

Autori

prof. dr. sc. Damir Žarko
dr. sc. Branimir Čučić

Nakladnik

Graphis d.o.o.,
Maksimirska 88, Zagreb

Recenzenti

prof. dr. sc. Zlatko
Maljković
dr. sc. Antun Mikulecky
prof. dr. sc. Zvonimir
Valković

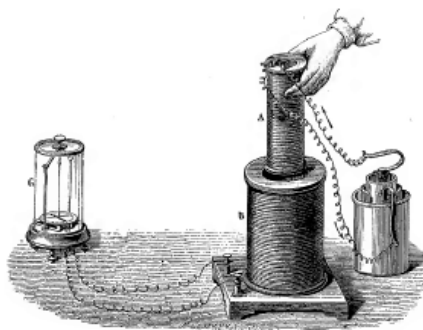


1. Uvod

1. UVOD

Transformatori su uređaji koji na principu elektromagnetske indukcije pretvaraju električnu energiju iz jednog izmjeničnog sustava u drugi iste frekvencije, ali promijenjene vrijednosti napona i struja. U pravilu se sastoje od željezne magnetske jezgre, dva ili više namota koji mogu biti spregnuti samo zajedničkim elektromagnetskim poljem, a u slučaju autotransformatora i električki, te od raznih konstrukcijskih dijelova kao što su stezni sustav jezgre i namota, kotao, konzervator, hladnjaci, itd.

Razvoj transformatora tekao je postepeno još od 1831. godine kada je Michael Faraday otkrio princip elektromagnetske indukcije. Eksperiment koji potvrđuje taj princip prikazan je na slici 1.1. preuzet iz udžbenika o elektricitetu iz 19. stoljeća [1]. Svitak napajan iz baterije uvlači se ili izvlači iz šupljeg svitka na čije krajeve je priključen galvanometar. Zbog promjene magnetskog toka izazvane pomakom manjeg svitka, u većem



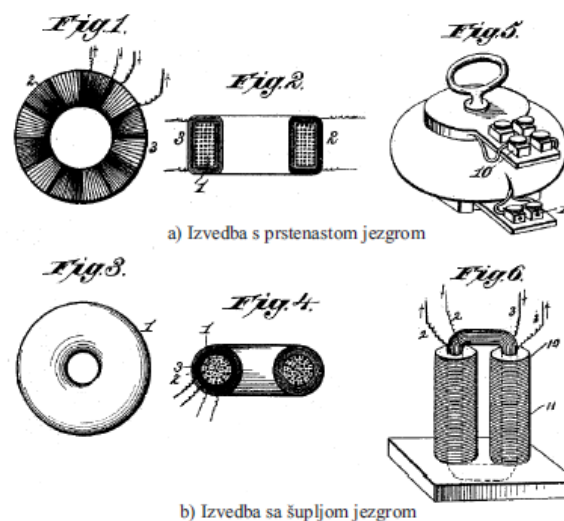
Sl. 1.1. Skica eksperimenta M. Faradaya koji dokazuje princip elektromagnetske indukcije [1]

4 1. UVOD

svitku inducira se napon koji će potjerati struju kroz galvanometar i izazvati otklon njegove kazaljke.

Prvim komercijalno upotrebljivim transformatorom može se smatrati izum ruskog inženjera Pavla Jobločkova koji je 1877. godine izgradio sustav serijski povezanih zavojnica sa štapnom željeznom jezgrom. Na sekundarne svitke namotane oko iste jezgre priključio je „električne svijeće“ koje je izumio 1876. godine. Ovaj sustav koristio je za osvjjetljenje na pariškoj izložbi 1878. godine.

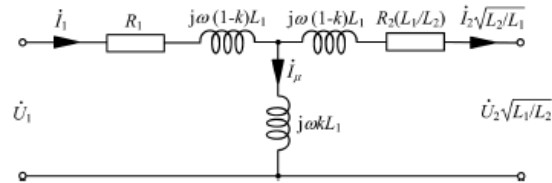
Nedostatak prvih transformatora bio je u tome što se koristila otvorena magnetska jezgra pa nije bilo moguće postići visoku magnetsku indukciju niti ostvariti učinkovitu pretvorbu energije na većim snagama. Između 1884. i 1885. godine inženjeri tvrtke Ganz and co. Károly Zipernowsky, Ottó Bláthy i Miksa Déri izumili su prvi transformator sa zatvorenom magnetskom jezgrom poznat kao „ZBD“ transformator nazvan po prvim slovima njihovih prezimena (slika 1.2.). Na prstenastu jezgru načinjenu od izolirane željezne žice namotali su po obodu zavojice primarnog i sekundarnog namota. Na taj način se magnetski tok koji ulančuje oba namota u potpunosti zatvara kroz željeznu jezgru linijom najmanjeg magnetskog otpora. Osim te izvedbe patentirali su i onu sa šupljom jezgrom od željezne žice kroz koju su prolazili međusobno izolirani bakreni vodiči oba namota. Ovi principi izvedbe magnetskoga kruga omogućili su razvoj transformatora visokog stupnja korisnosti i njihovu komercijalnu primjenu u prijenosu električne energije čime je ona postala dostupna širokim masama za potrebe osvjjetljenja, transporta i industrijske proizvodnje.



Sl. 1.2. Skice iz patente prijave ZBD transformatora [122]



2. Teorijske osnove transformatora



Sl. 2.36. T nadomjesna shema transformatora

$$a = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} = \sqrt{\frac{N_1^2}{R_{m1}}} = \frac{N_1}{N_2} \sqrt{\frac{R_{m2}}{R_{m1}}} \quad (2.169)$$

U literaturi je uobičajen odabir koeficijenta $a = N_1/N_2$ jer su u transformatoru sa željeznom jezgrom R_{m1} i R_{m2} praktički jednaki. U tom slučaju naponske jednačbe glase

$$\dot{U}_1 = I_1 R_1 + j\omega \left(L_1 - \frac{N_1}{N_2} L_{12} \right) I_1 + j\omega \frac{N_1}{N_2} L_{12} \left(I_1 - I_2 \frac{N_2}{N_1} \right), \quad (2.170)$$

$$-\frac{N_1}{N_2} \dot{U}_2 = I_2 \frac{N_2}{N_1} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 R_2 + j\omega \left[\left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 L_2 - \frac{N_1}{N_2} L_{12} \right] I_2 - j\omega \frac{N_1}{N_2} L_{12} \left(I_1 - I_2 \frac{N_2}{N_1} \right). \quad (2.171)$$

Izraz $L_1 - (N_1/N_2)L_{12}$ se, koristeći izraze iz odjeljka 2.2.3, može pisati u obliku

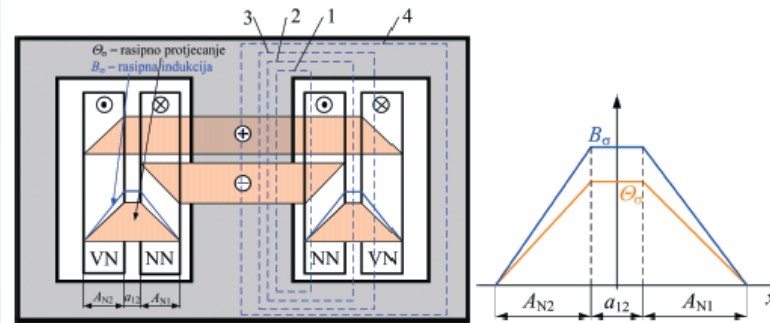
$$L_1 - \frac{N_1}{N_2} L_{12} = N_1 \frac{\Phi_{1e}}{i_1} - \frac{N_1}{N_2} \frac{\Phi_{21e}}{i_1} = \frac{N_1 (\Phi_{1e} - \Phi_{21e})}{i_1} = \frac{N_1 \Phi_{e1e}}{i_1} = L_{e1} \quad (2.172)$$

i predstavlja rasipni induktivitet namota primara. Slično se iz izraza $(N_1/N_2)^2 L_2 - (N_1/N_2)L_{12}$ može pokazati da on predstavlja rasipni induktivitet sekundarnog namota reduciran na primarnu stranu $(N_1/N_2)^2 L_{e2}$. U ovom slučaju omjeri transformacije glase

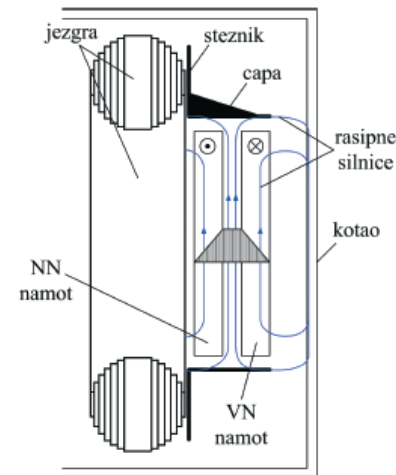
$$K_U = \frac{N_1}{N_2}, \quad K_I = \frac{N_2}{N_1}, \quad K_Z = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2.173)$$

pa su reducirane vrijednosti definirane izrazima

$$\frac{N_1}{N_2} U_2 = U'_2, \quad \frac{N_2}{N_1} I_2 = I'_2, \quad \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 Z_2 = Z'_2. \quad (2.174)$$



Sl. 2.51. Raspodjela protjecanja i magnetske indukcije u prozoru transformatora



Sl. 2.52. Bočni pogled na transformator s raspodjelom protjecanja i silnicama rasipnog polja

Izne linije pojednostavljuje se izračun magnetske indukcije u prozoru B_σ te ona postaje proporcionalna protjecanju Φ_σ . Bočni pogled na transformator sa silnicama rasipnog polja prikazan je na slici 2.52 gdje je vidljivo da se rasipno polje dijelom može zatvarati preko steznika i kotla.



3. Vrste, glavni dijelovi i grupe spoja transformatora



a)



b)

Sl. 3.1. a) Distribucijski i b) energetski transformator

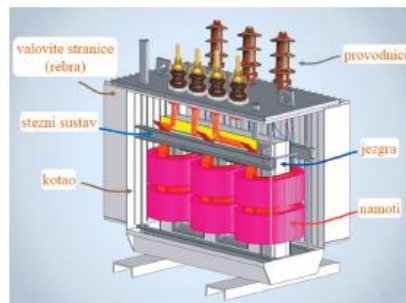
Prema izolacijskom i rashladnom sredstvu transformatori se dijele na:

- suhe (klasične suhe i zalivene),
- uljne (mineralno ulje i ostale rashladne tekućine).

