_2} \right)^2 R_1 \right] = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right)^2 R$$

$$X_a = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right)^2 \left[X_2 + \left(\frac{W_2}{W_1 - W_2} \right)^2 X_1 \right] = \left(\frac{W_1 - W_2}{W_1} \right)^2 X$$

R i X su radni otpor i induktivni otpor rasipanja dvonamotnog transformatora (vidi sl. 7.1-02 b) obzirom na sekundarnu stranu; dvonamotni transformator u ovom slučaju ima za primar serijski (nezajednički dio), a za sekundar zajednički dio štednog transformatora. Time je ujedno dokazano da se može sa štednim transformatorom postupati kao s običnim transformatorom sa dva namota, koji su ekvivalentni serijskom i zajedničkom dijelu štednog transformatora (vidi sl. 7.1-02). Prema tome se R i X mogu i mjeriti na vrlo jednostavan način: napon se narine na zajednički dio, a serijski dio se kratko spoji; u tom slučaju iznosi trajna struja kratkog

spoja

$$I_k = \frac{U_2}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

što odgovara običnom dvonamotnom transformatoru. Nakon odredjivanja R i X , odnosno I_k , jednostavno je odrediti stvarnu struju kratkog spoja štednog transformatora. Na niskonaponskoj strani štednog transformatora ona ima vrijednost:

$$I_{2k} = \frac{U_2}{\sqrt{R_a^2 + X_a^2}} = \frac{U_2}{\left(\frac{w_1 - w_2}{w_1}\right)^2 \sqrt{R^2 + X^2}} = \left(\frac{w_1}{w_1 - w_2}\right)^2 \cdot I_k$$

na visokonaponskoj strani:

$$I_{1k} = \frac{w_1 \cdot w_2}{(w_1 - w_2)^2} \cdot I_k$$

a u zajedničkom namotu teče razlika $I_{2k} - I_{1k}$:

$$I_{zk} = I_{2k} - I_{1k} = \frac{w_1}{w_1 - w_2} \cdot I_k$$

Iz zadnjih triju relacija je očito kakva ogromna naprezanja i za mrežu i za transformator može prouzročiti kratki spoj na štednom transformatoru, ako ga namotamo sa normalnim rasporedom "d" između oba namota (vidi sl. 5.4-02) kako se to provodi kod dvonamotnih transformatora. Neka brojevi primjer za slučaj $w_2/w_1 = 0,9$ ilustrira odnos struja kratkog spoja štednog transformatora i struje kratkog spoja dvonamotnog transformatora:

Ako je $w_2/w_1 = 0,9$ tj. $w_2 = 0,9 w_1$, tada je:

$$I_{2k} = \left(\frac{w_1}{w_1 - 0,9w_1}\right)^2 \cdot I_k = \left(\frac{1}{0,1}\right)^2 \cdot I_k = 100 \cdot I_k ; \quad \frac{I_{2k}}{I_k} = 100$$

$$I_{1k} = \frac{w_1 \cdot 0,9 w_1}{(w_1 - 0,9 w_1)^2} \cdot I_k = \frac{0,9 \cdot w_1^2}{0,01 \cdot w_1^2} \cdot I_k = 90 \cdot I_k ; \quad \frac{I_{1k}}{I_k} = 90$$

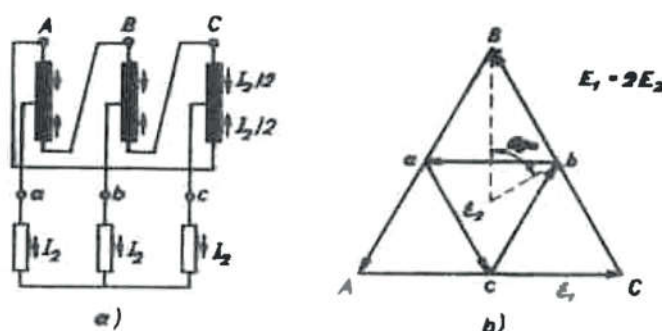
$$I_{zk} = \frac{w_1}{w_1 - 0,9 w_1} \cdot I_k = \frac{w_1}{0,1 w_1} \cdot I_k = 10 \cdot I_k ; \quad \frac{I_{zk}}{I_k} = 10$$

Za štedni transformator je posljednji omjer I_{zk}/I_k najvažniji.

Očito je da je štedni transformator mnogostruko napregnut prema običnom transformatoru. Međutim, može se raspored "d" povećati odnosno smanjiti visina namota "b" do one mjere, koja je potrebna da se postigne traženi napon kratkog spoja " u_k ". Ovo, naravno, poskupljuje izvedbu što se odražava u tome da se u praksi grade ve-

liki dvonamotni transformatori sa $u_k = 10 - 11 \%$ a veliki štedni transformatori sa $u_k = 6 - 8 \%$.

Štedni transformator se može izvoditi i kao trofazni, ali je u tom slučaju redovito spojen u zvijezdu. Ako se transformator u štednom spoju spoji u trokut sa omjerom napona 2:1 prema sl. 7.1-04, i ako se optereti niskonaponska strana simetrično sa strajom I_2 ,



Sl. 7.1-04

Spoj u trokut trofaznog štednog transformatora

a) Shema spoja

b) Dijagram napona

Što odgovara prividnom teretu:

$$P_2 = \sqrt{3} E_2 I_2$$

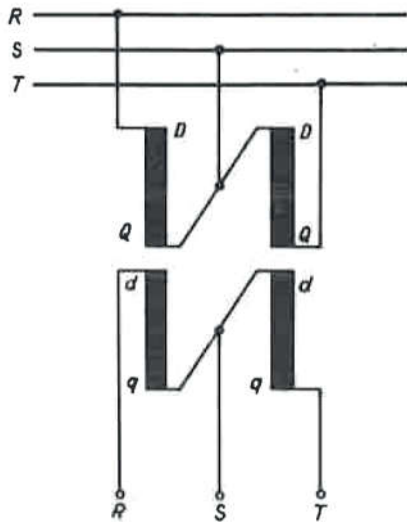
tada se namoti transformatora opterećuju sa:

$$P_1 = 2 E_1 \cdot \frac{I_2}{2} \cdot 3 = 3 E_1 I_2$$

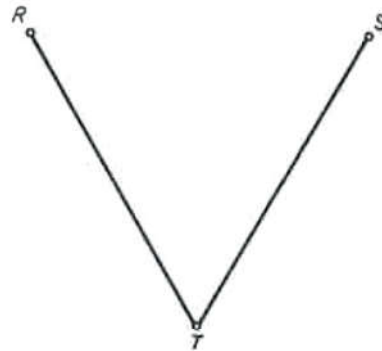
Prividna snaga na sekundarnoj strani je za $\sqrt{3}$ manja od snage za koju treba transformator dimenzionirati, tj. tipna snaga štednog transformatora u spoju Dd 2 je za $\sqrt{3}$ puta veća od prolazne snage transformatora, pa ovaj spoj nije rentabilan za upotrebu.

7.2 V-spoj transformatora

Ako se dva jednofazna transformatora priključe na trofaznu mrežu prema sl. 7.2-01 dobiju se sekundarno sva tri napona faza RST, pa je prema tome transformacija trofaznih napona moguća i sa dva jednofazna transformatora. Taj se spoj zove V-spoj, jer vektorska slika napona RS i TS prema sl. 7.2-02 ima oblik slova "V". Kod opterećivanja svih faza moraju namoti faza RS i TS preuzeti teret trećeg manjkajućeg namota faza RT na taj način, da struja faza RT prolazi kroz namot faza RS i TS.

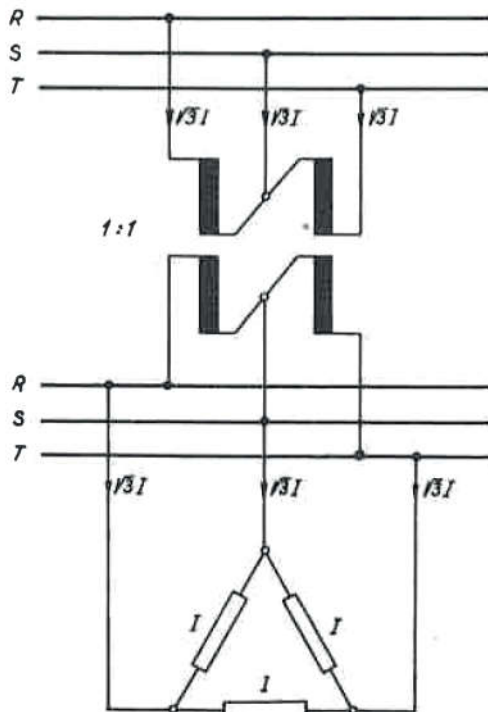


Sl. 7.2-01
V-spoj dvaju transformatora



Sl. 7.2-02
Vektorska slika napona u V-spoju

U slučaju trofaznog simetričnog opterećenja prema sl. 7.2-03 bit će strujno opterećenje faza RS i TS za $\sqrt{3}$ puta veće nego u slučaju terećenja samo faza RS i TS. Shema trofaznog simetričnog opterećenja je prikazana na sl. 7.2-03. Očito je da za trofazni simetrični teret snage $P = 3 \cdot I \cdot U$



Sl. 7.2-03
Simetrično opterećenje transformatora u V-spoju kod prenosnog omjera 1:1

