

Пројектовање и израда високонапонског трансформатора 0,23/50 kV/kV

Милош Миловановић
Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
milos.milovanovic@pr.ac.rs

Бојан Перовић
Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
bojan.perovic@pr.ac.rs

Јордан Радосављевић
Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
jordan.radosavljevic@pr.ac.rs

Младен Бањанин
Електротехнички факултет
Универзитет у Источном
Сарајеву
Источно Сарајево, Република
Српска, БиХ
mladen.banjanin@etf.ues.rs.ba

Јован Вукашиновић
Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
jovan.vukasinovic@pr.ac.rs

Андријана Јовановић
Факултет техничких наука
Универзитет у Приштини са
привременим седиштем у
Косовској Митровици
Косовска Митровица, Србија
andrijana.jovanovic@pr.ac.rs

Сажетак—Овај рад представља инжењерски приступ пројектовању, конструкцији и испитивању специјалног високонапонског трансформатора снаге 5 kVA, фреквенције 50 Hz и односа трансформације 0,23/50 kV/kV. Посебан акценат стављен је на технички захтеван процес оптимизације електричних и конструкционих параметара, уз уважавање критеријума економичности, технолошке изводљивости и енергетске ефикасности. Анализирани су кључни конструктивни елементи трансформатора, као што су језгро, намотаји и изолациони систем. Посебно је истакнута могућност примене конструисаног трансформатора за испитивање диелектричне чврстоће трансформаторског уља, што потврђује његову практичну вредност у дијагностици и контроли квалитета изолационих уља и материјала.

Кључне речи- високонапонски трансформатор; диелектрична чврстоћа; конструкција; пројектовање

I. УВОД

Трансформатори представљају један од најзначајнијих и најраспрострањенијих енергетских уређаја у савременим електроенергетским системима (ЕЕС). Њихова основна улога је пренос и трансформација електричне енергије са једног напонског нивоа на други. Разноликост трансформатора варира од малих, уграђених у електронске уређаје, до огромних енергетских трансформатора који повезују велике делове ЕЕС-а. Уљни трансформатори, као најчешће коришћени тип трансформатора у енергетици, обезбеђују поуздан рад захваљујући минералном уљу које служи као изолациони и расхладни медијум. Дијагностика стања изолационог система, посебно испитивање диелектричне чврстоће уља, има кључни значај за одржавање поузданости и безбедности рада трансформатора, јер омогућава рану детекцију деградације изолације и превенцију потенцијалних оштећења [1].

Циљ овог рада је да се изврши пројектовање, конструкција и испитивање специјалног високонапонског

трансформатора снаге 5 kVA, фреквенције 50 Hz и односа трансформације 0,23/50 kV/kV. Развијени трансформатор ће служити као део апаратуре за испитивање диелектричне чврстоће трансформаторског уља. Процес пројектовања у раду је усмерен ка остваривању техничке изводљивости, економичности и енергетске ефикасности. Пројектовање и испитивање је изведено у складу са релевантним стандардима, пре свега IEC 60076 серијом [2], која обухвата захтеве за дизајн, безбедност, изолацију, термичка својства и испитивања трансформатора. Изабран је напонски ниво од 50 kV због значаја диелектричне чврстоће трансформаторског уља на овом нивоу. Вредности диелектричне чврстоће новог уља крећу се у опсегу од 70 kV/2,5 mm до 80 kV/2,5 mm, док се диелектрична чврстоћа, за трансформаторе напонског нивоа до 72,5 kV, категорише у три категорије: „добро“ (> 55 kV/2,5 mm), „прихватљиво“ (40 – 55 kV/2,5 mm) и „лоше“ (< 40 kV/2,5 mm) [3]. Ове границе представљају основу за процену и одржавање изолационих својстава уља и оправдавају примену трансформатора управо на овом напонском нивоу.

II. ПРОЈЕКТОВАЊЕ ТРАНСФОРМАТОРА

Пројектовање трансформатора представља једну од кључних дисциплина у области електротехничког инжењерства. Задатак пројектанта је да кроз детаљне прорачуне дефинише оптимално решење које ће обезбедити трансформатор најбољих експлоатационих карактеристика уз минималне производне трошкове, истовремено испуњавајући све техничке захтеве и стандарде. Основни параметри који се постављају у складу са потребама ЕЕС-а су: номинална снага, номинални преносни однос, напон кратког споја, струја празног хода, губици у празном ходу и губици при оптерећењу. Са аспекта производње, кључни фактори су примењена технологија и количина основних материјала.

