

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ СИГРЕ
ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО-СИГРЕ

II ЕЛЕМЕНТИ НА ПОСТРОЈКИ

СТК 12 ТРАНСФОРМАТОРИ

Стручни известувачи: Александар Шеќерински, дипл.инж.

Владимир Пиперков, дип.инж.

ИЗВЕШТАЈ НА СТРУЧНИТЕ ИЗВЕСТУВАЧИ

P12-01 *Крстиџе Најденкоски, дипл.инж., Дионис Манов, дипл.инж., ЕТФ-Скопје*
АНАЛИЗА НА РАЗЛИЧНИ МОДЕЛИ НА НАМОТКИ ЗА
ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОР ОД АПСЕКТ НА
ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ СИЛИ НА КУСА ВРСКА

Содржината на трудот одговара на карактерот на советувањето, и истиот е на доволно стручно научно ниво. Овој труд дава придонес кон разјаснувањето на решавање на проблематиката на електродинамичка отпорност на трансформаторите при куси врски во дистрибутивните мрежи. Распределбата на електромагнетните сили, дадена за различните модели на примарната и секундарната намотка, дава многу важен податок за кој тип намотки да се применат, за да се зголеми електродинамичката отпорност на трансформаторот при куса врска.

Прашања за дискусија:

1. Дали ваква анализа со соодветната метода за пресметка на електромагнетните сили може да се примени и на тронамотни трансформатори, автотрансформатори, пригушници и сл.
2. Дали при анализата на моделите е земена и магнетната несиметрија што се воспоставува многу често при регулација на трансформаторите (или се разгледува само симетричен распоред на изводите за регулација).
3. Дали е извршена верификација на точноста на пресметаните големини за некој трансформатор.

P12-02 *Расим Салкоски, дипл.инж., ЕМО-Охрид*
ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКА ОТПОРНОСТ НА ТРАНСФОРМАТОРИ СО
СЛОЈНИ ЦИЛИНДРИЧНИ НАМОТКИ

Трудот е во согласност со предложените преференцијални теми за Второто советување на МАКО-СИГРЕ, и во него е разработена проблематика од областа на контрола на механичките напрегања во енергетски трансформатори.

Авторот е дел од екипата која учествувала во проектирање на енергетски трансформатори кои потоа на барање на купувачот биле испитувани во режим на куса врска, за да се провери дали тие можат да ги издржат механичките напрегања при куса врска.

Авторот на трудот, на почетокот презентира упростен аналитички метод за определување на аксијалните и радијалните електромагнетните сили што дејствуваат на намотките на енергетски трансформатори, потоа ги определува механичките и

термичките напрегања на намотките, и дава препораки за зголемување на електродинамичката отпорност на трансформаторите.

На крајот од трудот во табели се презентирани и резултатите што се добиени од испитувањето на еден енергетски трансформатор во режим на куса врска. После испитувањето на трансформаторот во режим на куса врска, измерена е индуктивноста на намотките, која потоа се споредува со референтните вредности за индуктивноста на намотките. Врз основа на промената на индуктивноста, се дава оценка за состојбата на намотките на трансформаторот, односно оценка дали трансформаторот ја издржал кусата врска.

Прашања за дискусија:

1. Дали точна нумеричка пресметка на електромагнетните сили односно на механичките напрегања на намотките е доволна, за да се изведе заклучок за тоа дали трансформаторот може да ги издржи напрегањата при куса врска?

P12-03 *Расим Салкоски, д-р инж., ЕМО-Охрид*

КОМПЕНЗАЦИОНИ ПРИГУШНИЦИ СТЕПЕНАСТО РЕГУЛИРАНИ СО ПРЕКЛОПКА ВО БЕЗНАПОНСКА СОСТОЈБА

Содржината и проблематиката што се изложува во трудот е во согласност со прифатените преференцијални теми, за второто советување на МАКО-СИГРЕ 98.

Во трудот се излага проблематиката на проектирањето и димензионирањето на: "**компензациони пригушници степенасто регулирани со преклопка во безнапонска состојба**", за номинална моќност 2000 kVA, $66000/\sqrt{3}$ V, и регулација на струјата од 22.8 до 50.2 A во безнапонска состојба.

Во трудот е дадена детална пресметка на магнетните и електричните големини, како и определувањето на конструктивните димензии. Во почетната фаза на пресметката авторот врши избор на геометриските димензии на магнетното јадро а потоа врз основа на аналитичката пресметка на магнетното поле и растурниот магнетен флуks, со помош на комфортно пресликување според теоремата на Шварц, врши конечна пресметка на пресекот и на индуктивноста на пригушницата.

Во трудот на кусо се изложени термичката и механичката пресметка, а се дадени и техничките карактеристики на пригушницата.

Прашања за дискусија:

1. Зашто авторот се одлучил за класична аналитичка метода за пресметка на магнетните големини, а не за нумеричка метода?
2. Како е извршена механичка пресметка, без да се пресметаат електромагнетните сили што дејствуваат во пригушницата?
3. Дали е извршено мерење на индуктивноста на пригушницата при различни степени на регулационата преклопка, и нивно споредување со пресметаните?

P12-04 *Јовче Донески, д-р инж., ЕМО-Охрид*

ЕКОНОМИЧНОСТ ПРИ ПАРАЛЕЛНА РАБОТА НА ТРАНСФОРМАТОРИ

Во трудот се анализирани неколку практични случаи за можна паралелна работа на дистрибутивни трансформатори, кога не ги исполнуваат идеалните услови

за паралелна работа, а имаат различни: коефициенти на трансформација на напоните, напони на куса врска, моќности и векторски групи.

Анализирана е и паралелната работа на група дистрибутивни трансформатори со исти моќности и напони на куса врска од аспект на потребниот број на вклучени трансформатори во паралелна работа во зависност од вкупното оптоварување на трафостаницата, а со цел за остварување на минимални вкупни загуби на моќност, односно економична паралелна работа.

Прашања за дискусија:

1. Моќности и проблеми при паралелна работа на трофазни тронамотни трансформатори.
2. Моќности и проблеми при паралелна работа на трофазни автотрансформатори.

P12-05 *Дионис Манов, д-р инж., Методија Камиловски, д-р инж., ЕТФ-Скопје*
**МОДЕРНИЗАЦИЈА НА ИМПУЛСНИТЕ ИСПИТУВАЊА НА
ИЗОЛАЦИЈАТА НА НАМОТКИТЕ НА ЕНЕРГЕТСКИ
ТРАНСФОРМАТОРИ**

Во овој труд е прикажана можноста за примена на дигитална компјутерска техника за снимање на импулсните напони и струи при испитување на изолацијата кај намотките од енергетските трансформатори, кое спаѓа во групата на типски испитувања.

Предностите на оваа модернизација се значителни, поедноставна и поевтина постапка, многу поголема брзина и прецизност во отчитувањето на резултатите, како и меморирање на истите во компјутерот, за понатамошно користење и статистичка обработка.

Можноста за зголемување и споредување на два осцилограма денес, со примена на компјутерската техника, е брза и симплицирана постапка која гарантира голема точност.

Сето ова укажува дека трудот дава насоки за наредните импулсни испитувања на изолацијата кај намотките од енергетски трансформатори.

Откривањето на евентуалните пробои или прескоци на дефектограмите се манифестираат со осцилации што е лесно приметливо и мерливо преку споредба со нормограмите. Со тоа се постигнува лесно дијагностицирање на настанатите аномалии и доверливост на резултатите добиени од извршените испитувања.

Со еден збор, модернизација вредна за инвестирање.

Прашања за дискусија:

1. Колку ориентационо би известувале трошоците за една ваква модернизација?

P12-06 *Аце Ристиќески, д-р инж., ЈП "ЕСМ", Подружница "Електропренос"*
**УТВРДУВАЊЕ НА СОСТОЈБАТА И ОТКЛОНУВАЊЕ НА ДЕФЕКТ
НА ГОЛЕМИ ТРАНСФОРМАТОРИ ВО ТЕРЕНСКИ УСЛОВИ**

Во трудот се изнесува лично искуство на авторот преку пример од праксата кој претставува случај на навремено откривање и санирање на потенцијална причина за

хаварија од поголеми размери на автотрансформатор 220/110/35 kV, со моќност 150 MVA.

Најнапред е наведена постапката (спроведените мерења и изведени заклучоци) во која е дојдено до заклучок каде да се бара дефектното место. Понатаму се изнесени извршените работи, на лице место, со кои се потврдува претпоставката, за местото на дефект, која е изведена на основа на мерењата.

Се изведува заклучок дека само со примена на повеќе мерни методи може да се извлече меродавен заклучок за состојбата на трансформаторот. Во спротивно можни се погрешни, оптимистички, заклучоци за истата.

Прашања за дискусија:

1. Какви се искуствата за обемот на мерењата кои се вршат?
2. Има ли сознанија за нови мерни методи?

P12-07 *Вилма Мавкова, д-л.инж., ЈП "ЕСМ", Подружница "Електироенерџи"*
**СТАРЕЕЊЕ НА ЦЕЛУЛОЗНАТА ИЗОЛАЦИЈА НА
ТРАНСФОРМАТОРИТЕ: АНАЛИЗА НА ДЕРИВАТИТЕ НА ФУРАН**

Дадена е комплетна слика како концентрацијата на дериватите на фуран анализирани со HPLC се ставаат во функција со квалитет на изолацијата на енергетските и мерните трансформатори. Добро е разработен самиот хемиски процес, како и аналитичката метода за следење на истиот. Исто така добро е објаснета и интерпретацијата на резултатите добиени од самата HPLC анализа.