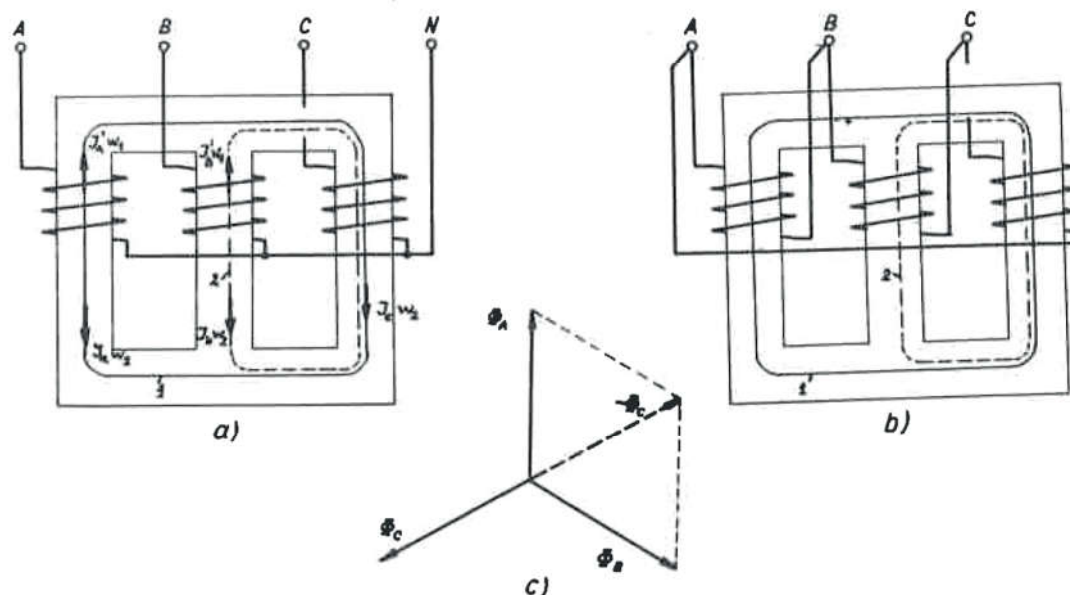
treba svaki namot biti dimenzioniran za iznos snage $P = U \cdot I \sqrt{3}$. Omjer tipne snage transformatora u V-spoju i snage tereta u ovom primjeru iznosi:

$$\frac{P_{V\text{-spoj}}}{P_{\text{tereta}}} = \frac{2 \cdot U \cdot I \sqrt{3}}{3 \cdot U \cdot I} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,155$$

Tipna snaga transformatora u V-spoju u slučaju trofaznog simetričnog tereta mora biti za 15,5 % veća od snage na sekundarnim stezaljkama, tj od snage potrošača.

V-spoj se može koristiti i kod trofaznih transformatora jezgrastog tipa koji imaju primar spojen u zvijezdu sa nul-vodom ili trokut. U oba slučaja, ako se prekine spoj u jednoj fazi, dobije se V-spoj prema sl. 7.2-04 a) i b).

Po vektorskom dijagramu tokova na sl. 7.2-04 c) se razabire da tokovi u dvije neprekinute faze (koje čine V-spoj na primarnoj strani) daju u trećem stupu jezgrastog transformatora tok, koji



Sl. 7.2-04

Trofazni jezgrasti transformatori u V-spoju

- a) V-spoj ostvaren u spoju zvijezda sa nul-vodom i prekidom u jednoj fazi
- b) V-spoj ostvaren u spoju trokut s prekidom u jednoj fazi
- c) Vektorski dijagram tokova u transformatorima pod a) i b)

je jednak po djelovanju onome toku, koji bi stvorili amperzavoji prekinute faze, kad ona ne bi bila u prekidu. Naime, tokovi Φ_A i Φ_B prolaze obrnutim smjerom kroz stup namota u prekidu, pa njihova suma sa negativnim predznakom daje tok Φ_C , kako je prikazano u vektorskom dijagramu na sl. 7.2-04. Time je ostvarena mogućnost da trofazni jezgrasti transformator u navedenim primjerima može biti priključen na primarnoj strani u V-spoju, a da se na sekundarnoj strani ništa ne izmijeni. Međutim, snagu, koju sekundar daje potrošaču, moraju dva namota primara, koji su u V-spoju, uzeti iz primarne mreže. U tom slučaju oni moraju stvoriti potrebne protuamperzavoje, koje traže sekundarni namoti; time oni preuzimaju teret treće primarne faze, koja je u prekidu. Na sl. 7.2-05 je prikazan vektorski dijagram struja pri simetričnom trofaznom opterećenju sekundara. Amperzavoji pojedinih svitka sekundara moraju biti poništeni tako, da u pojedinim stupovima teku samo magnetiski tokovi od struje magnetiziranja. Dakle, suma amperzavoja od opterećenja mora biti jednaka nuli. Ako suma amperzavoja na jednom stupu nije jednaka nuli, tada se mora stvoriti i na drugom i na trećem stupu protuamperzavoji da ih ponište. To znači da dva namota primara koji su u V-spoju, moraju povući iz mreže ne samo struju I_A odnosno I_B da bi poništili amperzavoje struja I_A i I_B , nego još i $-I_C$ u svakom namotu, jer time i $-I_C$ u namotu A i I_C u namotu B stvara amperzavoje koji se suprotstavljaju amperzavojima od struje I_C u namotu sekundara smještenom na trećem stupu.

Analitičko rješenje ovog problema je vrlo jednostavno. Suma svih MMS u bilo kojem zatvorenom magnetskom krugu mora biti jednaka sumi svih padova magnetskih napona. U našem slučaju magnetski napon mora biti nula, jer amperzavoji struje opterećenja ne smiju proizvesti nikakav tok. Postavimo samo dvije jednadžbe prema sl. 7.2-04 a) ili b) za sumu MMS u omći 1 i omći 2. Obzirom na smjerove MMS primara i sekundara a uz zanemarenje struje magnetiziranja vrijedi:

za omču 1

$$J'_A w_1 + J_C w_2 - J_A w_2 = 0$$

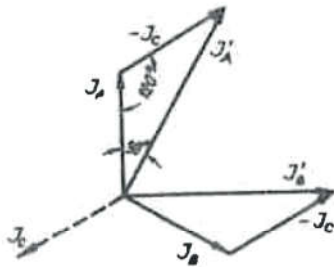
za omču 2

$$J'_B w_1 + J_C w_2 - J_B w_2 = 0$$

Ako radi jednostavnosti pretpostavimo da je $w_1 = w_2$, tada je:

$$J'_A = J_A - J_C$$

$$J'_B = J_B - J_C$$



Sl. 7.2-05

Vektorski dijagram struja pri V-spoju jezgastog transformatora na primarnoj strani uz trofazno simetrično opterećenje sekundara

tj. dobijemo isti rezultat kao na slici 7.2-05.

Iz dijagrama struja na sl. 7.2-05 slijedi da kroz svaki od dva primarna svitka teče struja J'_A odnosno J'_B u iznosu od $I'_A = \sqrt{3} I_A$ odnosno $I'_B = \sqrt{3} I_B$, pa je dozvoljeno sekundarno opterećenje transformatora za $\sqrt{3}$ puta manje od tipne snage jezgastog transformatora.

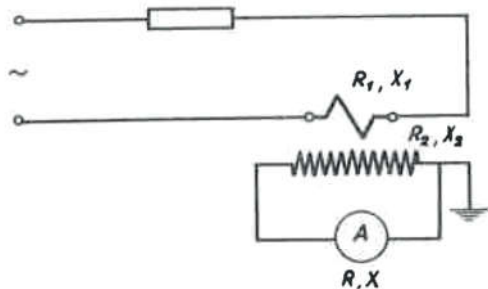
Iz dosadašnjeg razmatranja prilika koje nastaju u V-spojevima može se zaključiti da se ne mora prilikom kvara jedne faze trofaznog jezgastog transformatora potpuno obustaviti pogon, nego se mogu ostaviti preostale dvije faze da rade u V-spoju, ali se pri tome mora smanjiti nominalno opterećenje za $\sqrt{3}$ puta, odnosno u tom slučaju transformator može raditi s 58 % nominalne snage. Isti je slučaj i kod trofaznog spoja u trokut jednofaznih transformatora, samo što je još olakšano odvajanje i izmjena faze koja je u kvaru. Da bi trofazni transformator s jednom fazom u kvaru mogao i dalje napajati potrošače potrebno je odspojiti oštećenu fazu. Kod trofaznog transformatora trebalo bi za tu svrhu izvaditi transformator iz kotla, dok će kod triju jednofaznih transformatora biti dovoljno odspojiti oštećeni transformator.

7.3 Strujni transformator

Kod do sada promatranih transformatora smo redovito pretpostavljali da je narinuti napon konstantan, odnosno da je transformator priključen na krutu mrežu. Ove transformatore nazivamo naponskim transformatorima; oni mogu biti transformatori snage i mjerni naponski transformatori.

U ovom poglavlju ćemo promatrati strujni transformator kojemu, za razliku od naponskog, nije narinut konstantan napon nego mu je narinuta struja, koju uzima potrošač iz mreže. Strujni transformator se redovito upotrebljava za indirektna mjerenja izmjeničnih struja bilo radi transformiranja velikih struja na struje do 5 A radi lakšeg mjerenja s instrumentima, bilo radi galvanskog odvajanja visokonaponskog uređaja od mjernih instrumenata.

Strujni transformator se uvijek spaja u seriju sa potrošačem kojemu se želi mjeriti struja, snaga itd. (vidi sl. 7.3-01). Pri tome je karakteristično da sekundarni teret ima uvijek konstantnu impedanciju.



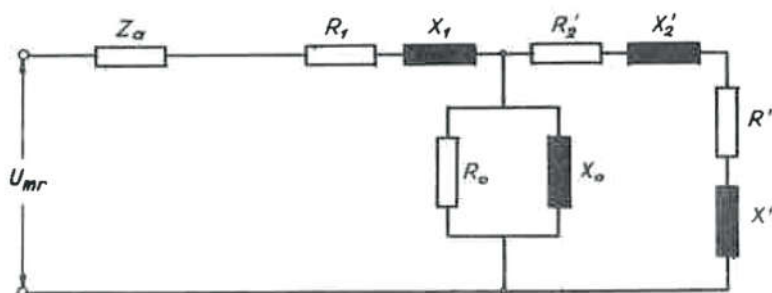
Sl. 7.3-01
Spoj strujnog transformatora sa potrošačem

Za strujni transformator vrijede isti zakoni koje smo ustanovili za naponski transformator, ali s tom razlikom da je primarni napon promjenljiv. Iz toga slijedi da za strujni transformator vrijedi ista ekvivalentna shema, koju smo za naponske transformatore utvrdili u poglavlju 2.6. Prema tome, strujni transformator predstavlja za primarni krug otpor, koji je određen jednačbom (zanemaruje-mo R_0 i X_0):

$$Z_b = R_b + jx_b = \sqrt{R_b^2 + x_b^2} \quad \angle \varphi_b$$

$$\text{gdje je } R_b = R_1 + R_2' + R', \text{ a } x_b = x_1 + x_2' + x'$$

Uvijek postoji primarna mreža koja je više ili manje kruta. Ako je strujnom transformatoru na primarni namot narinuta struja praktički neovisna o transformatoru, onda je to moguće predočiti samo na taj način da je strujni transformator prema sl. 7.3-02 priključen na



Sl. 7.3-02
Ekvivalentna shema strujnog transformatora

krutu mrežu preko još jednog otpora Z_a i da je taj otpor tako velik prema ukupnom otporu strujnog transformatora Z_b (vidi ekvivalentnu shemu), da je struja praktički ovisna samo o otporu Z_a .

$$I = \frac{U_{mr}}{Z_a + Z_b} \approx \frac{U_{mr}}{Z_a}$$

nikad ne smijemo ostavljati otvorenim.