Процес пројектовања трансформатора често је комплексан и временски захтеван, будући да се

економски интереси купца (смањење губитака) не поклапају са интересима произвођача (смањење масе и материјалних трошкова). Проблем додатно усложњава велики број могућих комбинација електричних и геометријских параметара, чија је међузависност нелинеарна и условљена бројним ограничењима. Циљ овог прорачуна је да се одреде димензије трансформатора на начин који обезбеђује да његове техничке карактеристике буду у рангу са карактеристикама добро пројектованих трансформатора исте намене и врсте. У овом раду, пројектовање трансформатора је извршено у складу са методологијом датом у [4] и [5].

A. Задатак

Пројектовати трансформатор следећих карактеристика:

- Номинална привидна снага: $S_n = 5 \text{ kVA}$
- Номинални примарни напон: $U_{n1} = 230 \text{ V}$
- Номинални секундарни напон: $U_{n2} = 50 \text{ kV}$
- Номинална учестаност: $f_n = 50 \text{ Hz}$
- Врста хлађења: $ONAN$

B. Избор података

Усвојени су следећи подаци:

- Густина струје: $\Delta = 3 \text{ A/mm}^2$
- Максимална вредност индукције: $B_m = 1,6 \text{ T}$
- Лимови чији су специфични губици у функцији максималне индукције: $p_{Fe} = 0,8 \text{ W/kg}$, $q_{Fe} = 1 \text{ VA/kg}$

Горенаведене вредности специфичних губитака у језгру односе се на тип лима TRAN-COR® Н-1 CARLITE®, АК Steel International, дебљине 0.27 mm, тестиран у складу са стандардом ASTM A804 [6].

C. Магнетно коло

Магнетно коло се гради од високо квалитетних хладно ваљаних оријентисаних трансформаторских лимова. Да би се смањила струја магнећења тежи се узимању што квалитетнијег лима, са великом пермеабилношћу и примењују се одговарајућа конструкциона и технолошка решења у изради магнетског кола. Ради смањења губитака услед вихорних струја, користе се међусобно изоловани лимови мале дебљине.

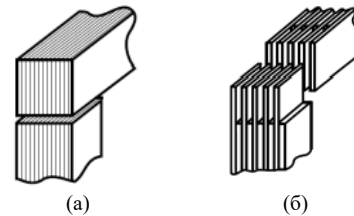
1) Омеравање магнетног кола

- Геометријски пресек магнетног кола:

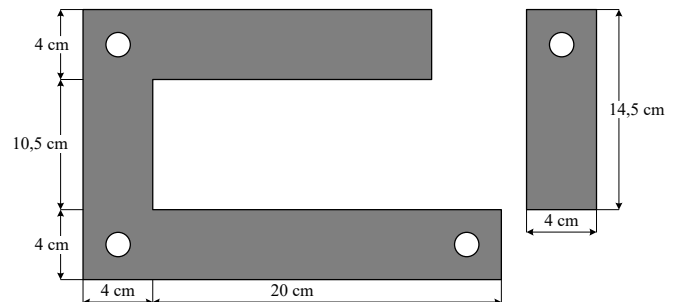
$$S_{Fe} = K_{SFe} \cdot \sqrt{S_{ST}} = K_{SFe} \cdot \sqrt{\frac{S_n}{2}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{5}{2}} = 47,43 \text{ cm}^2, \\ K_{SFe} = (22 \div 30). \quad (1)$$

Усваја се следећи пресек језгра: ширина пакета лимова 4 cm, а његова дебљина 13 cm, што даје ефективну површину попречног пресека језгра $S_{Fe} = 4 \cdot 13 = 52 \text{ cm}^2$.

Магнетно коло се састоји од више делова, при чему је слагање лимова изведено са преклапањем, као што је приказано на Сл. 1. Користе се UI профили, са димензијама назначеним на Сл. 2. Лимови једног слоја прекривају ваздушне заоре који настају у другом слоју, чиме се формира тзв. укалемљени спој. Оваквим преклапањем лимова смањује се ефективни ваздушни зазор у језгру, што за последицу има смањење струје магнећења и побољшање магнетних карактеристика кола.