Прашања за дискусија:

1. Да се дискутираат другите методи со кои се контролира термичкото стареење на изолацијата и деградацијата на целулозата преку гасно-хроматографска анализа, односно концентрацијата на CO₂/CO.

И12-08 *Александар Шеќерински, д-л.инж., ЈП "ЕСМ", Подружница "Електироенерџи"*
РЕВИТАЛИЗАЦИЈА НА ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Трудот е во согласност со преференцијалните теми, а од авторот е предложен како информација.

Прашањето на старите ЕТР е актуелно не само кај нас туку и пошироко во светот и согласно со значајот му се посветува особено внимание.

Од најголемо значење е да се применуваат меродавни дијагностички методи кои ќе обезбедат извршување на оптимална интервенција на ЕТР.

Целта на трудот е да се насочи вниманието кон воспоставување потребна процедура за донесување одлука за ревитализација, односно да му користи на експлоатациониот персонал кој треба да донесува одлуки за зафатите на ЕТР во насока на обезбедување потребно ниво на доверливост на истите и на ЕЕС во целина.

Прашања за дискусија:

1. Какви се искуствата од досега извршените интервенции на ЕТР?
2. Кои методи се користат за утврдување на состојбата на ЕТР?

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Крсте Најденкоски
Дионис Манов
Електротехнички факултет, Скопје

**АНАЛИЗА НА РАЗЛИЧНИ МОДЕЛИ НА НАМОТКИ ЗА ЕНЕРГЕТСКИ
ТРАНСФОРМАТОР ОД АСПЕКТ НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ СИЛИ НА
КУСА ВРСКА**

1. АБСТРАКТ

Предмет на истражување во овој труд ќе бидат некои карактеристични модели на намотки за енергетски трансформатори, издржливи на механичките напрегања при куса врска. За секој модел на намотки, се определуваат електромагнетните сили при куса врска на трансформаторот а потоа се прави анализа на различните модели на намотки, се со цел да се утврди кој модел е најпогоден од аспект на електромагнетните сили. Со оглед на тоа што експерименталното определување на електромагнетните сили е поврзано со определени тешкотии (ограничените можности на испитните лаборатории и големите трошоци на испитување), методот искористен во овој труд за определување на електромагнетните сили, покрај директна примена при оптимално проектирање на енергетски трансформатори, може да послужи за проверка на издржливоста на веќе произведените трансформатори на сили на куса врска.

1.1 Клучни зборови

Енергетски трансформатор, модели на намотки, струја на куса врска, електромагнетно поле, електромагнетни сили, аксијални и радијални компоненти, механички напрегања.

1. ABSTRACT

Subject of research in this work will be some of the most common models of windings for power transformers that can withstand the mechanical strains in case of short circuit. For each model, electromagnetic forces will be calculated for cases of the transformer short circuit. Additionally, analysis of different models of windings will be done in order to determine which model is the most suitable from the aspect of electromagnetic forces. Taking in consideration that experimental determination of electromagnetic forces is connected with certain difficulties (limited abilities of the test laboratories, and large expenditures for researches), a numerical

method for determining the electromagnetic forces, in this paper is applied. Besides the direct use for optimal modeling of the power transformers, this method can be used in testing already produced transformers to proof if they can withstand the short circuit forces.

1.1 Key words

Power transformer, models of windings, short circuit current, electromagnetic field, elektromagnetic forces, axial and radial components, mechanical stress.

1.2 Вовед

Електромагнетните сили коишто дејствуваат на намотките на трансформаторот се резултат на взаемодејството помеѓу струјата што протекува во проводниците на намотките и магнетно поле со кое тие се опфатени.

Имено, силата којашто дејствува на проводник со единица должина, е определена како производ помеѓу магнетната индукција од растурното магнетно поле B_{σ} и струјата што протекува во проводникот i_k . Поради тоа што магнетното поле е создадено од струите што протекуваат во намотките, може да се претпостави дека $B_{\sigma} \sim i_k$. Тогаш $f \sim i_k^2$, а имајќи предвид дека ударната струја на куса врска може да биде 30 пати поголема од номиналната струја, силите при куса врска ќе бидат приближно 1000 пати поголеми од номиналните електромагнетни сили. При номинално оптоварување на трансформаторот, на намотките дејствуваат сили околу 10 N/m , што значи дека при куса врска тие ќе достигнат вредност од околу $10\,000 \text{ N/m}$. Овие сили вршат делумно оштетување на изолацијата на намотките, кое при првото или наредното наидување на пренапони од атмосферско или комутационо потекло може да предизвикаат хаварија на трансформаторот, и покрај тоа што секој трансформатор има заштита од куси врски која за кратко време реагира и го исклучува трансформаторот од мрежа.

Затоа, намотките за енергетските трансформатори треба да бидат така проектирани, конструирани и изработени да можат да ги издржат големите електромагнетни сили што се јавуваат при куса врска.

2.НУМЕРИЧКО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНИТЕ СИЛИ

2.1.Претпоставки

Предмет на истражување во овој труд се електромагнетните сили во енергетски трансформатор, за кој се познати номиналните податоци и геометриските димензии. Со неколку претпоставки, нужни за нумеричко определување на електромагнетното поле, се дефинира математичкиот модел на трансформаторот. При тоа се зема предвид дека, трофазните енергетски трансформатори во однос на магнетниот систем се одликуваат со извесна несиметрија која произлегува од нееднаквоста на патеките на магнетниот флуks. Оваа несиметрија има свое влијание врз распределбата на електромагнетното поле. Поаѓајќи од тоа дека трофазниот трансформатор има три фазни намотки, низ кои протекуваат наизменични струи временски изместени за агол од $2\pi/3$ степени,

распределбата на електромагнетното поле се менува во секој момент на време. Со оглед на сеуште ограничените можности на персоналните сметачки машини, за анализа на електромагнетното поле се користи векторски магнетостатички модел на трансформатор. Тоа значи дека се утврдува еден временски момент за кој се определува електромагнетното поле, при што временски променливите струи се заменуваат со константни вредности, коишто соодветствуваат на моментот за кој се врши пресметувањето.

Поради тоа што, во трудот се врши анализа на електромагнетните сили што дејствуваат на намотки при куса врска, а како што беше изложено предходно, дека електромагнетните сили се правопрпорционални со квадратот на струјата на куса врска, се разгледува временскиот момент кога струјата има максимална вредност во намотките сместени на првиот столб на магнетното јадро на трансформаторот. Може да се претпостави дека, максималната вредност струјата на куса врска ја достигнува, половина периода после настанувањето на кусата врска.

За определување на распределбата на електромагнетното поле се користи програм, базиран на нумеричката метода на конечни елементи. Суштината на оваа метода се состои во следново:

1. дефинирање на геометријата, дискретизација во мрежа на конечни елементи, опишување на физичките својства на материјалите на набљудуваната област, дефинирање на граничните услови и внесување на изворите на енергија.
2. моделирање на објектот што е предмет на испитување, генерирање на систем алгебарски равенки и нивно решавање.
3. графичка презентација на добиените резултати, контрола, пресметување на други карактеристични електромагнетни големини.

Како што е наведено во точка 1 од предходниот параграф, целата област во која се определува електромагнетното поле се покрива со т.н. конечни елементи, а поаѓајќи од фактот, дека погуста односно пофина мрежа овозможува поголема точност на нумеричката пресметка на електромагнетното поле, се доаѓа до заклучок, дека пофина мрежа треба да се употреби во областа каде се сместени намотките.

2.2 Математичка формулација

За математичкиот модел на енергетски трансформатор, предмет на ова истражување, се користи цилиндричен координатен систем.

Електромагнетната сила што дејствува на проводник со површинска густина на струја \vec{J} , кој се наоѓа во магнетно поле со индукција \vec{B} , се определува со следниов израз:

$$\vec{F} = \int (\vec{J} \times \vec{B}) dv \quad (1)$$

Познато е дека густината на струјата има само ϕ -компонента:

$$\vec{J} = J \cdot \vec{e}_\phi \quad (2)$$

а векторот на магнетната индукција има аксијална и радијална компонента:

$$\vec{B} = B_r \cdot \vec{e}_r + B_z \cdot \vec{e}_z \quad (3)$$

Врз основа на предходните изрази, електромагнетната сила може исто така да се разложи на радијална и на аксијална компонента, односно може да се напише:

$$\vec{F} = F_r \cdot \vec{e}_r + F_z \cdot \vec{e}_z \quad (4)$$

при што:

$$F_r = \int J \cdot B_z \cdot dv \quad (5)$$

$$F_z = - \int J \cdot B_r \cdot dv \quad (6)$$

Сега, за силата што дејствува на триаголниот конечен елемент означен со "m" (слика 1) може да се напише следниот израз:

$$f_m = f_{rm} + f_{zm} = \pi \cdot J_m \cdot r_c \cdot 2S(B_{zm} + B_{rm}) \quad (7)$$

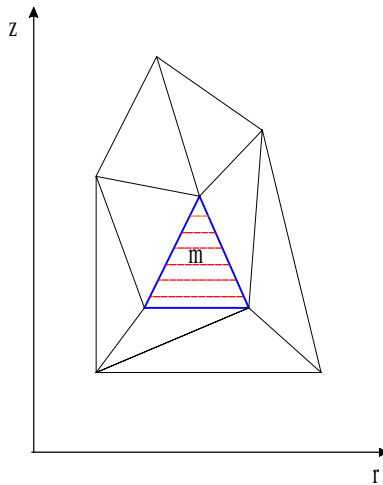
каде: $-J_m$ е површинска густина на струјата во конечниот елемент означен со "m",