7.4 Otcjepi

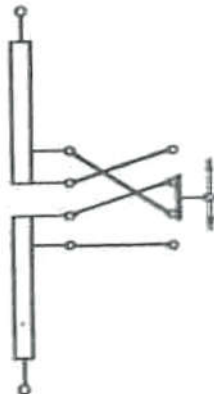
Kod određivanja podataka za transformator obično je teško za određeni slučaj unaprijed ustanoviti točan prenosni omjer. Mnogo puta se ne zna na kojem mjestu će se transformator upotrebljavati, pa su uvjeti za određivanje točnog prenosnog omjera još nepovoljniji. Zato se često traži transformator sa otcjepima, koji omogućavaju mijenjanje prenosnog omjera prema potrebi.

Uobičajeni su otcjepi sa $\pm 4\%$ ili $\pm 5\%$, ali se grade transformatori i sa otcjepima $\pm 2,5\%$, $\pm 5\%$ i $\pm 7,5\%$.

Otcjepi su za konstrukciju transformatora nepoželjni radi sljedećih razloga:

- svaki otcjep stvara nesimetriju namota obzirom na izjednačenje primarnih i sekundarnih superzavoja u aksijalnom pravcu pa se kao posljedica javlja aksijalne sile;
- udarni prenaponi se na otvorenim otcjepima reflektiraju, pa se otcjepi moraju posebno jako izolirati;
- izvod otcjepa iz namota je često puta teško izvesti.

Iz navedenih razloga izbjegavamo otcjepe ako nisu nužno potrebni.



Otcjepi se po mogućnosti postavljaju na sredinu namota, jer su tada aksijalne sile manje. Izvodi otcjepa se priključuju na preklopku, koja je smještena u transformatoru tako, da ima pogon sa proklapca transformatora. Preklapanje se smije vršiti samo u beznaponskom stanju.

U sl. 7.4-01 je prikazan uobičajeni način izvedbe otcjepa sa priključkom na preklopku.

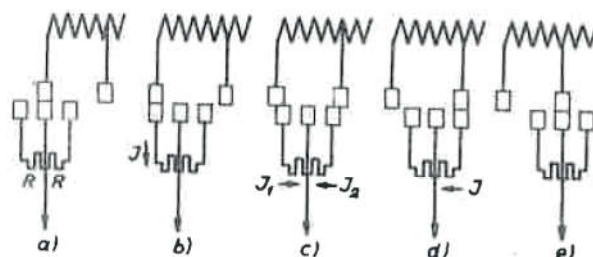
Sl. 7.4-01
Priključak otcjepa na
preklopku

7.5 Regulatorni transformator

Transformator kod kojeg je omogućeno prespajanje regulatornih otcjepa, i time mijenjanje prenosnog omjera za vrijeme punoga, nazivamo regulatornim transformatorom. Kod prespajanja od jednog otcjepa na drugi ne smijemo niti prekinuti struju niti kratkko spojiti dva otcjepa. To postizemo na taj način da tokom prespajanja između ota otcjepa u-

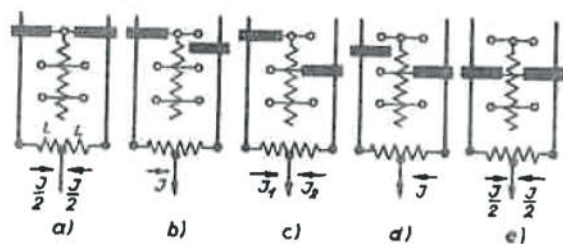
ključimo otpor, bilo radni bilo induktivni, i time snizimo struju kratkog spoja kratko spojenih regulacionih zavoja na snošljivu veličinu, koja mnogo ne prelazi nominalnu struju namota.

Princip prespajanja od otcjepa na otcjep, tj. princip regulacije kod upotrebe omskog otpora prikazan je u sl. 7.5-01 a kod upotrebe induktivnog otpora na sl. 7.5-02 .



Sl. 7.5-01

Redoslijed prespajanja pri regulaciji pomoću omskog otpora

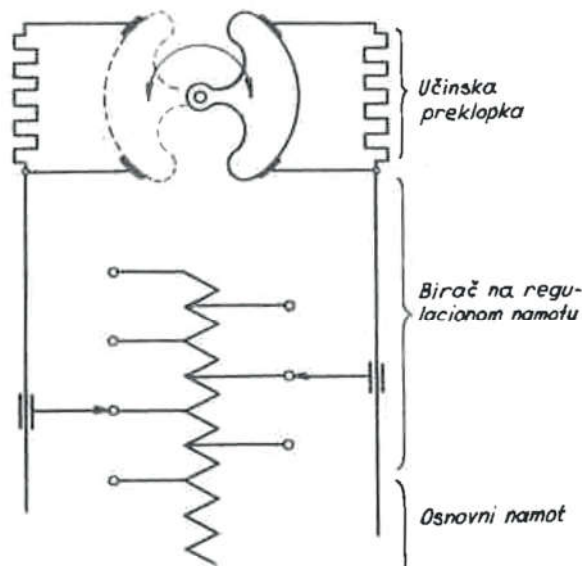


Sl. 7.5-02

Redoslijed prespajanja pri regulaciji pomoću prigušnice

Prednost upotrebe induktivnog otpora je u tome, što i međupoložaj "c" prema sl. 7.5-02 može biti pogonski položaj u kojem odgovarajuće dimenzioniran induktivni otpor djeluje kao autotransformator i raspoljavlja napon između dva otcjepa. Pri tom mora preklopka, koja vrši prespajanje, biti građena kao učinska sklopka, jer mora prekidati struju. Kod induktivnog otpora mora sklopka prekidati induktivnu struju, što je teži slučaj od prekidanja radne struje, pa se danas mnogo više upotrebljava princip regulacije pomoću radnih otpora.

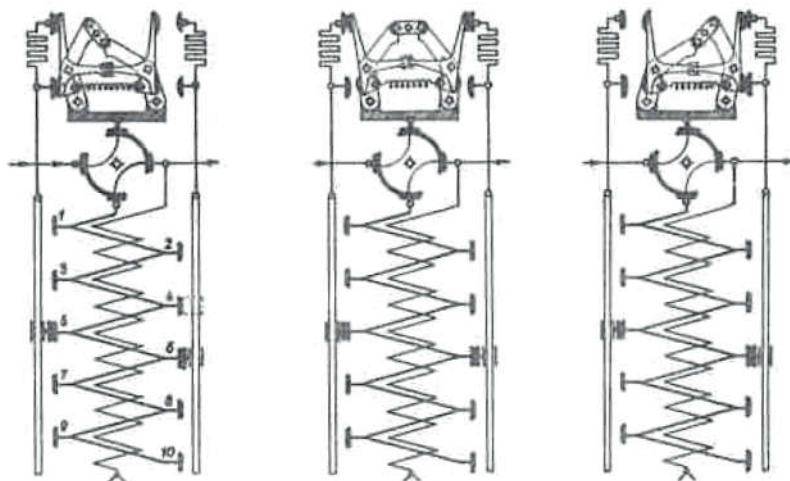
Regulacioni transformatori grade se najviše za regulaciju u granicama od $\pm 10\%$ do $\pm 20\%$. Napon jednog stepena iznosi cca 1,5 do 2 %. Kako se ne bi morao svaki kontakt graditi kao učinska sklopka za prekid struje, dijeli se preklopni uređaj na birač i učinsku preklopku, kako je to prikazano u sl. 7.5-03. Birač se prebacuje samo onda, kad ne vodi struju, pa prema tome učinska preklopka preuzima sva učinska preklapanja. Kontakt učinske preklopke se u obliku lire prebacuje za 180° iz na sl. 7.5-03 punom crtom izvučenog u crtkani položaj i natrag. Kod upotrebe radnih otpora, koji se većinom danas upotrebljavaju, traži se velika brzina preklapanja, kako bi otpor bio što kraće vrijeme opterećen. Zato se grade preklopke kod ko-



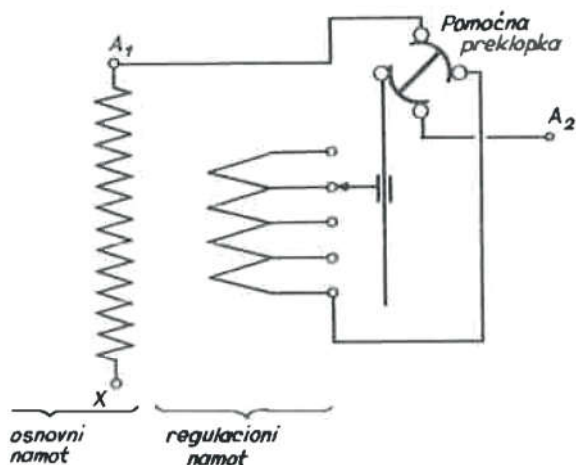
Sl. 7.5-03
Shema spoja birača i učinske preklopke regulacionog transformatora

jih imaju kontakti vrlo kratke putove, kako se to vidi kod Jansen-ove preklopke, koja je prikazana u sl. 7.5-04. U toj slici ucrtana je i pomoćna preklopka, kojom se može regulacioni dio namota pribrojiti ili odbiti od osnovnog namota, kako je to principijelno prikazano u sl. 7.5-05 ; na taj način se istim regulacionim namotom postiže dvostruki opseg regulacije.

