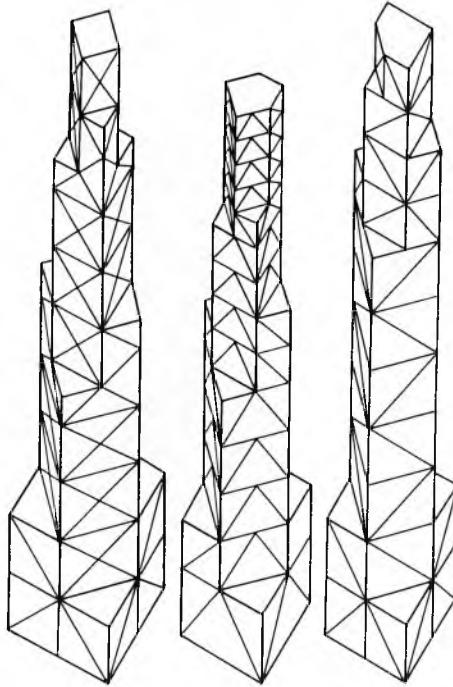


1600 m i imala bi 528 katova. Vertikalna nosiva konstrukcija je višečelijska cijev koja u najnižem dijelu ima 21 kvadratni modul, a naviše po 13, 9, 4 i u najvišem dijelu samo 1 kvadratni modul. U svim je područjima presjek četverostruko osno i zrcalno simetričan. Tlocrte su stranice jednog modula duge 30,5 m, pa je duljina stranica zgrade na donjem dijelu 152,5 m. Osnje je razmak stupova 6,1 m, a presjek se stupova naviše smanjuje. U vanjskim se pobočkama zgrade nalaze vertikalne rešetke. Stropovi su dvo-smjerne rebraste ploče s rasponom od 30,5 m u oba smjera. Temeljna je ploča kvadratna, sa stranicom duljine 168 m, a debljina je ploče 5,5 m. Neposredno su iznad razina gdje se mijenja presjek zgrade horizontalne rupe radi protoka vjetra, tj. radi smanjenja bočnog opterećenja zgrade. U strukturi pobočke zgrade dominantni su dvostruki kosnici, pa su prozori rombični. Perioda je slobodnih bočnih vibracija unatoč velikoj bočnoj krutosti zgrade ekstremno duga, čak 25 sekundi.

Slika 61 prikazuje još tri projekta toranskih zgrada budućnosti.



Sl. 61. Projekti triju toranskih zgrada budućnosti

LIT.: W. Drexsel, Turmbauwerke. Bauverlag, Wiesbaden 1967. – R. Rosman, Statik und Dynamik der Scheibensysteme des Hochbaues. Springer-Verlag, Berlin 1968. – B. Taratanath, Structural Analysis and Design of Tall Buildings. McGraw-Hill, New York 1988. – G. Franz, K. Schäfer, Konstruktionslehre des Stahlbetons. Springer-Verlag, Berlin 1988. – P. Dubas, E. Gehri, Stahlhochbau. Springer-Verlag, Berlin 1988. – E. Heinle, F. Leonhardt, Türme. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1990. – R. Graefe, Vladimir Šuchov. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1990.

R. Rosman

TRANSFORMATOR, staticki elektromagnetski uredaj u kojem se električna energija iz jednog ili više izmjeničnih krugova, koji napajaju primarne namote transformatora, prenosi u jedan ili više izmjeničnih krugova napajanih iz sekundarnih namota transformatora, s izmjenjenim iznosima struja i napona i nepromijenjenom frekvencijom.

Prema namjeni i izvedbi razlikuje se više vrsta transformatora: energetski transformator namijenjen je prijenosu i pretvorbi električne energije, mjerni transformator primjenjuje se za električna mjerjenja (v. *Mjerni transformatori*, TE 8, str. 610), a transformatorom impedancije u visokofrekvenčkoj se tehnici prilagođavaju impedancije dvaju strujnih krugova (v. *Transformatori impedancije*). Mnoge su podvrste energetskih transformatora: generatorski, mrežni, distribucijski, ispravljački, pečni i dr. U elek-

troničkoj se industriji uz energetske primjenjuje niz specijalnih malih transformatora kao što su niskofrekvenčni ili tonski transformator, međufrekvenčni, visokofrekvenčni, antenski i sl. (v. *Elektronika, sastavni dijelovi*, TE 4, str. 450). Poseban visokofrekvenčni transformator velikoga prijenosnog omjera naziva se *Teslinim transformatorom*.

U ovom se članku detaljno opisuje energetski transformator.

P. N. Jabločkov je 1877. godine konstruirao uredaj od serijski spojenih zavojica (primarni namot) namotanih oko štapićnih željeznih jezgara, od kojih je svaka imala još po jednu zavojnicu s manjim brojem zavoja (sekundarni namoti). Na sekundarne je namote priključio paralelne elektrode, tzv. *Jablockovlje svjeće* (v. *Električno osvjetljenje*, TE 4, str. 263) i tako postigao da se pregaranjem jedne od svjeća ne prekida strujni krug. Mnogi taj uredaj smatraju prvim transformatorom. Svrha je toga transformatora bila da se relativno visok napon izmjeničnoga generatora prilagodi naponu svjeća koji su se do tada spajale u seriju.

Prvi transformator sa zatvorenom jezgrom prikazan je na izložbi inovacija u Budimpešti 1885. godine, a konstruirali su ga K. Zipernowsky, M. Déri i O. T. Bláthy, inženjeri u tvornici Ganz. Taj se transformator sastojao od dvaju prstenastih namota podjednakih izmjeru, ali s različitim brojem zavoja. Namoti su bili postavljeni koaksijalno, jedan iznad другогa, te kroz otvor prstena i okolo obotani čeličnom žicom. Tako je nastao transformator sa željeznom jezgrom u obliku šupljeg torusa (sl. 1) s omjerom napona jednakim omjeru brojeva zavoja. Omjer brojeva zavoja odabran je tako da se generatorski napon snizio i prilagodio naponu žarulja koji su osvjetljavale deset izložbenih paviljona. Tada je prvi put u praksi ostvareno paralelno spajanje žarulja u izmjeničnom strujnom krugu.



Sl. 1. Prvi transformator sa zatvorenom željeznom jezgrom

U stotinu godina od izuma transformatora nije bilo većih promjena u njegovoj konцепцијi. Napredak je bio u tehničkim karakteristikama transformatora: povećane su nazivne snage i naponi, smanjene mase i gubitci po jedinici nazivne snage, smanjeni dodatni gubici i ograničeno lokalno ugrijavanje, povećana je otpornost na električna i mehanička dinamička naprezanja te povećana učinkovitost hlađenja. Uz sve se to i bolje poznaju pojave u transformatorima za vrijeme pogona. Glede ugradbenih materijala, najviše je postignuto na poboljšanju svojstava magnetskih limova od kojih se izrađuju transformatorske jezgre.

Proizvodnja transformatora u Hrvatskoj započela je 1946. u tvornici »Rade Končar« u Zagrebu. Danas su to tri tvornice: »Končar« – Energetski transformatori d.d., koja proizvodi generatorske i mrežne transformatore snaga 20 · 1000 MVA za napone do 500 kV, s najvećom isporučenom trofaznom jedinicom snage 725 MVA; »Končar« – Distributivni i specijalni transformatori d.d., koja proizvodi uljne energetske transformatore od 30 kVA · 35 MVA za napone do 145 kV, suhe transformatore do 5 MVA te razne specijalne transformatore, kao što su pečni, ispravljački, lokomotivski i sl., te »Končar« – Mjerni transformatori d.d., koja u svojem proizvodnom programu ima naponske i strujne transformatore za mjerjenje i zaštitu, izolirane uljno-papirnom izolacijom ili plinom sumpornim heksafluoridom, za napone do 500 kV, te epoksidnom ili sličnim smolama izolirane mjerne transformatore nazivnih napona do 50 kV. Izvoz, već prema proizvođaču i potrebama domaćeg tržišta, iznosi 50 · 80% godišnje proizvodnje.

Osim u navedenim specijaliziranim tvornicama, manji, osobito suhi transformatori specijalne namjene proizvode se u manjim tvornicama i radionicama širom Hrvatske.

Transformacija se zbiva u tzv. aktivnom dijelu transformatora koji se sastoji od jezgre i namotā. Energija ulazi u transformator kroz *primarni namot*, te se posredstvom magnetskog toka u jezgri seli u *sekundarni namot* s iznosima struje i napona različitim od primarnih, a iz njega nastavlja put k potrošaču. Smjer je energije dakle od primara prema sekundaru, pa isti namot, već prema smjeru energije na mjestu ugradnje, može biti primarnim ili sekundarnim namotom. Zato je namote bolje prepoznavati po relativnoj razini napona. Razlikuju se obično namoti višeg, VN, srednjeg, SN, i nižeg napona, NN. Omjer napona u transformatoru naziva se *omjerom transformacije*. U transformatoru omjera transformacije 400 kV/110 kV/33 kV namot 110 kV je SN namot, dok mu u transformaciji 110 kV/20 kV pripada oznaka VN.

U jednofaznom dvonamotnom transformatoru sa željeznom jezgrom i magnetski dobro ulančenim namotima, omjer transformacije praktički je jednak omjeru broja zavoja njegovih namota:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (1)$$

dok je omjer struja koje teku kroz namote obrnuto proporcionalan tom omjeru:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}. \quad (2)$$

Nazivni omjer transformacije je omjer nazivnih napona transformatora. To su naponi neopterećenog transformatora, za koje je on građen i prema kojima se određuju ispitni naponi transformatora. Omjer transformacije opterećenog transformatora razlikuje se od nazivnog omjera zbog pada napona u transformatoru. I ulazni napon transformatora ovisi o opterećenju zbog pada napona na dalekovodima. Međutim, potrošnja traži stabilan nazivni napon, jer, ako je napon previšok, pregaraju žarulje, ako je prenizak, pregrijavaju se motori itd. Problem se rješava tako da se na jednoj, pretežno višenaponskoj strani transformatora, uključuje više ili manje zavoja i time mijenja omjer transformacije. Taj se postupak naziva *regulacijom napona*, a dodatni namoti *regulacijskim namotima*. Regulacija se napona izvodi bilo u beznaponskom stanju (transformator se prethodno isključi), premještanjem kontakta na veći ili manji broj zavoja pomoću premještača, bilo pod naponom i opterećenjem pomoću regulacijske sklopke. Regulacijska je sklopka relativno skup uredaj, pa se obično ugrađuje u transformatore snaga većih od 10 MVA.

Svojstva se transformatora opisuju karakterističnim podatcima dogovorenim i opisanim u međunarodnim normama IEC (v. *Standardizacija*, TE12, str. 255). To su: broj faza, nazivna snaga, nazivni naponi, nazivne struje, spoj, nazivna frekvencija, izolacijski razred, način hlađenja, ispitni naponi, napon kratkog spoja, nazivni gubitci praznog hoda i nazivni gubitci zbog opterećenja, te podatci koje posebno dogovore kupac i proizvodac.

Električna se energija dobiva u elektranama pretvorbom iz drugih oblika energije (v. *Elektrane*, TE 3, str. 547). U završnoj fazi te pretvorbe mehanička se energija iz turbine, preko zajedničke osovine, predaje generatoru u kojem iz mehaničke nastaje električna energija. Osnovna je prednost električne pred drugim oblicima energije u jednostavnom i ekonomičnom prijenosu do korisnika, te u široko razvijenim mogućnostima njezine upotrebe u industriji i kućanstvu. Elektrane se obično grade u neposrednoj blizini izvora energije, a glavni su potrošači gradovi, često stotinama kilometara udaljeni od elektrana. Električna se energija prenosi visokonaponskim dalekovodima jer je gubitak energije pri prijenosu to manji što je prijenosni napon viši. Vidi se to iz omjera gubitaka u vodičima dalekovoda $P_g = I^2 R$ i prenesene snage $S = UI$:

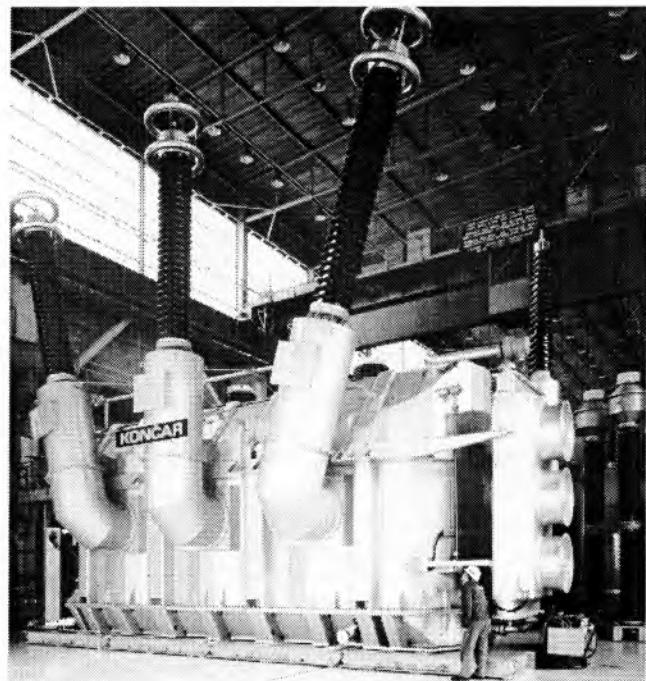
$$\frac{I^2 R}{UI} = \frac{J \rho l}{U}, \quad (3)$$

gdje je I električna struja, R električni otpor dalekovoda, U prijenosni napon, J gustoća struje, ρ otpornost materijala vodiča, a l udaljenost prijenosa.

Transformacija električne energije s nižega na viši napon, a nakon prijenosa ponovno na niži napon obavlja se u transformatorima. Danas je izlazni napon električnih generatora obično $20 \dots 30$ kV. U Hrvatskoj, a i u svijetu, generatorski se napon najčešće transformira na prijenosni napon od 400 kV. Dalekovodima tog napona prekrivene su i povezane sve europske zemlje. Da bi električna energija iz visokonaponskog dalekovoda bila pristupačna korisniku, potrebno ju je dovesti na odgovarajuću, mnogo nižu naponsku razinu. Najprije se u transformatorskim stanicama napon od 400 kV transformira na 110 kV ili 220 kV. Dalekovodima tog napona napaja se područje polumjera do 100 km, odnosno 200 km. Prije ulaska u naseljeno mjesto napon se ponovno transformira, obično na 30 kV, da bi se kabelom doveo do srednje transformatorske stanice, gdje će se sniziti na 10 kV ili 20 kV i razvesti, takoder kabelima, do transformatorskih stanica u naseljima iz kojih se, nakon još jedne transformacije, široka potrošnja napaja naponom 400 V, odnosno 230 V. Na putu od generatora do

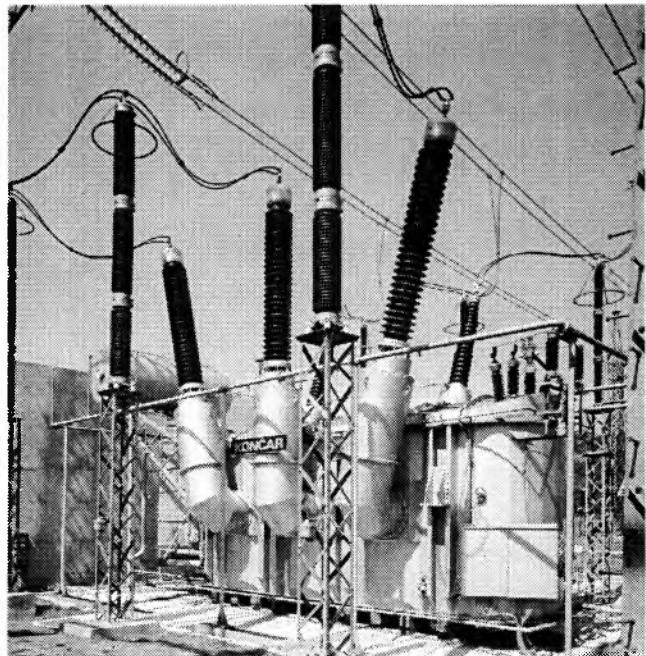
pretvorbe u koristan rad u motoru, žarulji, pećnicu ili televizoru, električna energija mnogo puta prolazi kroz transformatore. Zato je tzv. instalirana snaga transformatora višestruko veća od instalirane snage generatora.

Transformatori u elektranama, spojeni između generatora i visokonaponske mreže, *generatorski* su ili *blok-transformatori* (sl. 2). Karakterizira ih velika nazivna snaga, relativno velike nazivne struje niženaponskih namota i naglašeni zahtjevi glede pouzdanosti. Razlog je takvih zahtjeva u činjenici da se oni toliko konstrukcijski prilagoduju zahtjevima elektrane da praktički nije moguće imati jedan rezervni transformator za više elektrana.



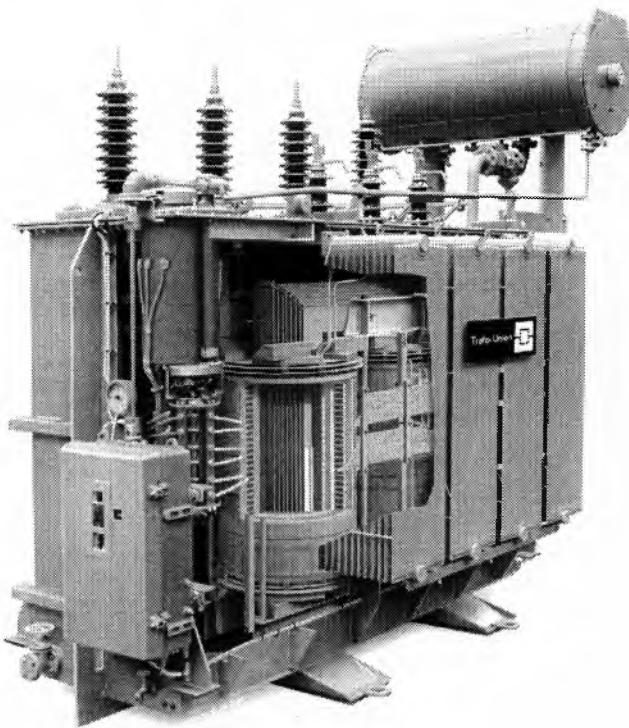
Sl. 2. Generatorski transformator nazine snage 725 MVA, omjera transformacije 21/410±3% kV („Končar“, Zagreb)

Mrežni transformatori i *autotransformatori* transformiraju napon visokonaponske električne mreže do napona distribucijske mreže. U Hrvatskoj je napon distribucijske mreže 30 kV ili 35 kV, a kako između 35 kV i 400 kV postoje još normirani naponi od 110 kV i 220 kV, mrežne transformatore karakterizira barem



Sl. 3. Mrežni autotransformator 400 MVA, 400±2×2,5%/231/31,5 kV

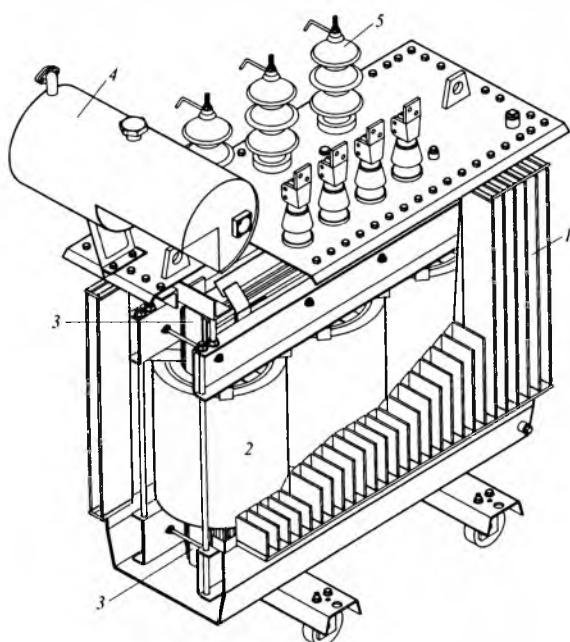
jedan namot u rasponu od 110 kV do 400 kV. To vrijedi i za cijelu Europu, jer i ondje gdje postoji viša naponska razina (npr. 750 kV), napon niženaponskog namota ulazi u navedeni raspon. Karakteristični predstavnici mrežnih transformatora su auto-transformator 400/231/31,5 kV, 400 MVA (sl. 3), transformator 400/115/31,5 kV, 300 MVA, te regulacijski transformator $110 \pm 16\% / 21 \text{ kV}, 10 \text{ MVA}$ (sl. 4). Generatorski i mrežni transformatori čine skupinu velikih transformatora.



Sl. 4. Regulacijski mrežni transformator 10 MVA, $110 \pm 16\% / 21 \text{ kV}$ s pogledom na aktivni dio

Transformatori za napon od 35 kV i niže napone su *distribucijski transformatori*, kojih su predstavnici transformatori 35/21/10,5 kV, 10 MVA i 10/0,4 kV, 630 kVA. Svi su navedeni transformatori redovito trofazni energetski uljni transformatori.