3.2. Dijelovi transformatora

3.2.1. Aktivni dio

Glavni dijelovi uljnog distribucijskog i energetskog transformatora prikazani su na slici 3.2. Namoti, jezgra i stezni sustav kod distribucijskog te dodatno regulacijska sklopka kod energetskog transformatora čine aktivni dio. Aktivni dio okružen je uljem i nalazi se u



a)



b)

Sl. 3.2. Glavni dijelovi: a) distribucijskog transformatora i b) energetskog transformatora

Tablica 3.2. Najčešći spojevi namota trofaznih transformatora (grupe spoja)

Satni broj	Trofazni spojevi		
	Yy0	Dd0	Dz0
0			
6			
5			
1			



4. Oblici presjeka stupa i namota

$$S = \frac{D^2 \pi}{4} = \frac{d^2 \pi}{4} + d\delta = ab,$$

$$d = \frac{D}{\sqrt{1 + \frac{2}{\pi}}} \approx 0,7817D; \quad \delta = \frac{d}{2} = \frac{D}{2\sqrt{1 + \frac{2}{\pi}}} \approx 0,3909D,$$

$$a = \frac{d}{3} \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) = \frac{D}{3} \sqrt{1 + \frac{\pi}{2}} \approx 0,67D; \quad b = d + \delta = \frac{3}{2}d = \frac{3}{2} \frac{D}{\sqrt{1 + \frac{2}{\pi}}} \approx 1,1725D.$$

Odgovarajući opsezi su

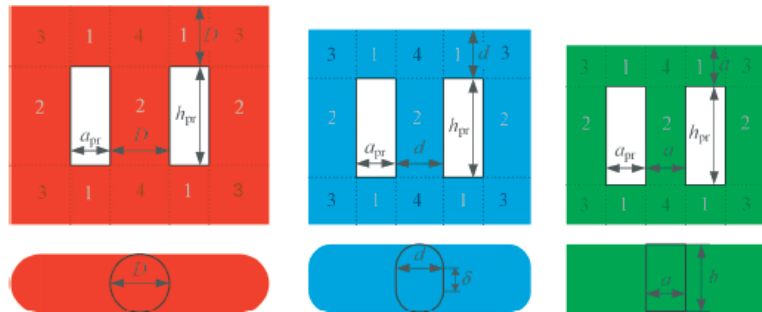
$$\begin{aligned} o_k &= D\pi \approx 3,1416D, \\ o_o &= d\pi + 2\delta \approx 3,2375D = 1,03o_k \quad (+3\%), \\ o_p &= 2(a+b) \approx 3,6848D = 1,17o_k \quad (+17\%), \end{aligned} \quad (4.2)$$

gdje se indeks k odnosi na kružni oblik, o na ovalni i p na pravokutni oblik. Sve karakteristične veličine izražene su kao funkcija promjera D kružnog oblika.

4.1. Usporedba idealno popunjenih jezgara s različitim oblicima presjeka stupa

4.1.1. Usporedba uz uvjet istog presjeka jezgre

Na slici 4.3 prikazana je usporedba jezgara s istom površinom poprečnog presjeka stupa i jarma S (istom indukcijom B), te istom visinom (h_{pr}) i širinom prozora (a_{pr}), a različitim oblicima poprečnog presjeka jezgre (okrugli, ovalni, pravokutni).



Sl. 4.3. Usporedba jezgara s različitim oblicima presjeka stupa (okrugli, ovalni, pravokutni)

Ovalna jezgra u odnosu na okruglu donosi uštede u dvije dimenzije (širina i visina), dok je u trećoj dimenziji (debljina) ovalna jezgra deblja od okrugle. Pravokutna jezgra u odnosu na ovalnu također donosi uštedu u dvije dimenzije (širina i visina), dok debljina ostaje ista. Osim ušteda u masi jezgre, dobivaju se uštede i u masi ulja i kotla, te se snižavaju gubici u jezgri.

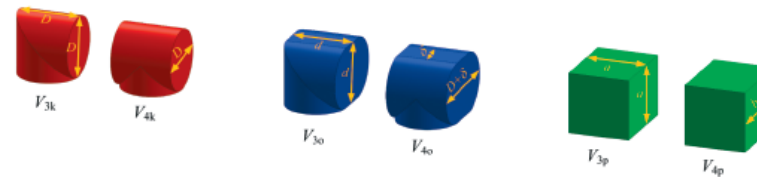
Na slici 4.3 brojevima 1 i 2 označeni su dijelovi jezgre bez spojnih mjesta (1-jaram, 2-stup), a brojevima 3 i 4 dijelovi jezgre u kojima se spajaju stup i jaram (spojna mjesta). To je bitno za izračun mase jezgre jer je volumen dijelova 1 i 2 isti u svim jezgrama bez obzira na oblik presjeka stupa. Dakle, masa jezgre sastoji se od fiksne mase dijelova jezgre bez spojnih mjesta (m_{112}) i promjenjive mase dijelova jezgre u spojnim mjestima (m_{134})

$$m_j = m_{112} + m_{134}. \quad (4.3)$$

Masa jezgre računa se prema izrazu

$$m_j = \gamma_{Fe} [S(4a_{pr} + 3h_{pr}) + 4V_3 + 2V_4], \quad (4.4)$$

gdje je γ_{Fe} gustoća magnetskih limova ($\gamma_{Fe} = 7650 \text{ kg/m}^3$), V_3 je volumen jednog vanjskog spojnog mjesta stupa i jarma, a V_4 je volumen jednog unutrašnjeg spojnog mjesta (slika 4.4).

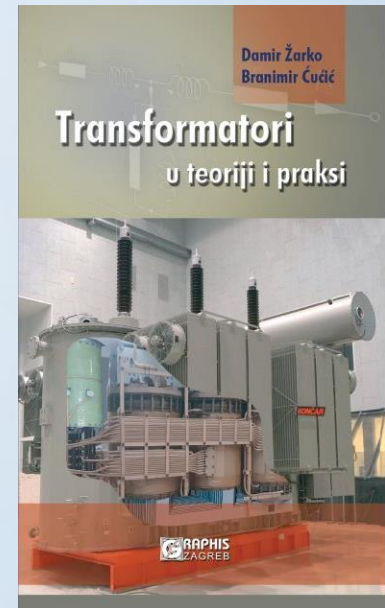


Sl. 4.4. Volumeni spojnih mjesta u jezgri (V_3 i V_4) za različite oblike presjeka

Volumen jednog vanjskog spojnog mjesta za kružni, ovalni i pravokutni oblik presjeka redom iznose

$$\begin{aligned} V_{3k} &= 2 \cdot \frac{D^2 \pi}{4} \cdot \frac{D}{2} = \frac{D^3 \pi}{4} \approx 0,7854D^3, \\ V_{3o} &= \frac{d^3 \pi}{4} + d^2 \delta = \frac{d^3}{2} \left(1 + \frac{\pi}{2}\right) \approx 1,2854d^3 \approx 0,6139D^3, \\ V_{3p} &= a^2 b = \frac{d^3}{6} \left(1 + \frac{\pi}{2}\right)^2 \approx 1,1015d^3 \approx 0,5261D^3. \end{aligned} \quad (4.5)$$

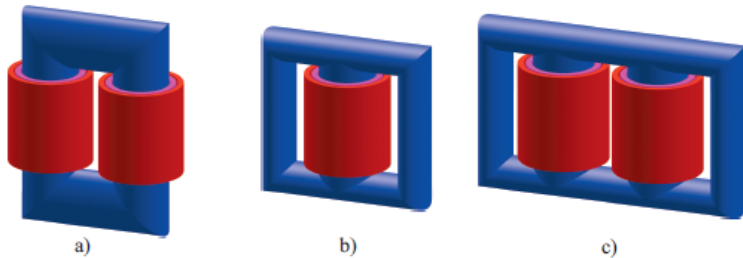
Volumen unutrašnjeg spojnog mjesta je



5. Jezgra i gubici praznog hoda

- 2) broju stupova
 - dvostupne
 - trostupne
 - četverostupne
 - peterostupne
- 3) izvedbi bez ili s povratnim stupom
 - jezgraste
 - ogrnute
- 4) načinu izvedbe
 - slagane
 - motane

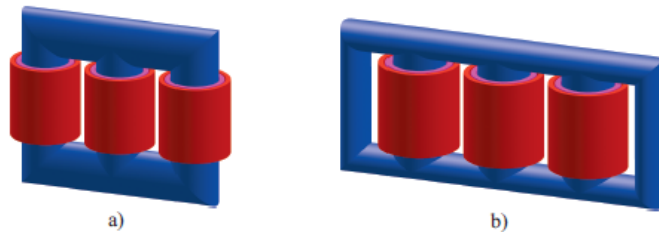
5.7.1. Izvedbe jednofaznih slaganih jezgara



SL 5.12. Izvedbe jednofaznih jezgara: a) dvostupna, b) trostupna i c) četverostupna

Na slici 5.12 su prikazani najčešći tipovi jednofaznih jezgara. Kod dvostupne jednofazne jezgre, stup i jaram imaju isti presjek, dok je kod trostupne i četverostupne inačice presjek dijelova jezgre koji služe za povrat magnetskog toka 1,7 – 1,8 puta manji od presjeka stupova na kojima su namoti. Inačica a) se još zove i jezgrasti tip (engl. *core type*), a inačice b) i c) ogrnuti tip (engl. *shell type core*).

5.7.2. Izvedbe trofaznih slaganih jezgara



SL 5.13. Izvedbe trofaznih jezgara: a) trostupna i b) peterostupna

Nakon toga slijedi proces uzdužnog rezanja bale lima. U primjeru na slici 5.15a bala se reže na sedam uzdužnih kolutova lima. Jedan uzdužno izrezani kolut lima prikazan je na slici 5.15b.

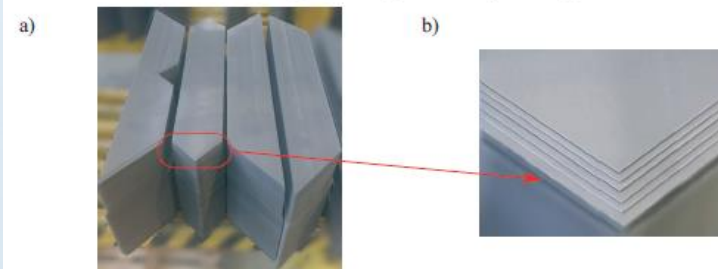


SL 5.15. a) Proces uzdužnog rezanja bale lima na kolutove i b) jedan uzdužno izrezani kolut lima

Nakon toga se uzdužno izrezani kolut stavlja na stroj za poprečno rezanje gdje se kolut razmatra (razvijen u ravninu postaje ravna traka) te se režu limovi za gornji i donji jaram, vanjske stupove i unutrašnji stup. To se ponavlja za svaku širinu paketa. Na slici 5.16 prikazano je poprečno rezanje trake lima gdje se sekvencijalno režu kombinacije jaram-stup. Nakon što se nareže potrebna debljina, prelazi se na rezanje srednjeg stupa.



