

Dr.sc. Branimir Ćučić, dipl.ing.el
Končar-Distributivni i specijalni transformatori
branimir.cucic@koncar-dst.hr

Marko Krainz, dipl.ing.el
Končar-Distributivni i specijalni transformatori
marko.krainz@koncar-dst.hr

Nina Meško, dipl.ing.el
Končar-Distributivni i specijalni transformatori
nina.mesko@koncar-dst.hr

Mr.sc. Mate Biloš, dipl.ing.el
Končar-Distributivni i specijalni transformatori
mate.bilos@koncar-dst.hr

OTPORNOST TRANSFORMATORA NA ATMOSFERSKE PRENAPONE I SILE KRATKOG SPOJA

SAŽETAK

Članak opisuje mjere koje se koriste u dizajnu 110 kV transformatora snage 20 MVA kako bi transformator bio otporan na atmosferske prenapone i sile kratkog spoja.

Atmosferski prenaponi simuliraju se udarnim naponom prema kojem se dimenzioniraju namoti i kojim se ispituje transformator kako bi se dokazala njegova otpornost na atmosferske prenapone.

Dizajn namota na kratki spoj uzima u obzir vlačno i tlačno naprezanje, naprezanje na savijanje i izvijanje.

Ključne riječi: energetska transformator, atmosferski prenaponi, kratki spoj

LIGHTING STRIKE AND SHORT-CIRCUIT WITHSTAND CAPABILITY OF A POWER TRANSFORMER

SUMMARY

The article describes the measures used in the design of a 20 MVA, 110 kV transformer to be able to withstand lightning strike and short circuit.

Lightning strike is being simulated with a lightning impulse. Windings are designed to withstand the lightning impulse.

When designing the windings to withstand short circuit, compressive and tensile stress, bending stress and buckling are considered.

Key words: power transformer, lightning strike, short circuit

1. UVOD

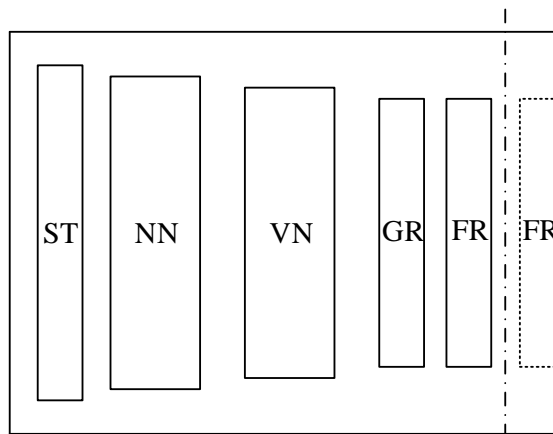
Članak obrađuje tematiku otpornosti transformatora na atmosferske prenapone i sile kratkog spoja tipičnog 110 kV energetskog transformatora snage 20 MVA u distribucijskoj mreži i to s aspekta dimenzioniranja transformatora. U Republici Hrvatskoj takvi transformatori najčešće povezuju mreže 110 kV i 20 kV ili 10 kV. Osnovni podaci jednog takvog transformatora navedeni su u tablici I.

Tablica I. Osnovni podaci 110 kV transformatora nazivne snage 20 MVA

Omjer transformacije	110 kV \pm 10x1,5% / 21 kV / (10,5 kV)
Izolacijska razina	LI550 AC230 / LI125 AC50 / AC28
Grupa spoja	YNyn0+d5
Nazivne struje	105 A / 550 A / 212 A
Napon kratkog spoja	11 %
Gubici praznog hoda	20 kW
Gubici kratkog spoja	120 kW

Raspored namota u prozoru takvog transformatora prikazan je na slici 1.

ST – stabilizacijski namot
NN – niženaponski namot
VN – višenaponski namot
GR – namot grube regulacije
FR – namot fine regulacije
FR' – namot fine regulacije druge faze



Slika 1. Raspored namota u prozoru transformatora

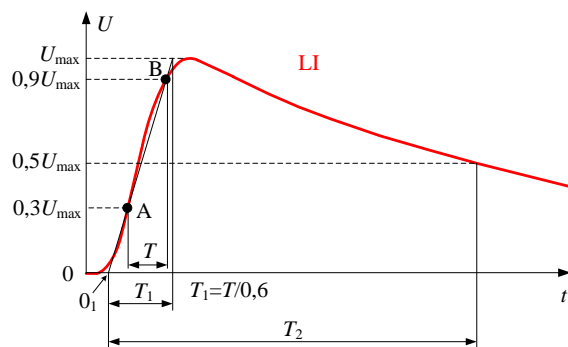
Za navedeni transformator pokazat će se koje se projektantske mjere poduzimaju da bi transformator u pogonu bio otporan na atmosferske prenapone i sile kratkog spoja.