Aktivni dio uljem hlađenog transformatora, jezgra s namotima, nalazi se u metalnom kućištu, kotlu transformatora (sl. 5).

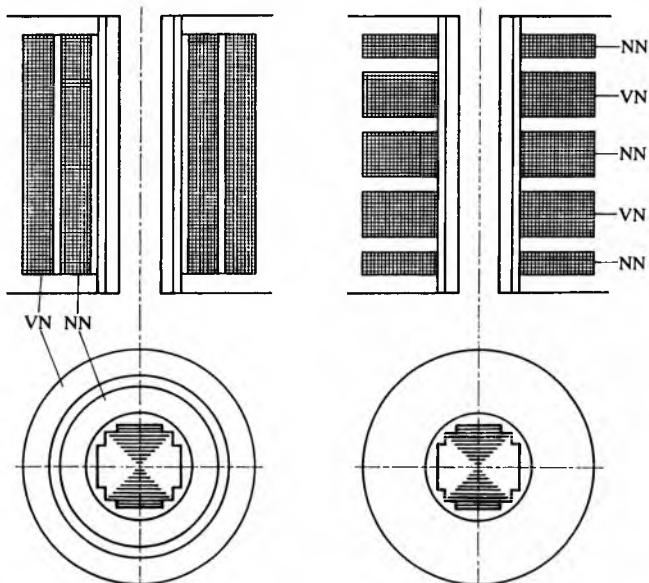


Sl. 5. Distribucijski transformator 630 kVA, 10/0,4 kV. 1 kotao, 2 namot, 3 jezgra, 4 konzervator, 5 provodni izolator

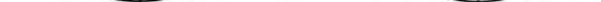
Transformatorske jezgre energetskih i najvećeg broja specijalnih transformatora, osim visokofrekveničkih, izrađuju se od tankih, hladno valjanih i obostrano izoliranih limova od legiranog željeza velike magnetske vodljivosti i malih specifičnih gubitaka (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 57). Složena od limova, jezgra se učvršćuje steznim elementima i ovojima da bi se mogla uspraviti i transportirati do mesta gdje će se nastaviti gradnja aktivnog dijela postavljanjem namota, izolacije i regulacijske sklopke, ako je predviđena. Magnetska je jezgra redovito najteži dio transformatora. Najniža je cijena aktivnog dijela transformatora kad je cijena jezgre približno jednaka cijeni namota. Kako je cijena kilograma namota dva do tri puta viša od cijene kilograma jezgre, transformatori se obično tako projektiraju da su namoti dva do tri puta lakši od jezgre.

Vodiči od kojih se izrađuju namoti obično su od elektrolički čistog bakra provodnosti $57 \cdot 10^6 \text{ S/m}$, a katkad, kad je to tehnički i ekonomski opravданo, od čistog aluminija provodnosti $35 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 61). Vodič može biti okruglog (obično u manjem transformatoru) ili pravokutnog presjeka. Izmjere su presjeka vodiča normirane. Promjeri vodiča okruglog presjeka obično nisu veći od 3,2 mm, a izmjere su vodiča pravokutnog presjeka od $2 \text{ mm} \times 0,8 \text{ mm}$ do $22,4 \text{ mm} \times 5,6 \text{ mm}$. Okrugla je žica izolirana najčešće lakom, a profilni vodiči u uljnim transformatorima pretežno papirnom vrpcom, koja se posebnim strojevima jednolično i u nekoliko slojeva omata oko njih. Profilni vodiči od kojih se izrađuju namoti za suhe transformatore u višim toplinskim izolacijskim razredima (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 77) na sličan se način izoliraju staklenim tkivom i impregniraju lakovima viših toplinskih razreda. Niženaponski (400 V) namoti transformatora, koji se upotrebljavaju u distribuciji električne energije, pretežno se izrađuju od neizoliranih bakrenih ili aluminijskih folija, a međuzavojna je izolacija najčešće vrstan prešani transformatorski papir. Osnovna je prednost tih namota u nižoj cijeni, jer im je mnogo kraće vrijeme izrade, a osnovni nedostatak manja mehanička čvrstoća, zbog čega je katkad potrebno poduzeti posebne mjere za povećanje mehaničke čvrstoće takvih namota.

Namot nižeg napona obično se u obliku valjka nalazi uz jezgru, a namot višeg napona namotan je oko njega (koncentrično namatanje, sl. 6). Rjeđe se namoti u obliku diska nalaze uzduž jezgre, jedan do drugoga (sl. 7).



Sl. 6. Stup jezgre s koncentričnim rasporedom namota



Sl. 7. Stup jezgre s pločastim (miješanim) namotima

Prolaskom struje kroz namote i magnetiziranjem jezgre razvija se toplina, pa transformatore treba hladiti. U uljnim transformatorima toplinu iz namota i jezgre preuzima transformatorsko ulje (v. *Elektrotehnički materijali*, TE 5, str. 85) i prenosi je do hladila iz kojih se toplina odvodi najčešće zrakom, a katkad i vodom. Transformatorsko je ulje u kombinaciji s papirom i osnovni izolacijski medij uljnih transformatora.

Ondje gdje se kao uvjet postavlja nezapaljivost, umjesto transformatorskog su se ulja donedavno primjenjivala ulja na osnovi kloriranih ugljikovodika, tzv. *askareli*. Njihova se upotreba, zbog opasnosti od zagađenja okoliša, u mnogim zemljama danas zakonski zabranjuje i kontrolirano se uništavaju, a umjesto njih primjenjuju se silikonska ulja ili se upotrebljavaju suhi transformatori.

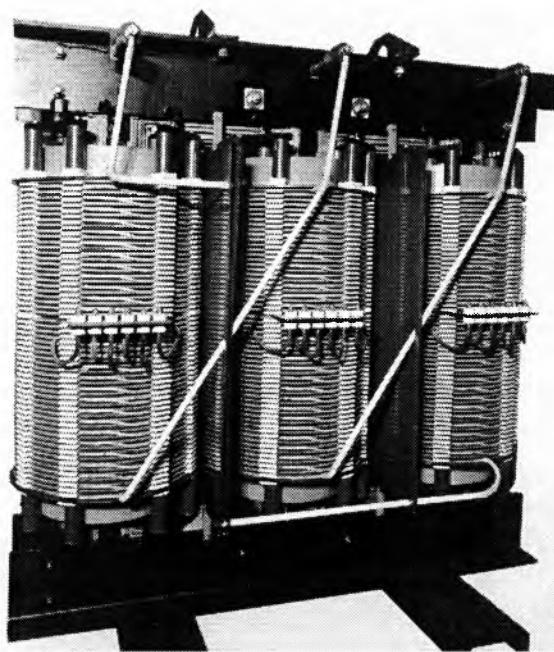
Zbog zagrijavanja transformatora povećava se obujam ulja u transformatoru. Taj višak ulja preuzima *konzervator*, spremnik koji se obično nalazi na poklopцу transformatora (sl. 5). Konzervator sadrži uljokaz i sušionik zraka koji oduzima vlagu iz zraka što kroz njega strui u konzervator kad se, zbog hlađenja, razina ulja u konzervatoru spušta. Manji se uljni transformatori izrađuju i bez konzervatora, u tzv. hermetički zatvorenoj izvedbi. Njihov je kotao od valovitog lima, pa se prilikom širenja ulja može elastično deformirati i privremeno povećati svoj obujam.

Na transformatore sa snagom većom od 630 kVA obično se na cijev koja spaja kotao i konzervator ugrađuje plinski relaj, koji uključuje signal upozorenja kad se nakupi određena količina plina što nastaje prilikom naponskih izbijanja ili toplinskog razaranja izolacije. Ozbiljniji kvar u transformatoru uzrokuje burno razvijanje plinova i povećani tlak u kotlu, zbog čega se ulje potiskuje prema konzervatoru. Ubrzano strujanje ulja kroz plinski relaj inicira isključenje transformatora iz mreže.

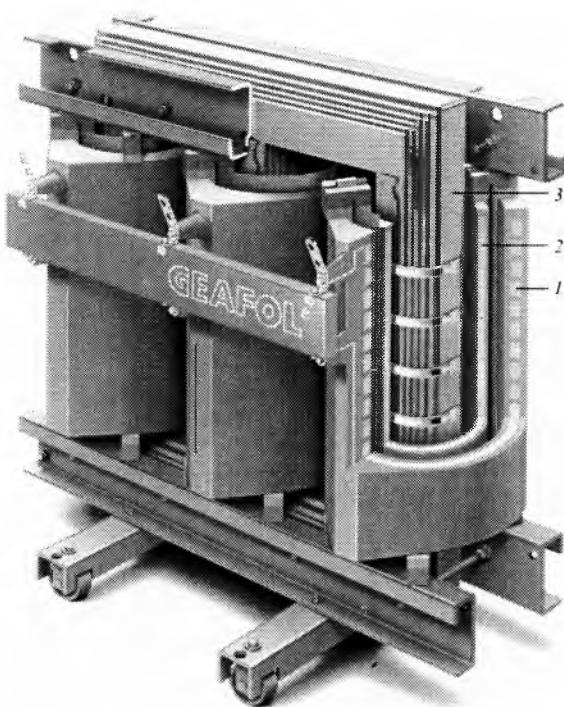
Električni spoj namota s izvorom napona i trošilima ostvaruje se kroz *provodne izolatore*, smještene obično na poklopcu transformatora (sl. 5). Provodni izolatori u uljnim transformatorima dijelom su u ulju (ispod poklopca), a dijelom na zraku, gdje su izloženi prenaponima atmosferskog i sklopog podrijetla. Iznos tih prenapona obično je ograničen odvodnicima prenapona što se priključuju između faznog priključka i zemlje. Kadkad se umjesto odvodnika upotrebljavaju iskrišta pridodata provodna izolatora.

Veći i skuplji transformatori imaju tzv. *termosliku*, uređaj koji na osnovi mjerenja temperature ulja i struje namota te podataka o određenim parametrima kontroliranog namota (vremenska konstanta zagrijanja) simulira njegovo dinamičko zagrijanje. Tako se mnogo bolje kontroliraju temperature namota, po potrebi uključuju ventilatori i uljne pumpe ili isključuje dio opterećenja, kako bi temperature namota ostale u dopuštenim granicama. Time se čuva izolacija vodiča od ubrzanog starenja i produžuje vijek trajanja transformatora.

Suhi transformatori hlađe se zrakom. Grade se za nazivne snage do 10 MVA i napone do 50 kV. U slučaju požara uzrokovanih električnim lukom suhi transformatori, za razliku od uljnih, ne gore nakon što nestane luk, pa se zato mogu ugraditi u centre potrošnje većih potrošača kao što su bolnice, neboderi i sl. Izrađuju se bilo u tzv. klasičnoj izvedbi (sl. 8), bilo izolirani epoksidnim ili drugim smolama (sl. 9).



Sl. 8. Suh transformator 1000 kVA, 10/0,4 kV u klasičnoj izvedbi



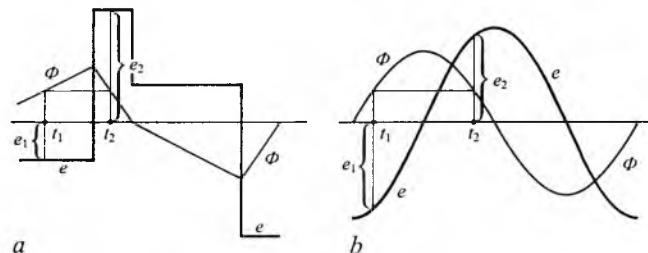
Sl. 9. Suh transformator 630 kVA, 10/0,4 kV u epoksidnoj izvedbi.
1 namot višeg napona, 2 namot nižeg napona, 3 jezgra

Načelo rada transformatora. Djelovanje transformatora osniva se na Faradayevu zakonu elektromagnetske indukcije (v. *Elektrotehnika*, TE 5, str. 128):

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (4)$$

Vremenska promjena magnetskog toka Φ ulančenog petljom inducira u petlji napon e . Taj će napon u zatvorenoj petlji potjerati struju i , a ona će proizvesti dodatni magnetski tok koji će se, u skladu s Lencovim zakonom, opirati promjeni toka Φ .

Mijenja li se npr. magnetski tok Φ kao na slici 10 a, trenutne će vrijednosti i polaritet toka biti jednak u trenutcima t_1 i t_2 , ali će zbog različita gradijenta u tim trenutcima inducirani naponi e_1 i e_2 biti različiti i po iznosu i po polaritetu. Na slici 10 b u trenutcima t_1 i t_2 iznosi su i polariteti toka Φ jednak, a vrijednosti su induciranih napona jednak po iznosu, a suprotne po predznaku.



Sl. 10. Inducirani napon e jednak negativnoj derivaciji magnetskog toka Φ

Petlja koja ima oblik zavojnice s N zavoja može N puta ulančiti isti tok Φ . Tako nastaje ulančeni magnetski tok Ψ određen relacijom

$$\Psi = N\Phi. \quad (5)$$

Ako svaki od N zavoja ne ulančuje cijeli tok Φ , ulančeni magnetski tok Ψ manji je od $N\Phi$ i iznosi

$$\Psi = N\Phi_e, \quad (6)$$

gdje je Φ_e ekvivalentni magnetski tok koji ulančen s N zavoja daje ulančeni tok Ψ . Inducirani napon tada iznosi

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N \frac{d\Phi_e}{dt}. \quad (7)$$

Budući da su induktivitet L i međuinduktivitet M definirani kao koeficijenti proporcionalnosti između ulančenog toka zavojnice i struje koja ga gradi, za ulančene tokove primarne (N_1 zavoja) i sekundarne (N_2 zavoja) zavojnice prema slici 11 vrijedi

$$\Psi_1 = N_1 \Phi_{1c} = L_1 i_1, \quad (8)$$

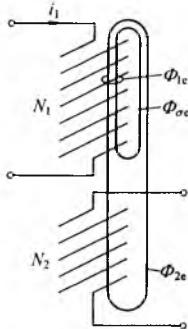
$$\Psi_2 = N_2 \Phi_{2c} = M i_1. \quad (9)$$

Naponi inducirani u primarnoj i sekundarnoj zavojnici iznose

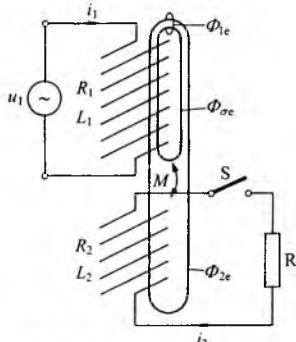
$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -N_1 \frac{d\Phi_{1c}}{dt}, \quad (10)$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{2c}}{dt}. \quad (11)$$

Relacije (10) i (11) određuju inducirane napone u primarnom i sekundarnom namotu neopterećenog transformatora.



Sl. 11. Ulančenje zavojnica



Sl. 12. Dvonamotni transformator opterećen djelatnim otporom R

Shema na slici 12 predstavlja dvonamotni transformator opterećen djelatnim otporom R . Primarni krug čine izvor napona u_1 i primarna zavojnica induktiviteta L_1 i otpora R_1 , a sekundarni se krug sastoji od sekundarne zavojnice induktiviteta L_2 i otpora R_2 , prekidač S i otpornika R . Magnetsku povezanost zavojnica karakterizira međuinduktivitet M . Ako je napon u_1 promjenljiv, a prekidač S u zatvorenom položaju, kroz strujne će krugove protjecati struje i_1 i i_2 , pa će u zavojnicama i trošilu nastati gubitci $P_g = i_1^2 R_1 + i_2^2 (R_2 + R)$.

Ako se na primarni i sekundarni krug primjenjeni drugi Kirchhoffov zakon, slijedi

$$u_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}, \quad (12)$$

$$M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} = i_2 (R_2 + R), \quad (13)$$

odnosno

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d}{dt} (L_1 i_1 - M i_2), \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} (M i_1 - L_2 i_2) = i_2 R_2 + u_2, \quad (15)$$

ili

$$u_1 = i_1 R_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} = i_1 R_1 - e_1, \quad (16)$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = i_2 R_2 + u_2 = -e_2, \quad (17)$$

gdje su e_1 i e_2 naponi inducirani u zavojnicama primarnog i sekundarnog namota. Negativni predznaci ispred M u jednadžbi (12) i ispred L_2 u jednadžbi (13) znače da sekundarni amperzavoj odmažu primarnima u uspostavljanju tokova kroz primarnu, odnosno sekundarnu zavojnicu.

Izraz (16) pokazuje da je narinuti napon u_1 u primarnom krugu jednak zbroju pada napona na otporu R_1 primarnog namota i ne-

gativne vrijednosti induciranoj napona e_1 što ga u primarnoj zavojnici inducira ulančeni tok Ψ_1 . Izraz (17) pokazuje da je zbroj napona opterećenja u_2 i pada napona na otporu R_2 sekundarnog namota jednak negativnoj vrijednosti napona e_2 što ga u sekundarnoj zavojnici inducira s njom ulančeni tok Ψ_2 .

Naponi i struje u elektroenergetici pretežno su harmoničke funkcije vremena, konstantne frekvencije. Za stacionarna stanja u takvim krugovima može se primjeniti simboličko pisanje, pa jednadžbe (14) i (15) glase

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + j\omega (L_1 \bar{I}_1 - M \bar{I}_2) = \bar{I}_1 R_1 + j\omega \bar{\Psi}_1 = \bar{I}_1 R_1 - \bar{E}_1, \quad (18)$$

$$j\omega (M \bar{I}_1 - L_2 \bar{I}_2) = \bar{I}_2 R_2 + \bar{U}_2 = j\omega \bar{\Psi}_2 = -\bar{E}_2. \quad (19)$$

Iz (18) i (19) slijedi

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 R_1 + \bar{I}_1 j\omega L_1 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\right) + \frac{M}{L_2} (\bar{I}_2 R_2 + \bar{U}_2), \quad (20)$$

$$\bar{\Psi}_2 = M \bar{I}_1 + L_2 \bar{I}_2 = M \left(\bar{I}_1 - \bar{I}_2 \frac{L_2}{M}\right). \quad (21)$$

Ako je

$$L_1 \left(1 - \frac{M^2}{L_1 L_2}\right) = L_{1\sigma}, \quad \bar{I}_1 - \bar{I}_2 \frac{L_2}{M} = \bar{I}_\mu, \quad (22)$$

gdje je I_μ struja magnetiziranja, iz (20) i (21) proizlazi

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 (R_1 + j\omega L_{1\sigma}) + (\bar{I}_2 R_2 + \bar{U}_2) \frac{M}{L_2}, \quad (23)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 \frac{L_2}{M} + \frac{\bar{\Psi}_2}{M} = \bar{I}_2 \frac{L_2}{M} + \bar{I}_\mu. \quad (24)$$

Omjer $K_n = M/L_2$ u (20) omjer je transformacije napona, a njegova recipročna vrijednost $K_s = L_2/M$ u (21) omjer je transformacija struje u transformatoru. Može se postaviti da je

$$K_n = \frac{1}{K_s} = \frac{M}{L_2} = \frac{N_1 N_2 \Lambda_m}{N_2^2 \Lambda_2} = \frac{N_1 \Lambda_m}{N_2 \Lambda_2}, \quad (25)$$

gdje su Λ_m i Λ_2 magnetske vodljivosti međuinduktivnog, odnosno sekundarnog kruga. Kad je omjer Λ_m/Λ_2 blizu jedinici, omjer je transformacije napona blizu omjeru brojeva zavoja N_1/N_2 , a omjer transformacije struje blizu omjeru N_2/N_1 . Budući da je taj uvjet praktički ostvaren u svim energetskim transformatorima sa željeznom jezgrom, dobiva se da je

$$K_n \equiv \frac{N_1}{N_2}, \quad (26)$$

$$K_s \equiv \frac{N_2}{N_1}. \quad (27)$$

Sekundarni naponi, odnosno struje, pomnoženi s pripadnim omjerima transformacije daju vrijednosti napona i struje koje bi imao transformator omjera transformacije 1. To su reducirane vrijednosti napona i struje, a K_n i K_s faktori su redukcije napona i struje. Reducirati se mogu i impedancije Z . Faktor redukcije impedancije K_i sa sekundarne na primarnu stranu slijedi iz omjera reduciranih vrijednosti napona i struje i iznosi

$$K_i = K_n^2. \quad (28)$$

Vrijednosti reducirane sa sekundarne na primarnu stranu označuju se crticom, pa je

$$K_s \bar{I}_2 = \bar{I}'_2; \quad K_n \bar{U}_2 = \bar{U}'_2; \quad K_i \bar{Z} = \bar{Z}'. \quad (29)$$

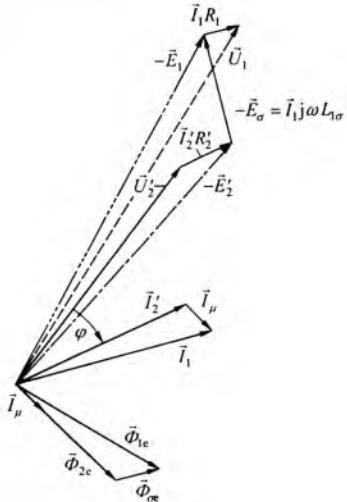
Kad se primarne veličine reduciraju na sekundarnu stranu, koeficijenti su redukcije recipročni, a reducirane se vrijednosti označuju s dvije crtice (I''_1, U''_1, L'').