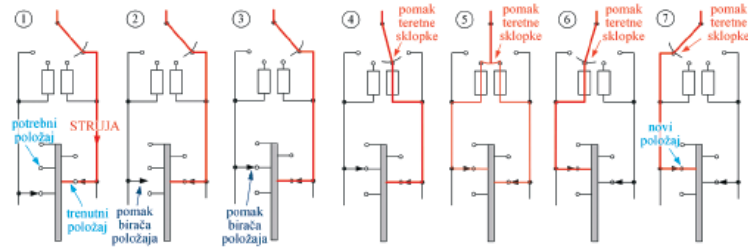
SL 5.16. Poprečno rezanje trake lima (jaram-stup)



SL 5.17. a) Poprečno izrezane trake lima i b) detalj preklopa u više koraka



6. Namoti i gubici tereta



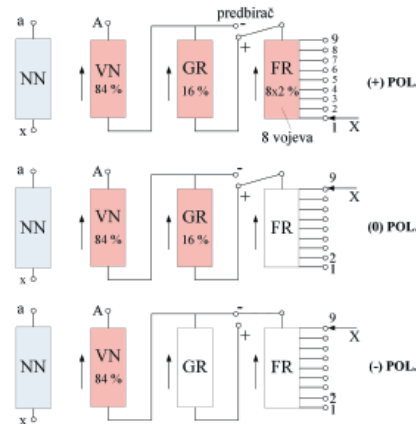
SL 6.10. Sekvence za promjenu položaja uljne regulacijske sklopke

Birač položaja se postavlja u novi položaj dok kroz njega ne teče struja. Nakon toga se struja preusmjerava iz starog u novi položaj pomoću teretne sklopke. Za ograničenje struje koriste se dodatni otpori ili reaktancije.

Sličan princip promjene položaja je i kod vakuumske regulacijske sklopke gdje ulogu teretne sklopke preuzimaju dva vakuumska prekidača (engl. *vacuum interrupter*). Iako u električnoj mreži ima najviše energetskih transformatora s uljnom regulacijskom sklopkom, danas je kod novih transformatora uobičajena vakuumska sklopka.

Predbiranje (GR + FR)

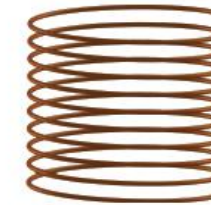
Na slici 6.11 prikazan je primjer regulacije predbiranjem gdje se zahtijeva regulacija VN napona $110 \text{ kV} \pm 8 \times 2 \%$, a namoti su u rasporedu NN+VN+GR+FR. U krajnjem plus položaju regulacije ukupno je uključeno 116 % nazivnog broja zavoja, u nultom položaju nazivni broj zavoja (100 %) i u krajnjem minus položaju 84 % nazivnog broja zavoja. To se izvodi tako da se VN namot dimenzionira za broj zavoja u krajnjem minus položaju regulacije (84 %), a svaki od regulacijskih namota za pola ukupnog opsega regulacije. Ukupni opseg regulacije je $\pm 16 \%$, pa GR i FR namot imaju po 16 % nazivnog broja zavoja. Dakle, u krajnjem minus po-



SL 6.11. Principijelna shema regulacije napona VN namota predbiranjem (GR + FR)

6.4.3. Spiralni namot

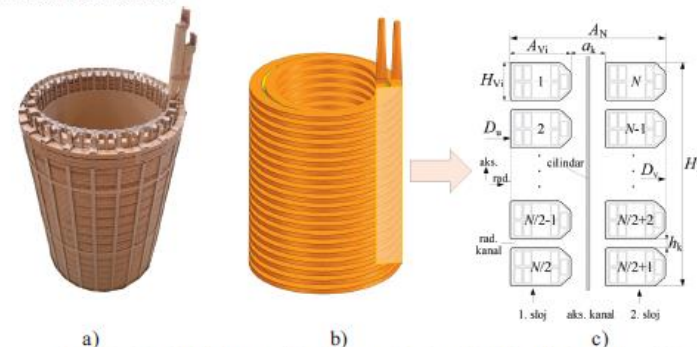
Spiralni namot (engl. *helical winding*) karakterističan je za većinu namota energetskih transformatora (ST, TN, NN, GR i FR). Po načinu namatanja sličan je slojnom namotu, ali se obično izvodi u jednom (I namot) ili dva sloja (U namot) pa se u engleskoj literaturi često koriste termini *single layer winding* i *double layer winding*. Naziv spiralni dolazi od oblika cilindrične spirale (engl. *helix*, slika 6.32). Može biti izveden sa i bez radijalnih kanala između zavoja. Postoji puno različitosti u izvedbama, a zadatak projektanta je napraviti najjeftinije rješenje koje zadovoljava zahtjeve kupca transformatora. Primjeri češćih kombinacija su:



SL 6.32. Cilindrična spirala (engl. *helix*)

- ST: I namot bez radijalnih kanala, profilni vodič na kant (više aksijalnih paralela),
- NN: U namot s radijalnim kanalima, TSV,
- GR: I namot bez radijalnih kanala, profilni vodič na kant (više aksijalnih paralela),
- FR: I namot bez radijalnih kanala, profilni vodič na kant (više aksijalnih vojeva).

Na slici 6.33 prikazan je NN spiralni namot izveden u dva sloja (U namot). Priključak početka i priključak kraja namota nalaze se s gornje strane namota. Između dva sloja nalazi se aksijalni rashladni kanal unutar kojega se zbog naponskih razloga nalazi barijera od tvrdog prešpana (cilindar). Kao vodič korišten je TSV, a između zavoja nalaze se radijalni rashladni kanali.



SL 6.33. a) Spiralni U-namot, b) pojednostavljeni model i c) karakteristični presjek

Što se tiče same terminologije oko naziva namota i to pogotovo spiralnog, postoje dosta raznolikosti i daljnjih mogućih podjela. Tako se slojni namot u jednom sloju bez radijalnih kanala zove cilindrični (engl. *cylindrical*), a ako ima radijalne kanale, zove se spiral-



7. Izolacijski sustav transformatora i ispitni naponi

232 7. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA I ISPITNI NAPONI



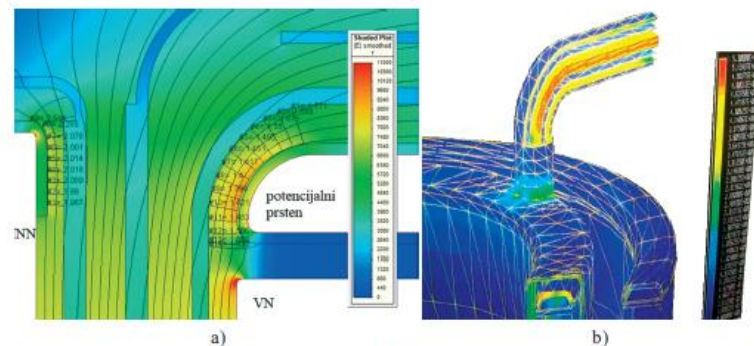
Sl. 7.2. Primjeri papirne izolacije u transformatoru

260 7. IZOLACIJSKI SUSTAV TRANSFORMATORA I ISPITNI NAPONI

Što se tiče razmaka u zraku (razmaci između provodnika), oni su definirani u [125]. U slučaju da se transformator ispituje sklopnim naponom (SI), tada za određivanje razmaka provodnika može biti mjerodavan sklopni napon.

7.6.2. Izračun električnog polja

Izračun električnog polja danas se uobičajeno provodi metodom konačnih elemenata (engl. *finite element method* – FEM) ili metodom rubnih elemenata (engl. *boundary element method* – BEM) i to najčešće na pojednostavljenoj 2D geometriji (slika 7.27a). Izuzetak su izvodi namota čije se polje obično računa u 3D (slika 7.27b), premda su neke konfiguracije analitičke rješive u 2D.



Sl. 7.27. Primjer izračuna električnog polja između NN i VN namota u 2D (lijevo) i izračuna električnog polja izvoda VN namota u 3D (desno)

7.6.3. Određivanje faktora sigurnosti

Za određivanje faktora sigurnosti koji se definira kao omjer dozvoljene i računske vrijednosti električnog polja koriste se različite metode [26] (kumulativna metoda, metoda maksimalnog električnog polja, *streamer* metoda i metoda napregnutog prostora). Mi ćemo se ovdje zadržati na kumulativnoj metodi kao jednoj od najčešćih metoda koja se koristi za dimenzioniranje glavne izolacije transformatora.

7.6.3.1. Kumulativna metoda za određivanje faktora sigurnosti

Kumulativna metoda je eksperimentalno provjerena metoda koja se koristi za određivanje faktora sigurnosti u uljnom kanalu glavne izolacije te faktora sigurnosti na granici uljepapir (klizna naprezanja).

Prema slici 7.28, faktor sigurnosti FS se definira kao minimalni omjer dopuštene E_{do} i izračunate prosječne jakosti električnog polja E_{sr} uzduž neke silnice, odnosno granice dielektrika:



8. Buka

udaljenost od izvora, podrazumijeva se ambijentalna vrijednost buke. Ove vrijednosti vrijede za zrak kao medij. Kada nema medija za prijenos (npr. u vakuumu), zvuk se ne prenosi.

Tablica 8.1. Karakteristične vrijednosti zvučnog tlaka za pojedine izvore buke

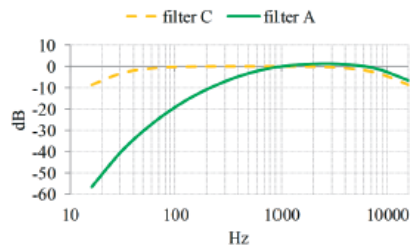
	L_{pA} , dB	
zrakoplov na 50 m	120-140	NEPODNOŠLJIVO
motorna pila na 1 m	110	
disko, 1 m od zvučnika	100	
kamion na 10 m	90	VRLO BUČNO
pločnik uz prometnu ulicu	80	
usisavač na udaljenosti od 1 m	70	BUČNO
razgovor na udaljenosti od 1 m	60	
ured ili učionica	50	UMJERENA BUKA
tihi ured ili knjižnica	40	
spavaća soba po noći	30	TIHO
studio za snimanje	20	
lišće	10	JEDVA ČUJNO
prag čujnosti	0	

8.3. Mjerenje buke transformatora

Mjerenje buke transformatora je tipsko ispitivanje (odjeljak 20.1.2) što znači da se obavezno mjeri na jednom predstavničkom transformatoru za određeni tip transformatora ili prema zahtjevu kupca. Kod distribucijskih i manjih energetskih transformatora mjeri se samo buka jezgre (slika 8.3), dok se kod većih transformatora mjeri buka jezgre i buka namota.

8.3.1. Prilagođavanje mjerene buke karakteristikama ljudskog uha

Kod instrumenata za mjerenje buke koriste se odgovarajući filtri koji objektivnu vrijednost buke prilagođavaju subjektivnoj. Na stvare izmjerene vrijednosti buke dodaju se korekcijske vrijednosti (filtri A i C) definirane krivuljama prikazanim na slici 8.1. Tako se filter A u praksi koristi kada je vrijednost buke izražena u dB potrebno prilagoditi ljudskom uhu. Ove prilagođene vrijednosti se izražavaju u dB(A) ili dBA. Na niskim i na visokim frekvencijama će dB(A) biti manji od dB, dok na srednjim frekvencijama vrijednosti ostaju praktički iste.