- r_c е координата на тежиштето на конечниот елемент,

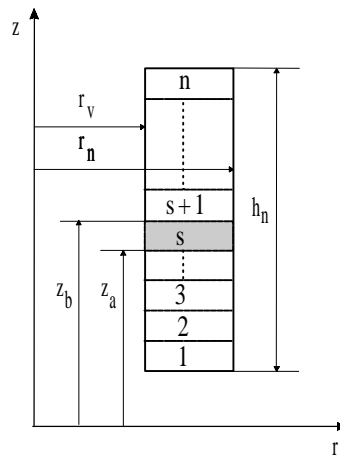
- S е површина на триаголникот-конечен елемент,

- B_{zm} е аксијална компонента на магнетна индукција во конечниот елемент,

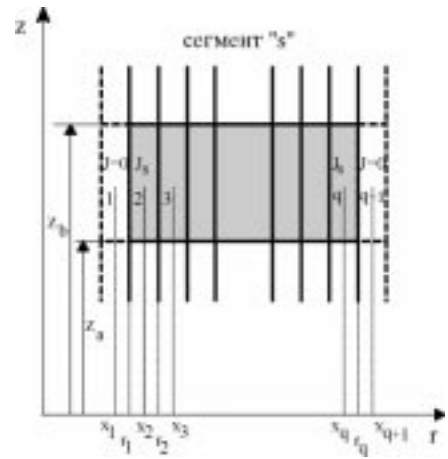
- B_{rm} е радијална компонента на магнетна индукција во конечниот елемент.



Слика 1



Слика 2



Слика 3

За определување на компонентите на електромагнетните сили во радијална и аксијална насока, намотката се дели на сегменти во тие насоки. Аксијалната компонента на електромагнетната сила, што дејствува на сегментот означен со "s" (слика 2) и со висина $z_b - z_a$, се определува со помош на изразов:

$$F_{zs} = \int_{r_v}^{r_n} \int_{z_a}^{z_b} \int_0^{2\pi} J_s \cdot B_r(r, z) \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot d\phi \quad (8)$$

Елементарната аксијална сила што дејствува на елементарниот сегмент означен со "2" (слика 3) се определува со помош на изразов:

$$f_{z2} = 2\pi \cdot J_s \cdot \int_{r_1}^{r_2} B_r \cdot r \cdot dr = 2\pi \cdot J_s \cdot \left(\int_{r_1}^{x_2} B_r \cdot r \cdot dr + \int_{x_2}^{r_2} B_r \cdot r \cdot dr \right) =$$

$$= 2\pi \cdot J_s \cdot \left\{ \int_{r_1}^{x_2} \left[B_{x1} + \frac{B_{x2} - B_{x1}}{x_2 - x_1} (r - x_1) \right] \cdot r \cdot dr + \int_{x_2}^{r_2} \left[B_{x2} + \frac{B_{x3} - B_{x2}}{x_3 - x_2} (r - x_2) \right] \cdot r \cdot dr \right\} \quad (9)$$

каде: $-B_x$ е радијална компонента на магнетната индукција во тежиштето на елементарниот сегмент "2" на слика 3.

Резултантната аксијална компонента на електромагнетната сила за целиот сегмент односно за целата дебелина на намотката се добива како збир на сите елементарни аксијални сили:

$$\begin{aligned}
 F_{zs} = \sum_{i=2}^q f_{zi} = 2\pi \cdot J_s \cdot \sum_{i=2}^q \left\{ \frac{x_i - r_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \cdot \left[\frac{1}{2} (B_{x_{i-1}} \cdot x_i - B_{x_i} \cdot x_{i-1}) \cdot (x_i + r_{i-1}) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{3} (B_{x_i} - B_{x_{i-1}}) \cdot (x_i^2 + x_i \cdot r_{i-1} + r_{i-1}^2) \right] + \frac{r_i - x_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot \left[\frac{1}{2} (B_{x_i} \cdot x_{i+1} - B_{x_{i+1}} \cdot x_i) \cdot (r_i + x_i) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{3} (B_{x_{i+1}} - B_{x_i}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot x_i + x_i^2) \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (10)$$

каде: q е вкупен број на елементарни сегменти во радијална насока (слика 3).

Радијалната компонента на електромагнетната сила што дејствува на сегментот "s" со висина $z_b - z_a$, се пресметува според изразов:

$$F_{rs} = \int_{r_v}^{r_n} \int_{z_a}^{z_b} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} J_s(z) \cdot B_z(r, z) \cdot \cos \varphi \cdot r \cdot dr \cdot dz \cdot d\varphi \quad (11)$$

На ист начин како и при определувањето на аксијалната компонента на електромагнетната сила, се доаѓа до конечниот израз за радијалната компонента за сегментот "s" со висина $z_b - z_a$:

$$\begin{aligned}
 F_{rs} = \sum_{i=2}^q f_{ri} = 2 \cdot J_s \cdot \sum_{i=2}^q \left\{ \frac{x_i - r_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \cdot \left[\frac{1}{2} (B_{x_{i-1}} \cdot x_i - B_{x_i} \cdot x_{i-1}) \cdot (x_i + r_{i-1}) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{3} (B_{x_i} - B_{x_{i-1}}) \cdot (x_i^2 + x_i \cdot r_{i-1} + r_{i-1}^2) \right] + \frac{r_i - x_i}{x_{i+1} - x_i} \cdot \left[\frac{1}{2} (B_{x_i} \cdot x_{i+1} - B_{x_{i+1}} \cdot x_i) \cdot (r_i + x_i) \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{3} (B_{x_{i+1}} - B_{x_i}) \cdot (r_i^2 + r_i \cdot x_i + x_i^2) \right] \right\}
 \end{aligned} \quad (12)$$

каде: $-B_x$ е аксијална компонента на магнетната индукција во тежиштето на соодветниот елементарен сегмент, на слика 3.

Резултантната електромагнетна сила се определува со изразот (4), односно:

$$F_s = \sqrt{F_{rs}^2 + F_{zs}^2} \quad (13)$$

За да се пресметаат електромагнетните сили, што дејствуваат при куса врска, потребно е пресметаните вредности за аксијалната компонента (10) и радијалната компонента (12) на електромагнетните сили, да се помножат со коефициентот:

$$k = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot k_{ud} \cdot 100}{u_k (\%)} \right)^2 \quad (14)$$

каде: $-k_{ud}$ е ударен коефициент на струјата на куса врска

$-u_{kn}(\%)$ е номинален напон на куса врска на трансформаторот.

3.РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Основниот модел (1) што се истражува во овој труд има намотки (внатрешна и надворешна односно нисконапонска и високонапонска) со еднакви висини и различни ширини. Од овој модел, за теоретско истражување се изведени останатите модели на намотки (дадени во прилог). При тоа се водело сметка, да се тие изведби на намотки што се среќаваат како во литературата, така и во практичните изведби на намотките за енергетски трансформатори. Практичната пресметка на електромагнетните сили е извршена на трансформатор со следниве номинални податоци:

$S_n=400 \text{ kVA}$	$f=50 \text{ Hz}$	$p_0=930 \text{ W}$
$U_{1n}=10 \text{ kV}$	$m=3$	$p_{kn}=4600 \text{ W}$
$U_{2n}=0,4 \text{ kV}$	$u_{kn}(\%)=4$	$Dy5$

Со помош на изразите (10) и (12) од предходното поглавје, извршена е пресметка на електромагнетните сили, во внатрешната (нисконапонската) и надворешната (високонапонската) намотка, за сите модели на намотки, и тоа по оската на симетрија на секоја од намотките (по средина на намотките).

За да се согледа, дејството на компоненти на електромагнетните сили врз намотките, како и влијанието на конфигурацијата на намотките врз распределбата на силите, резултатите од пресметувањата на сите модели се претставени во споредбени табели и слики.

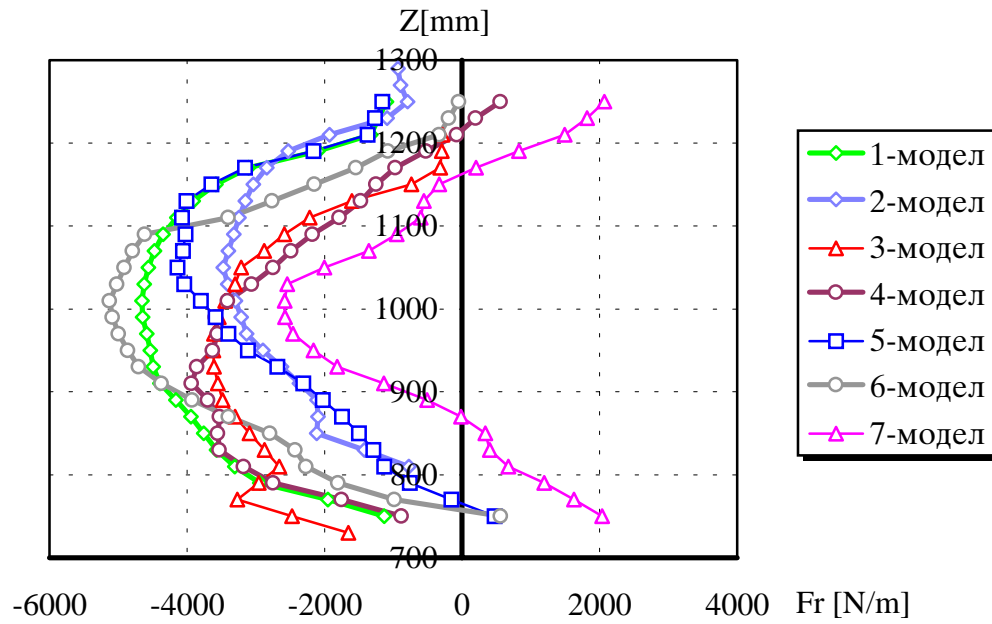
Така во табела I, за сите седум модели на намотки, дадени се максималните вредности на електромагнетните сили и на нивните компоненти и тоа како за внатрешната така и за надворешната намотка.