Kad se uvedu reducirane veličine, jednadžbe (23) i (24) glase

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1(R_1 + j\omega L_{1\sigma}) + \bar{I}'_2 R'_2 + \bar{U}'_2, \quad (30)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}'_2 + \bar{I}_\mu. \quad (31)$$

Fazorski dijagram transformatora. Jednadžbe (30) i (31) omogućuju da se odnosi u transformatoru prikažu grafički, fazorskim dijagrameom (sl. 13). Polazeći od po volji izabrana fazora



Sl. 13. Fazorski dijagram transformatora bez željezne jezgre

\bar{U}'_2 , na osnovi poznate impedancije opterećenja $Z \angle \varphi$, ucrtava se fazor struje:

$$\bar{I}'_2 = \frac{\bar{U}'_2}{Z'} \angle \varphi. \quad (32)$$

Fazoru \bar{U}'_2 u skladu s izrazom (30), pribraja se pad napona $\bar{I}'_2 R'_2$ i tako se dobiva fazor $-\bar{E}'_2$, koji je negativna reducirana vrijednost napona induciranoj u sekundarnom namotu i koji iznosi

$$-\bar{E}'_2 = \bar{I}'_2 R'_2 + \bar{U}'_2. \quad (33)$$

Iz izraza (21), (22), (25) i (28) slijede struja magnetiziranja \bar{I}_μ i ekvivalentni sekundarni tok Φ_{2e} :

$$\bar{I}_\mu = \frac{-\bar{E}'_2}{j\omega L'_2} = \frac{N_2 \bar{\Phi}_{2e}}{M}, \quad (34)$$

$$\bar{\Phi}_{2e} = \frac{-\bar{E}'_2}{j\omega N_2}. \quad (35)$$

To su istofazni fazori koji za $\pi/2$ zaostaju za $-\bar{E}'_2$. Na osnovi (31) može se nacrtati primarna struja \bar{I}_1 , a zatim i pad napona na rasipanju:

$$\bar{U}_\sigma = j\omega \bar{I}_1 L_{1\sigma} = j\omega \bar{\Psi}_1 = j\omega N_1 \bar{\Phi}_{\sigma e} = -\bar{E}_{1\sigma}, \quad (36)$$

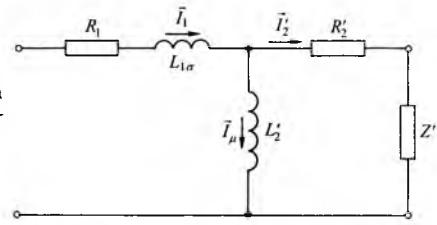
koji se, u skladu s izrazom (30), dodaje fazoru $-\bar{E}'_2$. Rezultat je fazor $-\bar{E}_1$, koji je negativna vrijednost napona induciranoj u primarnom namotu ulančenim tokom $\bar{\Psi}_1$ pa je

$$\bar{\Psi}_1 = N_1 \bar{\Phi}_{1e} = \frac{-\bar{E}_1}{j\omega}. \quad (37)$$

Da bi se dobio narinuti napon \bar{U}_1 , fazoru $-\bar{E}_1$ treba još dodati pad napona na otporu primarnog namota $\bar{I}_1 R_1$.

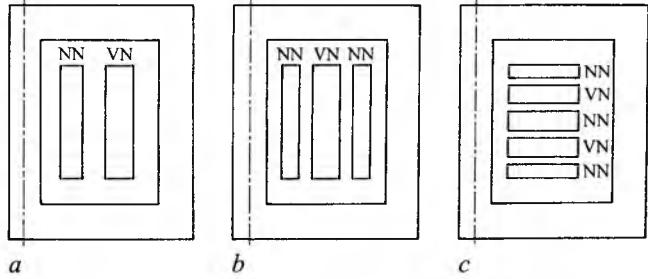
Ekvivalentni magnetski tokovi $\bar{\Phi}_{1e}$ i $\bar{\Phi}_{\sigma e}$ iz (37) i (36) zajedno s $\bar{\Phi}_{2e}$ iz (35) zatvaraju trokut geometrijski sličan trokutu napona $-\bar{E}_1$, $-\bar{E}_{1\sigma}$, $-\bar{E}'_2$ koje induciraju (sl. 12 i sl. 13).

Nadomjesna shema transformatora. Pomoću jednadžbi (30), (31), (33) i (34) crta se nadomjesna shema dvonamotnog transformatora (sl. 14), pomoću koje se jednostavno crta fazorski dijagram prikazan na slici 13.



Sl. 14. Nadomjesna shema dvonamotnog transformatora bez željezne jezgre

Fazorski dijagram i nadomjesna shema transformatora dobiveni su primjenom drugoga Kirchhoffova zakona na sustav od dviju zavojnica u nemagnetskom sredstvu. U praksi je, međutim, važno da magnetska povezanost primarnog i sekundarnog namota bude što bolja. To se postiže pomoću feromagnetske jezgre oko koje se postavljaju namoti (sl. 15), i to tako da ulančenje bude što veće.



Sl. 15. Raspored namota. a koncentrični, b bikoncentrični, c pločasti (miješani) namoti

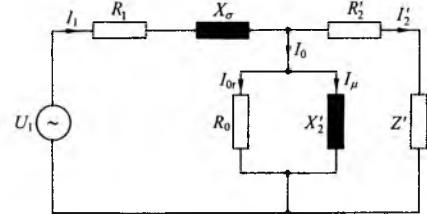
Jezgra se izrađuje od tankih, obostrano izoliranih željeznih limova dobivenih hladnim valjanjem. Hladnim se valjanjem postiže usmjerena kristalna struktura i smanjuju gubitci zbog histerezze. Promjenljivi magnetski tok inducira napon u limovima jezgre, u kojima, zbog njihove vodljivosti, nastaju vrtložne struje. Gubitci zbog vrtložnih struja u limovima razmjeri su kvadratu frekvencije, magnetske indukcije i debljine lima, a obrnuto razmerni otpornosti materijala od kojeg su limovi izrađeni. Zbog toga se danas upotrebljavaju tanki transformatorski limovi ($0,15 \cdots 0,3$ mm), obostrano izolirani i izrađeni od željeza s dodatkom silicija koji mu povećava električnu otpornost.

Uvođenjem željezne jezgre znatno se povećavaju induktiviteti i međuinduktiviteti zavojnica (L_1, L_2, M), smanjuje se struja magnetiziranja, ali se pojavljuju gubitci magnetiziranja jezgre i nonlinearnost. Gubitci su magnetiziranja izraziti u neopterećenom transformatoru, jer se tada ostali gubitci mogu zanemariti. Kad je neopterećeni transformator priključen na nazivni napon, kaže se da radi u praznom hodu, a gubitci koji pritom nastaju nazivaju se gubitcima praznog hoda. U mreži sa stalnom frekvencijom može se u prvoj aproksimaciji računati da gubitci praznog hoda ovise o kvadratu magnetske indukcije, pa, prema tome, i o kvadratu napona induciranoj u namotima. Uz takvu se pretpostavku može u nadomjesnu shemu uvesti otpor R_0 kojim se uzimaju u obzir gubitci u jezgri. Taj otpor iznosi

$$R_0 = \frac{E_2'^2}{P_{0n}}, \quad (38)$$

gdje su P_{0n} gubitci u jezgri pri nazivnoj magnetskoj indukciji i nazivnoj frekvenciji.

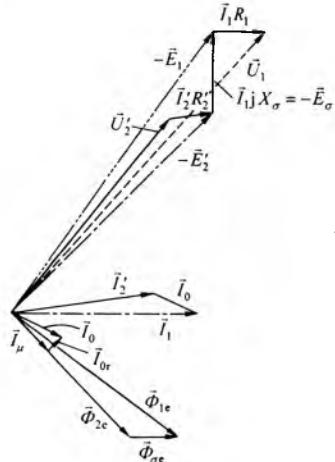
U stvarnosti otpor R_0 može se smatrati stalnim samo dok je frekvencija stalna, a promjene magnetske indukcije nisu velike. Zato, kad se u nadomjesnu shemu (sl. 16) uvodi R_0 , induktiviteti u shemi treba zamijeniti reaktancijama pri frekvenciji za koju je izračunan otpor R_0 .



Struja praznog hoda transformatora sa željeznom jezgrom ima dvije komponente: radna je komponenta I_{0r} u fazi s $-\bar{E}'_2$ i nastaje zbog histereze i vrtložnih struja u limovima jezgre, a jalova je komponenta I_μ u fazi s tokom Φ_{2c} i magnetizira jezgru. Može se napisati da je

$$\bar{I}_0 = I_{0r} - jI_\mu. \quad (39)$$

Prema shemi spoja na slici 16 fazorski dijagram transformatora sa željeznom jezgrom izgleda kao na slici 17. Na slici 18 nalazi se skica jednofaznog transformatora sa željeznom jezgrom, primarnim namotom (1) i sekundarnim namotom (2). Ucrtane su i silnice ekvivalentnih tokova Φ_{1c} , $\Phi_{\sigma c}$ i Φ_{2c} koji induciraju napone \bar{E}_1 , $\bar{E}_{\sigma c}$ i \bar{E}_2 .

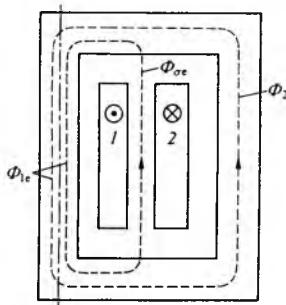


Sl. 17. Fazorski dijagram transformatora sa željeznom jezgrom

Snaga \bar{S}_{12} koju transformator predaje sekundarnom namotu iznosi

$$\bar{S}_{12} = \frac{\bar{E}_2^2}{R_2 + \bar{Z}} = \frac{\bar{E}_2^2}{(R_2 + \bar{Z})^2} (R_2 + \bar{Z}) = \bar{I}_2^2 R_2 + \bar{I}_2^2 \bar{Z} = \bar{P}_{12} + \bar{S}_2. \quad (40)$$

Dio \bar{P}_{12} snage \bar{S}_{12} utroši se na otporu sekundarnog namota, a ostatak \bar{S}_2 preuzima trošilo. Iz izraza (40) i činjenice da je napon \bar{E}_2 inducirani tokom $\bar{\Phi}_{2c}$ koji ulančuje i primarni namot slijedi da je $\bar{\Phi}_2$ posrednik koji omogućuje prijenos energije u transformatoru.



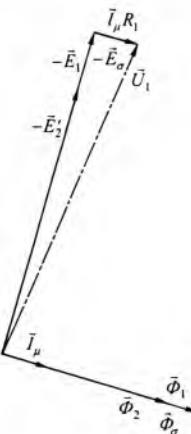
Sl. 18. Raspored magnetskih tokova u transformatoru kad je napajan unutrašnji namot (1)

Struja magnetiziranja. Struja neopterećenog transformatora bez željezne jezgre koji je priključen na sinusni napon također je sinusna funkcija vremena, a njezin iznos i fazni pomak prema naponu izvora određuje impedanciju primarnog namota. To je struja magnetiziranja. Inducirani naponi \bar{E}_1 i \bar{E}'_2 su u fazi i njihov je omjer

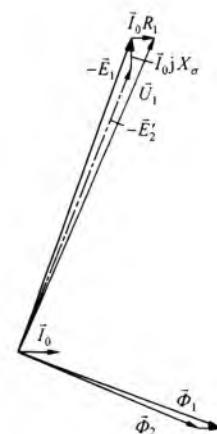
$$\frac{E_1}{E'_2} = \frac{L_1}{L'_2} = \frac{L_1 L_2}{M^2}. \quad (41)$$

Fazorski dijagram neopterećenog transformatora bez feromagnetske jezge prikazan je na slici 19. Ako se u takav transformator uvede feromagnetska jezgra, induktiviteti i osobito međuinduktiviteti transformatora znatno će porasti (nekoliko stotina do nekoliko desetaka tisuća puta, već prema magnetskom materijalu i indukciji), a struja magnetiziranja približno će se toliko puta smanjiti. Za omjer induciranih napona vrijedi relacija (41), ali zbog poboljšanih magnetskih veza omjer E_1/E'_2 približit će se jedinici, a omjer E_1/E_2 omjeru brojeva zavoja. Fazorski dijagram

neopterećenog transformatora sa željeznom jezgrom prikazan je na slici 20. U njemu su padovi napona uzrokovani strujom magnetiziranja, zbog preglednosti, bitno uvećani.

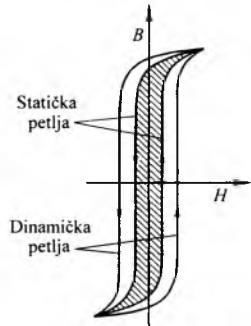


Sl. 19. Fazorski dijagram praznog hoda transformatora bez željezne jezgre

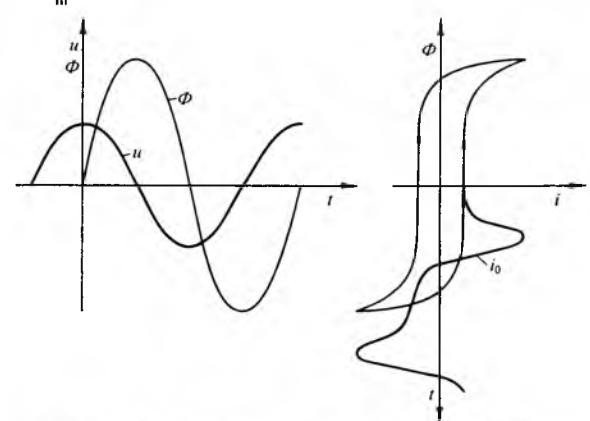


Sl. 20. Fazorski dijagram praznog hoda transformatora sa željeznom jezgrom

Feromagnetski materijali redovito imaju nelinearnu karakteristiku magnetiziranja (ovisnost magnetske indukcije B o jakosti magnetskog polja H). Petlja magnetiziranja u koordinatnom sustavu B, H omeđuje površinu koja je mjerilo gubitaka zbog magnetiziranja. Dobivena polaganim magnetiziranjem naziva se *statička petlja histereze* i njezinu površinu tada predstavlja gubitke zbog histereze u jedinici obujma jezgre. Pri izmjeničnom magnetiziranju u limovima jezgre nastaju vrtložne struje i gubici zbog njih. Gubici su magnetiziranja zbog toga veći, petlja je magnetiziranja šira od staticke petlje i naziva se *dinamička petlja histereze* (sl. 21), a njezina površina odgovara ukupnim gubicima zbog histereze i zbog vrtložnih struja.



Sl. 21. Statička i dinamička petlja histereze



Sl. 22. Funkcionalna ovisnost napona u , toka Φ i struje praznog hoda i_0

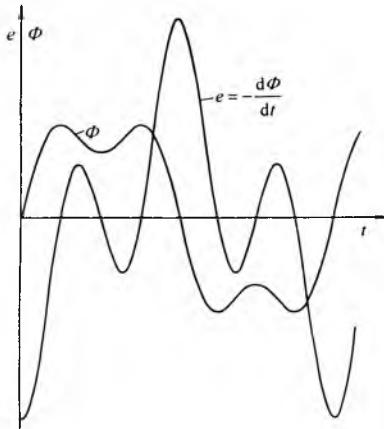
Struja magnetiziranja $i_0(t)$ harmonička je funkcija koja ima simetriju III. vrste, tj. osim osnovnoga sadrži samo neparne više harmoničke članove. Izdvoji li se komponenta osnovnog vala struje magnetiziranja $i'_{01} = i_{0r}$, koja je u fazi s narinutim naponom i donosi radnu komponentu snage magnetiziranja, ostaje čista struja magnetiziranja i_u , a ta se sastoji od jalove komponente osnovnog člana i''_{01} i viših neparnih harmoničkih članova:

$$i_\mu = i''_{01} + i_{03} + i_{05} + \dots = \sqrt{2} (I''_{01} \sin \omega t + I'_{03} \cos 3\omega t + I''_{03} \sin 3\omega t + \\ + I'_{05} \cos 5\omega t + I''_{05} \sin 5\omega t + \dots). \quad (42)$$

Efektivna vrijednost ukupne struje magnetiziranja, odnosno struje praznog hoda, izračunava se iz izraza

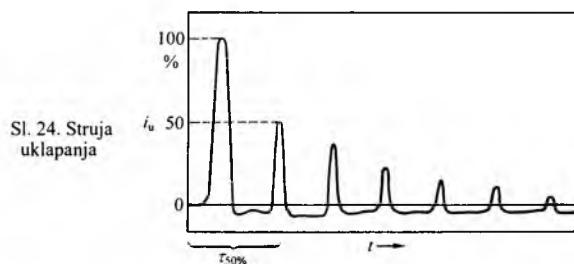
$$I_0 = \sqrt{I_{0r}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{I_{01}'^2 + I_{01}''^2 + I_{03}^2 + I_{05}^2 + \dots}. \quad (43)$$

U struji magnetiziranja, osim osnovnog člana, obično je izrazit treći harmonički član koji, već prema indukciji, iznosi oko trećine amplitudu osnovnog vala. U trofaznom je sustavu treći harmonički član istofazan jer mu je titrajni period upravo jednak pomaku faza osnovnog harmoničkog člana. Da bi se mogao pojaviti treći harmonički član struje, potreban je povratni vod. U trofaznom transformatoru koji nema namota spojena u trokut i koji na primarnoj strani nema povratnog puta za struju, struja magnetiziranja ne sadrži treći harmonički član. Zbog toga se pojavljuje treći harmonički član Φ_3 , u magnetskom toku i napon e_3 u faznom naponu, pogotovo kad postoji povratni put za istofazne magnetske tokove (peterostupna jezgra, trofazna skupina jednofaznih transformatora). U takvim slučajevima amplituda toka Φ_3 , je oko trećine amplitudu osnovnog člana, pa zbog trostrukе frekvencije treći harmonički član u faznom naponu doseže amplitudu osnovnog vala. U linjskom se naponu ne pojavljuje treći harmonički član, jer se kao istofazan poništava. Ako transformator ima namot spojen u trokut, napon će trećega harmoničkog člana potjerati kroz njega pripadnu struju. Iznos te struje ne može premašiti uzrok svog postanka, tj. amperzavoj u trokutnom namotu ne mogu biti veći od amperzavaja trećega harmoničkog člana koji nedostaju u primarnom namotu. Oblik krivulje magnetskog toka i napona u trofaznom transformatoru s povratnim magnetskim putem kad nema amperzavaja trećeg harmoničkog člana prikazan je na slici 23.



Sl. 23. Krivulje toka Φ i induciranih napona e u trofaznom transformatoru s peterostupnjom jezgrom, izoliranom nultočkom i namotima u spoju zvijezda

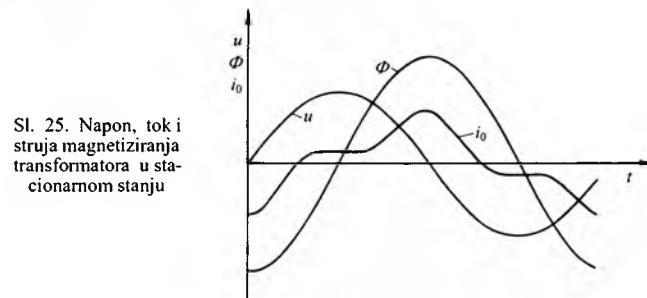
Struja uklapanja struja je magnetizirana koja nastaje prilikom uklapanja transformatora na mrežu. Njezina amplituda može biti višestruko veća od amplitude nazivne struje, a u manjim transformatorima može se približiti amplitudi simetrične komponente struje kratkog spoja. Trajanje je struje uklapanja karakterizirano vremenom $\tau_{50\%}$ koje je potrebno da se njezina amplituda smanji na polovicu. To vrijeme raste sa snagom transformatora. Udarna amplituda struje uklapanja (I_{umax}) obično se izražava višekratnikom amplitude nazivne struje (I_{nmax}), koji se smanjuje s povećanjem snage transformatora. Tipičan oblik struje uklapanja prikazuje slika 24, a neke mjerene vrijednosti višekratnika struje uklapanja I_{umax}/I_{nmax} i vremena trajanja $\tau_{50\%}$ nalaze se u tablici 1.



Tablica I

S_n , kVA	500	1000	5 000	10 000	50 000
$I_{u\max}/I_{n\max}$	15	14	10	10	9
$\tau_{50\%}$, s	0,16	0,2	1,2	5	72

Takva struja uklapanja nastaje zbog nelinearnosti krivulje magnetiziranja željezne jezgre, u skladu s Faradayevim zakonom, a remanentni magnetizam može je još povećati. Narinuti sinusni napon zahtijeva sinusnu promjenu toka. Tu promjenu u stacionarnom stanju prikazuje slika 25. Ako se transformator uklopi kad je napon maksimalan i kad bi stacionarni tok morao biti jednak nuli, struja je uklapanja od prvog trenutka jednaka stacionarnoj strui praznog hoda. Najveća amplituda struje uklapanja nastaje kad se transformator uklopi u trenutku prolaska napona kroz nulu, ako je pritom remanentni tok Φ_R suprotnog predznaka od pripadne trenutne vrijednosti. U takvim se uvjetima magnetski tok mijenja od vrijednosti Φ_R do $\Phi_R + \Phi_{\max}$. Tako velika vrijednost toka, zbog zasićenja jezgre i velike nazivne magnetske indukcije, zahtijeva veliku struju magnetiziranja.