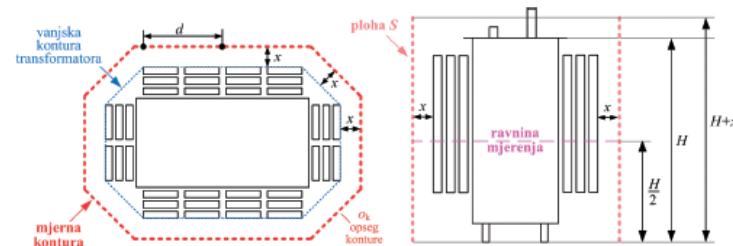


Sl. 8.1. Krivulje za prilagođavanje buke

Mjerene vrijednosti se označavaju s L_{pA} , L_{IA} i L_{WA} da se naglasi da su te vrijednosti korigirane prema krivulji A na slici 8.1.

8.3.2. Metode za mjerenje buke

Mjerenje buke transformatora definirano je IEC standardom 60076-10 [127], a ravnina mjerenja i mjerna kontura prikazani su na slici 8.2. Buka se mjeri u ravnini koja se nalazi na pola visine H koja se računa od dna transformatora do visine poklopca ili visine hladnjaka ako hladnjaci nadvisuju kotao. Kontura mjerenja u ravnini $H/2$ je od vanjske konture transformatora udaljena za vrijednost x ($x = 0,3$ m za distribucijske transformatore, $x = 1$ m za energetske transformatore bez ventilatora i $x = 2$ m za transformatore s ventilatorima).



Sl. 8.2. Mjerenje buke transformatora prema IEC 60076-10

Postoje dvije metode mjerenja: 1. mjerenja buke u točkama (engl. *point by point*) i 2. kontinuirano mjerenje buke duž mjerne konture (engl. *walk around*). U svakoj od tih metoda mjeri se zvučni tlak ili intenzitet.

8.3.2.1. Metoda mjerenja buke u točkama (*point by point*)

U ovoj metodi se broj točaka u kojima se mjeri buka određuje iz uvjeta da razmak d između njih ne bude veći od 1 m s time da broj točaka ne smije biti manji od osam. Srednja mjerena vrijednost razine zvučnog intenziteta ili tlaka dobiva se pomoću (8.16) ili (8.17), dakle kao srednja logaritamska vrijednost buke po točkama. Ova metoda se uobičajeno primjenjuje kod distribucijskih transformatora, a broj mjernih točaka je najčešće osam. Primjena iste metode kod energetskih transformatora zbog većih dimenzija dovodi do puno većeg broja mjernih točaka pa je kod njih praktičnije koristiti *walk around* metodu.

8.3.2.2. Metoda mjerenja buke duž mjerne konture (*walk around*)

Kod *walk around* metode ispitivač zajedno s mjernim instrumentom hoda duž mjerne konture i kontinuirano mjeri buku, a konačan rezultat je srednja logaritamska vrijednost buke po konturi. Ova se metoda koristi da bi se ubrzao proces mjerenja buke. Najčešće se koristi kod energetskih transformatora.



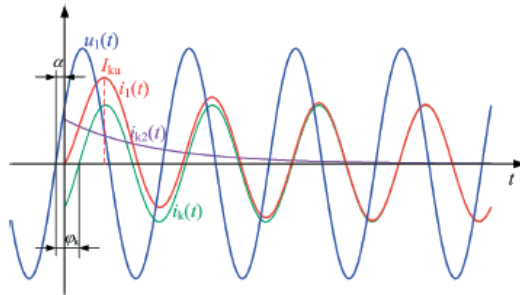
9. Sile i naprezanja u kratkom spoju

$$i_{k2}(t) = \frac{U_{n0} \sqrt{2} \sin(\alpha - \varphi_k)}{\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} e^{-\frac{R_k}{X_k} t} \quad (9.12)$$

i predstavlja prijelaznu struju kratkog spoja. Prijelazna struja opada po vremenskoj konstanti

$$\tau_k = \frac{L_k}{R_k} = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{u_r}{\omega u_r} \quad (9.13)$$

Valni oblici navedenih komponenta struje kratkog spoja i ukupne struje kratkog spoja prikazani su na slici 9.3.



Sl. 9.3. Valni oblik napona i struje za slučaj udarnog kratkog spoja koji je nastupio iz praznog hoda transformatora

Maksimalnu vrijednost struje kratkog spoja I_{ku} nazivamo *udarnom strujom kratkog spoja* i dobivamo je iz uvjeta $\alpha = 0$. Udarne struje kratkog spoja je

$$I_{ku} = k_u \sqrt{2} I_k \quad (9.14)$$

gdje je k_u faktor asimetrije koji se za distribucijske transformatore snage $S_n \leq 2,5$ MVA računa na sljedeći način:

$$\varphi_k = \arctan \left(\frac{u_k}{u_r} \right) \quad (9.15)$$

$$k_u = 1 + e^{-\left(\varphi_k + \frac{\pi}{2}\right) \frac{u_k}{u_r}} \cdot \sin \varphi_k \quad (9.16)$$

Faktor asimetrije k_u je prikazan na slici 9.4 kao funkcija omjera radne i induktivne komponente napona kratkog spoja u_r/u_k . Maksimalna teoretska vrijednost udarne struje kratkog spoja dobiva se za slučaj kada je $u_r = 0$ ($R_k = 0$) i tada je $k_u = 2$. Kako pada nazivna snaga transformatora, tako raste udio radne u odnosu na induktivnu komponentu napona kratkog spoja, ali omjer u_r/u_k rijetko kada prelazi 0,5.

Uvrštavanjem (9.25) u (9.24) dobiva se srednja radijalna sila za cijeli namot

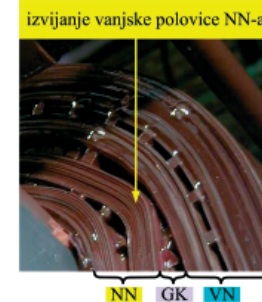
$$F_R = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 (NI)^2}{H_{12}} o_s K_R \cdot 10^6 = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 (NI)^2}{H_{12}} D_s \pi K_R \cdot 10^6 \quad (9.26)$$

Kod izračuna radijalnih naprezanja koristi se radijalna sila po jedinici duljine opsega u N/mm

$$f_R = \frac{F_R}{No_s} = \frac{1}{2} \frac{\mu_0 NI^2 K_R}{H_{12}} \cdot 10^6 \quad (9.27)$$

Radijalna sila se najčešće računa za slučaj najvećeg strujnog opterećenja pa za struju I treba uvrstiti udarnu struju kratkog spoja I_{ku} .

Kvar u slučaju kratkog spoja ponekad se dešava samo na vanjskom dijelu NN namota (u vanjskoj polovici, vanjskoj trećini ili u vanjske dvije trećine namota) i to tipično kod distribucijskih transformatora. Tako je na slici 9.8 prikazano izvijanje vanjske polovice NN namota, dok je unutrašnja polovica namota ostala nedeformirana. To se može objasniti činjenicom da je zbog veće magnetske indukcije srednje naprezanje vanjskog dijela NN namota veće od srednjeg naprezanja cijelog NN namota. Stoga će se sile i naprezanja računati za vanjski dio NN namota. Dijelovi NN namota omeđeni su aksijalnim kanalima u namotu. Prema slici 9.9 namot bez kanala je jedna cjelina, namot s jednim kanalom ima dvije cjeline (polovice), dok namot s dva kanala ima tri cjeline (trećine).

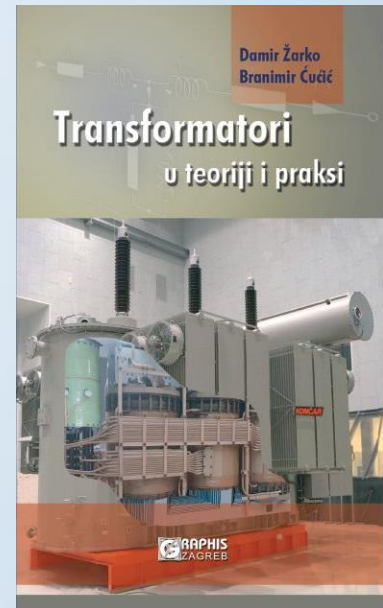


Sl. 9.8. Kvar na vanjskoj polovici NN-a

Pri izračunu srednje radijalne sile u vanjskim dijelovima unutrašnjeg namota u (9.24) treba uvrstiti općenito $k_N \cdot N$ zavoja, a u (9.25) treba uvrstiti $k_B \cdot B_0$ ovisno o tome u kojem dijelu namota se računa radijalna sila (slika 9.9). Ako se sila računa za vanjsku polovicu unutrašnjeg namota, tada je $k_N = 1/2$ i $k_B = 3/4$ jer je obuhvaćeno pola od ukupnog broja zavoja, a srednja vrijednost magnetske indukcije u vanjskoj polovici je $3/4$ indukcije B_0 u glavnom kanalu između unutrašnjeg i vanjskog namota. Za vanjsku trećinu unutrašnjeg namota je $k_N = 1/3$ i $k_B = 5/6$. Radijalna sila za vanjski dio unutrašnjeg namota se može napisati općenito kao

$$F_R = k_N k_B \frac{\mu_0 (NI)^2}{H_{12}} o_s K_R \cdot 10^6 = k_N k_B \frac{\mu_0 (NI)^2}{H_{12}} K_R (k_{Du} D_u + k_{Dv} D_v) \pi \cdot 10^6 \quad (9.28)$$

$$f_R = \frac{F_R}{k_N No_s} = k_B \frac{\mu_0 NI^2 K_R}{H_{12}} \cdot 10^6 \quad (9.29)$$



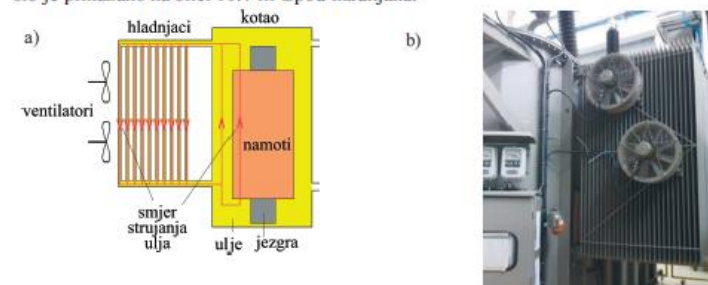
10. Zagrijavanje i hlađenje transformatora

smanjene gustoće uvijek diže prema gore pa ulje u namotima struji odozdo prema gore. Ulje zatim s gornje strane ulazi u izmjenjivač topline (hladnjake) gdje struji u obrnutom smjeru te se hladi (konvekcijom i zračenjem) te na koncu s donje strane ponovo ulazi u kotao da bi ohladilo namot, tj. preuzelo toplinu iz namota (kondukcijom i konvekcijom). Najtoplija točka namota je uvijek pri vrhu namota.