Кога станува збор за **внaйтpeшнaтa нaмoткa**, како што може да се забележи од табелата, аксијалната компонента има најголема вредност во апсолутен износ за вториот модел на намотки и таа изнесува 3940.0 N/m, додека пак радијалната компонента има најголема вредност за шестиот модел која изнесува 5012.5 N/m. Вкупната електромагнетна сила има најголема вредност 5084.7 N/m исто така за шестиот модел.

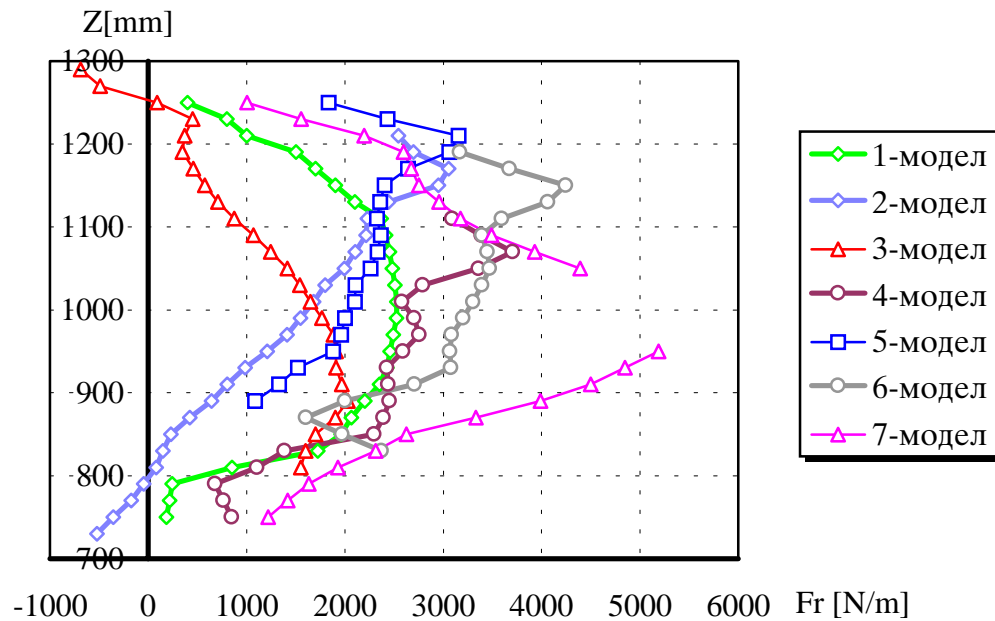
За **надворешнaтa нaмoткa**, можат да се изведат следниве заклучоци, аксијалната компонента има најголема вредност повторно за вториот модел на намотки и таа изнесува 4420.0 N/m, додека пак радијалната компонента има најголема вредност за седмиот модел која изнесува 5140.5 N/m, а максималната вредност на вкупната електромагнетна сила е 6019.3 N/m за седмиот модел на намотки.

Табела I

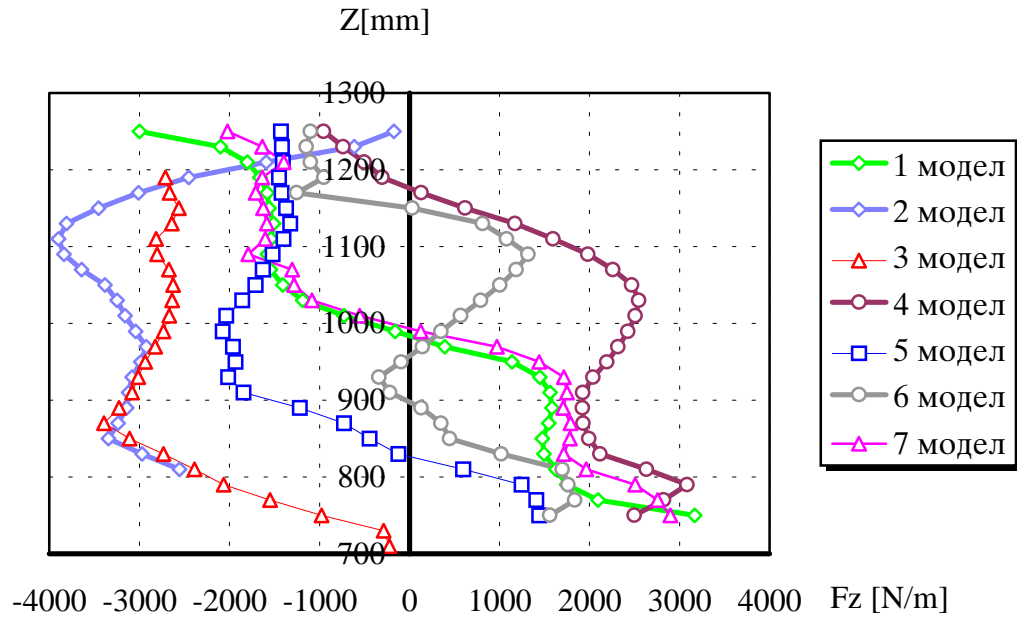
модел	внатрешна намотка			надворешна намотка		
	Fz[N/m]	Fr[N/m]	F[N/m]	Fz[N/m]	Fr[N/m]	F [N/m]
1	3176.0	-4450.9	3115.0	3110.0	2546.0	3210.0
2	-3940.0	-3493.1	5080.4	-4420.0	3065.5	5085.3
3	-3385.2	-3631.2	4810.3	3237.6	2041.2	2644.3
4	2453.3	-3944.4	4376.5	-3296.6	3710.5	4938.5
5	-2102.5	-4168.4	4578.6	2185.8	3084.6	3218.4
6	1566.5	-5012.5	5084.7	-2165.5	4315.3	4774.4
7	2885.6	-2517.2	3543.4	3042.5	5140.5	6019.3



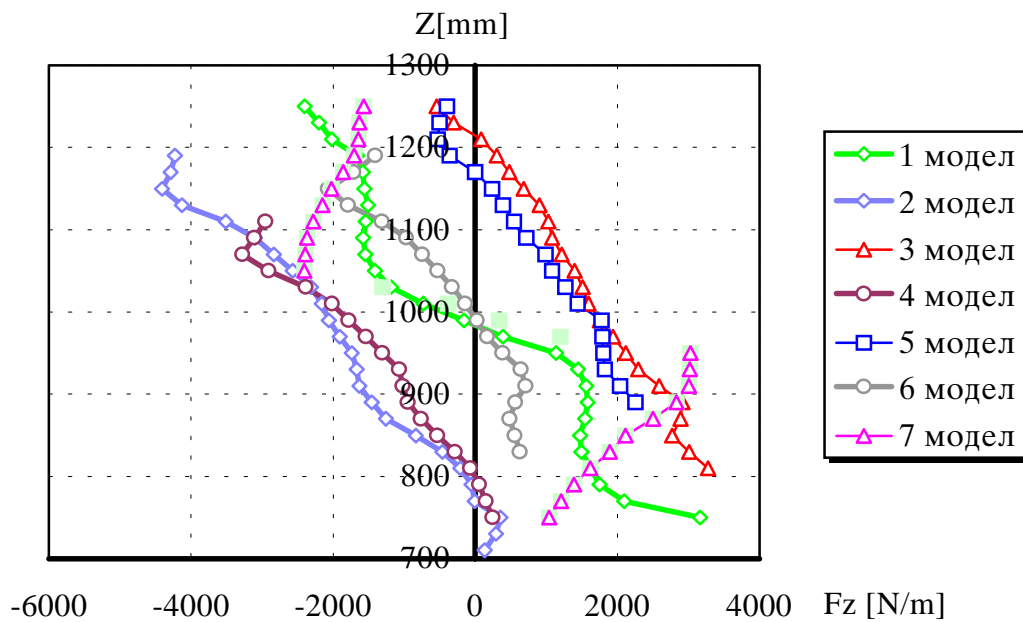
Слика 4 Радіјални компоненти на електромагнетније сили што дејствуваат на внатрешната намотка (при различни модели на намотки [1-7])



Слика 5 Радіјални компоненти на електромагнетније сили што дејствуваат на надворешната намотка (при различни модели на намотки [1-7])



Слика 6 Аксијални комјоненти на електромагнетније сили што дејствуваат на внатрешната намотка (при различни модели на намотки [1-7])



Слика 7 Аксијални комјоненти на електромагнетније сили што дејствуваат на надворешната намотка (при различни модели на намотки [1-7])

Според податоците од табелата, како и од анализата на дијаграмите (од слика 4 до слика 7) може да се изведе следнава констатација: изведбата односно конфигурацијата на намотките има големо влијание врз распределбата на растурното магнетно поле, а со тоа и врз големината и распределбата на електромагнетните сили, при куса врска на трансформаторот. При тоа како што може да се забележи од предходните слики, колку повеќе е изразена несиметријата на намотките, толку се поизразени аксијалните компоненти на електромагнетните сили. Затоа е непоходно како во фазата на проектирањето, така и при изработка на намотките на енергетските трансформатори да се води сметка за електромагнетните сили што можат да се јават во случај на куса врска. Намотките треба да бидат така проекрирани, конструирани и изведени да можат да ги издржат силите на куса врска, додека не реагира системот за заштита и не го исклучи трансформаторот од мрежа поради појава на хаварија.