Sl. 25. Napon, tok struja magnetiziranja transformatora u stacionarnom stanju

Kad se transformator ili skupina transformatora uklapa na sabirnice napajane iz slabe mreže, na koju su već priključeni ostali transformatori, može se pojaviti uzajamno djelovanje svih transformatora na istim sabirnicama. Ako struja uklapanja sadrži aperiodički član, na radnom otporu voda nastaje pad napona koji predmagnetizira ostale transformatore spojene na iste sabirnice. Budući da je uzrokovano padom napona, predmagnetiziranje je ostalih transformatora suprotno predmagnetiziranju koje aperiodički član uzrokuje u skupini upravo uklapljenih transformatora. U takvim uvjetima aperiodički član struje uklapanja prestaje dolaziti iz mreže i počinje kružiti između spomenutih dviju skupina transformatora. Vremenske su konstante tako dobivenoga strujnog kruga mnogo veće (djelatni otpori namota mnogo su manji od otpora dugih vodova), pa pojавa traje višestruko dulje, čuje se povećana buka svih transformatora, a neke zaštite mogu pogrešno djelovati. Budući da takva pojava nije dovoljno poznata, osobljje transformske stanice može pogrešno postupiti kad čuje povećanu buku transformatora koji su do tog trenutka mirno radili. Struja uklapanja može se djelotvorno smanjiti priključivanjem transformatora prekidačem koji ima ugrađen otpornik za ograničenje struje uklapanja. Taj je otpornik samo kratkotrajno uklavljen.

Gubitci nastaju u svakom dijelu transformatora: jezgri, namotima, izolaciji, steznom sustavu i kotlu. U praznom je hodu pri nazivnom naponu u jezgri nazivna indukcija, a gubici su u njoj

nazivni gubitci praznog hoda P_{0n} . Tada nastaju gubitci i u primarnom namotu kroz koji teče struja praznog hoda I_0 , ali su oni, kao i gubitci u izolaciji, zanemarivo maleni prema gubitcima u jezgri. Razlika ukupnih gubitaka nazivno opterećenog transformatora i nazivnih gubitaka praznog hoda jesu *nazivni gubitci zbog opterećenja* P_m . Poznavanje ukupnih gubitaka transformatora uvjet je za pravilno dimenzioniranje rashladnog sustava. Zbog toga, a i zbog cijene gubitaka, mjerjenje je nazivnih gubitaka transformatora komadno ispitivanje. To se mjerjenje sastoji od pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja.

U pokusu praznog hoda mjere se pri nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji nazivni gubitci P_{0n} i nazivna struja praznog hoda I_{0n} .

U pokusu kratkog spoja mjere se nazivni gubitci zbog opterećenja P_m pri nazivnoj frekvenciji i nazivnoj struci u primarnom namotu. Nazivna se struja postiže tako što se sekundarni namot kratko spoji, a na primarni se namot priključi napon nazivne frekvencije, koji se postupno povećava dok struja u primarnom namotu ne dostigne nazivnu vrijednost. Taj se napon zove *napon kratkog spoja* i najčešće se izražava u postotcima nazivnog napona, pa iznosi

$$u_{k\%} = 100 \frac{I_n Z_k}{U_n} = 100 \frac{S_n Z_k}{U_n^2}. \quad (44)$$

Djelatna je komponenta napona kratkog spoja

$$u_{r\%} = 100 \frac{I_n R_k}{U_n} = 100 \frac{P_m}{S_n} = 100 \frac{S_n R_k}{U_n^2}, \quad (45)$$

a jalova je komponenta napona kratkog spoja

$$u_{\sigma\%} = 100 \frac{I_n \omega L_\sigma}{U_n} = 100 \frac{S_n \omega L_\sigma}{U_n^2}, \quad (46)$$

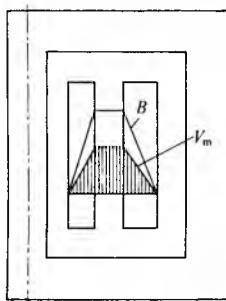
gdje su I_n , U_n i S_n nazivne vrijednosti struje, napona i snage namota koji se napaja u pokusu kratkog spoja, $P_m = I_n^2 R_k$ nazivni gubitci zbog opterećenja, a R_k ekivalentni djelatni otpor transformatora u toplomu stanju reducirani na stranu napajanja.

Napon kratkog spoja postotak je nazivnog napona i obično iznosi od 4% (za trofazne transformatore do nazivne snage 630 kVA) do 12% (za transformatore nazivne snage nekoliko stotina MVA). Pri nazivnoj frekvenciji i naponu koji je nekoliko puta manji od nazivnoga i magnetska je indukcija u jezgri toliko puta manja. Zato se pri pokusu kratkog spoja gubitci u jezgri i struja magnetiziranja zanemaruju, što znači da se mjere gubitci koji nastaju kad namotima teku nazivne struje.

Djelatni otpori namota R_1 i R_2 određuju se na osnovi mjerjenja metodom UI (v. *Električna mjerjenja*, TE 3, str. 614). To su tzv. istosmjerni otpori. Usporede li se nazivni gubitci P_m izmjereni pri istoj temperaturi sa zbrojem $I_{1n}^2 R_1 + I_{2n}^2 R_2$, dobiva se pozitivna razlika. To su dodatni gubitci P_{dod} , pa je

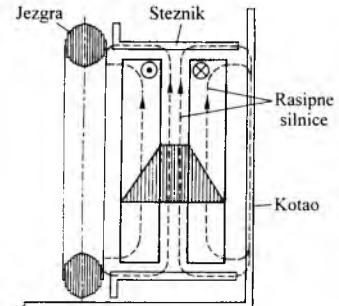
$$P_m = I_{1n}^2 R_1 + I_{2n}^2 R_2 + P_{\text{dod}}. \quad (47)$$

Dodatni su gubitci posljedica rasipnoga magnetskog toka koji u namotima, steznom sustavu i kotlu uzrokuje vrtložne struje. Budući da su amperzavoj primarnog i sekundarnog namota praktički jednaki i suprotni, dijagram magnetskog napona u prozoru transformatora ima oblik trapeza (sl. 26). Jednako izgleda i dijagram rasipne magnetske indukcije u prostoru namota. Izlazeći iz područja namota silnice rasipne magnetske indukcije zahvaćaju



Sl. 26. Magnetski napon V_m i indukcija B rasipnog toka u prozoru transformatora

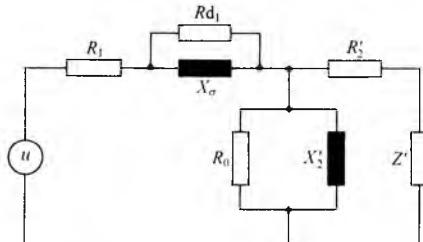
steznike namota i kotao (sl. 27). Inducirani naponi uzrokuju vrtložne struje svuda gdje silnice vremenski promjenjive magnetske indukcije prolaze kroz vodljivo sredstvo, a posljedica su dodatni gubitci. U namotima s paralelnim vodičima koji nisu pogodno prepleteni, a nalaze se u magnetskom polju različite jakosti, mogu nastati nejednaki inducirani naponi, pa se pojavljuju struje izjednačenja i dodatni gubitci.



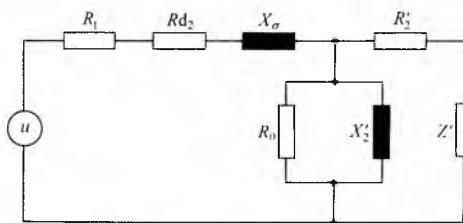
Sl. 27. Put rasipnih silnica u transformatoru

Dodatni su gubitci razmjerni kvadratu indukcije koja ih uzrokuje, a budući da indukciju rasipnog polja gradi struja opterećenja, slijedi da su dodatni gubitci razmjerni kvadratu opterećenja. Za razliku od osnovnih gubitaka $\sum I^2 R$ u namotima, koji pri stalnoj struci rastu razmjerno s temperaturom namota, dodatni se gubitci smanjuju s porastom temperature. Pri stalnoj je struci, naime, stalan i inducirani napon koji uzrokuje vrtložne struje, a otpor je vodljivih dijelova u kojima one teku zbog porasta temperature veći. Zbog toga se nadomjesna shema dvonamotnog transformatora može dopuniti otporom R_{d1} koji je paralelno spojen s rasipnom reaktancijom X_σ (sl. 28). Uz poznatu temperaturu može se otpor R_{d1} preračunati u otpor R_{d2} koji je serijski spojen s otporom namota (sl. 29). Ako se pri određenoj temperaturi mjerjenjem ustanove dodatni gubitci P_{dod} , vrijede izrazi

$$R_{d1} = \frac{(X_\sigma I_{1n})^2}{P_{\text{dod}}} - \frac{P_{\text{dod}}}{I_{1n}^2}; \quad R_{d2} = \frac{P_{\text{dod}}}{I_{1n}^2}. \quad (48)$$



Sl. 28. Nadomjesna shema transformatora kada se uzmu u obzir dodatni gubitci u transformatoru



Sl. 29. Pojednostavljena nadomjesna shema sa slike 28

Rasipni induktivitet L_σ transformatora jednostavno se izračunava iz rezultata mjerjenja u pokusu kratkog spoja prema izrazu

$$L_\sigma = \frac{U_n^2}{100 \omega S_n} \sqrt{u_{kn\%}^2 - u_{m\%}^2}, \quad (49)$$

gdje su $u_{kn\%}$ i $u_{m\%}$ naponi kratkog spoja prema izrazima (44) i (45). Kad se, međutim, transformator projektira, treba se dimenzionirati tako da se postigne rasipni induktivitet određen ugovorenim nazivnim podatcima transformatora. Rasipni se induktivitet

vitet najjednostavnije određuje pomoću magnetske energije rasipnog toka A_σ , koja iznosi

$$A_\sigma = \frac{1}{2} L_\sigma I^2 \quad (50)$$

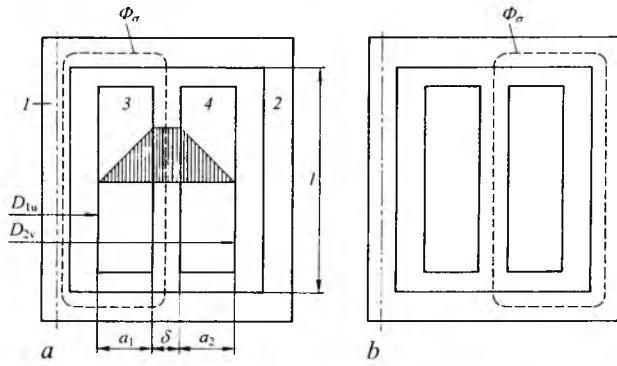
pa je

$$L_\sigma = \frac{2 A_\sigma}{I^2}. \quad (51)$$

Magnetska se energija rasipnog toka dobiva kao integral magnetske energije uzduž zatvorenih petlji silnica rasipne magnetske indukcije B_σ :

$$A_\sigma = \frac{1}{2} \int_V B_\sigma H_\sigma dV = \frac{1}{2} \int_V \frac{B_\sigma^2}{\mu_0} dV. \quad (52)$$

Zbog vrlo velike relativne permeabilnosti jezgre transformatora dio integrala koji se odnosi na jezgru zanemariv je s obzirom na dio u prozoru transformatora, gdje se računa s relativnom permeabilnošću $\mu_r = \mu/\mu_0 = 1$. Prostor integracije radikalno je omeđen promjerima namota D_{lu} i D_{2u} (sl. 30), a aksijalno ga određuje srednja duljina magnetskih silnica l_σ .



Sl. 30. Put rasipnoga magnetskog toka u transformatoru s koncentričnim namotima ako se napaja unutrašnji (a) ili vanjski namot (b). 1 stup, 2 jaram, 3 unutrašnji namot, 4 vanjski namot

Na temelju izraza (52) i slike 30 izraz za ukupnu energiju rasipnog magnetskog polja A_σ glasi

$$A_\sigma = \frac{B_\delta^2 l_\sigma \pi}{2 \mu_0} \left[\int_0^{a_1} \left(\frac{x}{a_1} \right)^2 (D_{lu} + 2x) dx + (D_{lu} + 2a_1 + \delta) \delta + \int_0^{a_2} \left(1 - \frac{x}{a_2} \right)^2 (D_{2u} + 2x) dx \right], \quad (53)$$

pri čemu je B_δ indukcija u kanalu između namota i iznosi

$$B_\delta = \mu_0 \frac{IN}{l_\sigma}. \quad (54)$$

Ako se uvede $D_{lu} + 2a_1 + \delta = D_s$, nakon integracije slijedi

$$A_\sigma = \frac{1}{2} I^2 N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma} \left[\frac{a_1}{3} \left(1 - \frac{\delta}{D_s} - \frac{a_1}{2D_s} \right) + \delta + \frac{a_2}{3} \left(1 + \frac{\delta}{D_s} + \frac{a_2}{2D_s} \right) \right]. \quad (55)$$

Iraz za rasipni induktivitet L_σ (51) dvonamotnog transformatora glasi

$$L_\sigma = N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma} \left[\frac{a_1}{3} \left(1 - \frac{\delta}{D_s} - \frac{a_1}{2D_s} \right) + \delta + \frac{a_2}{3} \left(1 + \frac{\delta}{D_s} + \frac{a_2}{2D_s} \right) \right]. \quad (56)$$

Kad je $a_1 \equiv a_2$, izraz (56) postaje jednostavniji, pa glasi

$$L_\sigma = N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{3} \right) = N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma} \delta_r. \quad (57)$$

Srednja se duljina magnetskih silnica koncentričnih namota l_σ računa prema izrazu

$$l_\sigma = \frac{l}{K_R}, \quad (58)$$

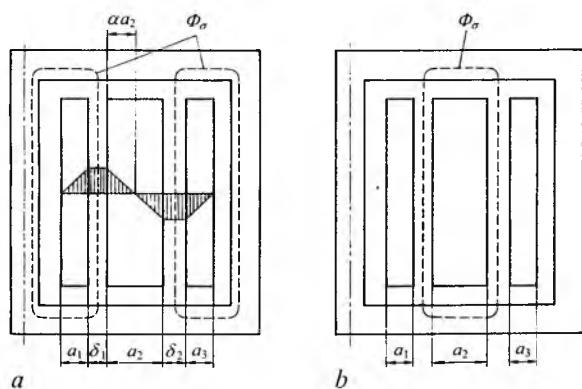
gdje je K_R tzv. faktor Rogowskog:

$$K_R = 1 - \sigma \left[1 - \exp \left(-\frac{1}{\sigma} \right) \right] \approx 1 - \sigma, \quad (59)$$

gdje je

$$\sigma = \frac{\delta + a_1 + a_2}{\pi l}. \quad (60)$$

Bikoncentrični namot (sl. 31) nastaje tako što se unutrašnji namot podijeli aksijalnim kanalom u dva dijela, između kojih se ugradi dotadašnji vanjski namot. Bikoncentrični raspored namota omogućuje smanjenje rasipnog induktiviteta, jer tada magnetske silnice koje ulančaju samo jedan od namota moraju svladati dvostruko veći magnetski otpor.



Sl. 31. Put rasipnoga magnetskog toka u transformatoru s bikoncentričnim namotima ako se napaja namot nižeg napona (a), odnosno namot višeg napona (b)

Namot bliži jezgri ne mora se podijeliti na jednakе dijelove. Ako je N ukupni broj zavoja nepodijeljenog namota, od kojeg αN zavoja ostaje na svome mjestu, a $(1-\alpha)N$ zavoja odmiče se da bi ustupilo mjesto drugom namotu, rasipni se induktivitet računa kao zbroj odgovarajućih rasipnih induktiviteta namota s αN i $(1-\alpha)N$ zavoja:

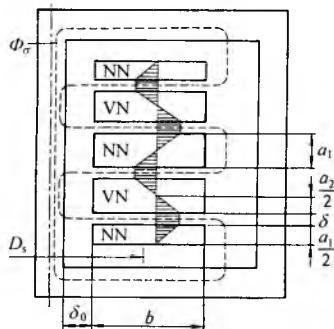
$$L_\sigma = (\alpha N)^2 \mu_0 \frac{D_{s1} \pi}{l_{\sigma1}} \left(\delta_1 + \frac{a_1 + \alpha a_2}{3} \right) + (1-\alpha)^2 N^2 \mu_0 \frac{D_{s2} \pi}{l_{\sigma2}} \left(\delta_2 + \frac{(1-\alpha)a_2 + a_3}{3} \right). \quad (61)$$

Srednje se duljine magnetskih silnica $l_{\sigma1}$ i $l_{\sigma2}$ računaju iz izraza

$$l_{\sigma1} = \frac{l}{1 - \frac{a_1 + \alpha a_2 + \delta_1}{\pi l}}, \quad (62)$$

$$l_{\sigma2} = \frac{l}{1 - \frac{(1-\alpha)a_2 + a_3 + \delta_2}{\pi l}}. \quad (63)$$

Još se manji rasipni induktivitet postiže pločastim ili mijenjanim namotom (sl. 32). Takvi se namoti primjenjuju u posebnim transformatorima za ispitivanje velikim strujama, za elektrolučne peći i sl. Kao i u prethodnom primjeru, ukupni se rasipni induktivitet računa kao zbroj rasipnih induktiviteta parova polusvitaka. Ako je namot podijeljen na n svitaka, svakom polusvitku pripada



Sl. 32. Put rasipnog magnetskog toka u transformatoru s pločastim namotima

$N/(2n)$ zavoja, pa se rasipni induktivitet pločastog namota računa prema izrazu

$$L_\sigma = \frac{1}{2n} N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{b_\sigma} \left(\delta + \frac{a_1 + a_2}{6} \right), \quad (64)$$

pri čemu se faktor K_R za izračunavanje srednje duljine rasipnih silnica b_σ prema (58) dobiva iz izraza

$$K_R = 1 - \left[1 - 0,5 \exp\left(-\frac{1}{\sigma}\right) \right] \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2\delta_0}{\sigma b}\right) \right\} \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\sigma}\right) \right]. \quad (65)$$

gdje su b i δ_0 izmjere sa slike 32.

Na vrijednost rasipnog induktiviteta transformatora, osim točnosti računa, utječe i odstupanje od predviđenih izmjera zbog tehnoloških tolerancija. Zbog toga i napon kratkog spoja mora imati tome odgovarajuću toleranciju. Norma IEC za transformatore i većina državnih normi dopušta odstupanje mjerene napona kratkog spoja $\pm 10\%$ od ugovorenih vrijednosti.

Sličnost transformatora. Dva su transformatora slična ako su građena od istih materijala, za ista specifična opterećenja (indukcija, gustoća struje) i ako su uz to i geometrijski slična. Pod geometrijskom sličnošću razumijeva se konstantan omjer x između svih odgovarajućih linijskih izmjera.

Ploštine svih presjeka i površina sličnih transformatora proporcionalne su s x^2 , a mase i obujmi s x^3 . Zbog jednakih specifičnih opterećenja i jednakih materijala specifični se gubitci ne mijenjaju, pa se osnovni gubitci u jezgri i namotu mijenjaju kao i masa proporcionalno s x^3 , dakle brže nego rashladna površina. Nazivna se snaga može izraziti pomoću specifičnih opterećenja B i J , presjeka jezgre A_j i namota A_n , pa je

$$S = UI = \omega \Phi NI = \omega BJN A_j A_n, \quad (66)$$

iz čega slijedi da se nazivna snaga mijenja s x^4 , što znači da se s povećanjem linijskih izmjera snaga povećava brže od gubitaka. Zbog toga je koeficijent korisnosti η većeg transformatora bolji. S obzirom na η poznatog transformatora (S_n, P_{0n}, P_{ln}), koeficijent korisnosti sličnog transformatora iznosi

$$\eta_x = \frac{S_n x^4 - (P_{0n} + P_{ln}) x^3}{S_n x^4} = 1 - \frac{P_{0n} + P_{ln}}{S_n x} = 1 - \frac{1 - \eta}{x}. \quad (67)$$

Rasipni tok

$$\Phi_{\sigma c} = \frac{L_\sigma I}{N} = N \lambda_\sigma J A_n = N \mu_0 \frac{D_s \pi \delta_r}{l_\sigma} J A_n \quad (68)$$

proporcionalan je trećoj potenciji omjera x , za razliku od tokova Φ_1 i Φ_2 u jezgri, koji se mijenjaju s kvadratom omjera x . Komponente napona kratkog spoja različito se ponašaju s promjenom linijskih izmjera. Induktivna komponenta $u_{\sigma\%}$ mijenja se kao i rasipni induktivitet (57) linearno s x , a djelatna komponenta $u_{t\%}$ i djelatni otpor namota recipročno promjeni linijskih izmjera, dakle s x^{-1} . Omjer tih komponenata, odnosno $\tan \phi_k$, mijenja se s x^2 . U uvjetima opterećenja strujom I , energija rasipnog magnetskog polja $A_\sigma = L_\sigma I^2/2$ mijenja se s x^5 . U slučaju kratkog spoja, struju pretežno određuje rasipni induktivitet L_σ , pa približno vrijedi relacija $A_\sigma = U^2/(2 \omega^2 L_\sigma)$, što znači da se energija A_σ mijenja s

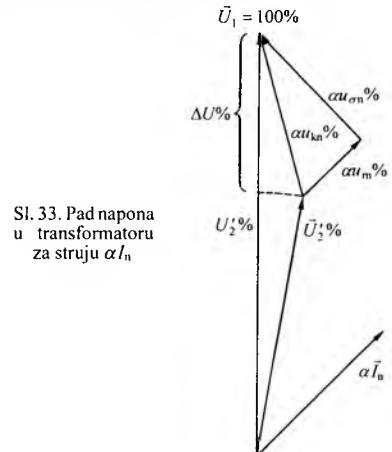
x^3 , a sile na namote mijenjaju se kao njezina derivacija po smjeru, dakle s x^2 . Dodatni gubici koji nastaju kao posljedica rasipnog toka ($P_{dod} = k \Phi^2 / R_d$) mijenjaju se s x^7 .