Слика 1. Начини слагања лимова: (а) туп и (б) укалемљен спој



Слика 2. Лимови UI профила са назначеним димензијама

- Пречник стуба:

$$D = K_D \cdot \sqrt{S_{Fe}} = 11,8 \cdot \sqrt{52} = 85 \text{ mm} = 8,5 \text{ cm}, \\ K_D = (11,8 \div 12,5). \quad (2)$$

- Висина стуба:

$$h = K_H \cdot D = 1,88 \cdot 8,5 = 16 \text{ cm}, K_H = (1,8 \div 2,9). \quad (3)$$

- Висина магнетног кола:

$$H = h + 2 \cdot b = 16 + 2 \cdot 4 = 24 \text{ cm}. \quad (4)$$

- Осни пресек стуба:

$$L = K_L \cdot D = 1,7 \cdot 8,5 = 14,5 \text{ cm}, K_L = (1,7 \div 2,2). \quad (5)$$

- Дужина магнетног кола:

$$g = L + b = 14,5 + 4 = 18,5 \text{ cm}. \quad (6)$$

2) Намотаји

Код енергетских трансформатора стандардне конструкције најчешће се примењују концентрични намотаји округлог облика.

A. Намотај ниског напона (примар)

- Број навојака примара:

$$N_1 = \frac{U_{n1}}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_{Fe}} = \frac{230}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 52 \cdot 10^{-4}} = 124. \quad (7)$$

- Номинална струја примара:

$$I_{n1} = \frac{S_n}{U_{n1}} = \frac{5000}{230} = 21,74 \text{ A}. \quad (8)$$

Усваја се двоструко лакирана бакарна жица округлог пресека, површине попречног пресека $S_{Cu1} = 2,5 \text{ mm}^2$. Пречник лакиране жице износи 1,9 mm.

- Укупна висина примара:

$$h_1 \approx h - 2v_1 = 160 - 2 \cdot 15 = 130 \text{ mm}, \quad (9)$$

где је v_1 растојање намотаја примара према јарму.

- Стварна висина намотаја:

$$h_{sl1} = \left(\frac{N_1}{2} + 1 \right) \cdot d_1 = \left(\frac{124}{2} + 1 \right) \cdot 1,9 = 120 \text{ mm}. \quad (10)$$

На преосталих 10 mm биће намотане изолационе траке ради изравнања висине намотаја. Број навоја који се може намотати на расположивој висини слоја израчунава се на основу пречника лакиране жице и расположиве висине:

$$N_{sl1} = \frac{h_{sl1}}{d_1} = \frac{120}{1,9} = 63. \quad (11)$$

Према томе, потребан број слојева је:

$$n_{sl1} = \frac{N_1}{N_{sl1}} = \frac{124}{63} = 1,97. \quad (12)$$

Усваја се $n_{sl1} = 2$.

- Укупна ширина примара:

$$\begin{aligned} a_1 &= n_{sl1} \cdot d_1 + (n_{sl1} - 1) \cdot \delta_{mi} + 2,5 \\ a_1 &= 2 \cdot 1,9 + 1 \cdot 0,2 + 2,5 = 6,5 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (13)$$

За међуслојну изолацију користи се прешпан дебљине 0,15 mm, премазан епоксидном смолом, па је рачуната дебљина изолационог слоја $\delta_{mi} = 0,2 \text{ mm}$. На Сл. 3а приказан је део намотаја примара.

В. Намотај високог напона (секундар)

- Број навојака секундара:

$$N_2 = \frac{U_{n2}}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot S_{Fe}} = \frac{50000}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,6 \cdot 52} = 27070. \quad (14)$$

- Номинална струја секундара:

$$I_{n1} = \frac{S_n}{U_{n1}} = \frac{5000}{50000} = 0,1 \text{ A}. \quad (15)$$

Усваја се двоструко лакирана бакарна жица округлог пресека: $S_{Cu2} = 0,03 \text{ mm}^2$. Пречник лакиране жице секундара (d_2) је 0,25 mm.

- Укупна висина секундара:

$$h_2 \approx h - 2v_2 = 160 - 2 \cdot 20 = 120 \text{ mm}, \quad (16)$$

где је v_2 растојање намотаја секундара према јарму.

Ова висина представља висину једног слоја, на којој је потребно намотати број навоја N_{sl2} , одређен једначином:

$$N_{sl2} = \frac{h_2}{d_2} = \frac{120}{0,25} = 480. \quad (17)$$

Према томе, потребан број слојева је:

$$n_{sl2} = \frac{N_2}{N_{sl2}} = \frac{27070}{480} = 56,4. \quad (18)$$

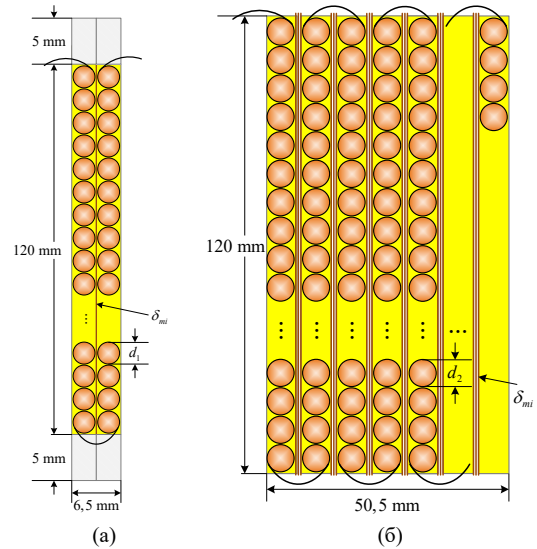
Усваја се $n_{sl2} = 57$.

- Укупна ширина секундара:

$$\begin{aligned} a_2 &= n_{sl2} \cdot d_2 + (n_{sl2} - 1) \cdot \delta_{mi} + 2,5 \\ a_2 &= 57 \cdot 0,25 + 56 \cdot 3 \cdot 0,2 + 2,5 \approx 50,5 \text{ mm}. \end{aligned} \quad (19)$$

За међуслојну изолацију користи се прешпан, у три слоја, дебљине 0,2 mm, премазан епоксидном смолом.

На Сл. 3б приказан је део намотаја секундара.



Слика 3. (а) Примарни намотај и (б) секундарни намотај

Да би се израчунала ширина намотаја мора се израчунати дебљина међуслојне изолације између свака два слоја. Она зависи од највишег међуслојног напона, који се јавља при испитном индукваном напону, тј.

$$\delta_{mi} = \frac{2 \cdot 2 \cdot N_{sl2} \cdot E_1}{8000} = \frac{4 \cdot 480 \cdot 1,85}{8000} = 0,44 \text{ mm}, (3 \cdot 0,2), \quad (20)$$

где је 8 kV/mm усвојена диелектрична чврстоћа прешпан папира (доња граница због сигурности), а E_1 је индуквана ЕМС у једном навојку, која износи:

$$E_1 = 222 \cdot B_m \cdot S_{Fe} = 222 \cdot 1,6 \cdot 52 \cdot 10^{-4} = 1,85 \text{ V/nav}. \quad (21)$$

3) Прорачун карактеристичних величина

А. Маса магнетног кола

За израду магнетног кола користи се лим са губицима снаге $p_{Fe} = 0,8 \text{ W/kg}$, снагом магнећења $q_{Fe} = 1 \text{ VA/kg}$, при максималној индукцији $B_m = 1,6 \text{ T}$, и масом $\gamma = 7650 \text{ kg/m}^3$.

- Маса језгра износи:

- два стуба:

$$2 \cdot S_{Fe} \cdot h \cdot \gamma = 2 \cdot 52 \cdot 160 \cdot 7,65 \cdot 10^{-4} = 12,73 \text{ kg}, \quad (22)$$

- два јарма:

$$2 \cdot S_{Fe} \cdot g \cdot \gamma = 2 \cdot 52 \cdot 185 \cdot 7,65 \cdot 10^{-4} = 14,72 \text{ kg}. \quad (23)$$

Укупна маса магнетног кола: 27,5 kg

В. Губици снаге у трансформатору

- Губици у гвожђу:

$$P_{Fe} = k_d \cdot m_{Fe} \cdot p_{Fe} = 1,25 \cdot 27,5 \cdot 0,8 = 28 \text{ W}, \quad (24)$$

где је k_d фактор повећања губитака услед слагања лимова.

- Губици у намотају примара и секундара:

$$P_{Cu1} = k \cdot m_{Cu1} \cdot \Delta_1^2, \quad (25)$$

$$P_{Cu2} = k \cdot m_{Cu2} \cdot \Delta_2^2, \quad (26)$$

где је k сачиниоц губитака, чије вредности за бакар износе 2 на 20 °C и 2,44 на температури од 75 °C.