4.ЗАКЛУЧОК

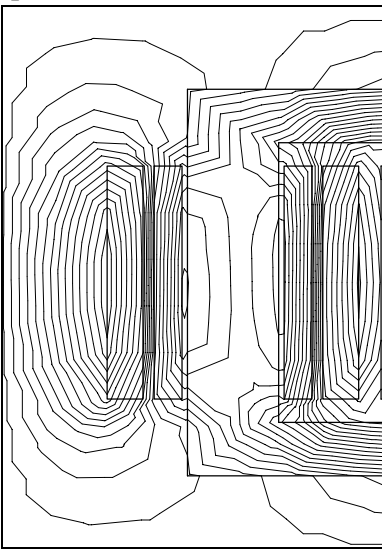
Поради зголемувањето на моќноста на куса врска на мрежата, а и на самите трансформатори, во втората половина на овој век забележано е значително зголемување на дефектите на трансформаторите, поврзани со дејствувањето на струите на куса врска. Поради тоа, определувањето на електромагнетните сили што дејствуваат на намотките при куса врска има големо значење, како за производителите така и за корисниците на трансформаторите. Затоа интензивно се работело и се работи на воведување на нови експериментални и пресметковни методи за определување на електромагнетните сили. Денес производителите на трансформатори, користат современи пресметковни методи и сметачки машини, соодветни материјали, конструктивни и технолошки решенија, за да се обезбеди издржливост на трансформаторите на куса врска, се со цел да се зголеми експлоатациониот период на трансформаторите.

Во трудот е разработен еден нумерички метод за определување на електромагнетните сили што дејствуваат на намотките на енергетски трансформатори при куса врска. Анализирани се неколку најкарактеристични модели на намотки, коишто се среќаваат во практиката и во теоријата. Потоа за сите модели, определени се електромагнетните сили, за да може да се утврди карактерот на силите за секој модел како и за да се изврши споредба помеѓу различните модели на намотки.

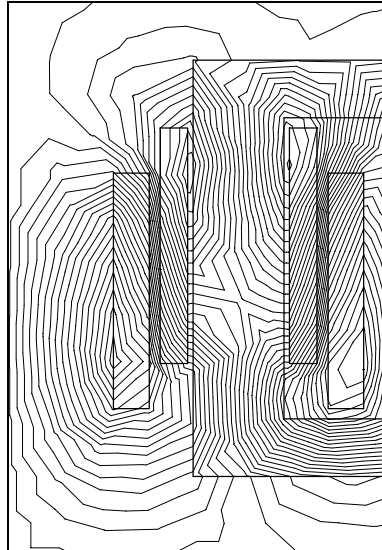
5.ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.Waters, "The Short-Circuit Strength of Power Transformers", Macdonald, London,
- [2] A.Kladas, M.Papadopoulos, "Leakage flux and force calculation on power transformer windings under short-circuit", 9 th COMPUMAG, 1993.
- [3] Krste Najdenkoski, Dionis Manov, "Electromagnetic Forces Calculation on Power Transformer Windings under Short Circuit", ISEF'97, Gdansk, Poland, 23-25.09.1997

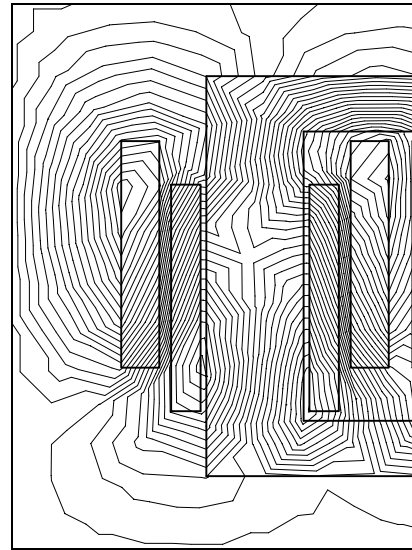
Прилог: Распределба на електромагнетно поле за сите модели на намотки



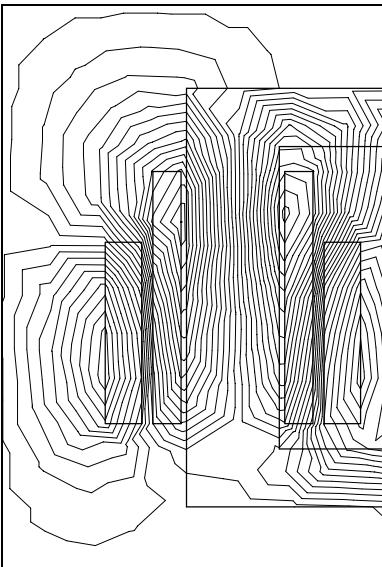
1 модел



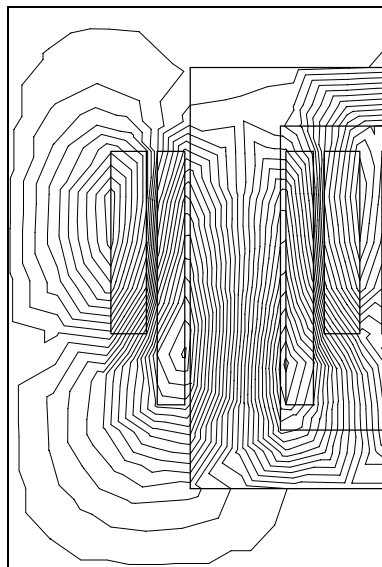
2 model



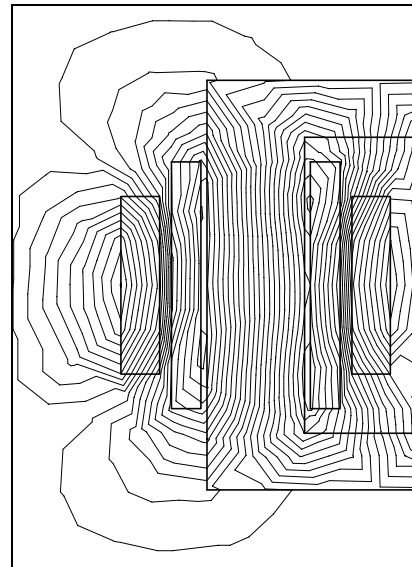
3model



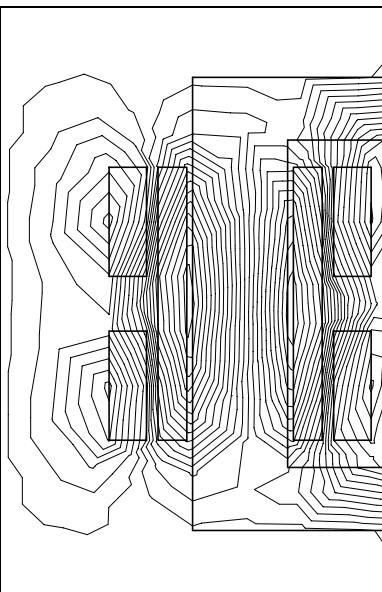
4 модел



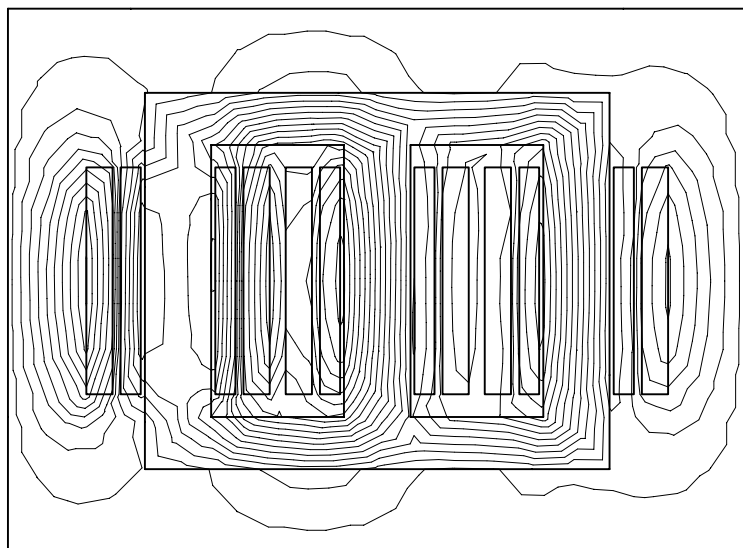
5 model



6model



7 модел



Основен модел на трансформатор

Расим Салкоски, дипл. ел. инж.
ЕМО - Охрид

ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКА ОТПОРНОСТ НА ТРАНСФОРМАТОРИ СО СЛОЈНИ ЦИЛИНДРИЧНИ НАМОТКИ

1. СОДРЖИНА

Во рефератот е прикажана упростена метода на пресметка на сили на основа неколку предпоставки одржувајќи при тоа доволна точност, применета на трифазен трансформатор изведен со слојни цилиндрични намотки со моќност 200 kVA, 11/.433 kV и напон на куса врска 4.75 % ; испитан по IEC 76-5 во ВН лабораторија во IPH-Берлин, Германија.