Prema navedenim odnosima između sličnih transformatora moguće je izvesti više zaključaka: s porastom nazivnih snaga transformatora smanjuje se utrošak materijala i cijena po jedinici snage, povećava se koeficijent korisnosti i napon kratkog spoja, raste potreba za učinkovitijim odvođenjem topline, više dolaze do izražaja problemi s dodatnim gubitcima i dr.

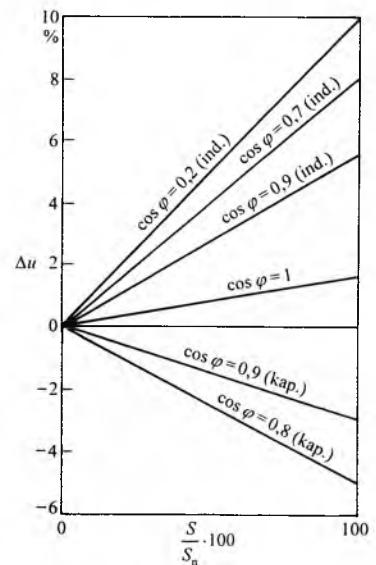
Pad napona u transformatoru. Padom napona u transformatoru naziva se razlika efektivnih vrijednosti primarnog i reducirajućeg sekundarnog napona izražena u postotcima primarnog napona. Pad napona nastaje na impedanciji kratkog spoja Z_k zbog struje opterećenja. Utjecaj se struje magnetiziranja na pad napona u stvarnom transformatoru redovito može zanemariti, pa fazorski dijagram transformatora izgleda kao na slici 33, gdje su naponi prikazani u postotcima primarnog napona za struju $I = \alpha I_n$. Pad napona u transformatoru ovisi o iznosu i faznom kutu opterećenja i izračunava se iz izraza

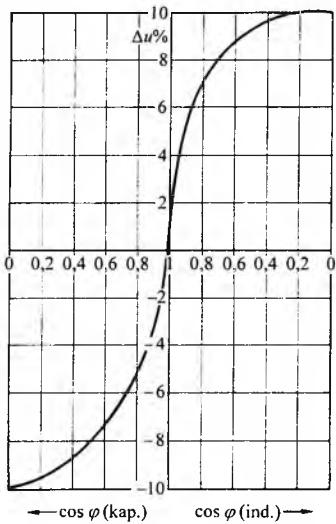
$$\Delta u_{\sigma\%} = \alpha [u_{m\%} \cos \varphi + u_{\sigma n\%} \sin \varphi + 0,005 \alpha (u_{\sigma n\%} \cos \varphi - u_{m\%} \sin \varphi)^2], \quad (69)$$

gdje je $\alpha = S/S_n$ relativno opterećenje, φ fazni kut opterećenja, a $u_{m\%}$ i $u_{\sigma n\%}$ komponente nazivnog napona kratkog spoja $u_{kn\%}$.

Sl. 33. Pad napona u transformatoru za struju αI_n

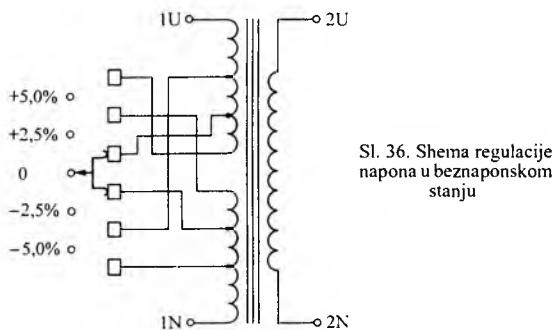
Ovisnost pada napona o opterećenju uz konstantni $\cos \varphi$ opterećenja i o $\cos \varphi$ opterećenja uz nazivno opterećenje za transformator s $u_{\sigma\%} = 1,2$ i $u_{m\%} = 10$ pokazuju slike 34 i 35.

Sl. 34. Ovisnost pada napona u transformatoru o relativnom opterećenju $(S/S_n)100$ za različite faktore snage



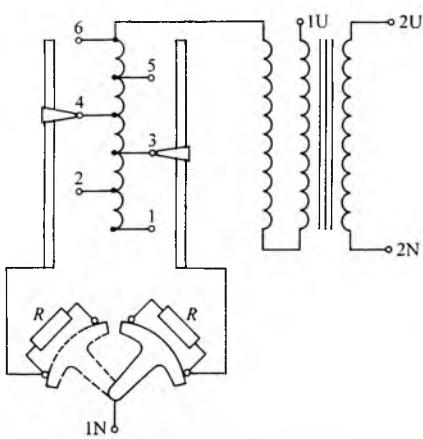
Sl. 35. Ovisnost pada napona u transformatoru o faktoru snage pri konstantnom opterećenju

Regulacija napona u transformatoru promjena je omjera transformacije. U tu se svrhu najčešće samo na jednoj strani uključuje veći ili manji broj zavoja. Ako se broj zavoja mijenja kad transformator nije pod naponom, onda je to *regulacija u beznaponskom stanju*, za razliku od *regulacije pod opterećenjem*,

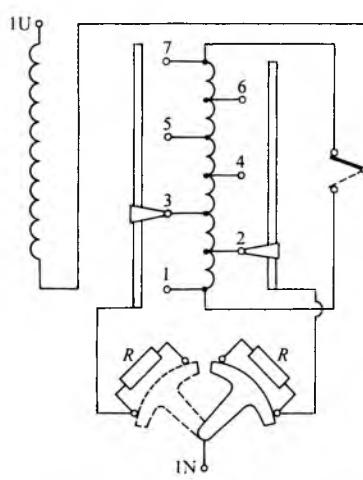


Sl. 36. Shema regulacije napona u beznaponskom stanju

kad se omjer transformacije mijenja dok je transformator u pogonu. Regulacija u beznaponskom stanju jeftinije je rješenje, ali za svaku promjenu omjera transformacije zahtijeva isključenje transformatora. Taj se način regulacije primjenjuje kad se omjer transformacije rijetko mijenja i ondje gdje bi regulacija opterećenog transformatora nerazmerno povećala cijenu transformatora. Tako je u gotovo cijeloj Europi normirano da se trofazni uljni



Sl. 37. Shema regulacije napona pod opterećenjem

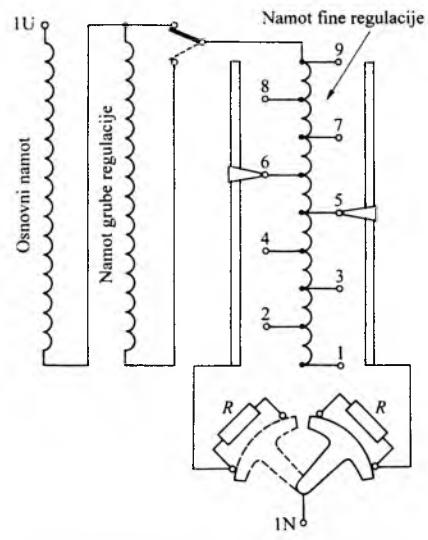


Sl. 38. Shema regulacije napona pod opterećenjem s prekretanjem

transformatori nazivnih snaga do 10 MVA za napone do 30 kV grade s regulacijom u beznaponskom stanju na strani višeg napona i u opsegu $\pm 2 \times 2,5\%$ (sl. 36). Regulacijski su svitci u namotu smješteni tako da njihovo uključivanje i isključivanje uzrokuje što manju nesimetriju amperzavoja i tako što manje dodatne sile prilikom kratkog spoja u mreži. Regulacijom u beznaponskom stanju uglavnom se broj zavoja namota višeg napona prilagoduje prosječnoj vrijednosti napona mreže na mjestu ugradnje transformatora, a položaj se premješta mijenja tek kad se ta prosječna vrijednost promjeni. Regulacija u beznaponskom stanju primjenjuje se i u velikim transformatorima, osobito generatorskim, a nije rijetka takva regulacija ni u velikim mrežnim transformatorima i autotransformatorima. Tako je, npr., u Hrvatskoj većina autotransformatora u 400-kilovoltnoj mreži građena za regulaciju napona u beznaponskom stanju.

Uljni transformatori nazivne snage veće od 10 MVA i nazivnog napona 110 kV i većeg proizvode se većinom za regulaciju pod opterećenjem. Uredaj kojim se napon regulira pod opterećenjem zove se regulacijska sklopka, a sastoji se od birača s kliznim kontaktima i preklopke opterećenja s pogonskim mehanizmom. Slika 37 shematski prikazuje regulacijski transformator s regulacijom na višenaponskoj strani. Regulacijski je namot smješten na strani nultočke. Struja višenaponskog namota ulazi kroz priključak 1U i izlazi kroz odcjep broj 3, a zatim preko kliznog kontakta birača i preklopke opterećenja dolazi do izlaznog priključka nultočke 1N. Ako se napon na višenaponskoj strani smanji, treba smanjiti i broj zavoja na istoj strani pa se slobodni kontakt birača doveđe u susjedni položaj 4, a zatim preklopka opterećenja, tjera na pogonskim mehanizmom, kratkotrajno uključi otpornike R za ograničenje struje i prijede u drugi krajnji položaj, označen crtkom. Time je operacija preklapanja pod teretom završena i u sljedećem se koraku, već prema potrebi, s odcjepa 4 može prijeći na odcjep 5 ili 3. Otpornici R ograničavaju struju u dijelu regulacijskog namota između susjednih odcjepa, koji bi bez tih otpornika privremeno bio u kratkom spoju.

Transformatori s regulacijom napona pod opterećenjem većinom reguliraju napon u granicama $\pm 10 \dots 15\%$, u stupnjevima $1 \dots 1,5\%$. Regulacijski namot za regulaciju $\pm n \times m\%$ ima n sekcija i $n+1$ izvod. Taj se namot pomoću posebne preklopke može spojiti u seriju s osnovnim namotom tako da se ukupni broj zavoja povećava ili se (zbog protuspoja) smanjuje. Takav se način regulacije napona pod opterećenjem s reverzibilnim regulacijskim namotom naziva *regulacija prekretanjem* (sl. 38). Drugi je način regulacije s dva regulacijska namota, za grubu i za finu regulaciju. Namot za finu regulaciju jednak je opisanome, a namot za grubu regulaciju ima jednak broj zavoja, ali nema odcjepa i uključuje se kad broj zavoja treba povećati iznad srednjeg, a isključuje kada broj zavoja treba biti manji od srednjega (sl. 39). Regulacija pod opterećenjem, kad nema prekretanja ni grube regulacije, naziva se *linearna regulacija*.



Sl. 39. Shema regulacije napona pod opterećenjem s namotima za grubu i finu regulaciju

Tipska snaga transformatora nazivna je snaga dvonamotnog (jednofaznog ili višefaznog) transformatora bez regulacije. Ako transformator treba imati mogućnost regulacije nazivnog napona u rasponu $+x\% \cdots -y\%$ uz jednaku nazivnu snagu, potrebito je jednom od namota dodati $x\%$ zavoja, a presjek vodiča istog namota povećati za $y\%$, da bi pri naponu nižem za $y\%$ struja mogla biti za $y\%$ veća. Tako se masa tog namota poveća za $(x+y)\%$. To je približno jednako kao da je ukupna masa obaju namota povećana za $(x+y)\%/2$. Kad bi se ta količina materijala namota upotrijebila za gradnju dvonamotnog transformatora bez regulacije, dobio bi se transformator tipske snage približno određene izrazom

$$S_T = S_n \left(1 + \frac{x\% + y\%}{200} \right). \quad (70)$$

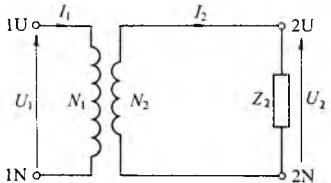
Trofazni transformatori snage veće od 10 MVA često imaju treći namot građen za nazivnu snagu S_3 koja je manja od nazivne snage transformatora. Tipska snaga takva transformatora, ako još ima mogućnost regulacije napona u rasponu $\Delta u\% = (x+y)\%$, približno iznosi

$$S_T = S_n \left(1 + \frac{\Delta u\%}{200} + \frac{S_3}{2S_n} \right). \quad (71)$$

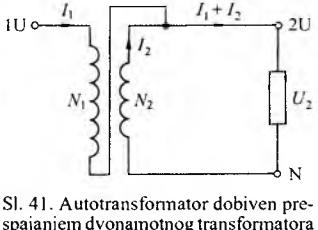
Prema (71) transformator nazivne snage 20 MVA s regulacijom napona $\pm 10\%$ i s trećim namotom nazivne snage 20/3 MVA ima tipsku snagu 25,3 MVA.

Autotransformator ili transformator u štednom spoju. Dvonamotni transformator bez regulacije, nazivne snage $S_n = S_T$ i omjera transformacije U_1/U_2 (sl. 40), može se prespojiti u autotransformator ili transformator u štednom spoju (sl. 41) s omjerom transformacije

$$U_{1a}:U_{2a} = (U_1 + U_2):U_2. \quad (72)$$



Sl. 40. Dvonamotni transformator



Sl. 41. Autotransformator dobiven prespajanjem dvonamotnog transformatora

Takvim se spojem, uz nepromijenjena specifična opterećenja jezgre i namota, transformira veća snaga:

$$S_a = U_{1a} I_{1a} = (U_1 + U_2) I_1 = U_1 I_1 \left(1 + \frac{U_2}{U_1} \right), \quad (73)$$

odnosno

$$S_a = S_T \frac{U_{1a}}{U_{1a} - U_{2a}}, \quad (74)$$

iz čega slijedi izraz za tipsku snagu S_T autotransformatora nazivne snage S_{na} i nazivnog omjera transformacije $K_n = U_{1na}/U_{2na}$:

$$S_T = S_{na} \left(1 - \frac{U_{2na}}{U_{1na}} \right). \quad (75)$$

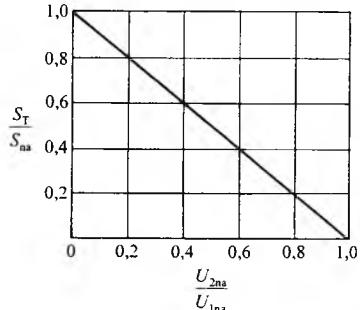
Relacija (75) povezuje tzv. nazivnu *prolaznu snagu* autotransformatora S_{na} s njegovom tipskom snagom S_T . Grafički prikaz relacije (75) nalazi se na slici 42. Ušteda u tipskoj snazi to je veća što je omjer transformacije autotransformatora bliži jedinici. Kad taj omjer dostigne vrijednost jedan, tipska je snaga autotransformatora jednaka nuli. To je i logično, jer pri tom omjeru transformacije autotransformator nije ni potreban.

Pespajanjem transformatora u autotransformator ne događaju se bitne promjene u vitalnim dijelovima transformatora. Mjenja se samo naponska razina serijskog namota (od U_1 na $U_1 + U_2$) i strujno opterećenje izvoda paralelnog namota (od I_2 na $I_1 + I_2$). Geometrijski odnosi, magnetska indukcija, struje, amperzavoji,

projecanja i energija rasipnoga magnetskog polja ostaju nepromijenjeni. Jednak je i napon kratkog spoja, ali je njegova postotna vrijednost manja zbog porasta omjera transformacije, pa iznosi

$$u_{kna\%} = u_{kn\%} \left(1 - \frac{U_{2a}}{U_{1a}} \right). \quad (76)$$

To znači da se postotni napon kratkog spoja autotransformatora računa kao da se radi o dvonamotnom transformatoru, a zatim se dobivena vrijednost množi faktorom $1 - U_{2a}/U_{1a}$. Bilo bi pogrešno iz toga zaključiti da će struje kratkog spoja i sile u autotransformatoru biti veće nego u transformatoru s odvojenim namotima. Autotransformator se projektira za postotni napon kratkog spoja koji bi imao i transformator s odvojenim namotima za istu namjenu. To, međutim, znači da će rasipni magnetski tok, a zbog njega i dodatni gubici P_{dod} , biti veći u autotransformatoru nego u dvonamotnom transformatoru jednakе tipske snage.



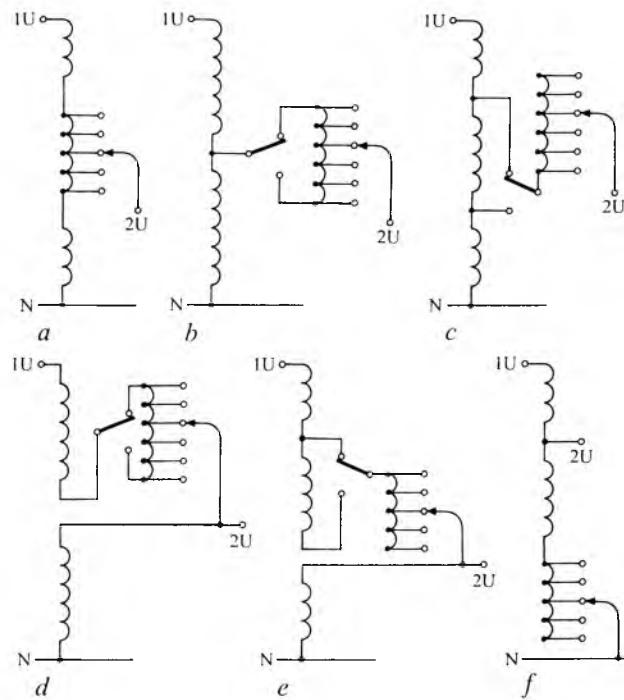
Sl. 42. Ovisnost tipske snage autotransformatora o omjeru transformacije

Prednosti su štednog spoja to veće što je omjer transformacije bliži jedinici. Zato se autotransformatori u prvom redu upotrebljavaju za povezivanje električnih mreža visokog napona, kad omjer transformacije nije previelik. U našoj se 400-kilovoltnoj mreži autotransformatori upotrebljavaju za povezivanje s mrežama od 220 kV i 110 kV.

Prednosti su štednog spoja posljedica konduktivne veze između namota. Povećanje snage, koje se postiže prespajanjem transformatora s odvojenim namotima u autotransformator, iznosi $\Delta S = S_{na} - S_n = U_2 I_1$. Taj se dio snage ne transformira, nego samo prolazi kroz serijski namot autotransformatora spomenutom konduktivnom vezom. Dio snage koji se prenosi preko magnetskog toka $S_T = U_2 I_2$ prespajanjem se ne mijenja.

Konduktivna je veza i osnovni nedostatak autotransformatora. Ako mreža nije uzemljena, pri zemnom spoju na strani višeg napona mogu niženaponska strana autotransformatora i priključena oprema doći na nedopušteno visoke napone. Zato se autotransformatori upotrebljavaju samo u mrežama s uzemljrenom nultočkom. U nekim se transformatorskim stanicama s uzemljrenom nultočkom izoliraju nultočke pojedinih transformatora da bi se povećala nulta reaktancija sustava, što se ne preporučuje kad se radi o autotransformatorima. Dogodi li se, npr., da prilikom isključivanja autotransformatora omjer transformacije 400 kV/115 kV s izoliranom nultočkom jedan pol prekidača na višenaponskoj strani ostane uključen, svi će namoti autotransformatora zbog konduktivne veze doći na fazni napon od 230 kV. Zbog toga će probiti odvodnici u nultočki i na priključcima 115 kV, pa će nastati kratki spoj autotransformatora.