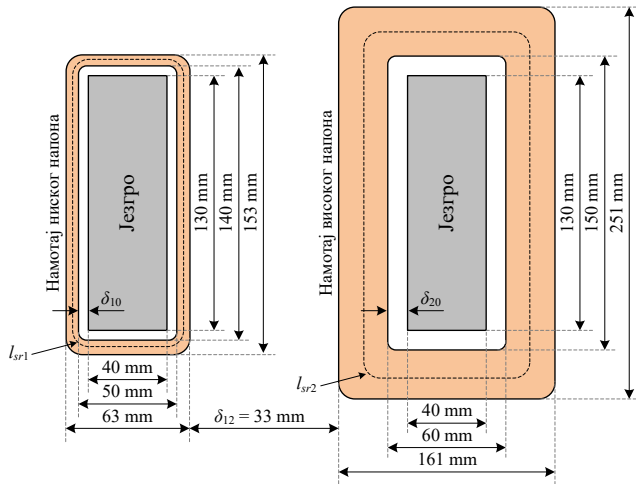
- Маса бакра примара и секундара:

$$m_{Cu1} = \rho_{Cu} \cdot l_1 \cdot S_{Cu1} \cdot 10^{-6}, \quad (27)$$

$$m_{Cu2} = \rho_{Cu} \cdot l_2 \cdot S_{Cu2} \cdot 10^{-6}, \quad (28)$$

где је $\rho_{Cu} = 8930 \text{ kg/m}^3$ специфична маса бакра, а l_1 и l_2 су укупне дужине намотаја примара и секундара, редом.

Димензије примарног и секундарног намотаја приказане су на Сл. 4.



Слика 4. Димензије намотаја примара и секундара

- Средње дужине навоја примара и секундара:

$$l_{sr1} = 2 \left[b + c + \pi \left(\delta_{10} + \frac{a_1}{2} \right) \right] = 392 \text{ mm}, \quad (29)$$

$$l_{sr2} = 2 \left[b + c + \pi \left(\delta_{20} + \frac{a_2}{2} \right) \right] = 562 \text{ mm}, \quad (30)$$

где су $\delta_{10} = 5 \text{ mm}$ и $\delta_{20} = 10 \text{ mm}$ изолациона растојања намотаја ниског напона (примара) и намотаја високог напона (секундара) према магнетском колу, редом.

Додајући још 2 м за спојеве и изводе, укупне дужине проводника примарног и секундарног намотаја износе:

$$l_1 = l_{sr1} \cdot N_1 + l_i = 392 \cdot 124 \cdot 10^{-3} + 2 = 50,7 \text{ m},$$

$$l_2 = l_{sr2} \cdot N_2 + l_i = 562 \cdot 27070 \cdot 10^{-3} + 2 = 15,22 \text{ km}.$$

Конечно, масе бакра примара и секундара износе:

$$m_{Cu1} = 8930 \cdot 50,7 \cdot 2,5 \cdot 10^{-6} = 1,14 \text{ kg},$$

$$m_{Cu2} = 8930 \cdot 15220 \cdot 0,03 \cdot 10^{-6} = 4,1 \text{ kg}.$$

Губици примара и секундара на температури од 20 °C:

$$P_{Cu1}^{20^\circ} = k \cdot m_{Cu1} \cdot \Delta_1^2 = 2 \cdot 1,14 \cdot 8,7^2 = 173 \text{ W},$$

$$P_{Cu2}^{20^\circ} = k \cdot m_{Cu2} \cdot \Delta_2^2 = 2 \cdot 4,1 \cdot 3,33^2 = 92 \text{ W}.$$

Напомена: Иако је густина струје у примарном колу релативно велика, струја ће бити ограничена уметањем заштитних отпорника у примарно коло, што је уобичајена пракса код испитних уређаја за испитивање трансформаторског уља.

C. Напон кратког споја

- Активна компонента релативног пада напона:

$$u_r = \frac{P_{Cu1}^{20^\circ} + P_{Cu2}^{20^\circ}}{S_n} \cdot 100 = \frac{173 + 92}{5000} \cdot 100 = 5,3\%. \quad (31)$$

Напомена: Код класичних енергетских трансформатора радна температура је обично 75 °C, па се прерачунавање губитака, а тиме и напона кратког споја, врши на овој температури. Међутим, пројектовани трансформатор ће радити у испрекиданом режиму рада, тј. биће у стању празног хода све до момента настанка прескока у уљу, након чега ће се тренутно искључити са мреже.