2. OTPORNOST TRANSFORMATORA NA ATMOSFERSKE PRENAPONE

2.1. Ispitni naponi

Transformator je u pogonu izložen različitim naponima kao što su trajni pogonski napon, povremeni prenaponi, sklopni prenaponi i atmosferski prenaponi. Sve te napone transformator mora izdržati. Stoga su razvijene metode ispitivanja koje simuliraju sve navedene napone koji se u pogonu mogu pojaviti. Tako se na primjer otpornost izolacijskog sustava na trajni pogonski napon i povremene prenapone dokazuje ispitivanjem transformatora s približno dvostrukim nazivnim naponom sinusnog oblika i to na dva načina: ispitivanjem stranim naponom (AV) trajanja 60 s i ispitivanjem induciranim naponom pri povišenoj frekvenciji čije trajanje ovisi o frekvenciji f (60 s za $2f$, 40 s za $3f$ ili 30 s za $4f$).

Da bi se dokazala otpornost transformatora na atmosferski prenapone, transformator je potrebno ispitati udarnim naponom (eng. *lighting impulse* – LI). Valni oblik udarnog napona prikazan je na slici 2., a nastao je kao rezultat promatranja i mjerenja prenapona atmosferskog porijekla.



Slika 2. Valni oblik udarnog napona

Vrijeme porasta vala T_1 (vrijeme čela) i vrijeme hrbata T_2 se prema [1] i slici 2. računaju u odnosu na fiktivno ishodište 0_1 definirano pravcem koji prolazi kroz točke A i B. Vrijeme čela T_1 se definira kao $T_1=T/0,6$; gdje je T vrijeme potrebno da udarni val sa 30 % dođe na 90 % amplitude U_{max} . Vrijeme hrbata T_2 se definira kao vrijeme potrebno da udarni val padne na 50% amplitude U_{max} . Standardni oblik punog vala definiran je vremenima $T_1 = 1,2 \mu s$ i $T_2 = 50 \mu s$. Prilikom ispitivanja transformatora udarnim naponom dopuštena su vremena $T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\%$ i $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$.

U tablici II. prikazani su ispitni naponi prema [2]. Ispitni naponi ovise o maksimalnom naponu opreme U_m . Maksimalni napon opreme je maksimalni dozvoljeni trajni linijski napon.

Tablica II. Ispitni naponi prema [2] do $U_m = 420$ kV

Najviši napon opreme	Udarni napon punog vala	Udarni napon odrezanog vala	Sklopni napon	Strani napon
U_m	(LI)	(LIC)	(SI)	(AV), (LTAC)
kV	kV	kV	kV	kV
<1,1	-	-	-	3
3,6	20	22	-	10
	40	44	-	10
7,2	60	66	-	20
	75 ^a	83 ^a	-	20
12	75	83	-	28
	95	105	-	28
	110 ^a	121 ^a	-	34 ^a
17,5	95	105	-	38
	125 ^a	138 ^a	-	38
24	125	138	-	50
	145	160	-	50
	150 ^a	165 ^a	-	50
36	170	187	-	70
	200 ^a	220 ^a	-	70
52	250	275	-	95
72,5	325	358	-	140
	350 ^a	385 ^a	-	140
100	450	495	375 ^a	185
123	550	605	460 ^a	230
145	550	605	460 ^a	230
	650	715	540 ^a	275
170	650	715	540 ^a	275
	750	825	620 ^a	325
245	850	935	700 ^a	360
	950	1045	750 ^a	395
	1050	1155	850 ^a	460
300	950	1045	750	395
	1050	1155	850	460
362	1050	1155	850	460
	1175	1290	950	510
420	1175	1290	950	510
	1300	1430	1050	570
	1425	1570	1175 ^a	630

Gornji indeks ^a označava nove vrijednosti u standardu IEC 60076-3 [2] iz 2013. zbog poveznice sa sklopnim naponom (eng. *switching impulse* – SI) ili zbog toga što su te vrijednosti uobičajene u nekim dijelovima svijeta.