Način *regulacije napona u autotransformatoru* ovisi ponajprije o tome na kojoj strani treba regulirati napon. Ako je viši napon čvrst, a treba regulirati napon na niženaponskoj strani, mogu se upotrijebiti spojevi *a*, *b* i *c* na slici 43. Spojevi *d* i *e* na toj slici predviđeni su za regulaciju napona na višenaponskoj strani, a spoj *f* upotrebljava se kad su naponi na obje strane promjenljivi. Zajedničko je za spojeve *a* do *e* da se napon regulira uz stalnu magnetsku indukciju. Da bi se napon promijenio $\pm 10\%$ na niženaponskoj strani u spoju *a* ili *c*, treba imati na raspolažanju 20% zavoja paralelnog namota, a ako se upotrebljava prekretanje, kao u spoju *b*, dovoljno je 10% zavoja paralelnog namota. Za jednak opseg regulacije na višenaponskoj strani u spoju *d* regulacijski namot zbog prekretanja treba imati 10% od ukupnoga broja zavoja, dok je za regulaciju u spoju *e* potrebno 20% od ukupnog broja zavoja serijskog i paralelnog namota.



Sl. 43. Mogućnosti regulacije napona u autotransformatorima

Regulacija napona u nultočki autotransformatora (spoј f) zahtijeva promjenljivu magnetsku indukciju i zbog toga veću tipsku snagu autotransformatora nego ostali spojevi. Ako se na višenaponskoj strani predviđa promjena napona u rasponu $\Delta U_1\%$, da bi se napon na niženaponskoj strani održavao konstantnim, regulacijski namot mora imati $\Delta N_1\%$ od ukupnoga broja zavoja u skladu s izrazom

$$\Delta N_1\% = 100 \frac{\Delta N_1}{N_s + N_p} = \frac{-\Delta U_1\%}{U_{1na} \left(1 + \frac{\Delta U_1\%}{100} \right)} - 1, \quad (77)$$

gdje N_s i N_p označuju broj zavoja serijskog i paralelnog namota. Indukcija u jezgri pritom će se mijenjati za $\Delta B\%$ prema izrazu

$$\Delta B\% = \frac{\Delta U_1\%}{1 - \frac{U_{2na}}{U_{1na}}}. \quad (78)$$

Za odgovarajuće promjene napona $\Delta U_2\%$ na niženaponskoj strani vrijede relacije

$$\Delta N_2\% = 100 \frac{\Delta N_2}{N_p} = \frac{\Delta U_2\%}{1 - \frac{U_{2na}}{U_{1na}} \left(1 + \frac{\Delta U_2\%}{100} \right)}, \quad (79)$$

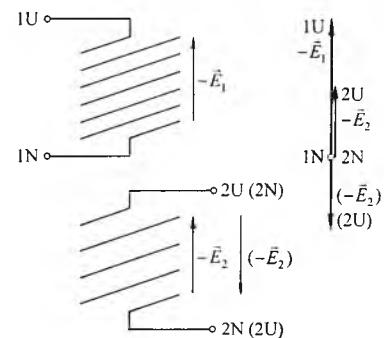
$$\Delta B\% = -\frac{\Delta U_2\%}{\frac{U_{1na}}{U_{2na}} - 1}. \quad (80)$$

Spojevi transformatora. Spoј je transformatora podatak o načinu spajanja namota i o faznom pomaku između višeg i nižeg napona.

Jednofazni dvonamotni transformator na slici 44 ima jednakomotane namote. Inducirani su naponi u oba namota u fazi, tj. fazni je pomak među njima jednak nuli. Ako se međusobno zamijene označe krajeva jednog od namota, inducirani će naponi biti u protufazi, odnosno fazni će pomak između njih iznositi 180° . Uobičajeno je da se u oznakama spojeva fazni pomaci izražavaju brojevima na satu. Jednom satu odgovara dvanaestina kruga ili 30° , pa, npr., faznom pomaku od 180° odgovara satni broj 6.

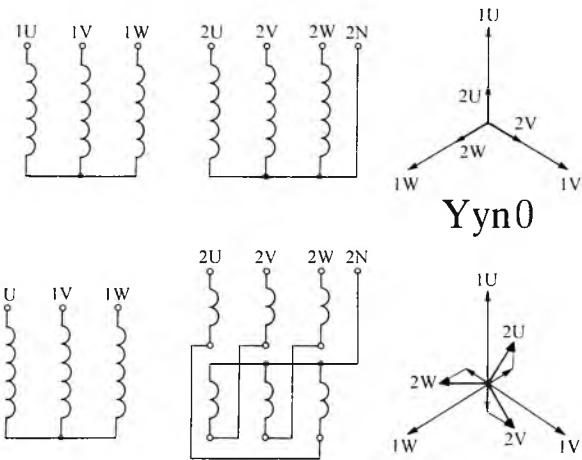
Oznaka spoja dvonamotnog transformatora sastoji se od slovnih označaka koje opisuju način spajanja namota i satnog broja. Velika se slova upotrebljavaju za višenaponske, a mala za niže-

naponske namote. Za označivanje jednofaznih transformatora upotrebljava se za višenaponski namot slovo I, a za niženaponski namot slovo i, tako da spoju na slici 44 pripada oznaka li0. Zamijene li se međusobno označke priključaka jednog od namota, oznaka će spoja biti li6.



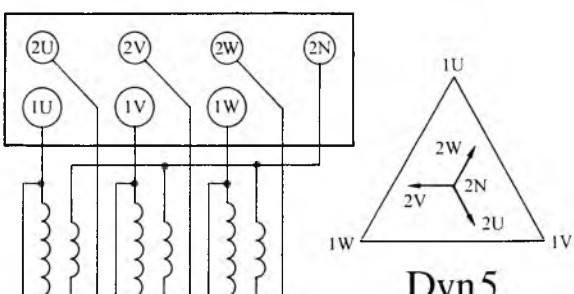
Sl. 44. Namoti, smjer namatanja i smjer induciranoj napona u jednofaznom dvonamotnom transformatoru

Namoti se trofaznih transformatora spajaju u zvijezdu, slomljenu zvijezdu (cik-cak) i trokut. Pripadne su slovne označke Y i y, Z i z te D i d za namote višeg, odnosno nižeg napona. Kad je nultočka namota izvedena, uz slovo koje označuje spoj namota dopisuje se N ako nultočka pripada namotu višeg napona i n ako se radi o nultočki namota nižeg napona (npr. YNd1, YNzn5).



Sl. 45. Sheme i fazorski dijagrami spojeva Yyn0 i Yzn1

Na slici 45 nalaze se sheme i fazorski dijagrami spojeva Yyn0 i Yzn1. Da bi se uz jednak napon po zavoju dobio jednak fazni napon, niženaponski namot u spoju z mora imati 15,5% više zavoja nego niženaponski namot u spoju y. Unatoč tome, spojevi Yzn1 i Yzn5 često se upotrebljavaju do nazivnih snaga od 160 kVA, jer omogućuju punu nesimetriju opterećenja (samo jedna faza opterećena sa 100% opterećenja). Transformator u spoju Yyn može se opteretiti samo do nesimetričnog opterećenja od 10%, jer se uz veću nesimetričnost pojavljuje nesimetrija napona. Za transformatore nazivnih snaga 250...2500 kVA najčešće se upotrebljavaju spojevi Dyn5 (sl. 46) i Dyn11 jer, kao i spoj Yzn (satni broj ne utječe), dopuštaju nesimetrično opterećenje.

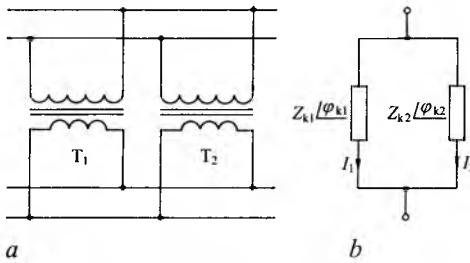


Sl. 46. Spoj Dyn5

Sve što je rečeno o spojevima vrijedi uz pretpostavku da su namoti jednako motani, tj. da imaju isti smjer namatanja. Kako je rezultat isti, ponekad je prikladnije promijeniti smjer namatanja nego zamijeniti početak i kraj namota.

Trofazni transformatori srednjih snaga ($16 \cdots 100 \text{ MVA}$) najčešće imaju oznaku spoja $YNy0d5$, koja daje sljedeću informaciju: višenaponski i srednjonaponski namoti trofaznog tronamotnog transformatora spojeni su u zvijezdu s faznim pomakom nula, dok je niženaponski namot spojen u trokut s faznim pomakom 5. Na višenaponskoj strani izvedena je nultočka.

Paralelni rad transformatora. Potrošnja električne energije stalno raste i transformator s vremenom treba zamijeniti većim ili mu paralelno dodati drugi transformator koji će preuzeti dio opterećenja. Paralelni se rad transformatora ostvaruje preko zajedničkih sabirница na višenaponskoj i niženaponskoj strani. Na slici 47 nalazi se shema paralelnog spoja dvaju jednofaznih transformatora i nadomjesna shema takva spoja.



Sl. 47. Paralelni spoj transformatora. a) shema spoja, b) nadomjesna shema

Da bi mogli raditi paralelno, transformatori trebaju zadovoljiti sljedeće uvjete: a satni broj treba biti isti; b nazivni omjeri transformacije trebaju biti jednaki; c naponi kratkog spoja ne smiju se razlikovati više od 10%; d omjer nazivnih snaga ne smije biti veći od 2.

Ispunjene uvjete a i b jamči da u sekundarnim namotima paralelno spojenih i neopterećenih transformatora neće teći prevelika struja izjednačenja. Uvjet c osigurava raspodjelu opterećenja u skladu s nazivnim snagama, a uvjet d praktički osigurava istofaznost struja opterećenja u paralelno spojenim transformatorima. Najvažniji je uvjet a. Ako se, npr., spoje paralelno dva transformatora koji se razlikuju samo u satnom broju za 6, bit će to kratki spoj pri punom naponu za oba transformatora. To, međutim, ne znači da u paralelnom radu mogu raditi samo transformatori koji na natpisnoj pločici imaju upisan isti satni broj. Pogodnim spajanjem priključaka trofaznih transformatora može se, ne otvarajući transformator, postići isti satni broj između transformatora s parnim satnim brojevima koji se razlikuju za 4. To dakle znači da transformatori sa satnim brojem 0, 4 i 8 mogu raditi paralelno uz određena prespajanja priključaka. Isto vrijedi i za transformatore sa satnim brojevima 2, 6 i 10. Ne mogu se, međutim, paralelno spojiti transformatori iz dviju od navedenih skupina. Za transformatore s neparnim satnim brojem situacija je jednostavnija; svi se transformatori s neparnim satnim brojem mogu pogodnim prespajanjem priključaka dovesti do istoga satnog broja.

Uvjet b, i kada je u cijelosti ispunjen, ne jamči da je razlika u stvarnim omjerima transformacije manja od 1%, jer je normom IEC dopuštena toleranca omjera transformacije od 0,5%. Ako su paralelno spojena dva transformatora jednakih nazivnih snaga i napona kratkog spoja 5%, a stvarna razlika u omjerima transformacije iznosi 1%, njima će teći struja izjednačenja od $0,1 I_n$.

U skupini od n paralelno spojenih transformatora ukupno će se opterećenje S_{Σ} rasporediti na transformatore prema omjeru admittancije kratkog spoja odgovarajućeg transformatora Z_{kv}^{-1} i admittancije kratkog spoja skupine transformatora $Z_{k\Sigma}^{-1}$ prema izrazu

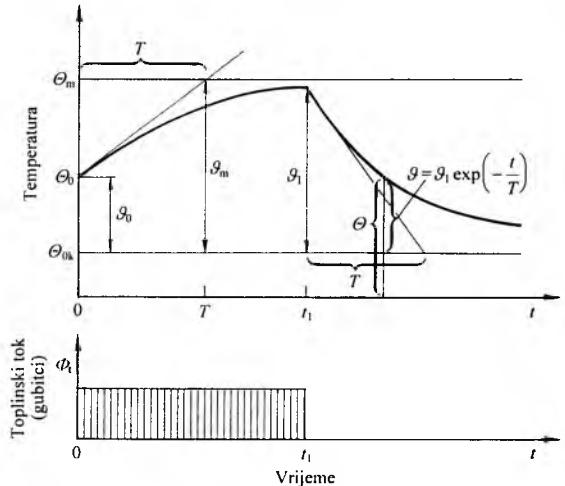
$$\frac{S_v}{S_{\Sigma}} = \frac{Z_{kv}^{-1}}{Z_{k\Sigma}^{-1}} = \frac{S_{nv}}{u_{kv\%} \sum_1^n \frac{S_{ni}}{u_{ki\%}}} \quad (81)$$

Ako su naponi kratkog spoja jednaki, a ukupno opterećenje primjerice jednako zbroju nazivnih snaga paralelno spojenih

transformatora, svaki će transformator biti opterećen svojom nazivnom snagom. Transformator koji bi imao napon kratkog spoja manji od prosječnoga preuzeo bi više opterećenja u skladu s izrazom (81).

Uvjet d za dopušteni omjer nazivnih snaga paralelno spojenih transformatora slijedi iz zakona sličnosti. Većoj nazivnoj snazi odgovara veći kut ϕ_k impedancije kratkog spoja, pa nastaje fazni pomak između struja u paralelno spojenim transformatorima. Optereti li se u takvim uvjetima skupina paralelno spojenih transformatora snagom jednakom zbroju njihovih nazivnih snaga, svih će transformatori u skupini biti preopterećeni u omjeru algebarskog i fazorskog zbroja struja u njima. Ako je omjer nazivnih snaga jednak ili manji od 2, fazni se pomak između struja u paralelno spojenim transformatorima može zanemariti.

Zagrijanje. Gubitci transformacije $P_g = P_0 + P_c$ očituju se najprije u zagrijavanju jezgre i namota. Povišenje njihove temperature prema okolini, koje zbog toga nastaje, naziva se **zagrijanje** ili **nadtemperatura** ϑ . Temperatura zagrijavanog tijela Θ zbroj je temperature okoline Θ_{ok} i zagrijanja ϑ .



Sl. 48. Zagrijanje i hlađenje homogenog tijela

Zagrijanje tijela kojem se trajno dovodi konstantan toplinski tok Φ_t mijenja se od početne vrijednosti ϑ_0 do konačne, maksimalne vrijednosti ϑ_{max} koju će tijelo postići u stacionarnom stanju (sl. 48). U homogenom tijelu mase m , specifičnog toplinskog kapaciteta c i površine A , okruženom rashladnim sredstvom (koeficijent prijelaza topline α), u jedinici vremena nastaje toplinski tok Φ_t , pa za toplinsko stanje tog tijela vrijedi jednadžba

$$\Phi_t dt = mcd\vartheta + A\alpha\vartheta dt, \quad (82)$$

prema kojoj se toplina $\Phi_t dt$ dijelom $mcd\vartheta$ akumulira u tijelu (toplinskog kapaciteta $m c$), uzrokujući porast zagrijanja za $d\vartheta$, a ostatak $A\alpha\vartheta dt$ predaje se okolini. Koliko će se od dovedene topline, u pojedinom trenutku, akumulirati, a koliko predati okolini ovisi o toplinskom kapacitetu $m c$, toplinskoj vodljivosti $A\alpha$ i zagrijanju ϑ . Pri zadanim vrijednostima $m c$ i $A\alpha$, s porastom ϑ sve se veći udio dovedene topline predaje okolini, a sve se manji udio akumulira. Zbog toga je i prirast zagrijanja sve manji i stanje teži k stagnaciji, kad neće biti prirasta zagrijanja, pa jednadžba (82) dobiva oblik

$$\Phi_t = A\alpha\vartheta_{max}, \quad (83)$$

iz kojeg slijedi izraz za maksimalno zagrijanje homogenog tijela pri konstantnom dovodu topline:

$$\vartheta_{max} = \frac{\Phi_t}{A\alpha}. \quad (84)$$

Ako pri nekom zagrijanju ϑ , prestane dovod topline, proces zagrijavanja prelazi u proces hlađenja, a jednadžba (82) dobiva oblik

$$0 = mc d\vartheta + A\alpha \vartheta dt. \quad (85)$$

Kad su parametri Φ_v , c i α konstante, rješenja jednadžbi (82) i (85) za procese zagrijavanja i hlađenja glase

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_{\max} - \vartheta_0)[1 - \exp(-t/T)], \quad (86)$$

$$\vartheta = \vartheta_1 \exp(-t/T), \quad (87)$$

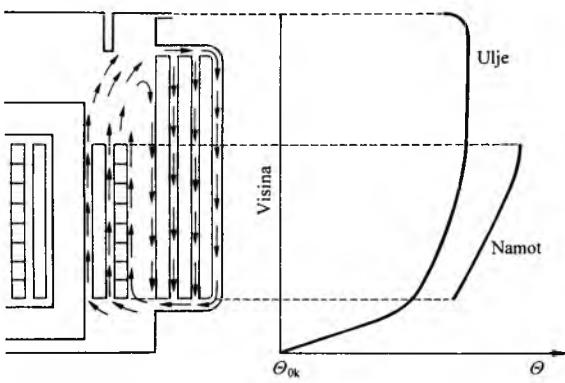
u kojima je $T = m c / A\alpha$ vremenska konstanta promatranih pojava. Vremenska konstanta pokazuje brzinu zagrijavanja, odnosno hlađenja. Poboljšanjem hlađenja (veća toplinska vodljivost $A\alpha$) smanjuje se vremenska konstanta procesa. Tada se proces odvija brže. Zagrijavanje i hlađenje homogenog tijela kojem se od trenutka $t=0$, kad je za ϑ_0 toplije od okoline, do trenutka $t=t_1$, kad je dostiglo zagrijanje ϑ_1 , u jedinici vremena dovodi toplinski tok Φ_v pokazuje slika 48.

Transformator nije homogeno tijelo i proces je njegova zagrijavanja složeniji od upravo opisanoga, ali mu je u osnovi sličan.

Niskonaponski transformatori malih snaga izrađuju se redovito kao suhi transformatori hlađeni zrakom. Za veće napone i nazivne snage ekonomičniji je uljni transformator, u kojem je mineralno ulje istodobno izolacijski i rashladni medij u koji je utrojen aktivni dio transformatora (jezgra i namoti).

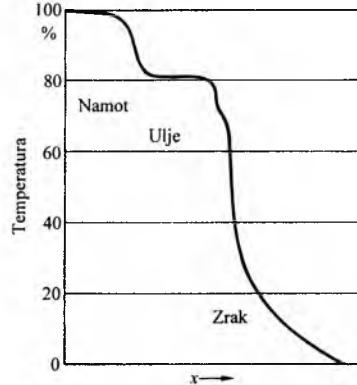
Tri su moguća načina prijenosa topline: vođenje ili kondukcija, zračenje ili radijacija i odvođenje ili konvekcija. Prijenos topline vođenjem zbiva se u jezgri i namotima kojima nastala toplina putuje prema rashladnoj površini, prolazi kroz metal i izolaciju uzrokujući pad temperature proporcionalan toplinskem otporu puta i količini topline. Zato je temperatura u unutrašnjosti jezgre i namota viša od temperature rashladne površine. Prijenos topline vođenjem završava na rashladnoj površini, odnosno u graničnom sloju rashladnog medija tik uz rashladnu površinu. Taj granični sloj preuzima toplinu vođenjem od rashladne površine i tu prestaje vođenje i započinje konvekcija, jer se ugrijane čestice rashladnog medija u graničnom sloju počinju gibati navise, miješaju se s hladnjim okolnim medijem i tako ga zagrijavaju. Zagrijan rashladni medij tjeran uzgonom struji navise odnoseći se sa sobom toplinu, a na njegovo mjesto pristiže hladniji medij. Količina odvedene topline proporcionalna je zagrijanju, rashladnoj površini i koeficijentu prijelaza topline. Da bi se postigla potrebna rashladna površina, u jezgri i namotima se ostavljaju rashladni kanali i dimenzioniraju tako da ne predstavljaju prevelik otpor rashladnom mediju. Što su specifična opterećenja (gustoća struje i indukcija) veća, potrebno je odvoditi više topline, pa je potrebno više kanala.

U uljnem transformatoru toplo se ulje iz prostora iznad namota odvodi u hladila iz kojih izlazi s nižom temperaturom i ulazi u kotao ispod namota. Rasporred zagrijanja jezgre, namota i ulja uzduž visine transformatora i put rashladnog sredstva pokazuje slika 49. Dijagram zagrijanja u jednoj horizontalnoj ravnini pokazuje slika 50. Uočljivi su karakteristični temperaturni padovi na mjestima gdje prevladava konvekcijski prijelaz topline. Najtoplja su mjesta u namotima ili jezgri, gdje nastaju gubitci. Najviše su termički ugroženi namoti, odnosno izolacijski materijali u namotima.



Sl. 49. Zagrijavanja u transformatoru po vertikali

TRANSFORMATOR



Sl. 50. Zagrijavanja u transformatoru u horizontalnom presjeku

Vijek trajanja. Istraživanja su pokazala da izolacijski materijali pod utjecajem temperature i drugih agensa (kisik, vlaga) s vremenom stare. Njihov je vijek trajanja u prvom redu funkcija temperature kojoj su izloženi (v. *Električni strojevi*, TE 4, str. 164).