1.1. КЛУЧНИ ЗБОРОВИ

Трифазен трансформатор, аксијална сила, магнетен флуks, крајна изолација, ВН намотка, НН намотка, магнетно-симетрични намотки.

ELECTRODYNAMIC RESISTANCE OF TRANSFORMERS WITH MULTI-LAYER CYLINDRICAL WINDINGS

1. SUMMARY

This paper describes the simplified method for calculation of axial forces based on several assumptions, but maintaining the appropriate accuracy. This calculation is applied in 200 kVA, 11/.433 kV transformer with impedance voltage 4.75% and multi-layer cylindrical windings; tested to IEC 76-5 at IPH High-Voltage Test Laboratory-Berlin, Germany.

1.1. KEY WORDS

Three-phase transformer, axial force, magnetic flux, end insulation, HV winding, LV winding, magnetic-symmetry windings.

2. ВОВЕД

Процесот на куса врска на трансформаторот, се јавува како хавариски режим, следен со неколкукратно зголемување на струите во намотките на трансформаторот во споредба со номиналните струи, зголемено загревање на намотките и ударни механички сили, кои дејствуваат на намотките и нивните делови.

Проверката на намотките на механичка отпорност при куса врска содржи:

- а) определување на стационарната и ударната струја на куса врска,
- б) определување на механичките сили меѓу намотките и нивните делови,
- в) определување на механичките напрегања во изолационата потпорна и меѓунавојна конструкција и во проводниците на намотките и
- г) одредување на температурата на намотките при куса врска.

3. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА СТАЦИОНАРНАТА И УДАРНАТА СТРУЈА НА КУСА ВРСКА

Номиналната вредност на стационарната струја на куса врска, за основниот извод на намотката, земајќи ја предвид напојната мрежа, согласно IEC 76-5, се одредува од равенката

$$I_{ku} = \frac{100I_n}{u_k [1 + 100S_n / (u_k S_k)]} \quad (1)$$

каде е I_n - номинална струја на соодветната намотка, A,

S_n - номинална моќност на трансформаторот, MVA,

S_k - моќност на куса врска на мрежата, MVA,

u_k - напон на куса врска на трансформаторот, % .

Номиналната вредност на стационарната струја на куса врска за трансформатори со моќност до 1.0 MVA, ако се претпостави дека е $S_k = \infty$, изнесува:

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

Моќноста на куса врска на мрежата и напоните на куса врска на трансформаторите, ако не се дадени, се дефинирани во IEC 76-5.

Во почетниот момент струјата на куса врска заради постоењето на аperiodичната компонента може значително да ја надмине стационарната струја и со тоа да предизвика механички сили меѓу намотките, неколку пати поголеми од механичките сили при стационарна струја на куса врска.

Според општата теорија на трансформатори ударната струја на куса врска, се определува по формулава:

$$i_{kmax} = \sqrt{2} k_{max} I_{ku} , \quad (3)$$

каде е k_{max} - ударен коефициент на струјата на куса врска, кој максимално го зема присуството на аperiodичната компонента на струјата на куса врска,

$$k_{max} = 1 + e^{-\pi u_{ka} / u_{kx}} \quad (4)$$

каде е u_{ka} - активна компонента на напонот на куса врска
 u_{kx} - реактивна компонента на напонот на куса врска.

4. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКИТЕ СИЛИ МЕЃУ НАМОТКИТЕ И НИВНИТЕ ДЕЛОВИ

Проводниците од коишто се изработени намотките на трансформаторот низ кои протекува струја се наоѓаат во растурното магнетно поле, и на нив дејствуваат електродинамички сили. Тие сили создаваат механички напрегања во намотките на трансформаторот и постојано се пренесуваат на другите елементи од неговата конструкција. При номинални струи силите не се големи, но при куси врски тие многу се зголемуваат и можат да се јават како причина за хаварија на трансформаторот.

Намотките на трансформаторот се состојат од бакарни проводници, раздвоени со изолациони елементи. Динамичките карактеристики на овој систем се менуваат во процесот на кусата врска, затоа што динамиката на изолационите елементи зависи од степенот на пресованост, т.е. од големината на силите што дејствуваат. Во суштина силите не остануваат постојани туку се менуваат по сложен закон. Намотката има неколку фреквенции на сопствени осцилации. Во тој случај, ако една од фреквенциите на електродинамичките сили се совпадне со фреквенција од сопствените осцилации, настапува резонанца, и како резултат на тоа, зголемување на нивото над статичкото. Нестационарниот процес во намотката претставува фактички разгледување на два преодни процеси: електромагнетен и механички.

При пресметка на механичката отпорност на трансформаторот намотките порано се разгледувале како неподвижни, а силите кои дејствуваат на нив - како постојани, кои соодветствуваат на најголемата струја која протекува низ нив. Со други зборови, динамичките процеси биле заменети со статички.

Во овој труд е изложена метода за пресметување на статички сили кои соодветствуваат на амплитудата на струјата при ненадејна куса врска.

4.1. Насока на силите кои дејствуваат на намотките во трансформаторот

Електромагнетната сила, која дејствува на струен елемент којшто се наоѓа во магнетно поле, се определува со Био-Саваров закон напишан во диференцијален облик:

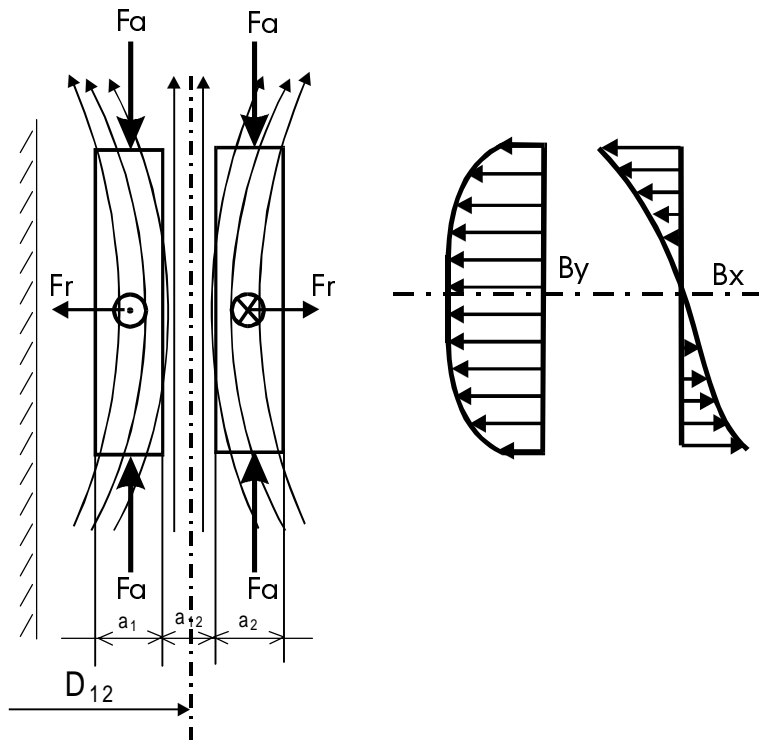
$$d\mathbf{f} = [\mathbf{B}\mathbf{J}]d\mathbf{v} \quad (5)$$

каде е $d\mathbf{f}$ - вектор на силата, кој дејствува на елемент од проводникот со волумен $d\mathbf{v}$, наоѓајќи се во поле со индукција \mathbf{B} при густина на струја \mathbf{J} . Векторскиот производ покажува, дека силата е нормална на насоката на индукцијата и насоката на густината на струјата. Според тоа, аксијалното поле создава радијални сили, а радијалното (попречно) - аксијални сили. Насоката на силата, индукцијата и густината на струја се поврзани со правилото на лева рака.

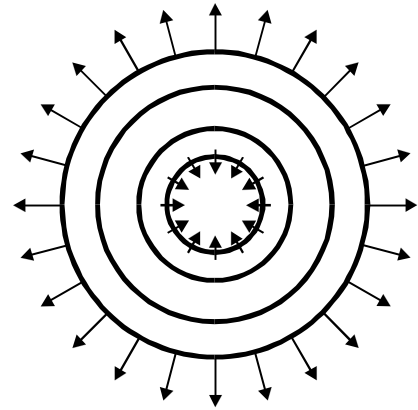
Проводници низ кои протекува струја се привлекуваат при еднакви насоки на струите и се одбиваат при различни. Низ сите навивки на една намотка протекуваат струи во иста насока, што значи тие се привлекуваат една кон друга. Спротивно, струите во НН и ВН намотки се поместени фазно приближно за π , што значи дека дејствуваат сили на одбивање поради што тие се одбиваат.

Растурното поле на трансформаторот со концентрични намотки при рамномерно распределени магетни напони по висина има облик, шематски прикажан на сл. 1. Во

просторот меѓу намотките линиите на полето се паралелни со оската на јадрото, а на краевите од намотките се искривуваат, т.е. покрај аксијалната се јавува и радијалната компонента на полето. Како што се гледа, на намотките дејствуваат како радијални, така и аксијални електромагнетни сили.



Слика 1. Распределба на аксијалната и радијалната компонента на индукцијата во трансформатор со еднакви висини на намотките



Слика 2. Радијални сили, кои дејствуваат на намотките на двонамотен трансформатор

На сл. 1 се дадени дијаграмите на распределба на индукцијата за една од намотките. Индукцијата на аксијалното поле B_y , кое создава радијални сили, во средниот дел на намотката има постојана вредност, намалувајќи се постепено кон краевите. Индукцијата на радијалното поле B_x , кое создава аксијални сили, има најголема вредност на краевите од намотката а во средината минува низ нула, менувајќи го притоа знакот.