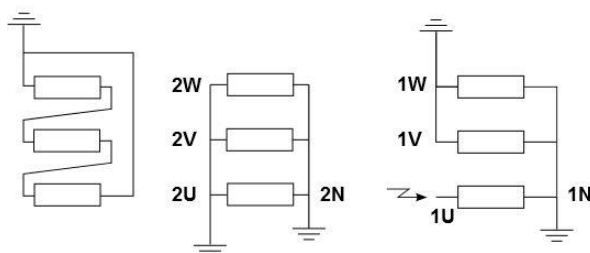
Prema tablici II. za sve 110 kV mreže, maksimalni napon opreme iznosi $U_m=123$ kV, a ispitni naponi iznose LI=550 kV i AV=230 kV (eng. *applied voltage* – AV, strani napon).

Za 20 kV mrežu, maksimalni napon opreme iznosi $U_m=24$ kV, a ispitni naponi su LI=125 (uobičajeno), 145 ili 150^a kV i AV=50 kV.

U daljnjem tekstu fokus će biti na naponu atmosferskog porijekla (LI).

2.2. Ispitivanje transformatora udarnim naponom

Na slici 3. prikazana je principijelna shema ispitivanja VN namota udarnim naponom oblika prema slici 2. za transformator u spoju YNyn0+d5.



Slika 3. Shema ispitivanja VN namota transformatora udarnim naponom

Udarnim valom ispituje se svaki namot posebno i to tako da se na ulaz namota dovodi udarni napon, a kraj uzemljuje. Priključci ostalih namota se kratko spajaju i uzemljuju.

2.3. Mjerodavni napon

Općenito se svi izolacijski razmaci u transformatoru određuju na temelju tzv. mjerodavnih napona. Mjerodavni napon je najveći ekvivalentni napon koji se može pojaviti na određenom mjestu u transformatoru, a njegovo porijeklo može biti strani, inducirani napon, LI ili pogonski napon.

Za raspored namota prikazan na slici 1. udarni napon je mjerodavan za dimenzioniranje izolacije između VN i GR namota, GR i FR namota te između dva FR namota (FR-FR').

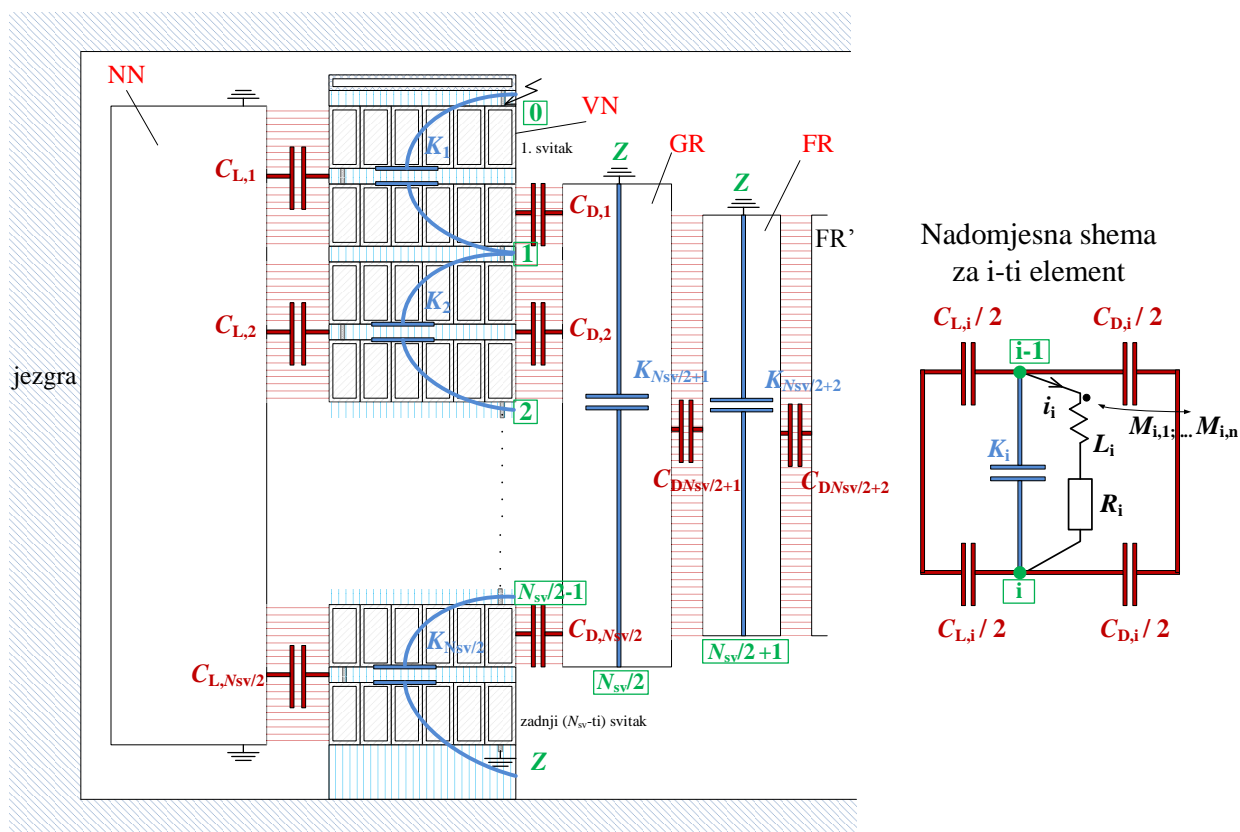
Udarni napon je mjerodavan i za određivanje izolacije vodiča u VN namotu koji je prema slici 4. izveden kao preloženi namot. Naime, debljinu izolacije vodiča određivat će maksimalni naponi koji se mogu pojaviti između svitaka te između zavoja unutar svitka.