Starenjem izolacije osobito se bavio Amerikanac V. M. Montsinger. Istraživao je promjene svojstava izolacijskih materijala pod utjecajem temperature, a kao kriterij za kraj vijeka trajanja uzeo je smanjenje njihove vlačne čvrstoće za 50%. Za različite izolacijske materijale utvrdio je normalni vijek trajanja Z_0 pri trajnoj izloženosti normalnoj temperaturi Θ_0 . Rezultate svojih istraživanja izrazio je 1930. godine formulom za vijek trajanja izolacije:

$$Z = Z_0 2^{-\frac{\Theta - \Theta_0}{\Delta}}, \quad (88)$$

gdje je Z_0 normalni vijek trajanja izolacije, Θ_0 normalna temperatura, Δ konstanta materijala, a Θ temperatura kojoj je izolacija trajno izložena.

Iako su Montsingerova istraživanja općenito prihvaćena, do danas nije postignuta usuglašena definicija normalnoga vijeka trajanja. Prihvaćen je, međutim, pojam relativnog trošenja vijeka trajanja:

$$\nu = \frac{Z_0}{Z} = 2^{\frac{\Theta - \Theta_0}{\Delta}}. \quad (89)$$

Za izolaciju klase A (papir u ulju) izrazi (88) i (89) vrijede u granicama temperature od $80 \dots 130^\circ\text{C}$. Starenje je izolacije pri temperaturama nižim od 80°C zanemarivo, a pri temperaturama višim od 140°C zbivaju se nove reakcije razaranja celuloze, pa temperatura najtoplje točke u namotu ne smije preći 140°C ni u uvjetima preopterećenja.

Vijek trajanja izolacije uljnog transformatora troši se normalno ako je najtoplja točka izolacije trajno na temperaturi 98°C . Povišenje trajne temperature za $\Delta = 6^\circ\text{C}$ udvostručuje, a sniženje za 6°C prepolovljuje normalno trošenje vijeka trajanja izolacije, a to znači i transformatora. Drugim riječima, jednak je potrošiti vijek trajanja nekog transformatora ako mu je najtoplja točka namota 24 sata na temperaturi 98°C ili 12 sati na 104°C ili 45 minuta na 128°C .

Temperatura izolacije u transformatoru uglavnom nije konstantna bilo zbog promjena temperature okoline, bilo zbog promjenljivog opterećenja. Ujni transformatori se u skladu s normama IEC najčešće grade za normalne uvjete okoline. To su sljedeći uvjeti: srednja dnevna temperatura zraka nije viša od 30°C , srednja godišnja temperatura zraka nije viša od 20°C , najviša temperatura zraka nije viša od 40°C , najniža je temperatura na otvorenom -25°C , najniža je temperatura u zatvorenom prostoru -5°C .

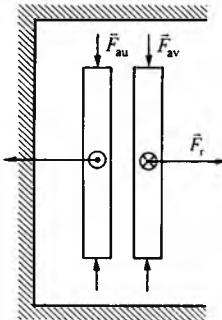
Već spomenuta normalna temperatura najtoplje točke namota uvnitnjih transformatora može se prikazati kao zbroj srednje godišnje temperature od 20°C , najvišega dopuštenog srednjeg zagrijanja namota prema okolini od 65°C , koje se određuje na osnovi promjene otpora namota i zagrijanja najtoplje točke namota iznad srednjeg zagrijanja namota u iznosu od 13°C .

Sile u transformatoru. Magnetska sila na vodič kojim protječe struja \bar{I}_1 , koji se nalazi u magnetskom polju indukcije \bar{B}_2 , računa se prema Lorentzu:

$$\bar{F}_m = \int_V \left(\frac{\bar{I}_1}{q_1} \times \bar{B}_2 \right) dV_1, \quad (90)$$

gdje je q_1 presjek vodiča, a V_1 njegov volumen. Ako je indukcija \bar{B}_2 nastala djelovanjem struje \bar{I}_2 u dugom ravnem vodiču, koji je paralelan vodiču kojim protjeće struja \bar{I}_1 , lako je zaključiti da će sila između vodiča biti privlačna ako su struje \bar{I}_1 i \bar{I}_2 jednakog smjera (v. Elektrotehnika, TE 5, str. 130), a odbojna ako su im smjerovi struja suprotni. Do istog se zaključka dolazi na osnovi tzv. pravila lijeve ruke (v. Električni strojevi, TE 4, str. 154).

U transformatoru postoje odbojne i privlačne sile. Struja u svim vodičima jednog namota u svakom trenutku ima isti smjer, pa se može zaključiti da se vodiči svakog namota međusobno privlače, ali i da se primarni i sekundarni namot međusobno odbijaju, jer kroz njih u istom trenutku protjeće struje suprotnog smjera (sl. 51).



Sl. 51. Djelovanje sile na namote kroz koje protjeće struja

Točan proračun sile na pojedine vodiče, svitke i namote provodi se danas najčešće tako da se na mjestu svakog pojedinog vodiča računa indukcija koja je rezultat struja u svim ostalim vodičima i utjecaja željezne jezgre, kotla i sl. te se na osnovi tako dobivene indukcije i struje u promatranom vodiču, u skladu s izrazom (90), određuje sila na taj vodič. Sile na dijelove namota (svitke) i cijele namote dobivaju se zbrajanjem pojedinih sila na vodiče. Tada se, dakako, moraju uzeti u obzir smjerovi sile. Takav način računa praktički je moguć samo pomoću elektroničkih računala.

Prikidan je način određivanja sile na osnovi Lagrangeova teorema, prema kojem je sila jednaka derivaciji energije sustava u promatranom smjeru. Sile su u transformatoru posljedica struja u namotima koje uzrokuju i rasipno magnetsko polje u području namota. Derivacijom magnetske energije rasipnog polja u aksijalnom i radikalnom smjeru dobit će se aksijalna i radikalna sila na namote. Energija rasipnog polja para namota već je izračunana prilikom određivanja rasipnog induktiviteta L_σ i iznosi

$$A_\sigma = \frac{1}{2} i^2 L_\sigma = \frac{1}{2} i^2 N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma} \delta_r. \quad (91)$$

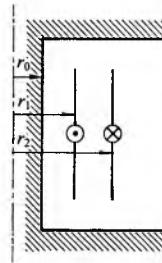
Radikalna je sila prema tome

$$F_r = \frac{\partial A_\sigma}{\partial \delta_r} = \frac{1}{2} i^2 N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma^2} \delta_r, \quad (92)$$

a aksijalna sila na namote slijedi iz izraza

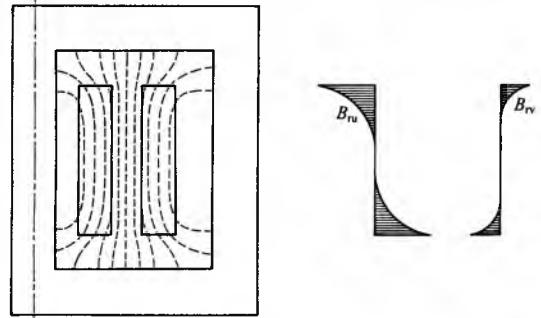
$$F_a = \frac{\partial A_\sigma}{\partial l_\sigma} = \frac{1}{2} i^2 N^2 \mu_0 \frac{D_s \pi}{l_\sigma^2} \delta_r = -F_r \frac{\delta_r}{l_\sigma}. \quad (93)$$

Sila F_a ukupna je aksijalna sila na oba namota. Njezin veći dio obično otpada na namot bliži jezgri koja privlači magnetske silnice. Zbog toga se povećava radikalna komponenta magnetske indukcije u području tog namota, a time i aksijalna komponenta sile na njegove vodiče. Što su namoti više udaljeni od stupa jezgre, razlika između aksijalne sile na unutrašnji i vanjski namot sve je manja. Opisani utjecaj pokazuje dijagram na slici 52.



Sl. 52. Udio aksijalne sile na vanjski namot F_{av} u ukupnoj aksijalnoj sili na namote F_a

Izrazi (92) i (93) vrijede za simetrično postavljene koncentrične namote jednake visine, za koje je i računana magnetska energija A_σ . U takvim uvjetima radikalna sila F_r tlači unutrašnji i razvlači vanjski namot, dok aksijalna sila F_a tlači oba namota. Aksijalna sila na pojedine vodiče najveća je na krajevima i smanjuje se prema sredini namota, kako se smanjuje i radikalna komponenta indukcije (sl. 53). Najveće je naprezanje izolacije u sredini visine namota, gdje aksijalna sila na vodiče mijenja smjer i gdje se zbrajaju aksijalne sile na sve vodiče jedne polovice namota. U tom je primjeru zbroj aksijalnih sila po cijeloj visini namota jednak nuli, i to zato što su težišta amperzavoja obaju namota u istoj visini.



Sl. 53. Radikalna komponenta magnetske indukcije na mjestu unutrašnjeg B_{ru} i vanjskog namota B_{rv}

Ako se ta ravnoteža poremeti tako da se npr. vanjski namot aksijalno pomakne za iznos Δ (sl. 54 a), pojavit će se dodatna aksijalna sila između namota, koja je to veća što je pomak Δ veći. Iznos te sile računa se prema izrazu

$$F_{ad1} = F_r \frac{2\Delta}{b} \left(1 - \frac{\Delta}{2l} \right) \frac{K_{R2}}{K_{R1}}, \quad (94)$$

gdje su $K_{R1} = l/l_\sigma$ i $K_{R2} = b/b_\sigma$ koeficijenti Rogowskog za izračunavanje srednje duljine aksijalnih i radikalnih magnetskih silica (izrazi 59 i 65). Sličan efekt nastaje i ako je jedan namot kraći za Δ kao na slici 54 b, a može nastati i ako su namoti jednakov visoki, ali se zbog regulacije napona isključi dio zavoja na kraju namota. Dodatna se aksijalna sila tada računa prema izrazu

$$F_{ad2} = F_r \frac{\Delta}{b} \cdot \frac{K_{R2}}{K_{R1}}. \quad (95)$$

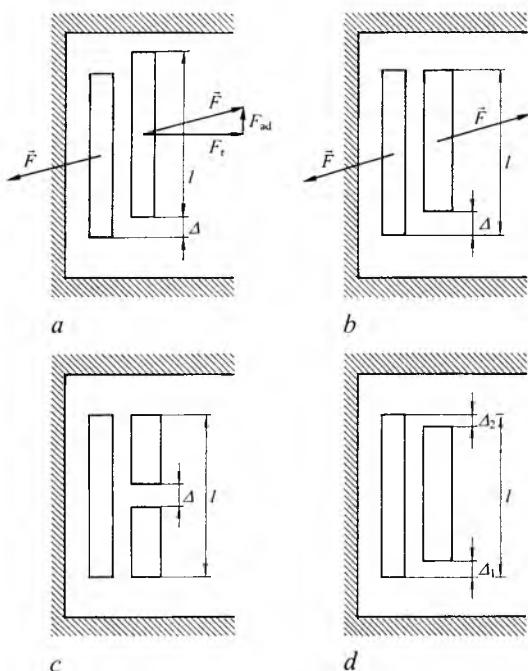
Ako su namoti jednakove visine, ali se zbog regulacije napona isključuje dio namota u sredini jednog od namota, kao na slici 54 c, dodatna se aksijalna sila na taj namot opire osnovnoj aksijalnoj sili prema izrazu (93) i nastoji dijelove tog namota kojima protjeće struja potisnuti prema jarmu. Iznos te dodatne aksijalne sile računa se prema izrazu

$$F_{ad3} = F_r \frac{\Delta}{4b} \cdot \frac{K_{R2}}{K_{R1}}. \quad (96)$$

Kad je jedan od namota kraći i pritom nesimetrično postavljen prema drugom namotu, kao na slici 54 d, dodatna aksijalna sila između namota iznosi

$$F_{\text{ad}4} = F_r \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{b} \cdot \frac{K_{R2}}{K_{R1}}. \quad (97)$$

U normalnim uvjetima rada, pri nazivnoj struci, te su sile bez većeg značenja, ali budući da se povećavaju s kvadratom trenutne vrijednosti struje, njihov iznos postaje znatan kad nastane kratki spoj i osobito ako se u struji kratkog spoja pojavljuje aperiodički član.



Sl. 54. Medusobni položaj unutrašnjeg i vanjskog namota. a) namoti jednakih visina pomaknuti aksijalno za Δ , b) jedan namot kraći za Δ , c) vanjski namot s neuključenim regulacijskim svitcima (u sredini), d) jedan namot kraći i aksijalno nesimetrično postavljen

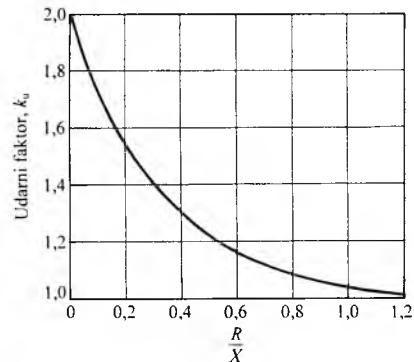
Za maksimalni iznos sile mjerodavnina je udarna struja kratkog spoja I_u , koja je u najnepovoljnijem slučaju praktički jednaka zbroju amplitude simetrične komponente struje kratkog spoja i vrijednosti aperiodičkog člana struje kratkog spoja u trenutku $t_i = 1/2f_n$, a računa se prema izrazu

$$I_u = k_u \sqrt{2} I_k, \quad (98)$$

gdje je I_k efektivna vrijednost simetrične komponente struje kratkog spoja, a k_u udarni faktor prema dijagramu na slici 55. Udarni se faktor računa iz izraza

$$k_u = 1 + \exp\left(-\frac{1}{2fT}\right) = 1 + \exp\left(-\frac{\pi R}{X}\right), \quad (99)$$

gdje je R djelatni otpor, X reaktancija kratko spojenog dijela mreže, a T vremenska konstanta kratko spojenog dijela mreže, koja iznosi $0,04 \cdots 0,2$ s, što u mrežama nazivne frekvencije 50 Hz odgovara omjeru R/X od $0,08 \cdots 0,016$.



Sl. 55. Ovisnost udarnog faktora k_u o omjeru R/X kratko spojenoga kruga

Otpornost transformatora na sile u kratkom spoju provjerava se tipskim ispitivanjem u skladu s normama IEC. Da bi transformator bio otporan na sile u kratkom spoju, potrebno je što točnije izračunati sile na namote i naprezanja u namotima i steznom sustavu, te na osnovi toga namote i stezni sustav adekvatno dimenzionirati i učvrstiti.

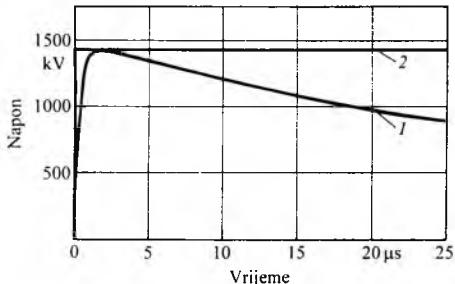
Prenaponi. U pogonu je transformator povremeno izložen prenaponima atmosferskog i sklopog podrijetla. *Atmosferski prenaponi* posljedica su atmosferskih izbijanja. Na vodu koji se nalazi u elektrostatičkom polju između električki nabijenog oblaka i tla akumulira se električni naboј koji je s naboјem oblaka vezan privlačnim elektrostatičkim silama. Količina tako vezanog naboјa proporcionalna je jakosti elektrostatičkog polja u kojem se vod nalazi. Pri izboju oblaka prema tlu ili drugom oblaku, elektrostatičko polje naglo slabiti, dio se naboja oslobađa i razilazi, stvarajući tako dva vala koja putuju vodom u suprotnim smjerovima i na putu nailaze na električnu opremu kao što su izolatorski lanci i iskrila na njima, odvodnici prenapona, mjerni transformatori, električni sklopni aparati, transformatori i sl. Dogada se i neposredni izboj iz oblaka u dalekovod. Tada se najčešće radi o većim energijama nego u prethodno opisanom primjeru, a to na istom dalekovodu znači da su veći i prenaponi. Dakevod, međutim, ima svoju izolacijsku razinu pa se preveliki naponi ne mogu na njemu održati. Nastaje izboj preko iskrila na izolatorskim lancima, prorate odvodnici prenapona, pa dalekovodom ubrzano putuje val koji odgovara izolacijskoj razini dalekovoda. To znači da očekivana naponska razina vala ovisi o izolacijskoj razini dalekovoda i da je bitno niža na dalekovodu 110 kV nego na dalekovodu 400 kV, iako se nalaze u jednakim atmosferskim uvjetima i na istom terenu.

Promatranje i mjerjenje prenapona atmosferskog podrijetla rezultiralo je dogovorom o obliku i iznosu ekvivalentnoga naponskog impulsa, poznatog pod nazivom *udarni napon*, kojim treba ispitivati svaki tip transformatora kako bi se dokazala njegova otpornost na atmosferske prenapone. Karakteristike tog oblika su strmo čelo i blagi hrbat. Čelo vala τ_1 vrijeme je potrebno da val dostigne maksimalni iznos ili tjeme vala, a hrbat vala τ_2 vrijeme je za koje se trenutna vrijednost od tjemene smanji na polovicu. Čelo i hrbat vala jednaki su za sve naponske razine i iznose $\tau_1 = 1,2 \mu\text{s}$ i $\tau_2 = 50 \mu\text{s}$. Tjemene vrijednosti su normirane i uskladene s podnosivim naponima industrijske frekvencije i najvišim naponima opreme. U tablici 2 navedene su vrijednosti podnosivih izmjeničnih i udarnih naponi za najviše napone opreme do $U_m = 420 \text{ kV}$, prema normama IEC za transformatore.

Tablica 2
PODNOŠIVI NAPON

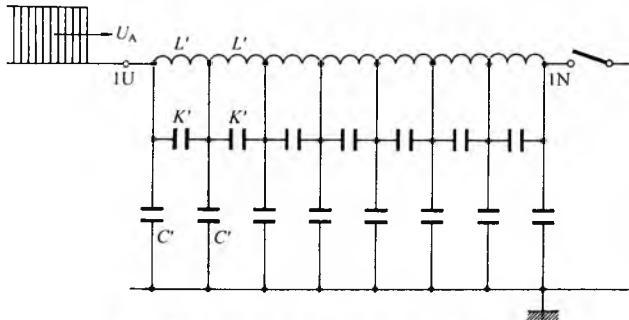
Najviši napon opreme U_m kV	Podnosivi napon industrijske frekvencije kV	Podnosivi udarni napon kV
3,6	10	40
7,2	20	60
12	28	75
24	50	125
36	70	170
123	185	450
	230	550
245	360	850
	395	950
420	570	1300
	630	1425

Normirani oblik vala tjemene vrijednosti 1425 kV pokazuje slika 56. Pojave u namotima prilikom nailaska atmosferskog vala na transformator relativno su složene, jer je složen i val (sadrži širok spektar frekvencija) i mreža induktiviteta, međuinduktiviteta, kapaciteta i djelatnih otpora kojom namot treba nadomjestiti, ako se želi točno računati. Da bi se dobila jasnija slika o tim pojavama, treba pojednostaviti i oblik vala i nadomjesnu mrežu. S obzirom na strmo čelo i relativno dug hrbat standardnog vala, bit će pojave neće znatno promijeniti ako se standardni val nadomjesti naponom oblika jedinične funkcije ili istosmjernim napo-



Sl. 56. Usporedba udarnog vala 1425 kV, 1,2/50 μs (1) i vala oblika jedinične funkcije (2)

nom (sl. 56). Za istu se svrhu složena nadomjesna shema namota može prikazati ekvivalentnim induktivitetom i mrežom uzdužnih i poprečnih kapaciteta (sl. 57). Kada na takvu konfiguraciju nađe



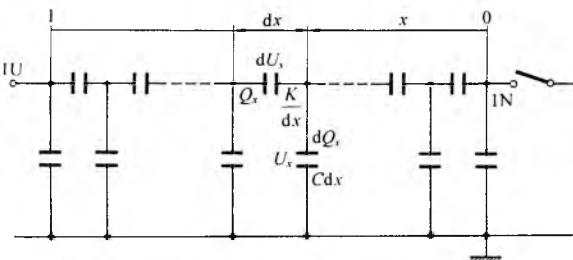
Sl. 57. Pojednostavljena nadomjesna shema namota

val oblika jedinične funkcije, induktivitet u prvom trenutku ne dopušta nikakvu struju i val ga ne osjeća, a mreža se kapaciteta nabija trenutno (vremenska je konstanta jednak nuli, jer su zanemareni radni otpori). Tako nastaje *početna raspodjela* prenapona uzduž namota, diktirana mrežom i iznosima vlastitih kapaciteta namota, koja će ovisiti i o tome je li nultočka namota uzemljena ili izolirana. Ako se kapacitivna mreža namota jedinične duljine zamisli sastavljenom od beskonačno malih elemenata duljine dx , za elementarne poprečne i uzdužne kapacitete C_e i K_e vrijede izrazi

$$C_e = C dx, \quad (100)$$

$$K_e = \frac{K}{dx}, \quad (101)$$

gdje je C ukupni poprečni, a K ukupni uzdužni kapacitet namota jedinične duljine. Za napon U_x na udaljenosti x od kraja namota