Za namote u svicima (preloženi, upleteni) moguće je povećati prijenos topline s namota na ulje ugradnjom posebnih pregrada u namot (slika 10.10b). Time se ulje više usmjerava kroz radialne kanale u namotu (usmjereno hlađenje, engl. *zig-zag cooling*)

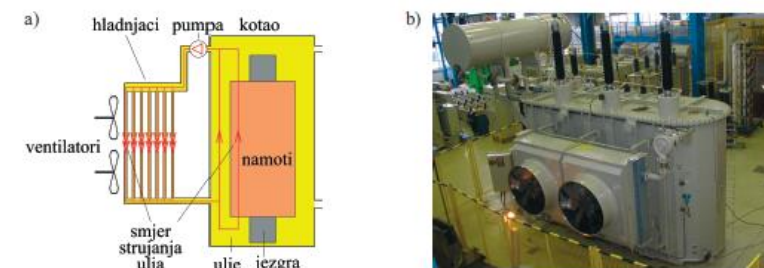
10.2.2. ONAN/ONAF

U ONAN/ONAF sustavu hlađenja (engl. *Oil Natural Air Forced* – ONAF) namoti, kotao i hladnjaci se prirodno hlade s mogućnošću poboljšanja hlađenja hladnjaka prisilnim strujanjem zraka uključanjem ventilatora (slika 10.7). Ventilatori se najčešće uključuju iznad 60 % nazivnog opterećenja. Ventilatori mogu biti smješteni s bočne strane hladnjaka kao što je prikazano na slici 10.7 ili ispod hladnjaka.

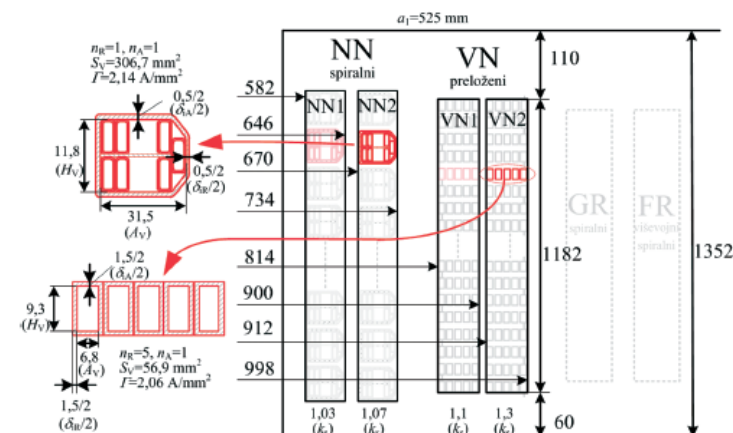


Sl. 10.7. ONAN/ONAF sustav hlađenja: a) princip i b) primjer izvedbe

10.2.3. OFAF



Sl. 10.8. OFAF sustav hlađenja: a) princip i b) primjer izvedbe



Sl. 10.24. Geometrija za izračun nadtemperatura energetskog transformatora

$$P'_{1_seg_NN1} = n_A n_R (1/\kappa_{75}) S_V F^{-2} (1+k_s) = 1 \cdot 1 \cdot \frac{1}{48} \cdot 306,7 \cdot 2,14^2 \cdot 1,03 = 30,1 \frac{W}{m} \quad (10.79)$$

Toplinska vodljivost za navedeni segment (nema slojne izolacije, redukcijski koeficijent 0) računa se kao

$$G'_{R_seg_NN1} = \frac{2 \cdot n_A \cdot (H_V + \delta_{iA})}{\frac{1}{\psi'_A} \cdot \left(\frac{\delta_{iR}}{2 \cdot \lambda_i} + \frac{1000}{\alpha_A} \right)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot (11,8 + 0,5)}{\frac{1}{0,75} \cdot \left(\frac{0,5}{2 \cdot 0,15} + \frac{1000}{70} \right)} = 1,16 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1},$$

$$G'_{A_seg_NN1} = \frac{2 \cdot n_R \cdot (A_V + \delta_{iR})}{\frac{1}{\psi'_R} \cdot \left(\frac{\delta_{iA}}{2 \cdot \lambda_i} + \frac{1}{\alpha_R} \right)} = \frac{2 \cdot 1 \cdot (31,5 + 0,5)}{\frac{1}{0,70} \cdot \left(\frac{0,5}{2 \cdot 0,15} + \frac{1000}{35} \right)} = 1,48 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}, \quad (10.80)$$

$$G'_{seg_NN1} = G'_{R_seg_NN1} + G'_{A_seg_NN1} = 1,16 + 1,48 = 2,64 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}.$$

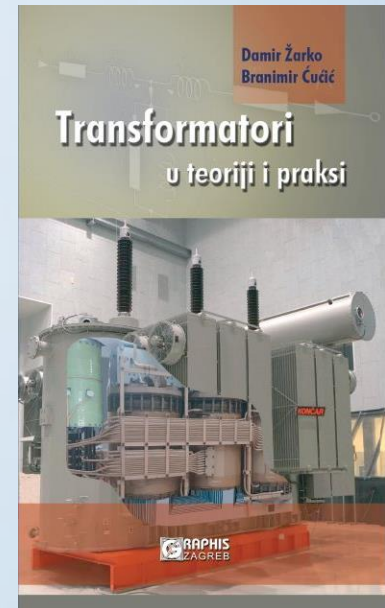
Nadtemperatura segmenta sekcije NN1 prema ulju je

$$\Theta_{NU_seg_NN1} = \frac{P'_{seg_NN1}}{G'_{seg_NN1}} = \frac{30,1}{2,64} = 11,4 \text{ K}. \quad (10.81)$$

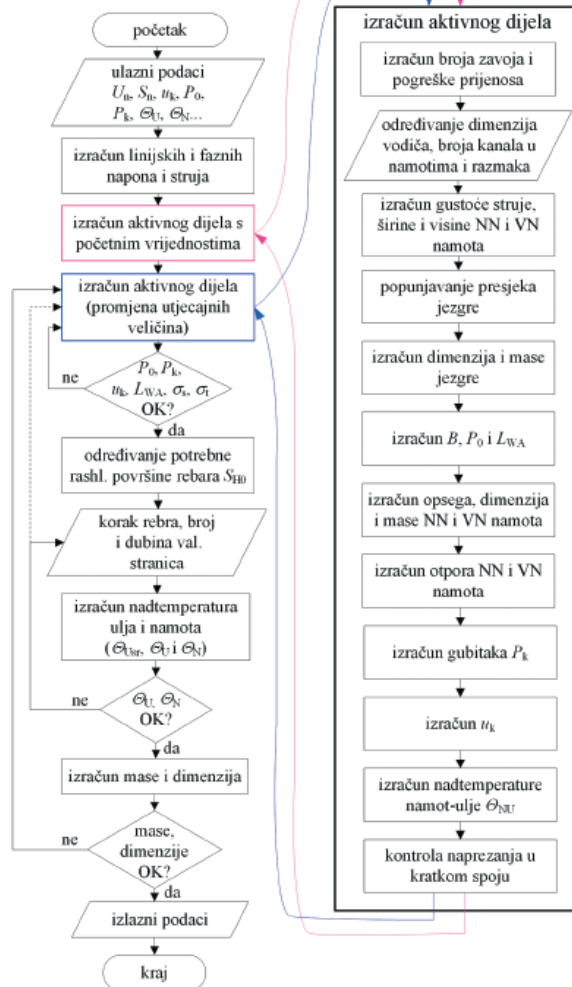
Na isti način se dobiva i nadtemperatura segmenta sekcije NN2 prema ulju



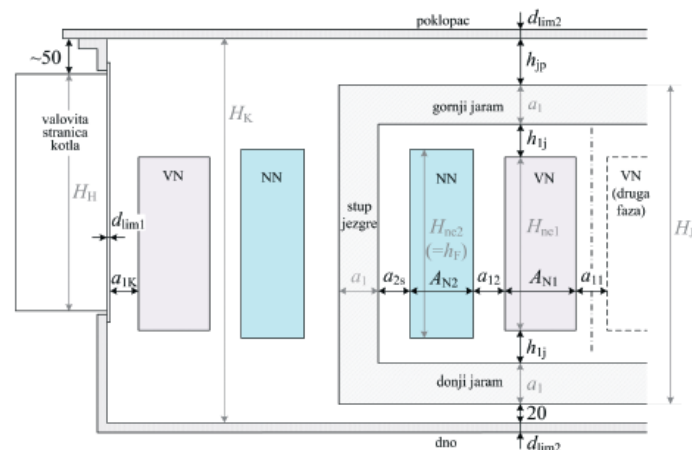
11. Projekt distribucijskog transformatora



PROJEKT TRANSFORMATORA



SI. 11.1. Dijagram toka projektiranja distribucijskog transformatora



SI. 11.2. Oznake veličina za koje se definiraju početne vrijednosti

Definiraju se početne vrijednosti za sljedeće veličine:

- a_{2s} – razmak između NN namota i stupa jezgre,
- a_{12} – razmak između NN i VN namota,
- a_{11} – razmak između dva VN namota susjednih faza,
- a_{1K} – razmak između VN namota i bočne stranice kotla,
- h_{1j} – razmak između VN namota i jarma,
- h_{jp} – razmak između jarma i poklopca,
- d_{lim1} – debljina lima valovite stranice,
- d_{lim2} – debljina poklopca i dna kotla.

Radi jasnoće, ucrtane su i dimenzije namota (širina A_N i električna visina H_{Ne}), širina stupa i jarma (a_1), visina jezgre (H_j), valovite stranice (H_H) i kotla (H_K). Početne vrijednosti za navedene veličine dane su u tablici 11.3.