Kako se u fazi projektiranja transformatora određuju ovi naponi prikazano je u sljedećoj točki.

2.4. Proračun raspodjele udarnih napona i dimenzioniranje izolacije

Slika 4. prikazuje nadomjesnu shemu za proračun udarnih napona u minus položaju regulacije i to za konfiguraciju namota prikazanu na slici 1. VN preloženi namot se dijeli na elemente po principu dva svitka-jedan element, dok za svaki regulacijski namot vrijedi princip jedan namot-jedan element. Prema [3] svaki se element (općenito i-ti) na slici 4. nadomješta s:

- vlastitim kapacitetom K_i koji u obzir uzima akumuliranu energiju između zavoja u svitka te između svitaka
- radijalnim kapacitetima $C_{L,i}$ i $C_{D,i}$ prema uzemljenim elektrodama s lijeve i desne strane promatranog elementa
- omskim otporom elementa R_i
- rasipnim induktivitetom L_i prema kratko spojenom namotu (NN)
- međui induktivitetom M_{ij} između i-tog i j-tog elementa (utjecaj struje u j-tom elementu na i-ti element).

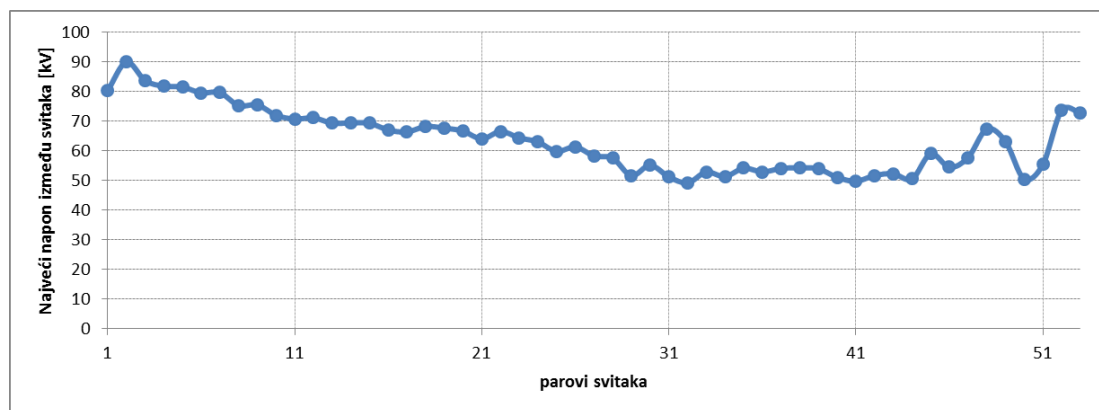


Slika 4. Nadomjesni kapaciteti i shema za proračun udarnih napona

Postavljanjem jednačbi prema prvom i drugom Kirchoffovom zakonu i njihovim rješavanjem dobivaju se nepoznati potencijali čvorova [3]. U konkretnom slučaju postoji $N_{sv}/2+1$ nepoznatih potencijala čvorova gdje je N_{sv} broj svitaka u VN namotu. Nakon određivanja potencijala čvorova računaju se naponi između svitaka i zavoja unutar svitka, te naponi između VN i regulacijskih namota na temelju čega se onda dimenzionira izolacijski sustav.

Maksimalni napon između svitaka i maksimalni napon između zavoja ne smiju prelaziti dozvoljene podnosive napone. Podnosivi napon između svitaka je funkcija debljine izolacije vodiča i visine radialnog kanala između svitaka, a podnosivi napon između zavoja je funkcija debljine izolacije vodiča.

Raspodjela udarnog napona po namotu je nelinearna. Na slici 5. prikazana je računaska raspodjela udarnog napona po visini VN namota promatranog transformatora gdje se vidi da su najviše opterećeni svici na početku i kraju namota.