Kod regulacionih transformatora nesimetrija uslijed regulacionog namota predstavlja još veći problem nego je to slučaj kod transformatora sa otcjepima. Zato se danas regulacioni namot većinom postavlja kao posebni cilindrični namot u kojem su svi dijelovi regulacionog namota paralelno namotani, tako da su svi

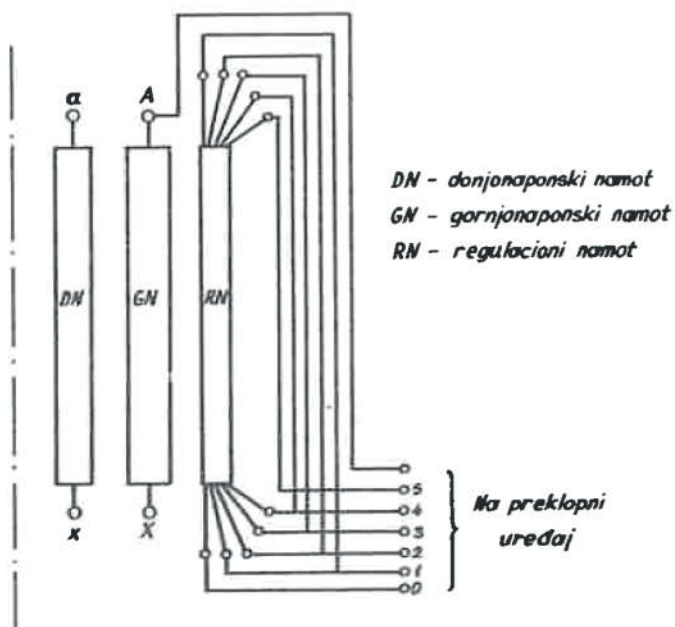


Sl. 7.5-04
Regulacija sa brzim biračem i sklopkom snage prema Jansenu



počeci na jednoj a svršeci na drugoj strani, kako to prikazuje sl. 7.5-06 . Time se postizava da su svi amperzavoji regulacionog namota u svakom položaju regulatora razdijeljeni po cijeloj visini namota.

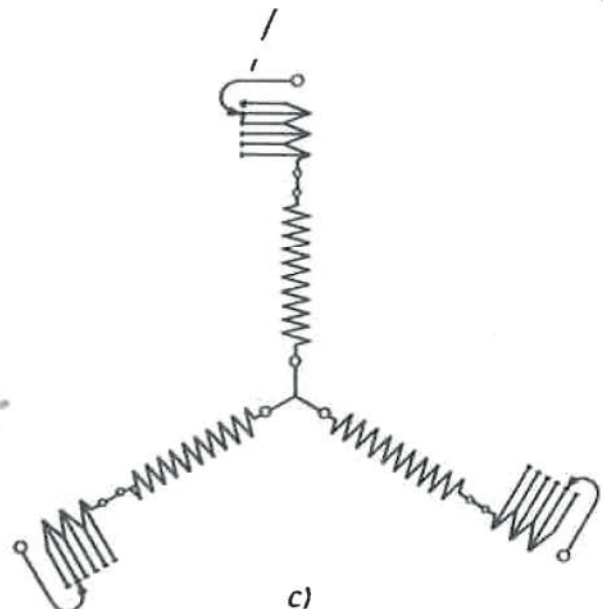
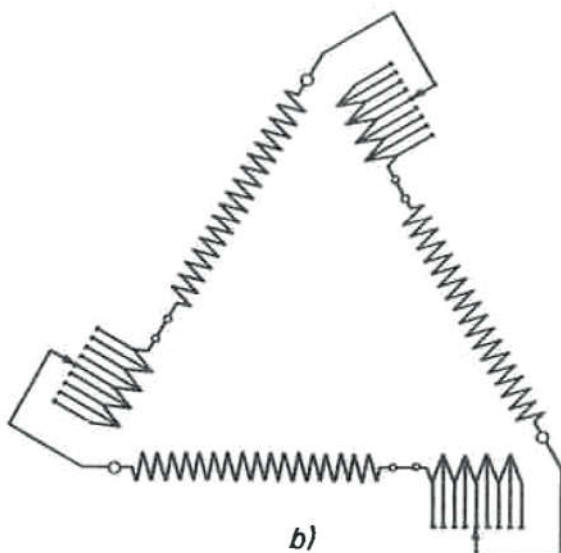
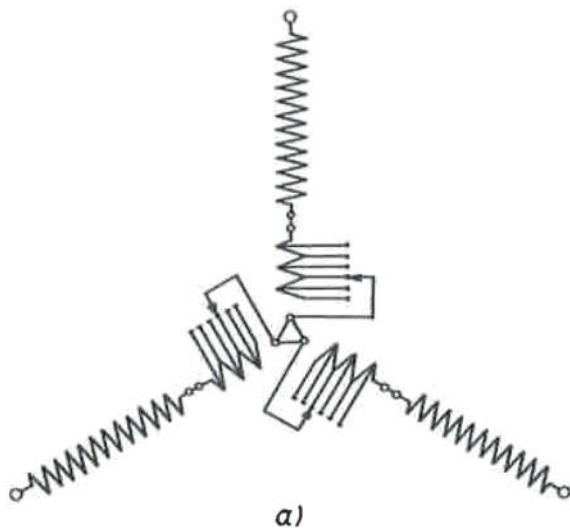
Sl. 7.5-05
Shema spoja pomoćne preklopke kod regulacionog transformatora



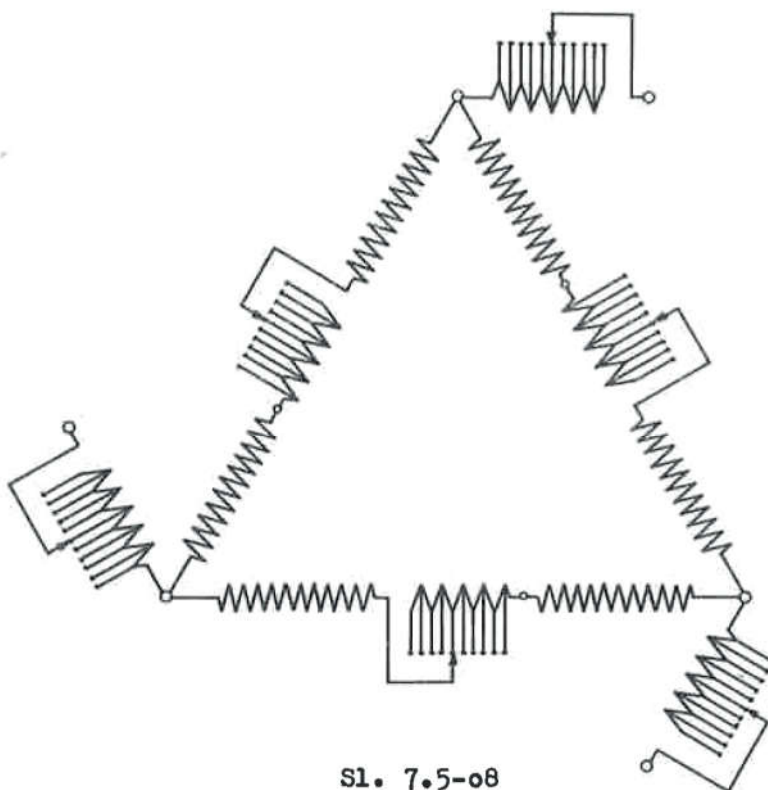
Sl. 7.5-06
Regulacioni namot izveden kao poseban cilindrični namot

U sl. 7.5-07 su prikazani razni spojevi regulacionog namota kod trofaznih transformatora.

Kad reguliramo samo napon bez skretanja vektora napona, govorimo o uzdužnoj regulaciji napona. Ako regulacionim namotom na drugom stupu dodajemo napon okomito na pravac vektora napona, onda govorimo o poprečnoj regulaciji napona. U sl. 7.5-08 prikazana je spojna shema za spoj trokut sa uzdužnom i poprečnom regulacijom napona. Na taj način je moguće u velikim zatvorenim mrežama vršiti regulacijom raspodjelu radne struje, jer se sa uzdužnom regulacijom može regulirati samo raspodjela jalove struje.



Sl. 7.5-07
Spojevi regulacionog namota kod trofaznih transformatora



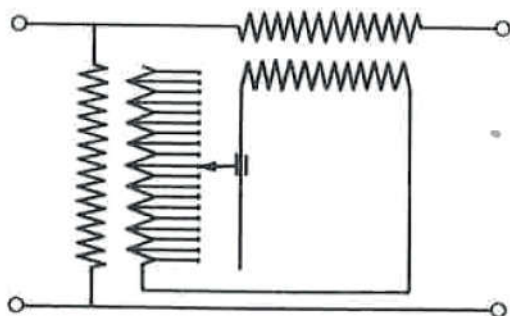
Sl. 7.5-o8

Spojna shema za uzdužnu i poprečnu regulaciju napona u spoju trokut

Kod jako velikih struja postaje preklopni uređaj skup, pa se upotrebljava regulacija sa dodatnim transformatorom prema shemi u sl. 7.5-o9.

Preklopni uređaj se u principu može smjestiti bilo na niskonaponsku bilo na visokonaponsku stranu. Kod toga odlučuju slijedeći razlozi:

- Na visokonaponskoj strani su struje manje pa su prema tome i preklopni uređaji lakši i jeftiniji.
- U nul-točki je napon prema sl. 7.5-o7 a) između faza preklopnih uređaja malen, pa se zato, kad god je to moguće, to koristi.
- U principu je povoljnije da je regulacioni namot smješten na onoj strani, na kojoj se više mijenja napon, kako bi indukcija u željezu za vrijeme reguliranja napona bila konstantna.



Sl. 7.5-o9

Shema spoja regulacije sa dodatnim regulacionim transformatorom

7.6 Suhi transformatori

Velika prednost ulja u pogledu probojne čvrstoće, kao i u pogledu izdašnijeg hladjenja, je gotovo potpuno istisnula primjenu suhih transformatora, tako da se oni danas grade samo za snage od nekoliko kVA a tek u iznimnim slučajevima do snage od nekoliko stotina kVA.