4.2. Определување на електромагнетни сили кои дејствуваат на концентрични слојни намотки на двонамотен трансформатор

Електромагнетните сили, кои дејствуваат на намотките на трансформаторот, можат да се пресметаат користејќи го законот на Био-Савар или со теоремата на Лагранж.

Во првиот случај силата која дејствува на намотката може да се пресмета со интегрирање на равенката (5)

$$\mathbf{F} = \int_V [\mathbf{B} \mathbf{J}] dV \quad (6)$$

Ако \mathbf{B} и \mathbf{J} се нормални една на друга и постојани по целиот волумен, тогаш е:

$$F = Bli \quad (7)$$

каде l - должина на проводникот или намотката, а i струјата што протекува во неа. Теоремата на Лагранж применета во електромагнетното поле разгледува систем од струјни контури, кој се наоѓаат во магнетно поле, при тоа електромагнетните сили, кои се стремат да ја променат дадената координата на системот, е еднаква на изводот на енергијата на магнетното поле по дадената координата, при тоа струите во контурите се одржуваат постојани. Набљудувајќи ги намотките од трансформаторот како оделни струјни контури, се добива:

$$f_g = \left[\frac{\partial W_m}{\partial g} \right]_{i=\text{const.}}, \quad (8)$$

каде е f_g - сила која дејствува во насока на координатата; а W_m - енергија на магнетното поле на растурање на намотките на трансформаторот, дадена со изразот:

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \int_V B_\sigma^2 dV \quad (9)$$

или

$$W_m = \frac{1}{2} i^2 L_k, \quad (10)$$

каде е L_k - индуктивност при куса врска на трансформаторот.

Во овој случај:

$$f_g = \left[\frac{\partial W_m}{\partial g} \right]_{i=\text{const.}} = \frac{1}{\mu_0} \int_V B_\sigma \frac{\partial B_\sigma}{\partial g} dV = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L_k}{\partial g}. \quad (11)$$

Двете методи даваат доста точни резултати, ако правилно е определена сликата на распределба на магнетното поле на растурање.

Радијалната сила F_r , која дејствува на концентрични намотки на двонамотаен трансформатор, се стреми да го зголеми растојанието меѓу намотките a_{12} . Така во согласност со равенката (11) е неопходно да се пресмета изводот по a_{12} . Ставајќи наместо струјата i , амплитудата на струјата на куса врска $i_{k \max}$, добиваме израз за сила при ненадејна - ударна куса врска:

$$F_r = \frac{1}{2} i_{k \max}^2 \frac{\partial L_k}{\partial a_{12}}. \quad (12)$$

Индуктивноста на куса врска на двонамотен трансформатор со концентрични цилиндрични намотки е определена со формулата

$$L_k = \frac{\mu_0 w^2 \rho_1 \pi D_{12} \left(a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \right)}{h} \quad (13)$$

од каде за радијалната сила се пресметува според (12) во Њутни:

$$F_r = \frac{\mu_0 (i_{k \max} w)^2 \rho_1 \pi D_{12}}{2h}. \quad (14)$$

Сопствените аксијални сили F_a , кои дејствуваат на намотките, се стремат да ја намалат висината на намотките, според тоа изводот на енергијата на магнетното поле неопходно е да се земе по висина на намотката h , т.е.

$$F_{a(2)} = \left[\frac{\partial W_m}{\partial h} \right]_{i=\text{konst}} = \frac{1}{2} i_{k \max}^2 \frac{\partial L_k}{\partial h} = - \frac{\mu_0 (i_{k \max} w)^2 \rho_1 \pi D_{12} a_0}{2h^2}, \quad (15)$$

каде е

- $F_{a(2)}$ - сопствена аксијална сила, која дејствува на двете намотки,

- $a_0 = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$ - сведена ширина на намотките,

- $\rho_1 \approx 1 - \sigma \left(1 - e^{-1/\sigma} \right)$ - коефициент на Роговски,

или упростено:

$$\rho_1 \approx 1 - \sigma$$

$$\sigma = \frac{a_1 + a_{12} + a_2}{\pi n}.$$

Експериментално е определено, дека приближно (60-70)% од флуксот на растурање на трансформаторот се опфаќа со внатрешната (поблиската до јадро) намотка и (30-40)% - со надворешната. Така силата на притисок која дејствува на внатрешната односно надворешната намотка, е еднаква соодветно на:

$$F_{a(\text{vnatr.})} \approx 0.7 F_r \frac{a_0}{h}; \quad (16)$$

$$F_{a(\text{nadv.})} \approx 0.3 F_r \frac{a_0}{h}. \quad (17)$$

5. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА МЕХАНИЧКИТЕ НАПРЕГАЊА ВО ИЗОЛАЦИОНИТЕ ЕЛЕМЕНТИ И ВО ПРОВОДНИЦИТЕ НА НАМОТКАТА

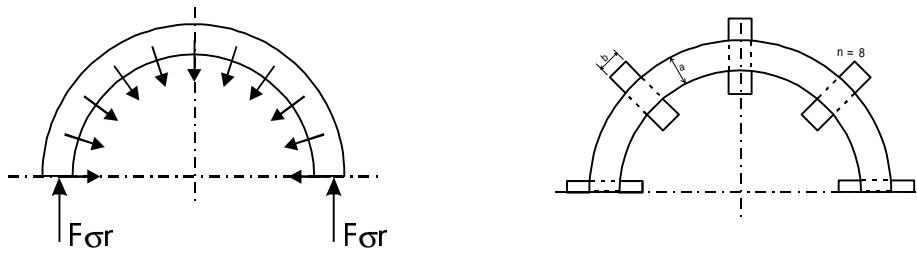
За оценка на механичката отпорност на намотките обично се определуваат напрегањата на притисок на внатрешната намотка (НН), кои се резултат на дејството на радијални сили и напрегањата на притисок меѓу навивки од најголемите аксијални сили F_a . При определувањето на напрегањата на притисок од радијалните сили се наоѓа сила, која ја притиска внатрешната намотка (сл. 3), условно разгледувана како статичка,

$$F_{\sigma r} = F_r / (2\pi). \quad (18)$$

Напрегањето на притисок во МРа, во проводниците на внатрешната намотка се определува според формулата:

$$\sigma_{\sigma r} = F_{\sigma r} 10^{-6} / (w \cdot S_{cu}), \quad (19)$$

каде е w - број на навивки на намотката, за која се пресметува силата; S_{cu} - површина на попречниот пресек на една навивка во $[m^2]$.



Слика 3.

Отпорноста на внатрешната намотка при дејство на радијални сили зависи од многу фактори, а при пресметките тоа може приближно да биде оценето по големината $\sigma_{\sigma r}$.

За обезбедување на отпорноста на намотките при ударни струи на куси врски можно е како проверка да се дозволи $\sigma_{\sigma r} < 35 \text{ MPa}$ во намотки изработени од бакар.

Напрегањата на притисок на потпорната површина во MPa, е:

$$\sigma_{\sigma a} = F_a 10^{-6} / (n \cdot a \cdot b) \quad (20)$$

каде е n - број на блокови по обемот на намотката; a - радијална ширина на намотката, m ; b - ширина на блокот, m .

6. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ТЕМПЕРАТУРАТА НА НАМОТКИТЕ ПРИ КУСА ВРСКА

Пресметката на температурата на намотките при куса врска се врши за стационарната струја на куса врска при претпоставка, дека заради кратковремениот процес на одавање на топлина од намотка кон масло, и целата топлина создадена од грејното тело, оди за зголемување на неговата температура т.е. се разгледува адијабатски процес.

Допуштената температура на загревање на намотките изработени од бакар се определува според формулава:

$$\vartheta_{kCu} = \frac{670t_k}{12.5 \left[u_k / (g 10^{-6}) \right]^2 - t_k} + \vartheta_n \quad (21)$$

каде е t_k - времетраење на кусата врска, g - густина на струја при номинално оптоварување, A / mm^2 . За почетна температура на намотките обично се зема $\vartheta_n = 90^\circ C$.

Времето за кое намотките од бакар ја достигнуваат допуштената температура од $\vartheta_{kCu} = 250^\circ C$,

$$t_{k250} \approx 2.5 \left[u_k / (g 10^{-6}) \right]^2. \quad (22)$$

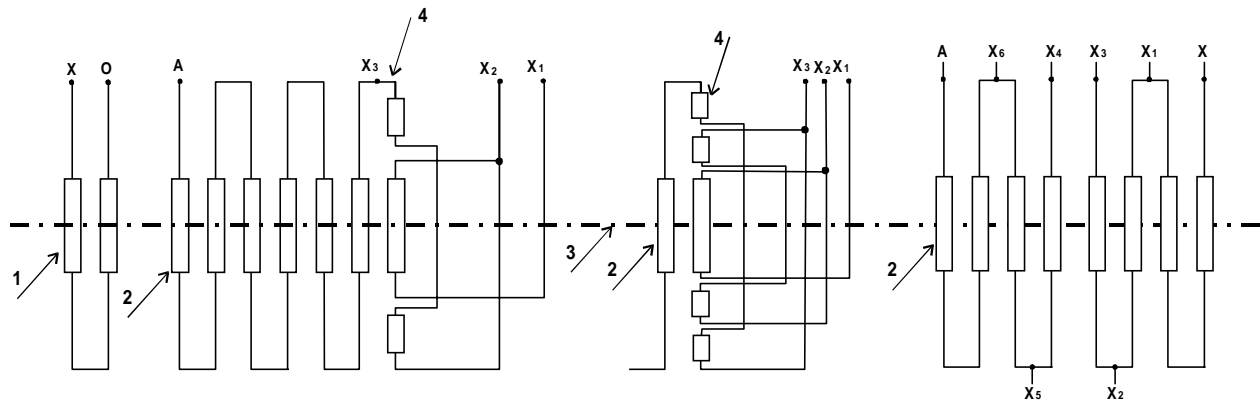
Димензиите на сите големини се изразуваат во SI системот (International System of Units).