Slika 5. Raspodjela udarnog napona po VN namotu transformatora (lijevo-gornji kraj namota)

3. OTPORNOST TRANSFORMATORA NA KRATKI SPOJ

Svaki transformator tijekom svog životnog vijeka doživi nekoliko kratkih spojeva u mreži koje transformator mora izdržati. Transformator se na kratki spoj dimenzionira u skladu sa standardom IEC 60076-5 [4] i to na temelju najvećih struja koje se u transformatoru mogu pojaviti tijekom kratkog spoja.

Na zahtjev kupca se otpornost transformatora na kratki spoj može dokazati na jedan od sljedeća tri načina [4]:

- ispitivanjem transformatora na kratki spoj
- usporedbom sa sličnim transformatorom koji je uspješno ispitan na kratki spoj
- provjerom proračuna sila i naprezanja u kratkom spoju.

3.1. Struje u kratkom spoju

Trajna struja kratkog spoja I_t se računa za najgori slučaj, tj. pretpostavku da je snaga kratkog spoja mreže beskonačna, pa su namoti dimenzionirani za struju kratkog spoja određenu samo impedancijom transformatora:

$$I_t = \frac{100}{u_k} I_n \quad (2)$$

Udarana struja kratkog spoja ovisi o trenutku nastanka kratkog spoja. U najgorem slučaju kada kratki spoj nastane dok napon prolazi kroz nulu, udarna struja kratkog spoja I_u , prikazana na slici 6., se prema [4] računa na sljedeći način:

$$u_r = \frac{P_t}{10S_n} \quad (3)$$

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_r^2} \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \frac{u_x}{u_r} \quad (5)$$

$$k = 1 + e^{-\frac{(\phi + \pi/2) \cdot u_r}{u_x}} \sin \phi \quad (6)$$

$$I_u = k \sqrt{2} I_t \quad (7)$$

gdje je:

I_t – trajna struja kratkog spoja (efektivna vrijednost), A

I_u – udarna struja kratkog spoja (maksimalna vrijednost), A

I_n – nazivna fazna struja, A

P_t – gubici tereta pri 75 °C, kW

S_n – nazivna snaga transformatora, MVA

u_k – napon kratkog spoja pri 75 °C, %

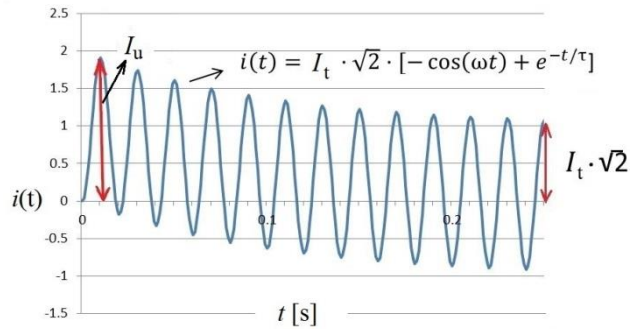
u_r, u_x – radna i induktivna komponenta napona kratkog spoja pri 75 °C, %

$k\sqrt{2}$ – faktor povećanja struje definiran jednadžbama (3)-(6) i prikazan u tablici III.