- Реактивна компонента релативног пада напона:

$$u_\gamma = \frac{0,1975 \cdot S_n \cdot (L_{sr1} + L_{sr2})/2}{E_1^2 \cdot (h_1 + h_2)/2} \cdot \delta' \cdot K_R. \quad (32)$$

где су δ' и K_R , редом, еквивалентни размак између примара и секундара и коефицијент Роговског:

$$\delta' = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} = 33 + \frac{6,5 + 50,5}{3} = 52 \text{ mm}. \quad (33)$$

$$K_R = 1 - \frac{a_1 + \delta_{12} + a_2}{\pi \cdot (h_1 + h_2)/2} = 1 - \frac{6,5 + 33 + 50,5}{\pi \cdot (120 + 130)/2} = 0,77. \quad (34)$$

Према томе, реактивна компонента пада напона је:

$$u_\gamma = \frac{0,1975 \cdot 5 \cdot (392 + 562)/2}{1,85^2 \cdot 125} \cdot 5,2 \cdot 0,77 = 4,4\%.$$

- Напон кратког споја износи:

$$u_k = \sqrt{u_r^2 + u_\gamma^2} = \sqrt{5,3^2 + 4,4^2} = 6,9\%. \quad (35)$$

D. Струја празног хода

Јачина магнетног уплива иста је у језгрима и јармовима, $B_m = 1,6 \text{ T}$, и према карактеристици магнећења за лимове TRAN-COR® Н-1 CARLITE®, овој вредности одговара јединична магнетопобудна сила: $H = 25 \text{ A/m}$.

- Дужине цеви уплива су:

- у језгру: $l_1 = h = 160 \text{ mm},$

- у јарму: $l_2 = g = 185 \text{ mm}.$

Узимајући да саставци језгра и јармова делују као међугвожђе од 0,1 mm, пад магнетног напона по језгру у тренутку када је уплив у врхунцу је:

$$M_m = \frac{B_m}{\mu_0} \cdot \delta + H \cdot (l_1 + l_2) \quad (36)$$

$$M_m = \frac{1,6 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} + 25 \cdot 345 \cdot 10^{-3} = 136 \text{ A}.$$

- Реактивна компонента струје празног хода са стране високог напона:

$$I_{q02} = \frac{M_m}{N_2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{136}{27070 \cdot \sqrt{2}} = 3,55 \text{ mA}, \quad (37)$$

а са стране ниског напона:

$$I_{q01} = \frac{M_m}{N_1 \cdot \sqrt{2}} = \frac{136}{124 \cdot \sqrt{2}} = 0,78 \text{ A} . \quad (38)$$

– Активна компонента струје празног хода са стране високог напона:

$$I_{p02} = \frac{P_{Fe} + R_2 \cdot I_{q02}^2}{U_{02}} = \frac{28 + 10,96 \cdot 3,55^2 \cdot 10^{-3}}{50000} = 0,563 \text{ mA} ,$$

а са стране ниског напона:

$$I_{p01} = \frac{P_{Fe} + R_1 \cdot I_{q01}^2}{U_{01}} = \frac{28 + 0,438 \cdot 0,78^2}{231} = 0,122 \text{ A} ,$$

при чему су омски отпори примара и секундар:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{S_{Cu1}} = 0,0216 \cdot \frac{50,7}{2,5} = 0,438 \Omega ,$$

$$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_{Cu2}} = 0,0216 \cdot \frac{15,22 \cdot 10^3}{0,03} = 10,96 \text{ k}\Omega .$$

– Стварна струја празног хода:

$$I_{01} = \sqrt{I_{q01}^2 + I_{p01}^2} = \sqrt{0,78^2 + 0,122^2} = 0,79 \text{ A} ,$$

$$I_{02} = \sqrt{I_{q02}^2 + I_{p02}^2} = \sqrt{3,55^2 + 0,563^2} = 3,6 \text{ mA} .$$

– Релативне вредности струја празног хода:

$$i_{01} = \frac{I_{01}}{I_{n1}} \cdot 100 = \frac{0,79}{21,74} \cdot 100 = 3,6\% ,$$

$$i_{02} = \frac{I_{02}}{I_{n2}} \cdot 100 = \frac{3,6 \cdot 10^{-3}}{0,1} \cdot 100 = 3,6\% .$$

Е. Израчунавање масе и димензија трансформатора

Израдом техничке документације долази се до тачних габаритних димензија. Приближне димензије су дате у наставку.

– Узимајући за одстојање навоја од унутрашњег зида суда $n_1 = 50 \text{ mm}$, за дужину суда добија се:

$$A_s = 2 \cdot b + 2\delta_{10} + 2\delta_{20} + 2a_1 + 2a_2 + \delta_{12} + 2 \cdot n_1$$

$$A_s = 2 \cdot 40 + 2 \cdot 5 + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 6,3 + 2 \cdot 50,5 + 33 + 100 = 357 \text{ mm} .$$

Усваја се: $A_s = 360 \text{ mm}$, дакле $n_1 = 51,5 \text{ mm}$.