Tablica 11.3. Početni razmaci i debljine

S_N , kVA	a_{2s} , mm	U_m , kV	a_{12} , mm	a_{11} , mm	a_{1K} , mm	h_{1j} , mm	h_{jp} , mm	d_{lim1} , mm	d_{lim2} , mm
≤250	2	12	7*	8	25	150	1,25	5	
400	2,5	17,5	7	9	26				
630	3	24	9	11	28				
800	3,5	36	12	15	36				
1000	4								
1250	4,5								
>1250	5								

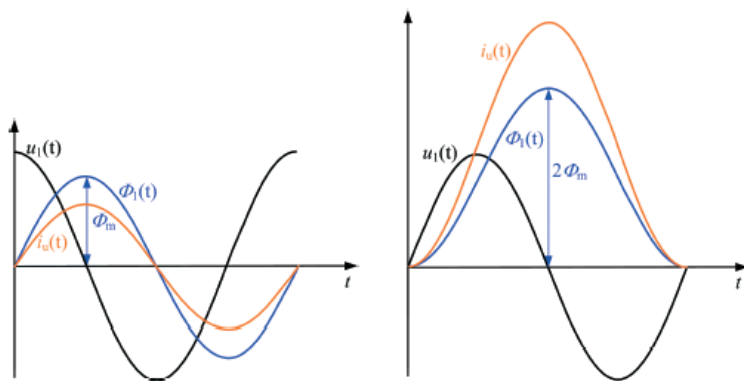
* iz tehnoloških razloga se razmak NN-VN ne radi manjim od 7 mm

12. Struja uključenja

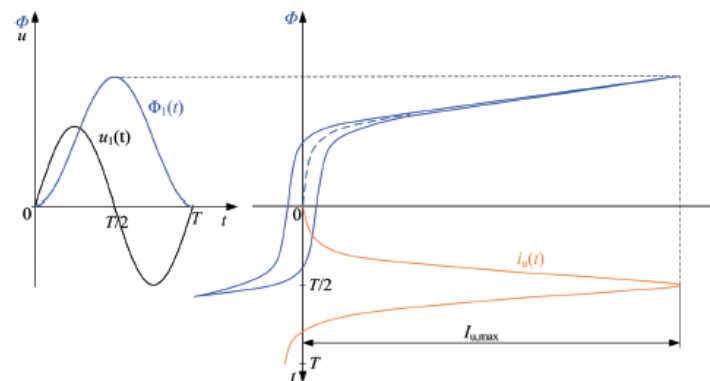
$$\begin{aligned}\alpha = \frac{\pi}{2}: \Phi_1(t) &= \frac{U_{n1}\sqrt{2}}{N_1\omega} \sin(\omega t) = \Phi_m \sin(\omega t), \\ \alpha = 0: \Phi_1(t) &= \frac{U_{n1}\sqrt{2}}{N_1\omega} - \frac{U_{n1}\sqrt{2}}{N_1\omega} \cos(\omega t) = \Phi_m - \Phi_m \cos(\omega t).\end{aligned}\quad (12.5)$$

Objek prijelazne pojave toka Φ_1 prikazane su na slici 12.1. U slučaju $\alpha = \pi/2$ vidljivo je da će odmah poteći trajna struja praznog hoda bez prijelazne pojave, a vršna vrijednost toka Φ_1 jednaka je nazivnoj vrijednosti toka u jezgri Φ_m za transformator u praznom hodu. U slučaju $\alpha = \pi/2$ vršna vrijednost toka jednaka je dvostrukoj nazivnoj vrijednosti ($2\Phi_m$). Za transformator s linearnom krivuljom magnetiziranja bi prema (12.4) potekla struja uključenja iznosa jednakog dvostrukoj nazivnoj struji magnetiziranja. Taj iznos je još veći ako je u jezgri postojao remanentni magnetski tok Φ_r . U tom slučaju će maksimalni tok u jezgri za najgori slučaj biti $2\Phi_m + \Phi_r$.

U realnom transformatoru glavni induktivitet L_m ovisi o zasićenju jezgre transformatora, a zbog smanjenja dimenzija jezgre transformatori su tipično projektirani s nazivnim magnetskim indukcijama blizu koljena krivulje magnetiziranja, tj. na granici područja magnetskog zasićenja. Dvostruko povećanje toka u jezgri će stoga drastično zasiti limove jezgre što će rezultirati smanjenjem njene permeabilnosti i posljedično smanjenjem induktiviteta L_m . Nužna posljedica toga je znatno povećanje struje magnetiziranja kako bi se zadovoljila jednadžba (12.4) jer potrebni tok mora biti stvoren i u uvjetima velikog zasićenja.



Sl. 12.1. Promjena napona, struje i magnetskog toka s vremenom u transformatoru sa zanemarenim otporom primara i linearnom krivuljom magnetiziranja jezgre za slučajeve uključenja transformatora kada je: a) napon maksimalan i b) napon jednak nuli



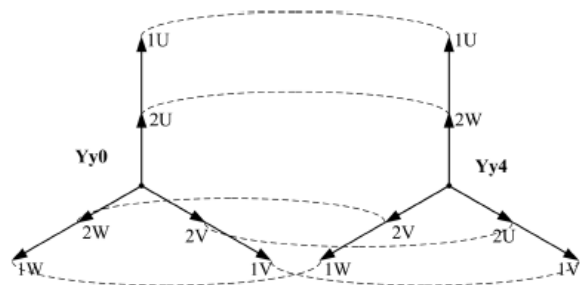
Sl. 12.2. Valni oblik struje uključenja u prvoj periodu za kut uključenja $\alpha = 0$ i razmagnetiziranu jezgru

Struja uključenja stvara različite probleme u praksi od kojih se mogu izdvojiti sljedeći:

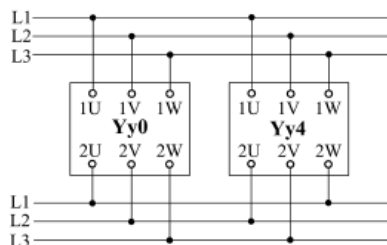
1. Veliki početni iznosi struje uključenja koji ovise o trenutnoj vrijednosti napona u trenutku uključenja mogu izazvati kvar na namotu zbog velikih sila i mehaničkih naprezanja.
2. Velika struja uključenja stvara padove napona u sustavu na koje neka trošila koja zahtijevaju konstantnu snagu reagiraju povećanom strujom, a to može izazvati djelovanje zaštita.
3. Viši harmonici u valnom obliku struje uključenja mogu izazvati rezonanciju i dinamičke prenapone u elektroenergetskom sustavu koji mogu trajati nekoliko sekundi. Problem je naglašen u mrežama niske snage kratkog spoja (viši induktivitet u impedanciji mreže) i višeg kapaciteta (dugački nadzemni vodovi ili podzemni kabeli) koje imaju rezonanciju na nižim frekvencijama bliskima neparnim ili parnim harmonicima struje uključenja nižeg reda i više amplitude [69]. Na rezonantnoj frekvenciji povećana je impedancija mreže gledano sa stezaljki transformatora zbog čega dolazi do prenapona u interakciji s odgovarajućim harmonikom struje uključenja [70]. Posljedice toga su djelovanje nadnaponskih zaštita ili preopterećenje metaloksidnih odvodnika prenapona.
4. Kada se uključuje jedan ili više transformatora javlja se uzajamno djelovanje (engl. *sympathetic interaction*) s drugim transformatorima na istim sabirnicama izazvano aperiodskim članom struje uključenja koji kruži među neposredno uključenim transformatorima i onima koji su već na mreži. Istosmjerna komponenta struje transformatora



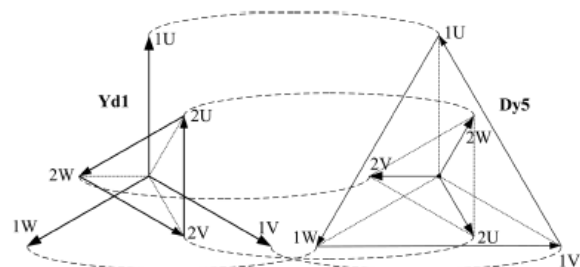
13. Paralelni rad transformatora



Sl. 13.1. Fazorski dijagrami transformatora u spoju Yy0 i Yy4 s označenim stezaljkama koje se trebaju kratko spajati na VN i NN strani

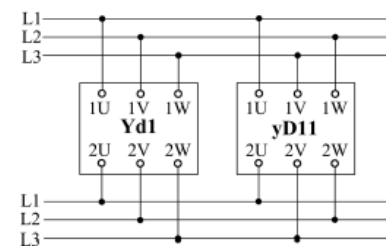


Sl. 13.2. Shema mrežnog priključka transformatora Yy0 i Yy4 u paralelnom spoju



Sl. 13.3. Fazorski dijagrami transformatora u spoju Yd1 i Dy5 s označenim stezaljkama koje se trebaju kratko spajati na VN i NN strani

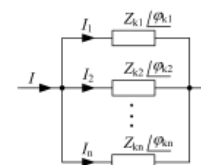
je da je orijentacija trokuta napona na sekundaru različita, stoga nije moguće povezivati stezaljke na način opisan u prethodna dva slučaja. Rješenje je zarotirati fazorski dijagram jednog od transformatora za 180° oko okomite osi te onda povezati stezaljke na ranije opisani način. Ako se fazorski dijagram transformatora u spoju Yd11 zarotira, dobivaju se fazorski dijagrami na slici 13.6 na kojima su označene stezaljke koje se trebaju spajati na iste linije mrežnog priključka. Shema mrežnog priključka koja slijedi iz slike 13.6 je prikazana na slici 13.7.



Sl. 13.7. Shema mrežnog priključka transformatora Yd1 i yD11 u paralelnom spoju

13.1. Raspodjela snage među paralelno spojenim transformatorima

U grupi od n paralelno spojenih transformatora ukupna snaga će se raspodijeliti u ovisnosti o iznosu impedancije kratkog spoja pojedinog transformatora Z_{ki} i ukupne impedancije kratkog spoja cijele grupe Z_k . Struja I_0 u poprečnoj grani nadomjesne sheme se može zanemariti jer je u većini modernih transformatora manja od 0,2 % nazivne struje. Paralelno spojeni transformatori tada se mogu prikazati kao paralelni spoj njihovih impedancija kratkog spoja kao što je prikazano na slici 13.8.