Tablica III. Faktor povećanja termičke struje kratkog spoja u ovisnosti o omjeru u_x/u_r

u_x/u_r	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	14
$k\sqrt{2}$	1,51	1,64	1,76	1,95	2,09	2,19	2,27	2,37	2,46	2,55

Na slici 6. prikazan je valni oblik struje kratkog spoja.



Slika 6. Valni oblik struje kratkog spoja

Uvrštenjem podataka iz tablice I. u formule (2)-(7), dobivaju se sljedeće struje kratkog spoja na NN strani:

- trajna struja kratkog spoja $I_t=5$ kA i
- udarna struja kratkog spoja $I_u=13$ kA.

3.2. Magnetsko polje i djelovanje sila

Ako se promatra vodič duljine l , čiji je smjer vektora \vec{l} određen smjerom struje I koja teče kroz taj vodič, a on se nalazi u vanjskom magnetskom polju indukcije B , tada na vodič djeluje sila

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} \quad (8)$$

Za jedinične vektore prema slici 7., uz predznak (+) za vodič vanjskog namota (VN) i predznak (-) za vodič unutrašnjeg namota (NN), vektor dijela vodiča duljine l je:

$$\vec{l} = \pm l \cdot \vec{a}_t \quad (9)$$

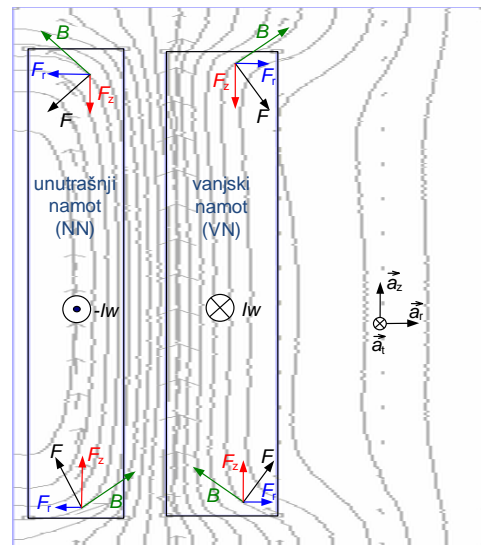
Vektor gustoće rasipnog magnetskog toka \vec{B} može se prikazati kao:

$$\vec{B} = B_r \cdot \vec{a}_r + B_z \cdot \vec{a}_z \quad (10)$$

Sila na vodič namota kroz koji teče struja I je:

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B} = \pm I \cdot l \cdot (B_z \cdot \vec{a}_r - B_r \cdot \vec{a}_z) \quad (11)$$

$$\vec{F} = F_r \cdot \vec{a}_r + F_z \cdot \vec{a}_z \quad (12)$$



Slika 7. Djelovanje sila na namote transformatora

gdje je:

$\vec{a}_r, \vec{a}_z, \vec{a}_t$ jedinični vektori u radijalnom, aksijalnom i tangencijalnom smjeru

F – sila na vodič duljine l koji se nalazi u polju B i kroz koji teče struja I , N

F_r – radijalna komponenta sile, N

F_z – aksijalna komponenta sile, N

B_r – radijalna komponenta magnetske indukcije rasipnog polja na mjestu gdje se računa sila, T

B_z – aksijalna komponenta magnetske indukcije rasipnog polja na mjestu gdje se računa sila, T

Prema slici 7., aksijalna komponenta rasipne indukcije (B_z) uzrokuje radijalnu silu (F_r), dok radijalna komponenta rasipne indukcije (B_r) uzrokuje aksijalnu silu (F_z).

3.3. Radijalne sile

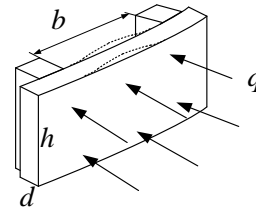
Prema izvedenom izrazu za silu, radijalna sila F_r tlači unutrašnji namot ($F_r < 0$), a razvlači vanjski ($F_r > 0$). Stoga radijalne sile uzrokuju vlačna naprezanja u vanjskim namotima i tlačna naprezanja u unutrašnjim namotima. Za unutrašnje namote treba računati i naprezanje na savijanje i to za vodiče koji nasjedaju na letvice u aksijalnim kanalima. Također, kod tlačno napregnutih namota može doći do izvijanja, tj. gubitka forme.