Kod suhih transformatora klase A dozvoljavaju naši propisi da prosječna nadtemperatura bakra iznosi najviše 55°C . Faktor hladjenja konvekcijom zraka iznosi $8 \text{ W/m}^2\text{C}$, pa prema tome može jedan kvadratni metar površine svitaka odvoditi toplinu od $8 \times 55 = 440 \text{ W/m}^2$. Tome nasuprot iznosi faktor hladjenja konvekcijom ulja $100 \text{ W/m}^2\text{C}$. Prema našim propisima dozvoljena nadtemperatura od srednje temperature bakra prema temperaturi okolnog zraka iznosi 60°C , pa na razliku temperature bakra i ulja otpada samo cca 20°C . Unatog toga dobijemo da jedan kvadratni metar površine svitaka u ulju odvodi toplinu od $100 \times 20 = 2000 \text{ W/m}^2$, odnosno cca 4,5 puta više nego kod suhog transformatora. Prema tome gubici kod uljnog transformatora mogu biti 4,5 puta veći, odnosno specifično opterećenje bakra cca 2,1 puta veće.

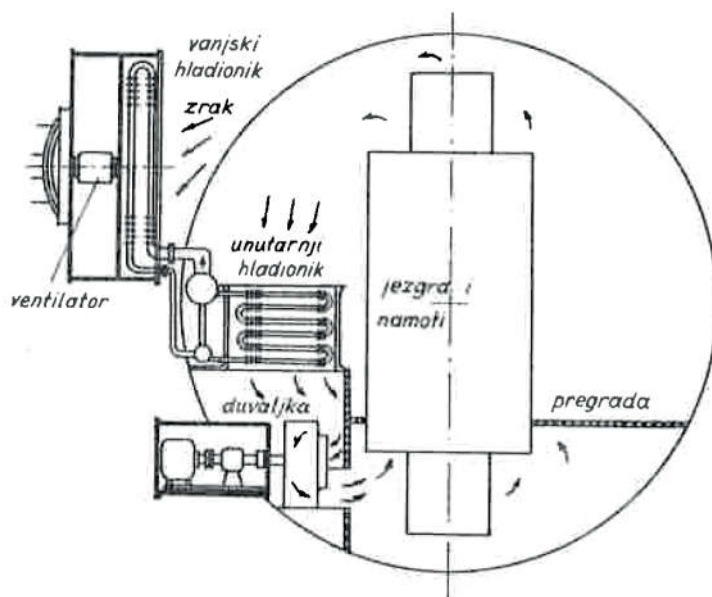
Suhi transformator klase A uspijevamo tako konstruirati, da ga možemo opteretiti trajno do $1,8 \times 10^6 \text{ A/m}^2$. Prema tome bi uljne transformatore mogli opteretiti do $3,6 \times 10^6 \text{ A/m}^2$. Medjutim, kako vidimo iz poglavlja 5.6, iz ekonomskih razloga se ne ide tako daleko, barem ne kod manjih transformatora do kojih 1000 kVA snage, koje se opterećuje samo do cca $3 \times 10^6 \text{ A/m}^2$. Suhi transformator treba prema tome 67 % veći presjek vodiča te dakle 67 % više bakra, a radi veće srednje duljine vodiča produljuje se i duljina željeza. Da ne narušimo ekonomski omjer težine bakra i željeza, kod suhih transformatora povećavamo presjek željeza i presjek bakra podjednako, pa dobijemo da suhi transformator ima cca 35 % više bakra i cca 45 % više željeza nego uljni transformator. Kod uljnih transformatora manje snage treba na masu aktivnog dijela dodati još cca 100 % mase za kotao i ulje, pa zato masa uljnog transformatora ispada još uvijek cca 35 do 40 % veća od mase suhog transformatora. Ali kotao, a pogotovo ulje su relativno jeftini, pa unatoč manje mase je suhi transformator za cca 25 % skuplji od uljnog transformatora.

U novije vrijeme počela je primjena tzv. silikonskih izolacija, koje odgovaraju klasi H, za koju propisi dozvoljavaju nadtemperaturu 135°C , odnosno 2,25 puta više nego za klasu A. Prema tome može se silikonski transformator za cca $\sqrt{2,25} = 1,5$ puta više specifično opteretiti nego suhi transformator klase A, tj. sa $1,5 \times 1,8 = 2,7 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, odnosno gotovo toliko koliko opterećujemo uljne transformatore. Silikonske izolacije su još jako skupe, pa je silikonski transformator kraj praktički istih masa za aktivni dio skuplji od uljnog transformatora za cca 35 %, odnosno skuplji od suhog transformatora klase A za cca 8 %.

Ne smijemo ipak zaboraviti da za suhi transformator nije potrebna uljna jama, te je time riješen problem vatrosigurnosti, pa da zato u izvjesnim slučajevima suhi transformator može konkurirati uljnom transformatoru. K tome dolazi još činjenica da u Americi dozvoljavaju za silikonsku izolaciju trajnu nadtemperaturu od 180°C za razliku od 135°C prema VDE propisima. Silikonska izolacija nalazi se još u razvoju, te se može očekivati ne samo da će propisi za nju dozvoljavati još znatno veće nadtemperature, već da će osim toga ta izolacija postati jeftinija. Zato može lako biti moguće da će razvojem primjene silikonskih izolacija doći do toga da silikonski trans-

formator postane i za normalne prilike ozbiljan konkurent uljnom transformatoru.

Sva ta razmatranja vrijede samo za napone do 10 kV, jer iznad ovog napona izolacioni razmaci, koji su u zraku daleko veći nego u ulju, onemogućuju primjenu zračnih suhих transformatora. Međutim, u novije vrijeme pokušava se pitanje suhog transformatora riješiti i za visoke napone i velike snage preko 10 000 kVA na taj način, da se transformator postavi u hermetički zatvoreni kotao i napuni plinom pod pritiskom. Amerikanci imaju u pogonu već nekoliko takovih transformatora za 10 000 kVA i 69 kV, koji su napunjeni plinom SF_6 (sumporni heksafluorid) pod pritiskom od 2,05 at kod 25°C . Taj pritisak prilikom zagrijavanja transformatora raste do cca 2,5 at. Na slici 7.6-01 prikazana je principijelna konstrukcija tog transformatora. Kotao je u obliku cilindra, kako bi lakše

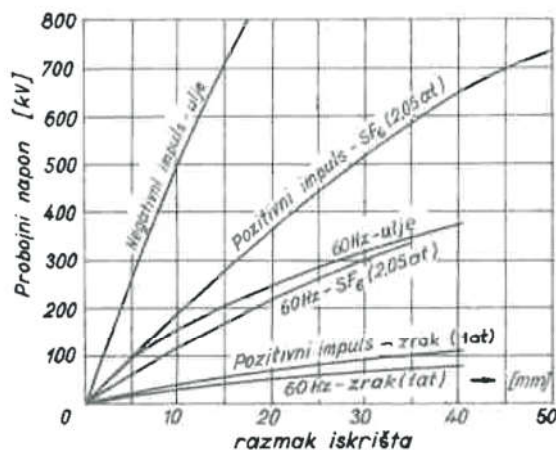


Sl. 7.6-01

Principijelna konstrukcija plinom punjenog transformatora

odoljevao unutarnjem pretlaku. U kotlu se nalazi isparivač u obliku cijevnog sistema napunjenog tekućim freonom, koji se zagrijava od izolacionog plina te ga isparivanjem hladi. Na kotlu se nalazi hladionik, koji sa vanjskim zrakom pomoću ventilatora hladi tj. kondenzira freon, pa se tako tekući freon vlastitom težinom vraća u isparivač. Pomoćni ventilator, koji je smješten u kotlu a pogonjen sa elektromotorom izvan kotla, tjera izolacioni plin kroz namot transformatora i kroz isparivač. Donji dio kotla je pregradom tako zatvoren, da je hladni plin prisiljen prolaziti kroz namot transformatora.

Probojna čvrstoća plina SF_6 je za niskofrekventne napone kod navedenog pritiska gotovo jednaka probojnoj čvrstoći ulja, dok kod udarnih napona iznosi mnogo manje od probojne čvrstoće ulja, kako se to vidi iz dijagrama na sl. 7.6-02. Za sada Amerikanci taj problem rješavaju tako da montiraju na kotao transformatora katodne odvodnike, koji su podešeni na niži probojni napon nego što je to uobičajeno kod normalne izvedbe transformatora.



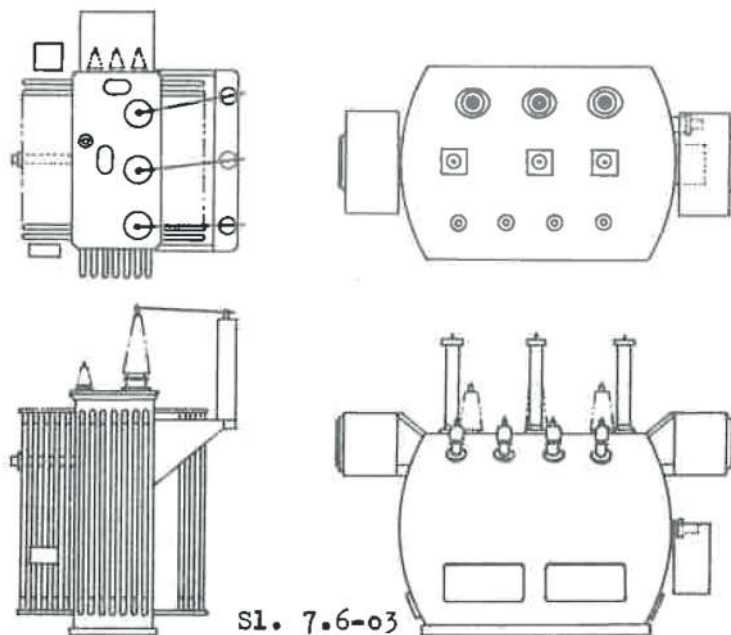
Sl.7.6-o2

Probojna čvrstoća ulja, zraka i sumpornog heksafluorida. Mjere-
no na iskrištu : kugla 254
nasuprot ravne plohe

U slijedećoj tabeli prikazani su karakteristični podaci uljnog i plinskog transformatora.