Sl. 58. Kapacitivna shema namota i njezin element duljine dx

(sl. 58) i za diferencijal napon dU_x na elementu duljine dx , mogu se napisati relacije

$$U_x = \frac{dQ_x}{C dx}, \quad (102)$$

$$dU_x = \frac{Q_x}{K dx}, \quad (103)$$

iz kojih slijedi da je

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = \frac{C}{K} U_x. \quad (104)$$

Rješenje jednadžbe (104) izraz je za raspodjelu napona uzduž namota jedinične duljine. Ako je narinuti napon oblika jedinične funkcije i amplitude U_A , onda se, već prema tome je li nultočka uzemljena ili izolirana, za početnu raspodjelu napona dobivaju sljedeće relacije:

s uzemljom nultočkom

$$\frac{U_x}{U_A} = \frac{\sinh \alpha x}{\sinh \alpha}, \quad (105)$$

s izolirom nultočkom

$$\frac{U_x}{U_A} = \frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha}, \quad (106)$$

Koefficijent α iznosi

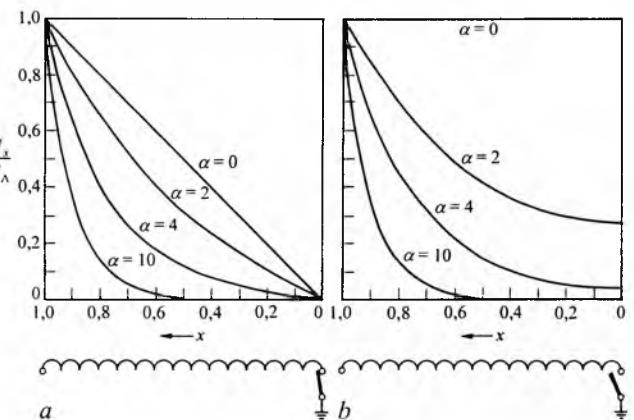
$$\alpha = \sqrt{C/K}. \quad (107)$$

Budući da je

$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[\frac{\sinh \alpha x}{\sinh \alpha} \right] = x, \quad (108)$$

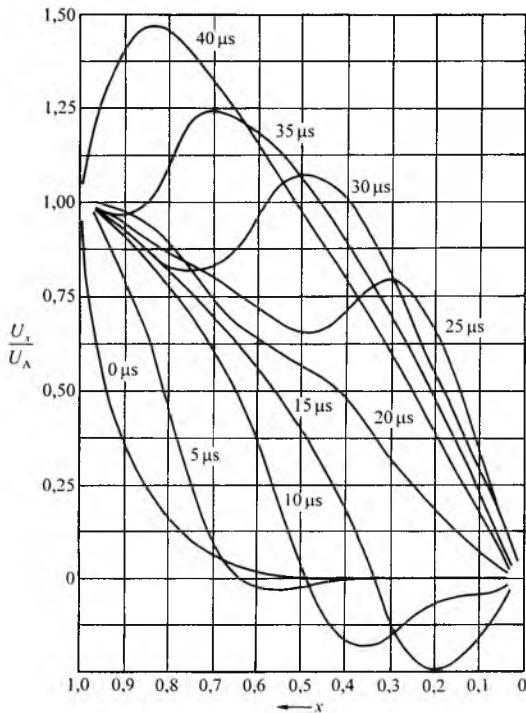
$$\lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[\frac{\cosh \alpha x}{\cosh \alpha} \right] = 1, \quad (109)$$

slijedi da je početna raspodjela napona, za $\alpha=0$, u uzemljenoj namoti linearna ($U_x/U_A=x$), a u izoliranoj namoti konstantna ($U_x/U_A=1$). Kad je $\alpha \geq 3$, početne se raspodjele u uzemljenoj i izoliranoj namoti praktički ne razlikuju. Dijagrame tih početnih raspodjela napona u uzemljenoj i neuzemljenoj namoti, uz različite iznose koeficijenta α , pokazuju slika 59.



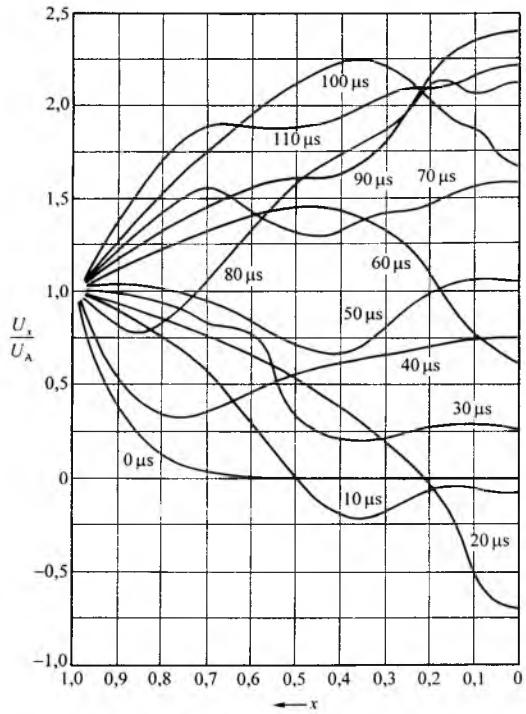
Sl. 59. Početna raspodjela napona u uzemljenoj namoti (a) i u namotu s izoliranim nultočkom (b) za različite vrijednosti koeficijenta α

Početna raspodjela napona mjerodavna je za dalji tijek pojave u namotu. Nabijeni se kapaciteti izbjiju preko induktiviteta i tako u namotu nastaju titranja, koja se postupno prigušuju i pojava prelazi u stacionarno stanje. U uzemljenoj namoti u stacionarnom stanju raspodjela je napona oblika jedinične funkcije linearne. Diktiraju je djelatni otpori namota. Ako je nultočka namota izolirana, cijeli namot dobiva narinuti napon U_A , tj. stacionarno je stanje u oba primjera jednak početnoj raspodjeli kad je $\alpha=0$. Budući da je prijelazna pojava proces između početnog i stacionarnog stanja, nema prijelazne pojave u namotu kad je $\alpha=0$. Zato je važno postići što manji koeficijent α . Odatile slijedi i zaključak da će prijelazna pojava biti to burnija što je razlika između početne i konačne raspodjele veća. Slike 60 i 61 pokazuju raspodjelu napona u različitim trenutcima uzduž namota s uzemljenoj i s izoliranoj nultočkom. Može se zapaziti da je u početnoj raspodjeli najveći gradijent napona na ulaznom dijelu namota, te da se tijekom prijelazne pojave relativno veliki gradijenti napona mogu pojaviti i na drugim mjestima. Pojačanjem izolacije između zavoja ne rješava se problem otpornosti namota prema prena-



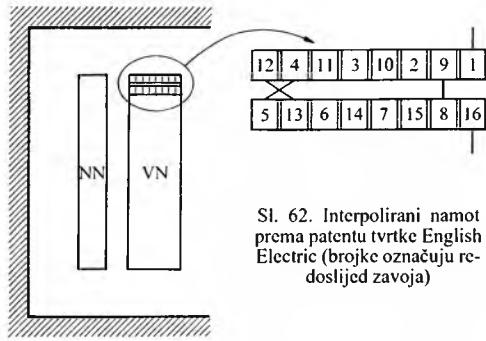
Sl. 60. Raspodjela napona (oblika jedinične funkcije) u uzemljrenom namotu, u rasponu od početne raspodjelje ($t=0$) do $t = 40 \mu s$ za $\alpha = 10$

ponima atmosferskog podrijetla, jer se tako ujedno smanjuje uzdužni kapacitet K , a povećava koeficijent α i pogoršava početna raspodjela prenapona. Rješenje je u povećanju uzdužnoga kapaciteta K . Ima više načina da se to postigne, a najpoznatiji je i najviše se primjenjuje interpolirani (engl. interleaved) namot



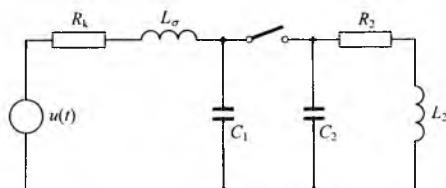
Sl. 61. Raspodjela napona (oblika jedinične funkcije) u namotu s izoliranom nultočkom, u rasponu od početne raspodjelje ($t=0$) do $t = 110 \mu s$ za $\alpha = 10$

prema patentu tvrtke English Electric (sl. 62), kojim se postiže višestruko povećanje uzdužnoga kapaciteta K , pa i smanjenje koeficijenta α . Takav namot zahtijeva osjetno više rada, pa se u praksi primjenjuje samo kad je to prijeko potrebno, odnosno za namote nazivnog napona 400 kV i više.



Sl. 62. Interpolirani namot prema patentu tvrtke English Electric (brojke označuju redoslijed zavoja)

Sklopni prenaponi zapravo su prijelazne pojave u mreži koje nastaju pri prijelazu između dva stanja, nakon isklapanja i uklanjanja sklopnih aparata u normalnim i havarijskim uvjetima. Svaka konfiguracija mreže ima, naime, u svakom trenutku odgovarajući raspored akumulirane energije: električne (u kapacitetima), magnetske (u induktivitetima) i mehaničke (u masama rotirajućih dijelova). Svakoj novoj konfiguraciji, bilo da je ona posljedica namjerno sklopne operacije ili slučaja, odgovara novi raspored akumulirane energije pa nužno nastaje pretvorba energije popraćena titravnim procesom. Posljedica su sklopni prenaponi, jer svaka pretvorba magnetske energije u električnu znači akumulaciju električne energije na nekom kapacitetu, a to nužno znači povećanje napona na njemu. Isto je tako promjena magnetske energije u nekom induktivitetu nužno praćena prenaponom na njemu, proporcionalnom iznosu induktiviteta i intenzitetu promjene struje. Novoj konfiguraciji u promatranom trenutku može odgovarati više ili manje elektromagnetske energije. Razlika se nadoknađuje iz mehaničke energije sustava ili se u nju vraća, pri čemu nužno nastaju gubitci i pojavi se prigušuje. Nastajanje sklopog napona može se uočiti na jednostavnom primjeru isključivanja prigušnice priključene na transformator (sl. 63).



Sl. 63. Nadomjesna shema transformatora opterećenog prigušnicom (za računanje sklopnih prenapona)

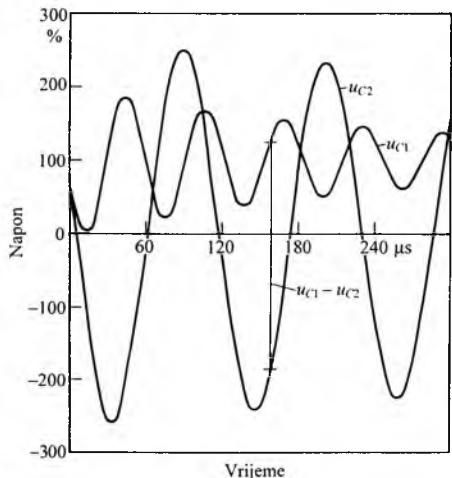
Transformator je nadomješten rasipnim induktivitetom L_σ , nadomjesnim djelatnim otporom transformatora R_k i kapacitetom sekundarnog namota prema tlu C_1 , a prigušnica njezinim induktivitetom L_2 , djelatnim otporom R_2 i nadomjesnim kapacitetom C_2 . Dok je prigušnica bila uključena, napon na izlazu iz transformatora bio je niži od napona izvora za pad napona na impedanciju kratkog spoja transformatora Z_k . Otvaranjem prekidača, od jednog strujnog kruga nastaju dva nezavisna strujna kruga povezana samo zajedničkom prošlošću, iz koje slijede početni uvjeti za prijelazne pojave koje će završiti novim stacionarnim stanjem u oba kruga. Te su prijelazne pojave zapravo sklopni naponi koji mogu dobiti i takve iznose da ugroze izolaciju transformatora, odnosno prigušnice. Njihova se razlika pojavljuje na prekidaču i može uzrokovati probaj između njegovih kontakata ili vanjski preskok. Za napone na kapacitetima C_1 i C_2 nakon prekida strujnog kruga vrijedi relacija

$$u_{C(t)} = u_{C(s(t))} + (\Delta u_0 \cos vt + \Delta i_0 \sqrt{\frac{L}{C}} \sin vt) \exp(-t/T), \quad (110)$$

gdje je $u_{C(s(t))}$ trenutna vrijednost stacionarnog napona na kapacitetu, Δu_0 razlika trenutne vrijednosti napona na kapacitetu neposredno prije otvaranja prekidača ($t=0$) i vrijednosti $u_{C(s(0))}$, Δi_0 trenutna vrijednost struje kroz prekidač u trenutku otvaranja (odrezana struja), $\sqrt{L/C}$ valni otpor kruga, $v = 1/\sqrt{LC}$, a $T (= 2L/R)$ vremenska konstanta kruga.

Osobito visoki sklopni prenaponi mogu nastati u krugu visokoga valnog otpora ako odrezzana struja ima veliku vrijednost.

Slika 64 pokazuje napon na sekundarnoj strani transformatora, napon na prigušnici i njihovu razliku koja se pojavljuje na kontaktima prekidača, pri prekidu struje prije prolaska kroz nulu. Za razliku od atmosferskog preprijenona koji dolazi izvana, sklopni preprijona nastaje u transformatoru, prigušnici i ostalim dijelovima mreže, ponajviše zbog viška magnetske energije u strujnom krugu. Zbog toga sklopni napon manje ugrožava unutrašnju izolaciju transformatora i prigušnice, a češće uzrokuje preskoke prema masi i uzemljjenim dijelovima. Frekvencija sklopog preprijona ovisi o parametrima strujnih krugova u kojima preprijona nastaje. Najčešće se susreću vrijednosti od nekoliko desetaka kiloherca.



Sl. 64. Sklopni preprijoni na sekundarnoj strani transformatora (u_{C1}), na prigušnici (u_{C2}) i na prekidaču nakon isključenja prigušnica ($u_{C1} - u_{C2}$)

Provjera otpornosti na sklopne preprijone predviđa se, u skladu s normom IEC (76-3), samo za transformatore najvišeg napona opreme $U_{max} \geq 300 \text{ kV}$, ako se to ugovori prilikom naručivanja transformatora. Oblik je ispitnog vala normiran kao i atmosferski ispitni val s trajanjem čela vala τ_1 od $250 \mu\text{s}$ i hrpta vala τ_2 od $2000 \mu\text{s}$. Iznos podnositve vrijednosti sklopog napona odbire se u skladu s najvišim naponom opreme prema normama IEC. Tako se, npr., transformator građen za najviši napon opreme $U_{max} = 420 \text{ kV}$ ispituje podnositivim sklopnim naponom od 950 kV ili 1050 kV , već prema dogovoru između kupca i proizvođača. Niža se razina može izabrati samo ako je transformator djelotvorno zaštićen odvodnicima preprijona.

Ispitivanje podnositivim udarnim naponima (atmosferskim i sklopnim) provodi se u visokonaponskim ispitnim stanicama pomoću udarnoga generatora.

LIT.: L. F. Blum, Transformer Engineering, John Wiley and Sons, New York 1951. – M. Vidmar, Die Transformatoren, Verlag Birkhäuser, Basel 1956. – M. I. T. Staff, Magnetic Circuits and Transformers, Cambridge, Massachusetts 1965. – E. Slamecka, Schaltvorgänge in Hoch- und Niederspannungsnetzen, Siemens AG, Berlin 1972. – T. Bosanac, Teoretska elektrotehnika, Tehnička knjiga, Zagreb 1973. – E. Jezierski, Transformatory, WNT, Warszawa 1975. – A. Dymkov, Transformer Design, Mir Publishers, Moscow 1975. – B. Hochart, Power Transformer Handbook, Butterworths, London 1987. – A. Dolenc, Transformatori, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 1991.

T. Kelemen

TRANSFORMATOR IMPEDANCIJE ili mreža za transformaciju impedancije, četveropolni sklop za pretvorbu impedancije trošila u impedanciju koja će biti najpovoljnija za određenu vrstu primjene (v. Elektrotehnika, TE 5, str. 135). Transformatori impedancije služe za međusobno prilagođavanje električnih izvora, vodova, sklopova i trošila, pa se često upotrebljavaju u visokofrekvenčkoj tehnici. Oni se većinom bitno razlikuju od energetskih transformatora (v. Transformator). Pri pri-

jenusu signala u pojedinim se primjenama osobita pozornost daje kojem od sljedećih uvjeta: prijenos snage, smanjenju refleksije, smanjenju šuma, širini frekvencijskog pojasa i dr.

Neki transformatori impedancije uz osnovnu funkciju obavljaju i tzv. simetriiranje, tj. prilagođuju nesimetrične izvore, vodove, sklopove i trošila na simetrične, ili obratno, simetrične na nesimetrične.

Kao transformatori impedancije upotrebljavaju se sklopovi zavojnica, kondenzatora i otpornika, vodovi određenih impedancija i duljina te posebni spojni elementi valovoda.

Temeljna svojstva transformatora impedancije. Za najveći prijenos snage impedanciju trošila valja pretvoriti u impedanciju koja je s obzirom na impedanciju generatora konjugirano kompleksna. Snaga koja se pritom predaje trošilu jest raspoloživa snaga generatora. Za prijenos bez refleksije impedancije trošila i generatora moraju biti jednake, a za prijenos s minimalnim šumom u pojačalima impedancija generatora treba biti jednak najboljoj impedanciji za šum s kojom treba zaključiti ulaz pojačala. Ta je impedancija svojstvena svakom pojačalu. Osim pretvorbe impedancije, važno su svojstvo mreža za transformaciju maleni gubitci pri prijenosu i frekvenčni opseg. Frekvenčni se opseg definira prema vrsti primjene. Širina pojasa za snagu određena je donjom i gornjom graničnom frekvencijom pri kojoj se transformirana impedancija toliko promjeni da je snaga koju ona troši jednak polovici raspoložive snage. Širina pojasa s obzirom na refleksiju ograničava se najvećim dopuštenim omjerom stojnog vala ili najvećim dopuštenim koeficijentom refleksije (v. Elektronika, Sklopovi i sastavni dijelovi za mikrovalnu tehniku, TE 4, str. 569). Najveći dopušteni omjer stojnog vala ovisi o primjeni te iznosi 1,05 za precizna mjerena, 1,25 za obične sklopove, do najviše 2 za antene. Širina pojasa za šum određena je donjom i gornjom graničnom frekvencijom pri kojoj se, zbog promjene impedancije priključene na ulaz pojačala, faktor šuma udvostruči.

PRAVILA I OGRANIČENJA PRI TRANSFORMACIJI IMPEDANCIJE

Da bi se utvrdili elementi četveropola za transformaciju impedancije u zadanom frekvenčnom opsegu, potrebno je prvo provjeriti je li uopće moguće s pasivnim elementima (zavojnicom, kondenzatorom, odsječkom linije i eventualno otpornikom) ostvariti takav četveropol. Naime, na ulazu četveropola nije moguće ostvariti bilo kakvu impedanciju u ovisnosti o frekvenciji, već je ona podvrgnuta određenim ograničenjima koja jamče ostvarivost zahtijevanog četveropola.

Cetveropol za transformaciju pasivna je mreža i za nju vrijede određena pravila. Ako se *ulazna impedancija* četveropola shvati kao racionalna funkcija kompleksne frekvencije s realnim koeficijentima (v. Elektročni krugovi, TE 4, str. 60), onda se za impedanciju u ravnni kompleksne frekvencije postavljaju sljedeći zahtjevi: 1) polovi i nule su ili realni ili se pojavljuju u konjugiranoj kompleksnim parovima, 2) polovi i nule ne mogu se pojaviti u desnoj poluravnini, 3) ako na imaginarnoj osi kompleksne frekvencije (odgovara stvarnim frekvencijama) postoje nule i polovi, oni moraju biti jednostruki, 4) realna, odnosno imaginarna komponenta impedancije za stvarne je frekvencije parna, odnosno neparna funkcija, 5) realna komponenta impedancije ne može biti negativna za stvarne frekvencije.

Osim toga, za prijenosnu funkciju četveropola (v. Telekomunikacije, radiokomunikacije, TE 12, str. 581), koji je za mrežu za transformaciju impedancije linearan i pasivan, vrijede također određena pravila. Budući da je pasivna mreža uvek stabilna, odziv na izlazu pojavit će se tek pošto se pojavila uzbudba na ulazu, odnosno odziv na izlazu težit će nuli ako je prošlo dovoljno vremena pošto je uzbudba nestala. Prema tome, može se za područje stvarnih frekvencija (imaginarna komponenta kompleksne frekvencije) matematički dokazati da je za zadatu realnu komponentu prijenosne funkcije jednosmisleno određena imaginarna komponenta, a vrijedi i obratno. Prema tome, ako se želi odrediti prijenosna funkcija, dovoljno je zadati samo realnu ili samo imaginarnu komponentu za sve frekvencije od minus do plus beskonačno. Prijenosna je funkcija jednosmisleno određena i onda kada je za određeni frekvenčni opseg zadana realna komponenta, a za ostatak spektra imaginarna. Moguće je postaviti i