3.3.1. Radijalno savijanje

Vodič opterećen kontinuiranom radijalnom silom q po jedinici duljine opsega se prema slici 8. promatra kao upeta greda između dva oslonca na razmaku b , tj. između dviju letvice u aksijalnom kanalu.

Maksimalno dozvoljeno naprezanje vodiča na radijalno savijanje izraženo u N/mm² se prema [5] računa na sljedeći način:

$$\sigma_s = \frac{q}{2h} \left(\frac{b}{d} \right)^2 \quad (13)$$



Slika 8. Radijalno savijanje

gdje je:

- q - kontinuirana radijalna sila po jedinici duljine opsega, N/mm
- h - visina vodiča, mm
- b - razmak između oslonaca (razmak letvica u aksijalnom kanalu), mm
- d - širina vodiča, mm

Prema [4] maksimalni iznos radijalnog naprezanja na savijanje ne smije prijeći 90 % granice razvlačenja $R_{p0.2}$ bakra.

3.3.2. Tlačno i vlačno naprezanje

Maksimalno tlačno i vlačno naprezanje u namotu izraženo u N/mm² se prema [5] računa kao:

$$\sigma_t = \frac{F_r}{\pi} \cdot \frac{1}{2A} \quad (14)$$

gdje je F_r ukupna radijalna sila u N, a A ukupni presjek vodiča na promatranom segmentu u mm². Maksimalno tlačno naprezanje prema [4] ne smije prijeći 60 % granice razvlačenja bakra $R_{p0.2}$ za vodiče s epoksidom, odnosno 35 % za vodiče bez epoksida, dok za vlačno naprezanje ne smije prijeći $0,9R_{p0.2}$.

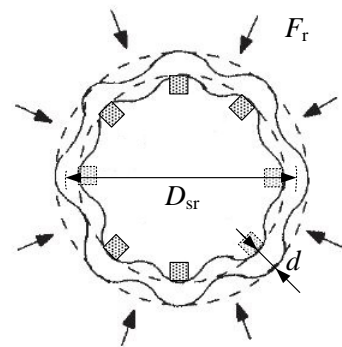
3.3.3. Izvijanje

Tlačno naprezanje u namotu može dovesti do gubitka geometrijske stabilnosti materijala pri čemu se prema slici 9. vodiči namota izvijaju preko oslonaca, tj. letvica u aksijalnom kanalu. Kritično tlačno naprezanje σ_{KR} izraženo u N/mm² pri kojem dolazi do izvijanja preko oslonaca je:

$$\sigma_{KR} = n^2 \cdot \frac{E_{Cu}}{12} \cdot \left(\frac{d}{D_{sr}} \right)^2 \quad (15)$$

gdje je:

- n - broj oslonaca
- E_{Cu} - Youngov modul elastičnosti za bakar, N/mm²
- d - širina, mm
- D_{sr} - srednji promjer sloja, mm



Slika 9. Izvijanje preko oslonaca

Ova jednadžba se u literaturi spominje kao Fischerova jednadžba [6]. Tlačno naprezanje u namotu ne smije prelaziti kritično tlačno naprezanje, tj. mora biti $\sigma_t < \sigma_{KR}$.

3.4. Aksijalne sile

Prema slici 7., 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 radijalna komponenta indukcije. Ako su NN i VN namoti međusobno dobro centrirani, tj. ako je rasipno polje simetrično s gornje i donje strane namota, ukupni vektorski zbroj pojedinačnih aksijalnih sila po cijeloj visini namota je jednak nuli, a najveće naprezanje izolacije u tom slučaju nastaje u sredini namota (zbrajaju se aksijalne sile na sve vodiče jedne polovice namota). U realnosti uvijek postoji mala nesimetrija između namota, pa je rezultantna aksijalna sila na namot različita od nule. U fazi dizajna transformatora, aksijalne sile se računaju uz pretpostavku aksijalne nesimetrije.

Aksijalne sile za navedeni transformator iz tablice I. uzrokuju tlačna naprezanja u izolaciji namota i podložnim pločicama, te aksijalno naprezanje na savijanja vodiča uz radijalne kanale (podložne pločice su oslonci).