– Ширина суда, узимајући одстојање навоја од унутрашњег зида суда $n_2 = 50 \text{ mm}$, износи:

$$B_s = c + 2\delta_{20} + 2a_2 + 2 \cdot n_2$$

$$B_s = 130 + 2 \cdot 10 + 2 \cdot 50,5 + 2 \cdot 50 = 351 \text{ mm} .$$

Усваја се: $B_s = 360 \text{ mm}$, дакле $n_2 = 54,5 \text{ mm}$.

– Висина суда, рачунајући за дебљину дрвене гредице која се подмеће под трансформатор $i = 30 \text{ mm}$, је:

$$H_s = 1,6 \cdot h + 2 \cdot b + i = 1,6 \cdot 160 + 2 \cdot 40 + 30 = 366 \text{ mm} .$$

Усваја се: $H_s = 370 \text{ mm}$, дакле $i = 34 \text{ mm}$.

Пројектовани трансформатор је без конзерватора и херметички је заптивен.

– Запремина суда:

$$V_s = A_s \cdot B_s \cdot H_s = 0,36 \cdot 0,36 \cdot 0,37 = 0,048 \text{ m}^3 = 48 \text{ dm}^3 .$$

– Запремина активног дела:

$$V_{akt} = 0,184(m_{Fe} + m_{Cu}) = 0,184 \cdot (27,5 + 5,24) = 6 \text{ dm}^3 .$$

– Запремина уља у суду:

$$V_{us} = V_s - V_{akt} = 48 - 6 = 42 \text{ dm}^3 .$$

– Маса уља:

$$m_u = 0,9 \cdot V_{us} = 0,9 \cdot 42 = 38 \text{ dm}^3 = 38 \text{ kg} .$$

Масу трансформатора чине масе магнетног кола (гвожђа), бабра и изолације. Укупна маса износи:

$$m_{tr} = k_{tr} \cdot (m_{Fe} + m_{Cu} + m_u) = 1,2 \cdot (27,5 + 5,24 + 38) = 85 \text{ kg} ,$$

где је $k_{tr} = 1,15 \div 1,35$ коефицијент који узима у обзир конструкцијске делове.

Напомена: Прорачуни напрезања намотаја услед електромагнетних сила при кратком споју, динамичких напрезања, пораста температуре, степена искоришћења, као и пада напона, нису извршени јер пројектовани трансформатор није предвиђен за трајни рад. Струја кратког споја ће бити ограничена заштитним отпорницима како би се ограничила деградација испитиваног узорка уља у периоду након појаве прескока у уљу до тренутка прекидања струје у испитном колу.

III. ИЗРАДА ТРАНСФОРМАТОРА

У овом делу рада приказани су материјали коришћени при изради трансформатора, као и сам трансформатор са назначеним деловима. На Сл. 5 приказани су: бакарна жица коришћена за израду намотаја примара и секундара, главни изолациони материјал – прешпан папир и лак.



Слика 5. Приказ материјала коришћених за израду трансформатора

На Сл. 6 приказан је намотај секундара, израђен од округле бакарне жице пречника $0,2 \text{ mm}$. У сваком слоју налази се по 480 навојака, који су међусобно изоловани са три слоја прешпан папира дебљине $0,15 \text{ mm}$.

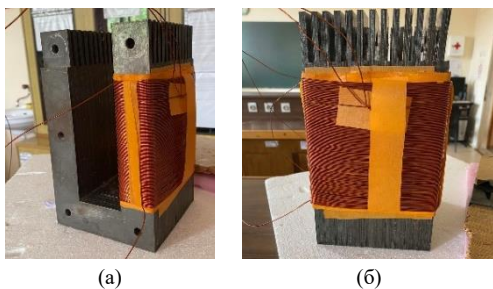


(а)

(б)

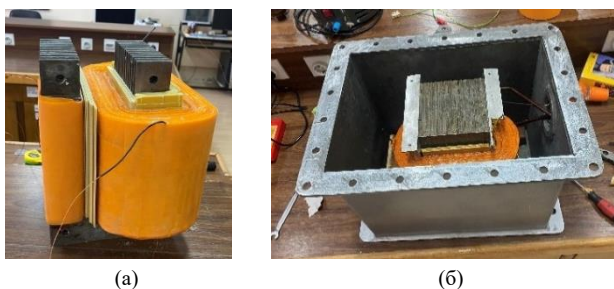
Слика 6. Приказ намотаја секундара: (а) слој од 480 навојака, (б) изолација намотаја

На Сл. 7 приказан је намотај примара који је израђен од бакарне жице пречника 1,5 mm. Језгро је израђено од лимове дебљине 0,5 mm, који су међусобно изоловани са циљем смањења губитака услед вихорних струја.