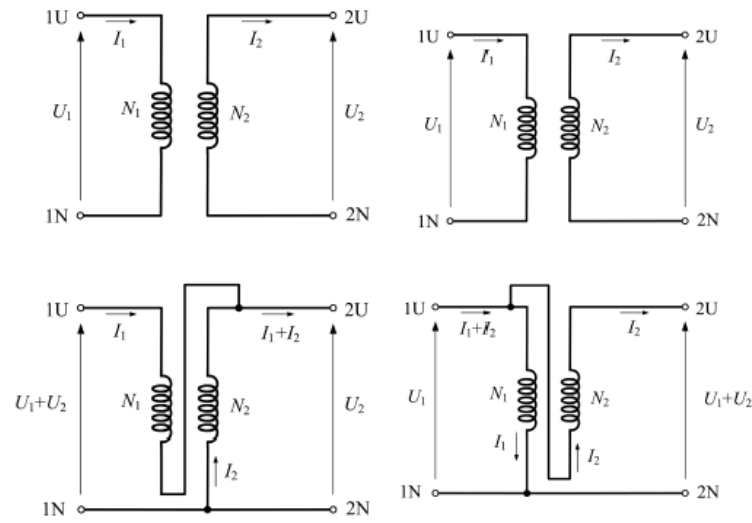


Sl. 13.8. Paralelni spoj transformatora prikazan impedancijama kratkog spoja

Ako se pretpostavi da paralelno spojeni transformatori imaju isti omjer X_k/R_k , onda je fazni pomak φ_{ki} jednak za sve transformatore pa vrijedi

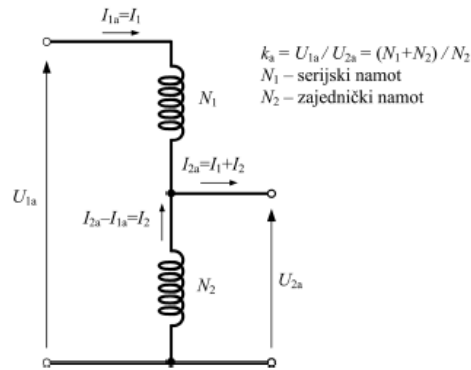


14. Autotransformator



Sl. 14.1. Princip prespajanja dvonamotnog transformatora u silazni autotransformator

Sl. 14.2. Princip prespajanja dvonamotnog transformatora u uzlazni autotransformator



Sl. 14.3. Načelna shema autotransformatora

$$k_a = U_{1a} / U_{2a} = (N_1 + N_2) / N_2$$

N_1 – serijski namot
 N_2 – zajednički namot

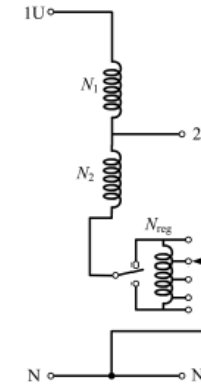
- Dodatna prednost je niski napon regulacijskih zavoja prema zemlji te jednostavnija izvedba izolacijskog sustava.

$$\frac{U_{2a}}{U_{1a}} = \frac{N_2 \pm \frac{k}{N_p - 1} N_{reg}}{N_1 + N_2 \pm \frac{k}{N_p - 1} N_{reg}}$$

$$k = 0, \dots, N_p - 1$$

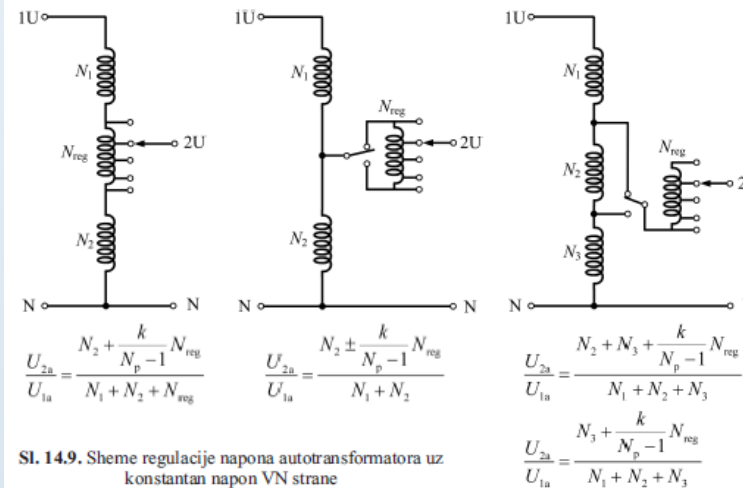
N_p – broj položaja regulacijske sklopke

Sl. 14.8. Shema autotransformatora s regulacijom napona u nultočki



14.4.2. Regulacija napona autotransformatora uz konstantan napon VN strane

Slika 14.9 prikazuje nekoliko primjera regulacije napona autotransformatora u slučaju konstantnog napona VN strane i varijabilnog napona NN strane.



Sl. 14.9. Sheme regulacije napona autotransformatora uz konstantan napon VN strane



15. Zaštitni uređaji na transformatoru



Magnetski (slika 15.3) i optički uljokaz (slika 15.4) najčešće se ugrađuju u cijev za nadolijevanje ulja na poklopac transformatora. Imaju mogućnost detektiranja curenja ulja i akumuliranja zraka i drugih plinova ispod poklopca transformatora. Kod magnetskog uljokaza je veza između indikatora razine ulja i pokazivača magnetska. Padom razine ulja, sve veći dio pokazivača u prozoru uljokaza postaje crvenijim. Kod optičkog uljokaza je vidljivo ulje u kojem pliva kuglica koja se u normalnim okolnostima nalazi pri vrhu prozora. U slučaju pada razine ulja, pada i kuglica.

Kombinirani zaštitni uređaj (slika 15.5) objedinjuje odušnik s kontaktima, kontakti termometar i uljokaz s kontaktima. Ujedno postoji mogućnost uzimanja plina. Najčešće se upotrebljava na transformatorima snaga većih od 1600 kVA.



Sl. 15.3. Magnetski uljokaz



Sl. 15.4. Optički uljokaz



Sl. 15.5. Kombinirani zaštitni uređaj

15.1.2. Zaštitni uređaji na distribucijskim transformatorima koji imaju konzervator

Transformatori s konzervatorom imaju sušionik zraka (slika 15.6), uljokaz na konzervatoru (slika 15.7), a mogu imati Buchholz relej (slika 15.7) i kontakti termometar. Buchholz relej služi za signalizaciju i isklapanje transformatora u slučaju razvijanja plina, gubitka ulja ili naglog strujanja ulja iz kotla prema konzervatoru uslijed kvara u transformatoru.



Sl. 15.6. Sušionik zraka



Sl. 15.7. Uljokaz na konzervatoru i Buchholz relej

tribucijskog transformatora, Buchholz relej služi za signalizaciju i isklapanje transformatora u slučaju razvijanja plina, gubitka ulja ili naglog strujanja ulja iz kotla prema konzervatoru uslijed kvara u transformatoru. Najčešće se montira na cijev koja povezuje kotao i konzervator (slika 15.12).



Sl. 15.12. Buchholz relej montiran na cijev koja povezuje kotao i konzervator

Odušnik

U slučaju burnog kvara unutar transformatora dolazi do isparavanja ulja, a plinovi stvaraju veliki tlak. Ako se tlak ne snizi unutar nekoliko milisekundi, dolazi do oštećenja kotla. Da bi se to spriječilo, koristi se odušnik (slika 15.13). Ukoliko tlak u kotlu dosegne podešenu vrijednost na odušniku, ventil na odušniku se otvara i tlak u kotlu se normalizira. Odušnik se montira na poklopac transformatora.



Sl. 15.13. Odušnik

Indikator razine ulja u konzervatoru (uljokaz)

Konzervator služi za kompenzaciju volumena ulja uslijed promjene temperature. Minimalna i maksimalna dozvoljena razina ulja u konzervatoru označene su na uljokazu (slika 15.14). Također je označena i razina ulja pri temperaturi od 20 °C. Prilikom svake ugradnje uljokaza mora se podesiti pozicija plovka u ulju kako bi se on prilagodio postojećoj geometriji konzervatora i pokazivao ispravnu razinu pri referentnoj temperaturi.



Sl. 15.14. Uljokaz

16. Zaštita transformatora od korozije

16. ZAŠTITA TRANSFORMATORA OD KOROZIJE

Korozija je proces nenamjernog razaranja konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, kemijskim i biološkim agensima [72]. Proces je ireverzibilan, a korozija skraćuje vijek trajanja konstrukcija, uzrokuje gubitke u proizvodnji, havarije i nesreće te nerijetko i ekološke katastrofe.

Čelični dijelovi transformatora kao što su kotao, poklopac, konzervator, hladnjaci i dr. su tijekom životnog vijeka izloženi atmosferskoj koroziji. Atmosferska korozija je najrašireniji oblik korozije i rezultat je djelovanja dva čimbenika, kisika i vlage. U nedostatku jednog od njih ne dolazi do korozije. U suhom zraku ili kod relativne vlažnosti ispod 60%, čelik ne hrđa. Atmosferska korozija je posebno jaka u industrijskim i u primorskim predjelima. U današnje vrijeme je potrebno puno više pažnje posvetiti koroziji metala nego ranije, a jedan od glavnih razloga je pojačana korozivnost okoline uslijed povećanog zagađenja vode, zraka i tla.

Transformator se od korozije najčešće štiti bojanjem (obično epoksidi, poliuretani ili akrilne boje na bazi vode), vrućim pocinčavanjem ili kombinacijom ove dvije tehnike. Zaštita pocinčavanjem se koristi za agresivnije atmosfere (obično zone C4 i C5 prema tablici 16.1). U postupku vrućeg pocinčavanja se valoviti kotlovi, poklopci, hladnjaci i dr. uranjaju u kadu s rastopljenim cinkom pri temperaturi od oko 450°C. Debljina takvog premaza je 50 – 100 µm (samo jedan sloj). S druge strane boja se obično nanosi u tri sloja (temeljni sloj, međusloj i završni sloj boje) ukupne debljine od 120 do 360 µm. Često se kao temeljni premaz koristi kombinacija boje i cinka (epoksid na bazi cinka), dok se za ostala dva sloja koristi boja.

Proces zaštite zahtijeva više procesa: pripremu površine, nanošenje prevlake, kontrolu debljine i prionjivosti premaza. Vrsta korozivne zaštite se određuje prvenstveno prema klimatskoj zoni (tablica 16.1) [147]. Prilikom odabira zaštite uzimaju se u obzir i sljedeći faktori: zaht-

jevi kupca, mjesto gdje će se transformator ugraditi, temperatura unutrašnjosti transformatora, temperaturni stresovi, utjecaj kondenzacije, abrazivni utjecaj okoline i otpornost na UV zračenje.

Tablica 16.1. Klimatske atmosferske zone

kategorija	klimatska zona – otvoreni prostor	klimatska zona – zatvoreni prostor
C1		Grijane zatvorene prostorije (zgrade) s čistim zrakom.
C2	Niski stupanj zagađenosti zraka. Ruralna područja.	Negrijane prostorije gdje postoji mogućnost kondenzacije (skladišta, dvorane).
C3	Naselja i industrijske zone s umjerenom koncentracijom sumpnog dioksida.	Proizvodne hale s visokom vlažnošću, uz niski stupanj zagađenosti zraka (prehrambena industrija).
C4	Industrijske zone i obalna područja s umjerenim salinitetom.	Kemijska industrija, priobalne zgrade, blizina bazena
C5 I - industrija	Industrijske zone s visokom vlažnosti i agresivnom atmosferom.	Prostorije sa stalnom kondenzacijom i visokim stupnjom zagađenosti zraka.
C5 M - more	Obalna i morska područja s visokim salinitetom.	

Današnji trendovi idu u smjeru smanjenja uporabe boja na bazi otapala i traženja ekološki i ekonomski prihvatljivijih alternativa. Akrilne boje na vodenoj bazi ekološki su prihvatljive, ali je proces sušenja duži.