3.4.1. Pritisci na izolaciju i konstrukcijske dijelove

Pritisci na papirnu izolaciju i podložne pločice u N/mm^2 računaju se prema izrazu [7]:

$$P_{ipp} = \frac{F_a}{A_{ipp}} \quad (17)$$

gdje je A_{ipp} površina izolacije, odnosno podložnih pločica u mm^2 , a F_a aksijalna sila u N.

Maksimalni dozvoljeni pritisci prema [4] dani su u tablici IV.

Tablica IV. Dopuštena naprezanja u izolaciji prema [4]

Tlačno naprezanje na podložne pločice od prešpana za vodič izoliran papirom	80 MPa
Tlačno naprezanje na podložne pločice od prešpana za vodič izoliran lakom	120 MPa
Tlačno naprezanje na papirnu izolaciju višeslojnog namota	35 MPa

3.4.2. Aksijalno savijanje

Izraz za aksijalno naprezanje je jednak izrazu za naprezanje na radijalno savijanje, samo što širina d i visina vodiča h mijenjaju mjesta.

$$\sigma_s = \frac{q}{2d} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \quad (18)$$

gdje je:

q - kontinuirana aksijalna sila po jedinici duljine, N/mm

h - visina vodiča, mm

b - razmak između oslonaca (razmak pločica u radijalnom kanalu), mm

d - širina vodiča, mm

Standard [4] definira da maksimalni iznos aksijalnog savijanja ne smije prelaziti 90 % granice razvlačenja $R_{p0.2}$ bakra.

3.5. Utjecajni parametri za dizajn namota na kratki spoj

U literaturi [5] je pokazano da se naprezanje na savijanje može napisati u sljedećem obliku

$$\sigma_s = \text{konstanta} \cdot \frac{J_n \cdot b^2 \cdot B_0}{d \cdot u_k} \quad (19)$$

gdje je:

- J_n - gustoća struje u namotu, A/mm²
- b - razmak oslonaca, mm
- B_0 - amplituda rasipne magnetske indukcije u kanalu NN-VN, T
- d - širina vodiča, mm
- u_k - napon kratkog spoja, %

Stoga je za smanjenja naprezanja u kratkom spoju treba imati što manju gustoću struje J_n , što viši namot (manji B_0), što manji razmak oslonaca b (veći broj oslonaca), što širi vodič d i što veći napon kratkog spoja u_k .

Također se povećanje otpornosti na kratki spoj može postići korištenjem vodiča s epoksidnom smolom te korištenjem bakra povećane čvrstoće.

U proizvodnji je bitno da namoti budu dobro osušeni i centrirani, a mehaničkih svojstava materijala se moraju kontrolirati.

4. ZAKLJUČAK

Svaki transformator se dimenzionira tako da može izdržati ispitivanje udarnim valom koji simulira atmosferske prenapone. Također se svaki namot dimenzionira na kratki spoj prema standardu IEC60076- 5.

Transformator omjera napona 110 kV / 20 kV / (10,5) kV, nazivne snage 20 MVA i grupe spoja YNyn0+d5 korišten u distribucijskoj mreži Republike Hrvatske je dimenzioniran na struje kratkog spoja ograničene samo impedancijom transformatora.

5. LITERATURA

- [1] IEC 60060-1, High-voltage techniques – Part 1: General definitions and test requirements, 2010.
- [2] IEC 60076-3, Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, srpanj 2013.
- [3] B. Čučić, „Raspodjela udarnog napona po preloženom namotu transformatora“, magistarski rad, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2001.
- [4] IEC 60076-5, Power transformers – Part 5: Ability to withstand short circuit, veljača 2006.
- [5] N. Meško, B. Čučić, D. Žarko, " Short-circuit stress calculation in oval windings ", 4th International Colloquium "Transformer Research and Asset Management", 2017.
- [6] H. Thompson, F. Tillery, D. von Rosenberg, "The dynamic response of low voltage, high current, disk type transformer windings to through fault loads", 1979.
- [7] B. Bošnjak, "Mehanička naprezanja u energetskim transformatorima pri kratkom spoju", kvalifikacijski doktorski ispit, FER, Zagreb, 2011.