Слика 7. Приказ намотаја примара: (а) цео намотај од 125 навојака, (б) део намотаја од 110 навојака

Приказ процеса склапања представљен је на Сл. 8, док је комплетно састављен трансформатор илустрован на Сл. 9. Суд је испуњен уљем и херметички затворен. Испод трансформатора налазе се дрвене гредице дебљине 3 cm. Изолациони материјал од стаклолита високе изолационе чврстоће (око 40 kV/mm) уграђен је између примарног и секундарног намотаја, као и између намотаја и језгра, чиме је обезбеђена поуздана изолација свих критичних делова. На десној страни (на Сл. 9) приказана је посуда за испитивање диелектричне чврстоће материјала, при чему је видљив електрични лук између електрода и подешени размак који дефинише услове испитивања.



Слика 8. Приказ трансформатора у фази склапања: (а) намотаји примара (лево) и секундара (десно) и (б) трансформаторски суд



Слика 9. Приказ израђеног трансформатора и посуде за испитивање диелектричне чврстоће трансформаторског уља

Након завршетка склапања, трансформатор је подвргнут испитивањима ради потврде електричних и конструктивних параметара. Испитивања су обухватила мерење односа трансформације, проверу ознака крајева намотаја, мерење струје празног хода, отпора намотаја, изолационих параметара и друге тестове неопходне за безбедан и поуздан рад уређаја. Сви измерени параметри били су у оквиру дозвољених и прорачунских вредности.

ЗАКЉУЧАК

Главна идеја овог рада била је теоријско пројектовање и практична израда високонапонског трансформатора снаге 5 kVA и преносног односа 0,23/50 kV/kV. Процес пројектовања обухватио је избор и прорачун свих релевантних параметара и карактеристичних величина. Израђени трансформатор намењен је за употребу у лабораторијским условима, пре свега за испитивање диелектричне чврстоће трансформаторског уља и изолационих материјала. У том контексту, овај рад представља важан корак ка развоју поуздане опреме за потребе наставе и експерименталних истраживања у области високонапонске технике. Током испитивања уочена је потреба за унапређењем мерења и надзора у случају појаве електричног лука. Као правац будућег развоја предвиђа се аутоматизација мерења и обраде испитних параметара, као и развој система за детекцију електричног лука у уљу и његово аутоматско искључење, што ће допринети повећању сигурности и поузданости испитних поступака.

ЗАХВАЛНИЦА

Аутори се захваљују Министарству науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије на пруженој финансијској подршци за спровођење научноистраживачког рада, у оквиру Уговора бр. 451-03-34/2026-03/200155.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] N. Rajda, R. R. Patel, "Characterization of virgin and aged transformer oil with SiO₂ nanoparticles," 2017 Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT), Vellore, India, 2017, pp. 1–4.
- [2] IEC 60076-1:2011, Power transformers – Part 1: General, International Electrotechnical Commission, 2011.
- [3] М. Бањанин, Техника високог напона 2, Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет, Академска мисао, Београд, стр. 282, 2021.
- [4] Ј. Крстовић, Р. Радосављевић, Пројектовање дистрибутивних трансформатора, Београд, 2009.
- [5] В. В. Петровић, Упут у прорачун трансформатора, Грађевинска књига, Београд, 1975.
- [6] AK Steel International, Grain Oriented Electrical Steels – Data Sheet, Cleveland-Cliffs, 2020. Available: https://e-magnetica.pl/database-em/01_Soft/Electrical_steels/AKSteel_2020/GOES-TRAN_COR_H_H-0_H-1_H-2_Carlite_DR_2020.pdf

ABSTRACT

This paper presents an engineering approach to the design, construction, and testing of a specialized high-voltage transformer rated at 5 kVA, operating at 50 Hz, with a transformation ratio of 0.23/50 kV/kV. Particular emphasis is placed on the technically demanding process of optimizing electrical and structural parameters while considering criteria such as cost-effectiveness, technological feasibility, and energy efficiency. Key structural components of the transformer, such as the core, windings, and insulation system, are thoroughly analyzed. Special attention is given to the potential application of the constructed transformer for testing the dielectric strength of transformer oil, demonstrating its practical value in the diagnostics and quality control of insulating oils and materials.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A HIGH-VOLTAGE TRANSFORMER 0.23/50 kV/kV

Miloš Milovanović, Bojan Perović, Jordan Radosavljević, Mladen Banjanin, Jovan Vukašinović, Andriana Jovanović