	Uljni transformator	Plinski transformator
Težina aktivnog materijala	88 %	100 %
Težina izolacionog sredstva	2200 %	100 %
Ukupna težina transformatora	140 %	100 %
Napon kratkog spoja	7,2 %	7,2 %
Ukupni gubici	95 %	100 %

Na sl. 7.6-o3 nacrtane su mjerne skice uljnog i plinskog transformatora snage 10 000 kVA i napona 69 kV. Iz ovih podataka se vidi da uljni transformator za velike snage dobiva ozbiljnog konkurenta u plinom punjenom transformatoru.



Sl. 7.6-o3

Mjerne skice uljnog i plinskog transformatora snage 10 MVA, 69 kV

7.7 Vatrosigurni transformator

Uljni transformator prema poglavlju 7.6 ima velike prednosti pred suhim transformatorom, pa je njegova primjena daleko šira i veća u odnosu na suhi transformator. Uljni transformator ima međjutim, veliku manu, jer je ulje zapaljivo. Ulje se teško zapali. Možemo baciti goruću šibicu u kotao sa ulje, pa će se šibica ugasiti. Lako se, međjutim, upali npr. nauljena prašina na podu, nauljeni papir ili nauljeno tkivo. Kad se pak ulje jednom zapali, onda je jako opasno, te može doći do eksplozije. Ako npr. kotao propušta ulje i treba ga zavariti, ne smije se variti ni izvana niti na praznom kotlu, tj. ako je ulje izliveno, jer se kod zagrijavanja od varenja razviju od ostataka ulja unutar kotla plinovi, koji mogu eksplodirati. U tom slučaju je najbolje kotao napuniti vodom i tek onda sa vanjske strane variti, ili pak otvoreni kotao tokom varenja jednim ventilatorom stalno ventilirati, tako da se onemogućí nakupljanje eksplozivnih plinova.

Kada ulje gori, razvija se čadja u velikim količinama, tako da se i velike prostorije u kratko vrijeme ispuna crnim dimom, koji jako smanjuje vidljivost i time veoma otežava gašenje požara.

Iz navedenih razloga se transformator, ako je ikako moguće, postavlja na slobodnom prostoru, tj. tamo gdje ne može u slučaju požara ugroziti druge objekte. Ako to nije moguće, moramo se prema propisima pobrinuti, da u slučaju eksplozije kotla ulje odmah može otijecati na sigurno mjesto, te da je osim toga transformator zatvoren u posebne ćelije. Kod većih transformatora ugrađujemo još posebne automatske uređaje za gašenje sa CO₂, ili sa plaštem vodene magle.

Tamo gdje radi vatrosigurnosti ne smijemo postaviti uljni transformator, postoji mogućnost upotrebe umjetnih ulja koje Amerikanci obuhvaćaju pod nazivom "Askarel-ulja". Na tržištu su ta ulja poznata pod nazivima "Pyranol", "Clophen", "Pyralen" itd. Sva ta ulja su nezapaljiva. Bezbojna su, a imaju manju specifičnu toplinu i manju toplinsku vodljivost od običnih ulja, pa zato nešto slabije hlade. Probojna čvrstoća je ista a dielektrična konstanta dva puta veća nego što je to slučaj kod običnog ulja. Sva ta ulja isparavaju, pa se zato preporučuje kondenzator hermetički zatvoriti sa velikim zračnim jastukom, koji ograničuje pretlak kod zagrijavanja ulja na za kotao dozvoljenu visinu.

Askareli nagrízavaju kožu, pa se njihove pare zato ne smije udisati. Kad se radi s tim uljem, treba ruke zaštititi glicerinom. Kad se kod visoke temperature to ulje raspada, npr. kod defekta na namotu, pod uplivom električkog luka nastaju otrovni i agresivni produkti, među ostalim i solna kiselina, što uništava konstruktivne elemente u unutrašnjosti transformatora. Zato je poslije defekta potrebno ulje izmijeniti sa novim.

Osobitosti tih ulja traže prema tome posebnu konstrukciju transformatora. Ta umjetna ulja su oca pet puta skuplja od običnih ulja. K tome dolaze još povećani troškovi zbog posebne izvedbe, pa su zato ovakvi vatrosigurni transformatori relativno skupi. Obzirom na razvoj suhih silikonskih izolacija (vidi pogl. 7.6) počinje se u zadnje vrijeme sve više upotrebljavati silikonske transformatore. Sa stanovišta vatrosigurnosti pogodni su i plinom punjeni transformatori, koji su punjeni sa nezapaljivim i neotrovnim plinovima, a sa svojom cijenom takodjer konkuriraju "Askarel" izolaciji.

8. KVAROVI I ZAŠTITA TRANSFORMATORA

8.1 Općenito o kvarovima

Transformatori su u većini slučajeva stalno u pogonu, vrlo često u usamljenim transformatorskim stanicama, daleko od posluge i nadzora. Ispad transformatora iz pogona obično predstavlja ispad jednog dijela mreže, dakle većeg broja potrošača, pa se zato obično kod transformatora traži veća pogonska sigurnost nego kod motora. Pošto su transformatori izvrnuti direktnim udarcima prenapona iz mreže, tom zahtjevu sigurnosti je teže udovoljiti nego zahtjevu sigurnosti kod motora. Unatoč toga uspijeva već danas gradnja transformatora koji su sigurni i od direktnih udara грома u neposrednoj blizini. Ipak, potpune sigurnosti ne može biti, pa je zato potrebno računati sa mogućnošću kvara.

Na transformatoru mogu nastupiti slijedeći kvarovi:

- a) proboj namota prema tijelu transformatora,
- b) proboj između visokonaponskog i niskonaponskog namota,
- c) proboj između faza,
- d) spoj među zavojima i
- e) kratkospojeni krug u jezgri.

Kod proboja a), b) i c) moramo razlikovati dva slučaja:

- A) Proboj od prenapona, koji obično nemaju snage da podrže luk, nego odmah nestanu, a sitnu rupicu, koju je proboj učinio kroz tvrdi dio izolacije, zalije ulje, pa ostane vidljiva samo mala crna točkica na izolaciji; ova točkica pokazuje da je na tom mjestu izolacija oslabljena, no ne u tolikoj mjeri da bi ju pogonski napon mogao probiti. Kod otvaranja transformatora, koji je bio duže vremena u pogonu, može se pod povećalom naći više puta mnogo sitnih crnih točkica. Vremenom proboji sve više oslabljuju izolaciju, dok je konačno pogonski napon ne probije i ne podržava luk sa visokom temperaturom i toplinom, koja topi bakar.
- B) Proboj od udarnih valova većih snaga ili od pogonskih prenapona, koji odmah razvijaju luk i tope bakar.

Kod spoja među zavojima moramo isto tako razlikovati dva tipična slučaja: spoj među zavojima malog transformatora i spoj među zavojima velikog transformatora. Kod malog transformatora sa malim naponom između zavoja napon je premalen da bi podržavao luk, pa nastupa samo zagrijavanje kratkospojenog zavoja radi struje kratkog spoja. Vodič se sve više grije, izolacija na kratko spojenom zavoju gori, postepeno izgori izolacija i na susjednim zavojima, pa se i između njih stvara kratki spoj, te se tako kvar relativno polako širi i traje čak nekoliko minuta. Opisani kvar prepoznajemo po izgorenom namotu, kod kojeg prilikom kvara nije došlo do topljenja bakra.

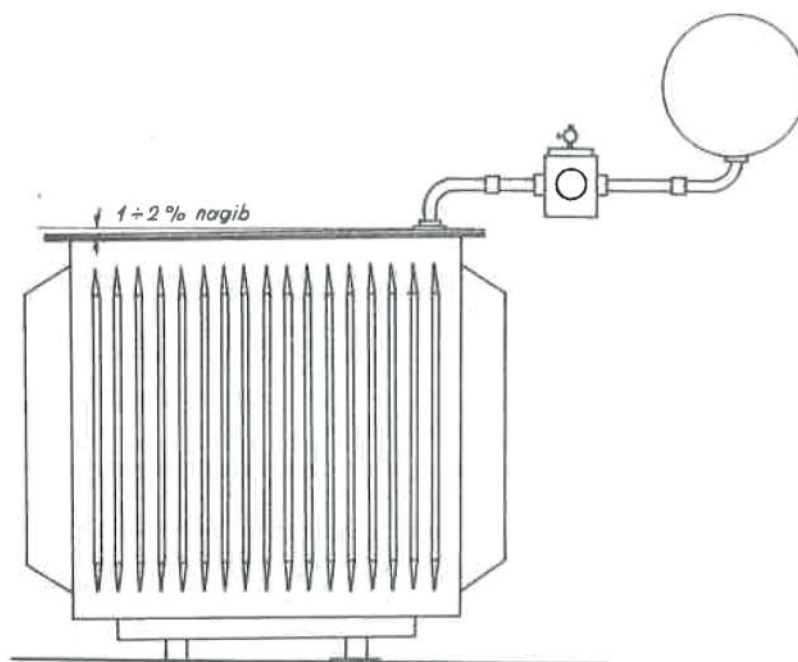
Kod velikih transformatora je napon jednog zavoja dovoljno velik da spoj među zavojima odmah pretvori u luk; pri tom se bakar topi

i kvar se velikom brzinom širi. Za ovaj slučaj je karakteristično da nema izgorene izolacije na cijelom zavoju, ali je rastopljen bakar i izgorena izolacija na mjestu gdje je nastupio spoj među zavojima. Ovaj kvar se odvija u desetinkama sekunde.

Do kratkospojenog kruga u jezgri dolazi obično na tupom spoju ili ga stvaraju loše izolirani vijci i tlačne ploče kojima je stegnuta jezgra. Pri tom u većini slučajeva dolazi do topljenja željeza. Tako oštećenu jezgru treba potpuno rastaviti, izrezati stopljena mjesta na pojedinim limovima, ponovno izolirati limove i raspodjelom oštećenih limova na razna mjesta jezgre izbjeći preveliko povećanje indukcije na mjestu kvara. To je veoma težak rad, pa je zato popravak skup.