U novije vrijeme pojavljuju se još neke vrste korozivne zaštite kao što su KTL sustav (engl. *Cathodic E-dip coating*) i praškasti sustavi zaštite (za valovite kotlove). Praškasti premazi u svom sastavu imaju 100 % suhe tvari pa ne sadrže organska otapala. Najveće prednosti su ekološki prihvatljiviji premaz, ravnomjernost debljine premaza i bolja je mehanička otpornost [73].



17. Kapitalizirana cijena transformatora

17. KAPITALIZIRANA CIJENA TRANSFORMATORA

Osnovna cijena transformatora je prodajna cijena koja izražava vrijednost samog transformatora, dok kapitalizirana cijena dodatno uzima u obzir i cijene gubitaka. U tom smislu transformator može biti optimiran prema osnovnoj ili kapitaliziranoj cijeni, ovisno o tome jesu li u tenderskom zahtjevu kupca definirane cijene gubitaka.

Kapitalizirana cijena transformatora sastoji se od dvije komponente: osnovne cijene transformatora i troškova eksploatacije (gubitaka) transformatora za vrijeme njegove životne dobi, što se izražava sljedećom formulom

$$C_T = C_{Tp} + c_k P_k + c_0 P_0 \quad (17.1)$$

gdje je:

C_T – kapitalizirana cijena transformatora u €

C_{Tp} – osnovna, tj. prodajna cijena transformatora u €

c_k – cijena gubitaka tereta u €/W

P_k – gubici tereta u W

c_0 – cijena gubitaka praznog hoda u €/W

P_0 – gubici praznog hoda u W

Više cijene gubitaka c_k i c_0 povećavaju osnovnu cijenu transformatora C_{Tp} , ali snižavaju troškove eksploatacije $c_k P_k + c_0 P_0$, budući da se tada teži da se transformator napravi sa što nižim gubicima P_k i P_0 . Izraz $c_k P_k + c_0 P_0$ zapravo daje približnu ekvivalentnu sadašnju cijenu budućih troškova eksploatacije transformatora za cijelu njegovu životnu dob. Kapitalizacijske faktore c_k i c_0 definira kupac, a oni ovise o kamatnoj stopi, životnoj dobi trans-

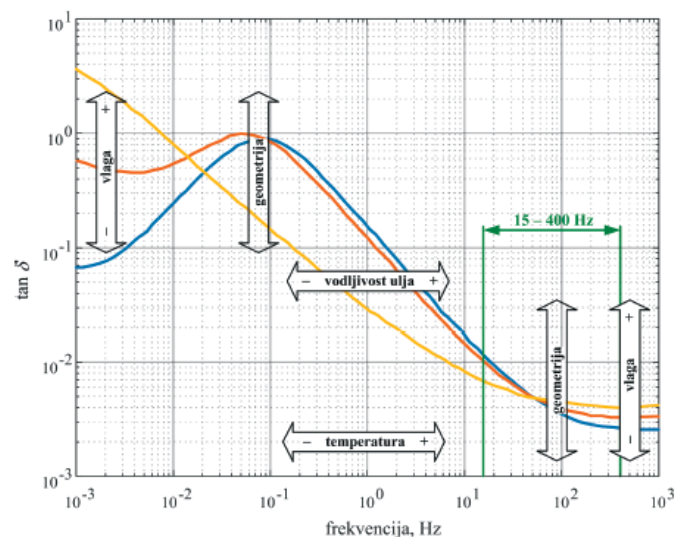


18. Dijagnostika i motrenje transformatora

18.1.2.7. Dielektrična spektroskopija u frekventijskoj domeni

Mjerenje faktora dielektričnih gubitaka u proširenom rasponu frekvencije je poznato kao ispitivanje dielektričnog frekventijskog odziva (engl. *Dielectric Frequency Response Test* – DFR) ili spektroskopija u frekventijskoj domeni (engl. *Frequency-Domain Spectroscopy* – FDS). Većinom se koristi raspon frekvencija od 0,1 mHz do 1 kHz, no na tržištu postoje i uređaji s proširenim rasponom frekvencija, npr. od 50 mHz do 5000 Hz [83]. Tipični oblici frekventijske ovisnosti $\tan \delta$ prikazani su na slici 18.7 za različite slučajeve udjela vlage u izolaciji te različita stanja ulja. Porast temperature utječe na pomak cijele karakteristike udesno budući da električna vodljivost ulja raste s porastom temperature. Vodljivost ulja također raste sa starenjem te povećanjem udjela vode u ulju. Na oblik karakteristike u točkama na koljenu pri niskim i visokim frekvencijama utječu promjene u geometriji namota.

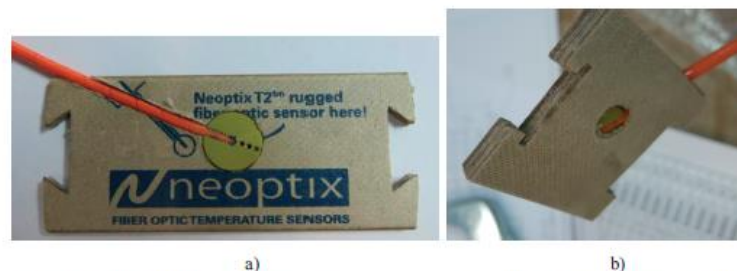
Glavni nedostatak spektroskopije je dugo vrijeme mjerenja, naročito pri niskim frekvencijama, koje ukupno za cijeli frekventijski spektar može trajati i više od 12 sati.



Sl. 18.7. Tipični oblici frekventijske ovisnosti $\tan \delta$ za različite slučajeve udjela vlage u papiru i električne vodljivosti ulja

18.1.2.8. Spektroskopija u vremenskoj domeni

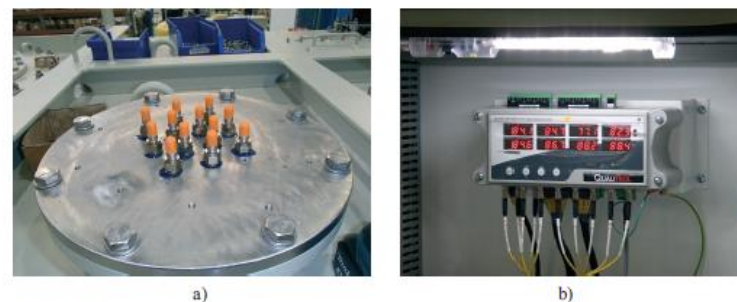
U svrhu dijagnosticiranja udjela vlage u izolaciji provodi se mjerenje struja polarizacije i depolarizacije izolacije transformatora u vremenskoj domeni (engl. *Polarization and De-*



Sl. 18.24. Priprema svjetlovodnog temperaturnog senzora za ugradnju: a) senzor umetnut u disk i pločicu od prešpana, b) senzor ugrađen u „sendvič“ između dvije dodatne pločice od prešpana



Sl. 18.25. Primjer svjetlovodnog temperaturnog senzora ugrađenog u uljni kanal VN namota transformatora



Sl. 18.26. Primjer a) priključnog mjesta na kotlu transformatora i b) uređaja za obradu i prikaz mjerenih signala iz svjetlovodnih temperaturnih senzora ugrađenih u transformator



19. Prilozi

Za neke tipove transformatora (suhe, sa samozaštitom itd.) mogu se definirati i druga ispitivanja.

Ako ispitivanje nije specificirano u [123] (npr. nije navedeno mjerenje viših harmonika u struji magnetiziranja), tada se ono provodi prema dogovoru kupca i proizvođača transformatora.

19.1.4. Ispitivanja prilikom montaže transformatora na terenu

Bez obzira na to što se transformator ispituje u tvornici, na terenu (engl. *on site*) se rade dodatne provjere i ispitivanja uslijed mogućih oštećenja u transportu ili pak zbog toga što se veći transformatori transportiraju sa skinutim hladnjacima i provodnicima.

Obično se kod distribucijskih transformatora na terenu mjeri struja magnetiziranja, provjerava prijenosni omjer, mjeri otpor izolacije namota, provjerava signalizacija i podešenja, a često još dodatno mjere otpori namota, faktor dielektričnih gubitaka ($\tan \delta$) i ovlaženost izolacijskog sustava, radi fizikalno-kemijska i kromatografska analiza ulja, te frekvencijski odziv transformatora (FRA).

Kod energetskih transformatora se na terenu najčešće mjeri struja magnetiziranja, provjerava prijenosni omjer, mjeri otpor izolacije namota, ispituje dielektrična čvrstoća ulja, radi fizikalno-kemijska i kromatografska analiza ulja, ispituje rad zaštitnih uređaja na transformatoru (signalizacija), radi vizualna kontrola montiranih dijelova i nepropusnosti svih spojeva na transformatoru, a često još dodatno mjere otpori namota, kapaciteti i faktor dielektričnih gubitaka namota i provodnika ($\tan \delta$), mjeri ovlaženost izolacije, mjeri rasipni induktivitet namota, te ispituje frekvencijski odziv transformatora (FRA).

19.2. Natpisna pločica

Svaki transformator mora imati natpisnu pločicu od materijala otpornog na vremenske uvjete postavljenu u vidljivi položaj. Zapis na pločici moraju biti neizbrisivi i sadržavati sljedeće nužne podatke [123]:

1. Vrsta transformatora (npr. transformator, autotransformator, strujni transformator, naponski transformator)
2. Broj standarda prema kojem su definirani podaci (npr. IEC 60076)
3. Naziv proizvođača (npr. Končar D&ST, Alstom, ABB, Siemens)
4. Tip i serijski broj
5. Godina proizvodnje
6. Broj faza
7. Nazivna snaga (u kVA ili MVA). Za višenamotne transformatore mora biti navedena snaga svakog namota. Moraju biti navedene kombinacije opterećenja osim ako je snaga jednog namota jednaka sumi snaga svih ostalih namota.
8. Nazivna frekvencija
9. Nazivni napon (u V ili kV) i raspon regulacije napona (npr. 11 kV $\pm 2 \times 2,5$ %)

5. Shema spoja u slučaju kada standardna oznaka spoja ne daje kompletnu informaciju o unutarnjim spojevima
6. Masa za prijevoz (za transformatore ukupne mase veće od 5 t)
7. Masa jezgre i namota (engl. *untanking mass*)

19.2.2. Primjeri natpisnih pločica

Primjeri natpisnih pločica za distribucijski, energetski i specijalni transformator prikazani su na slikama 20.1, 20.2 i 20.3.

KONČAR D&ST		TRANSFORMER	
Type	5TBNO 800-12/OP	No	DT1143- Year
Power	800 kVA	Connect.	Dyn11
Phases	3	Standard	IEC 60076
Freq.	50 Hz	Cooling	ONAN
P ₀	< A ₀	635	W
P _K	< B _K	6300	W
Windings	Al	385	kg
Oil	CLASS 0	440	kg
Core	HGO-DR	1230	kg
Total mass		2490	kg

MADE IN CROATIA

SL 19.1. Primjer natpisne pločice distribucijskog transformatora