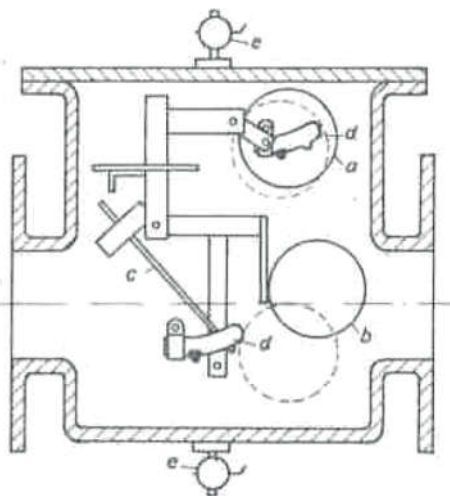
8.2 Buchholzova zaštita

Kod uljnih transformatora se uvijek na mjestu kvara, radi visoke temperature, razvijaju plinovi. Tu pojavu koristi Buchholzova zaštita, ugradjena u cijev koja veže kotao transformatora sa konzervatorom, prema sl. 8.2-01. Buchholzova zaštita se sastoji iz



Sl. 8.2-01
Transformator sa ugradjenom Buchholzovom
zaštitom

posude u kojoj se skupljaju plinovi iz kotla i iz dva plovka, gornjega "a" i donjega "b", od kojih je svaki povezan sa svojim živorsrebrenim kontaktom "d". Donji kontakt je povezan još sa jednom lopaticom "c", a osim toga ta posuda ima gore i dolje po jedan pipac "e", kako to slika 8.2-02 prikazuje.



Sl. 8.2-02
Izvedba Buchholzovog
relea

Kod manjeg kvara u transformatoru plin se polako razvija pa se sakuplja u gornjem dijelu posude i ističe nivo ulja prema dolje. Sa nivoom ulja pada i gornji plovak i ukapča gornji kontakt, koji daje signal upozorenja. Ta ista pojava se može dogoditi, ako je npr. kod čišćenja ulja ušao zrak u kotao ili ako pumpa za cirkulaciju ulja uvlači i zrak. Zato je predviđena mogućnost kontrole plina na taj način, da se plin sa gornjim pipcem "e" ispušta napolje i pokuša zapaliti. U slučaju da plin gori, sigurno je da se radi o kvaru u transformatoru. Ako plin ne gori, treba tražiti objašnjenje prodiranja zraka u kotao.

Kod većih kvarova se plin jako brzo razvija i ističe ulje iz kotla prema konzervatoru. Ulje veli-

kom brzinom prolazi kroz posudu Buchholzove zaštite i okrene lopaticu "c" koja ukapča donji kontakt, a ovaj odmah posreduje izbacivanje transformatora iz pogona.

Ako ulje nestaje iz kotla, jer je npr. kotao počeo propuštati ulje, onda nivo ulja pada, pa gornji plovak prvi daje kontakt za upozorenje, a poslije toga donji plovak zatvara kontakt za izbacivanje.

Kako bi plin, koji se razvija u kotlu, što prije stigao u posudu Buchholzove zaštite, treba kotao transformatora postaviti cca 1-2 % u nagnuti položaj tako, da je najviše mjesto na poklopcu baš na mjestu gdje izlazi cijev iz kotla.

Ispitivanje pravilnog djelovanja Buchholzove zaštite se vrši na slijedeći način:

Na donji pipac se priključi ručna zračna crpka (može biti obična pumpa za automobilske gume), pa se polako tiska zrak u posudu zaštite. Posuda je opremljena sa staklom, kroz koje se može promatrati padanje nivoa ulja i nadzirati pravilno djelovanje gornjeg plovka. Ako se posuda brzo puni sa zrakom, tada mora djelovati lopatica "c", a ako se gornji dio posude ispunji zrakom mora djelovati donji plovak.

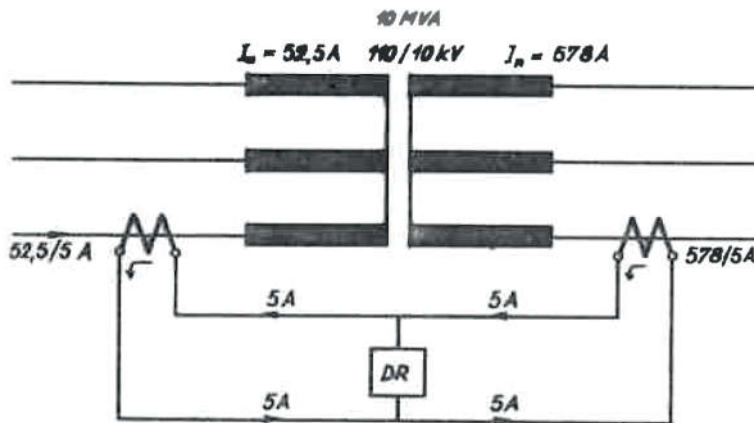
Buchholzova zaštita se gradi u tri veličine. Najmanja veličina se izvodi za priključak na cijev promjera 1", što odgovara za transformatore snage do 1000 kVA. Srednja veličina se izvodi za priključak na cijevi 2" za transformatore od 1000 do 10 000 kVA dok se za transformatore preko 10 000 kVA upotrebljava najveća izvedba Buchholzove zaštite.

8.3 Diferencijalna zaštita

Brzina razvijanja kvara je ovisna o snazi koja hrani mjesto kvara. Razumljivo je da se pri većoj snazi transformatora većom snagom razvija kvar, pa transformator treba brže iskopčati iz pogona kako bi se kvar bez mnogo štete ograničio. Kod transformatora iznad nekoliko MVA

brzina djelovanja Buchholzove zaštite više ne zadovoljava, pa se obično dodatno predviđa tzv. diferencijalna zaštita.

Princip rada diferencijalne zaštite se zasniva na mjerenju razlike struje iste faze na primarnoj i sekundarnoj strani (vidi sl. 8.3-01).



Sl. 8.3-01

Shema spoja diferencijalne zaštite kod transformatora

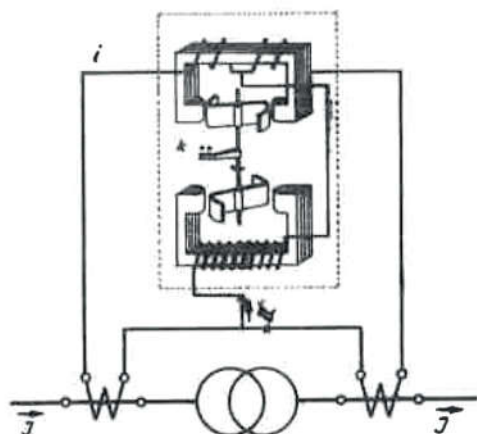
Strujni transformatori moraju imati takav prenosni omjer, da su njihove sekundarne struje i na jednoj i na drugoj strani transformatora jednake. Npr. kod transformatora za 10 MVA, 110/10 kV, 52,5/578 A, moraju strujni transformatori imati prenosni omjer 52,5/5 na primarnoj odnosno 578/5 na sekundarnoj strani.

Ako je transformator zdrav i ako zanemarimo struju magnetiziranja, koja je kod velikih transformatora relativno malena, moraju sekundarne struje oba strujna transformatora biti jednake i po veličini i po fazi, pa po Kirchhoffovom zakonu ne može između točaka "a" i "b" kroz diferencijalni rele poteći struja.

Ako nastupi kvar u namotu transformatora, mora to mjesto napajati primarna strana, pa će struja na primarnoj strani biti za iznos povećanja struje radi kvara relativno veća od struje na sekundarnoj strani. Ta razlika se pojavljuje i na sekundarnoj strani strujnih transformatora, pa će poteći odgovarajuća struja kroz diferencijalni rele, koji time registrira kvar i daje signal za izbacivanje transformatora iz pogona.

Isto tako kako se od diferencijalne zaštite traži da mora sigurno djelovati kod kvara u transformatoru, traži se da ona ne smije djelovati kod kvara u mreži odnosno izvan područja, koje je sa strujnim transformatorima obuhvaćeno. U protivnom slučaju bi diferencijalna zaštita mogla bez potrebe transformator izbaciti iz pogona, što se ni u kojem slučaju ne smije dogoditi. Kod svake diferencijalne zaštite moramo očekivati izvjesne netočnosti u prenosnim omjerima strujnih transformatora; svaka pogreška u prenosnom omjeru može imati za posljedicu lažne struje, koje prolaze kroz diferencijalni rele i time mogu uzrokovati njegovo djelovanje bez potrebe. Osjetljivost diferencijalnog relea se može smanjiti tako, da te lažne struje ne utječu, tj. da je lažna struja manja od struje djelovanja. No, lažne struje

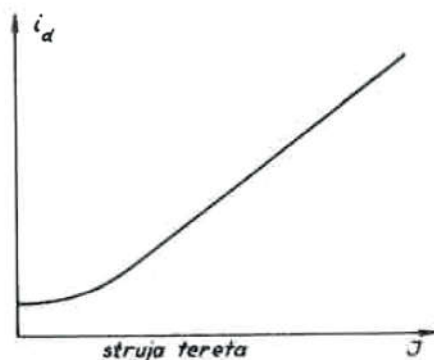
su to veće, što je veće opterećenje, pa su kod preopterećenja, a pogotovo kod kratkog spoja u mreži, jako velike. Ako bi postavili struju djelovanja tako visoko, tj. diferencijalni rele učinili tako neosjetljivim, da ne djeluje niti na te velike lažne struje, postala bi sigurnost djelovanja u slučaju kvara u transformatoru problematična. Zato se diferencijalni relei grade tako, da je njihovo djelovanje ovisno o struji tereta. Kod malog tereta rele djeluje na malu razliku struja, kod većeg tereta na proporcionalnom teretu veću razliku struja. Prema tome je struja djelovanja " i_d " proporcionalna, struji tereta; njezina veličina izražena u procentima struje tereta je približno konstantna (vidi sl. 8.3-03). Stoga se takav diferencijalni rele zove i procentualni rele. Opisano djelovanje postizavamo na taj način da npr. diferencijalni rele opremimo sa dva mjerna sistema na zajedničkoj osovinu, prema sl. 8.3-02. Kroz gornji mjerni sistem prolazi



struja tereta " I " reducira na sekundarnu stranu strujnih transformatora. Taj sistem drži osovinu relea to jače u neutralnom položaju, što je struja tereta veća. Kroz donji mjerni sistem prolazi razlika struja, koja ima takovo djelovanje da želi okrenuti osovinu u pravcu kratkog spajanja kontakata "k", nakon čega dolazi do izbacivanja transformatora iz pogona.

Struja djelovanja " i_d ", tj. ona struja koja je potrebna da se osovina okrene, je prema tome ovisna o struji tereta, kako je to prikazano u dijagramu sl. 8.3-03.

Sl. 8.3-02
Shema izvedbe procentualnog diferencijalnog relea



Sl. 8.3-03
Dijagram ovisnosti struje djelovanja " i_d " o struji tereta kod procentualnog relea

Popis upotrebljenih oznaka u Transformatorima I i II

a - ubrzanje	H_m - maksimalna vrijednost jakosti magnetskog polja
a' - širina prozora transformatora	H - efektivna vrijednost jakosti magnetskog polja
a_1 - širina primarnog namota	$\vec{x}, \hat{A}$ - vektor efektivne vrijednosti magnetskog polja
a_2 - širina sekundarnog namota	H_δ - jakost magnetnog polja u zračnom rasporu
$\Delta a_1, \Delta a_2, \Delta a_3$ - razmaci među namotima u transformatoru	i - momentana vrijednost struje
A - koeficijent opterećenja	I_m - tjemena vrijednost struje
A_{mag} - magnetska energija	I - efektivna vrijednost struje
A_{meh} - mehanička energija	I_{sr} - srednja vrijednost struje
b' - visina prozora transformatora	$\vec{J}, \hat{I}$ - vektor efektivne vrijednosti struje
b - visina namota	I_f - struja faze
b_1 - visina primarnog namota	I_0 - struja praznog hoda (struja magnetiziranja)
b_2 - visina sekundarnog namota	I_μ - bezvratna komponenta struje praznog hoda (čista struja magnetiziranja)
B_t - momentana vrijednost magnetske indukcije	I_{or} - radna komponenta struje praznog hoda
B_m - maksimalna vrijednost magnetske indukcije	I_δ - struja magnetiziranja zračnog raspora
B_δ - indukcija u zračnom rasporu	I_{Fe} - struja magnetiziranja željeza
c - specifična toplina	I_h - dio struje magnetiziranja uslijed histereze
c_{Cu} - cijena kilograma bakrenog vodiča	I_v - dio struje magnetiziranja uslijed vrtložnih struja
c_{Fe} - cijena kilograma transformatorskog lima	$I_{\mu Fe}$ - jalova komponenta struje magnetiziranja željeza (čista struja magnetiziranja željeza)
C - cijena, integraciona konstanta	I_1 - primarna struja
D - promjer, promjer jezgre transformatora	I_2 - sekundarna struja
D_s - srednji promjer	I_k - trajna struja kratkog spoja
D_o - optimalni promjer	I_{ku} - udarna struja kratkog spoja
e - baza prirodnih logaritama	I_{ou} - udarna struja ukapčanja
e - momentana vrijednost inducirano napona	I_d - direktna komponenta struje
E_m - tjemena vrijednost inducirano napona	I_i - inverzna komponenta struje
E - efektivna vrijednost inducirano napona	I_o - istofazna komponenta struje
E_{sr} - srednja vrijednost inducirano napona	I_ψ - struja ψ -tog harmonika
$\vec{E}, \hat{E}$ - vektor efektivne vrijednosti inducirano napona	I_z - iskorištanje životne dobi
E_1 - primarni inducirani napon	k - faktor
E_2 - sekundarni inducirani napon	k_d - faktor potiskivanja struje
E_f - napon faze	k_{12} - prenosni omjer
f - frekvencija	l - dužina, krak
f_{Cu} - faktor punjenja namota	L - induktivitet
f'_{Cu} - faktor punjenja prozora	$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ - rasipni induktivitet primara odnosno sekundara
f_{Fe} - faktor punjenja jezgre	L_k - ukupni rasipni induktivitet reduciran na primar
f_o - faktor oblika	m - masa
F - sila, jakost električnog polja	m_{Cu} - masa bakra
F_a - aksijalna komponenta sile na namot	m_{Fe} - masa željeza
F_r - radijalna sila na namot	M - međui induktivitet
g - gravitacija	P - snaga, gubici
G - težina	P - specifični gubici (po jedinici volumena ili mase)
h - visina, dubina, koeficijent odvoda topline	
h_1 - koeficijent isijavanja topline	
h_k - koeficijent odvoda topline konvekcijom	
H_t - momentana vrijednost jakosti magnetskog polja	

P_{Cu} - gubici u bakru	U_0 - napon praznog hoda
P_{Cu1} - gubici u bakru primara	U_f - fazni napon
P_{Cu2} - gubici u bakru sekundara	v - brzina
P_{dod} - dodatni gubici	V - volumen
P_{Fe} - gubici u željezu	w - broj zavoja
$P_{Fe,h}$ - gubici u željezu uslijed histereze	w_1 - broj zavoja primara
$P_{Fe,v}$ - gubici u željezu uslijed vrtložnih struja	w_2 - broj zavoja sekundara
$P_{Fe,jB}$ - jalovi gubici u željezu	W - energija
P_g - ukupni gubici	W_g - godišnji gubici energije
P_{gn} - ukupni gubici kod nominalnog tereta	W_{Cu} - godišnji gubici u bakru
P_r - djelatna snaga	W_{Fe} - godišnji gubici u željezu
P_j - jalova snaga	X - induktivni otpor
P_n - nominalna snaga	$X_{1\sigma}$ - rasipni otpor primara
P_p - prolazna snaga autotransformatora	$X_{2\sigma}$ - rasipni induktivni otpor sekundara
P_t - tipna snaga transformatora	X_k - ukupni rasipni otpor transformatora po fazi
q - presjek vodiča	X_h - induktivni otpor magnetiziranja
Q - količina topline	Y - vodljivost
r - polumjer	Z - impedancija
R - radni otpor	Z_k - ukupna impedancija transformatora po fazi
R_k - ukupni radni otpor namota transformatora po fazi	Z_1 - primarna impedancija
R_m - magnetski otpor	Z_2 - sekundarna impedancija
R_{st} - otpor mjeren između stezaljki	Z_h - impedancija magnetiziranja
R_{hl} - hladni otpor	Z - životna dob
R_t - topli otpor	α - kut, temperaturni koeficijent otpora
R_1 - radni otpor primara	β - kut
R_2 - radni otpor sekundara	γ - specifična masa
S - presjek	ρ - gustoća struje
S_{Cu} - ukupni presjek bakra	σ - duljina zračnog raspora, raspor među namotima kutna pogriješka
S_{Fe} - presjek željezne jezgre transformatora	σ_r - reducirana širina raspora
Si - stupanj izolacije	Δ_0 - Montsingerova konstanta
t - vrijeme	ϵ - dielektrička konstanta, intermitencija
t_d - dozvoljeno trajanje pogona	η - stepen djelovanja
T - vremenska konstanta, apsolutna temperatura	ϑ - temperatura
T_0 - apsolutna temperatura okoline	θ - proticanje (magnetomotorna sila)
u - momentana vrijednost napona	θ - nadtemperatura
U_m - tjemena vrijednost napona	θ_m - maksimalna nadtemperatura
U - efektivna vrijednost napona	θ_d - dozvoljena nadtemperatura
U_{sr} - srednja vrijednost napona	θ_{sr} - srednja nadtemperatura
$\vec{U}, \vec{U}$ - vektor efektivne vrijednosti napona	z - specifična električka vodljivost
U_n - nominalni napon	λ - specifična toplinska vodljivost
U_k - napon kratkog spoja	μ - permeabilitet
U_r - radni napon kratkog spoja	μ_0 - permeabilitet zraka
U_σ - induktivni (rasipni) napon kratkog spoja	ν - red nadvala, faktor ornoče
U_φ - pad napona kod tereta sa kutem φ	ξ - omjer gubitaka u bakru i željezu
u_k - procentualni napon kratkog spoja	ρ - specifični otpor
u_r - procentualni radni napon kratkog spoja	G - Blondel-ov faktor rasipanja
u_σ - procentualni induktivni napon kratkog spoja	τ - Heyland-ov faktor rasipanja
u_φ - procentualni pad napona kod tereta s kutem φ	φ - kut faznog pomaka
U_1 - primarni napon	φ - kut faznog pomaka u praznom hodu
U_2 - sekundarni napon	φ_k - kut faznog pomaka u kratkom spoju

S a d r Ź a j

S v e z a k I I

Strana

4. Konstrukcija transformatora

4.1	Limovi	1
4.2	Zračni raspor u jezgri	4
4.3	Oblik jezgre	7
4.4	Presjek stupa i konstrukcija jezgre	10
4.5	Izolirani vodič	14
4.6	Namot	15
4.7	Kotac	29
4.8	Ulje	37

5. Proračun transformatora

5.1	Nominalne vrijednosti	38
5.2	Osnovni principi projektiranja	43
5.3	Zakoni sličnosti	45
5.4	Proračun rasipanja	50
5.5	Glavne dimenzije i cijena transformatora	65
5.6	Ekonomika u gradnji transformatora	78
5.7	Dodatni gubici u bakru	87

6. Transformator u pogonu

6.1	Paralelni rad transformatora	88
6.2	Viši harmonički	93
6.3	Nesimetrične struje u trofaznom jezgrastom transformatoru	108
6.4	Kratki spoj	118
6.5	Struja ukapčanja	125
6.6	Sile kratkog spoja	128
6.7	Sile kod nesimetričnog namota	132
6.8	Prenaponi	135

7. Specijalni transformatori

7.1	Šteđni spoj transformatora	142
7.2	V-spoj transformatora	147
7.3	Strujni transformator	150
7.4	Otcjepi	153
7.5	Regulacioni transformator	153
7.6	Suhi transformator	159
7.7	Vatrosigurni transformator	162

8. Kvarovi i zaštita transformatora

8.1	Općenito o kvarovima	163
8.2	Buchholzova zaštita	164
8.3	Diferencijalna zaštita	165

Popis upotrebljenih oznaka	168
--------------------------------------	-----