7. ПРЕПОРАКИ ЗА ЗГОЛЕМУВАЊЕ НА ЕЛЕКТРОДИНАМИЧКАТА ОТПОРНОСТ НА ТРАНСФОРМАТОРИ СО СЛОЈНИ ЦИЛИНДРИЧНИ НАМОТКИ ПРИ КУСИ ВРСКИ

Резултатите на пресметките и испитувањата покажуваат дека единствен начин за да се зголеми електродинамичката отпорност при куси врски на трансформаторите со слојни цилиндрични намотки над 400 kVA, е јавува смалувањето на аксијалните сили.

Најдобар и најрационален начин да се намали аксијалната сила е:

1. Да се изведат (изработат) ВН намотки магнетно-симетрични во однос на средината од висината при било која положба на изводите за регулација. Некои такви шеми се прикажани на сл.4.



Слика 4. Шеми на магнетно симетрични ВН намотки

1 - НН намотка; 2 - ВН намотка; 3 - оска на симетрија

2. Рамномерна распределба на ампер-навивките на двете намотки по целата висина (избалансиран ампер-навивки на ВН и НН намотки). Одсуство на каква било несиметрија по висина на намотките.

8. РЕЗУЛТАТИ ОД ПРЕСМЕТКАТА И ИСПИТУВАЊАТА НА ПРОТОТИПНИОТ ТРАНСФОРМАТОР 200 kVA, 11/0.433, $U_k = 4,75\%$

Предложената упростена метода за пресметка на електродинамичката отпорност на трансформатори со слојни цилиндрични намотки се состои во следново:

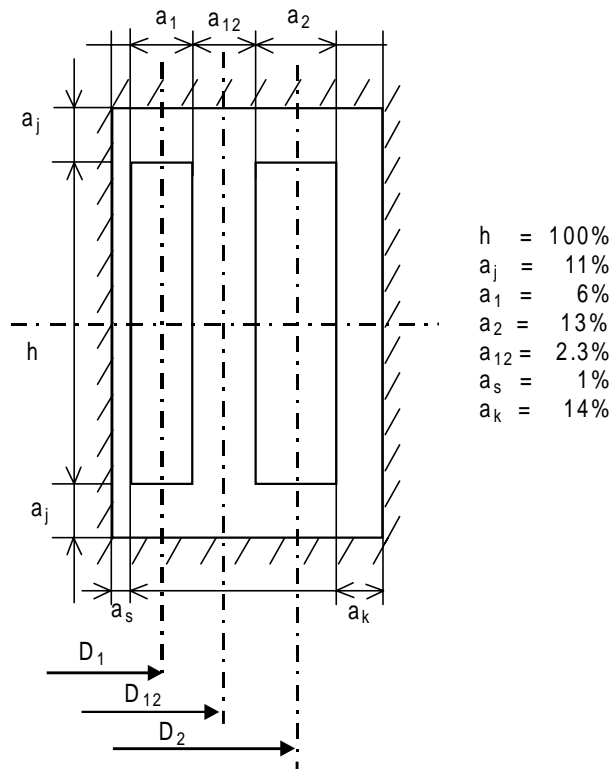
а) Се определуваат аксијалните сили, кои дејствуваат на целата и на внатрешниот слој од НН намотка; при пресметката се задаваат определени вредности на двете видови несиметрии на намотките:

- несиметрија во аксијална насока
- несиметрија во слојот со навивки за регулација.

б) Се пресметува потпорната површина на внатрешниот слој на НН намотка

в) Се определува максималното напрегање на крајната изолација, кое не смее да биде, зависно од изолациониот материјал поголем од 20 МРа. Ако пресметаното напрегање е поголемо од 20 МРа, тогаш треба да се зголеми потпорната површина на изолацијата или да се намали општата пресметана сила по пат на примена на специјални шеми на намотките, обезбедувајќи магнетна симетрија на сите степени на регулираниот напон.

Резултатите од пресметувањето се дадени во Табела 1.



Слика 5. Процентуален однос на основните параметри во однос на висината

Табела 1

Пресметани вредности	Намотка	
	В.Н. Намотка	Н.Н. Намотка
$I_{ku} (S_k = 500 \text{ MVA})$	219.2 A	5.568 kA
$i_{k \max}$	441.7 A	11.218 kA
σ	0.068	
ρ_1	0.932	
F_T	1021228 N	1021228 N
$\sigma_{\sigma r}$	28.89 MPa < 60	32.63 MPa < 60
F_a	44547 N	44547 N
$\sigma_{\sigma a}$	3.31 MPa	14.5 MPa за А и С фаза < 20 MPa
		19.3 MPa за В фаза < 20 MPa
$\vartheta_{kCu} (t_k = 5 \text{ sec})$	150.6 $^{\circ}\text{C}$ < 250 $^{\circ}\text{C}$	

Во прилог се дадени во оригинал 2 страни од TEST RECORD од IPH - Берлин, Германија од пресметката:

- 4.5. Test and measuring circuits (Испитни и мерни шеми),
- 4.6. Test results (Резултати од испитувањата).

9. ЗАКЛУЧОК

1. Во трансформаторите со слојни цилиндрични концентрични намотки, особено за моќности над 250 kVA, се јавуваат значителни сили кои се резултат на несиметричен последен слој на ВН намотка. За намалување на аксијалните сили најдобро е да се применат шеми на намотки на ВН, кои обезбедуваат симетричен (во однос на средината од намотката) распоред на навивките за регулација.

2. Неопходно е да се изврши проверка на крајната изолација на максимално напрегање во согласност со карактеристиките на изолацијата што ги дава производителот.

3. Типски испитувања на ударна куса врска.

10. ПРЕГЛЕД НА УПОТРЕБЕНИ ОЗНАКИ

- I_n - номинална струја на една намотка
- S_n - номинална моќност на трансформатор
- S_k - моќност на куса врска на мрежата
- u_k - напон на куса врска на трансформаторот
- I_{ku} - стационарна струја на куса врска
- $i_{k\max}$ - ударна струја на куса врска
- F_r - радијална сила
- F_a - аксијална сила
- w - број на навивки на една намотка
- ρ_1 - коефициент на Роговски
- μ_0 - магнетна пермеабилност на воздух
- σ_{gr} - механичко напрегање од радијални сили
- σ_{sa} - механичко напрегање од аксијални сили
- ϑ_{kCu} - температура на намотките при куса врска
- t_k - времетраење на куса врска

11. ЛИТЕРАТУРА

- [1] M.Waters, "The Short-Circuit Strength of Power Transformers", Macdonald, London 1966.
- [2] B.Kuzmanovi}, "Prora~un sila u namotu transformatora i napona kratkog spoja na digitalnom ra~unalu", Informacije, Rade Kon~ar 1968.
- [3] П.М. Тихомиров, "Расчет трансформаторов", ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, Москва, 1986
- [4] Я. Туровский, "Техническая электродинамика", ЭНЕРГИЯ, Москва, 1974
- [5] Д. Манов, К. Најденкоски, "Пресметка на сили во намотките на енергетски трансформатори", МАКО - СИГРЕ, Стк.12, стр. 144-150

Расим Салкоски, дипл ел. инж.
ЕМО - Охрид

КОМПЕНЗАЦИОНИ ПРИГУШНИЦИ СТЕПЕНАСТО РЕГУЛИРАНИ СО ПРЕКЛОПКА ВО БЕЗНАПОНСКА СОСТОЈБА

1. СОДРЖИНА

Во рефератот е прикажана техниката на проектирање, конструкцијата и резултатите од испитувањата на компензациона пригушница степенасто регулирана со преклопка во безнапонска состојба. Дадени се основните технички карактеристики на компензационата пригушница со моќност 2000 kVAr, напон $66000/\sqrt{3}$ V, регулација на струјата од 20.8 до 52 A.

1.1. КЛУЧНИ ЗБОРОВИ

Компензациона пригушница, индуктивност, магнетно коло, основна намотка, дополнителна намотка, магнетен флуks, фиксен воздушен зјај.

STEPWISE ADJUSTABLE ARC SUPPRESSION COILS

1. SUMMARY

This paper deals with the method of designing, mechanical construction and test results of stepwise adjustable arc suppression coils. The main technical characteristics of arc suppression coil power rating of 2000 kVAr, $66000/\sqrt{3}$ V, regulation of current in the range 20.8 to 52 Amps, have been laid down in the paper.

1.1. KEY WORDS

Arc suppression coil, inductivity, magnetic core, main winding, auxiliary winding, magnetic flux, fixed air gap.

2. ВОВЕД

Компензационите пригушници степенасто регулирани со преклопка во безнапонска состојба се проектираат како пригушници со фиксни воздушни зјаеви по должината на магнетното јадро, а регулацијата на струјата се врши со промена на бројот на навивки преку изводите за регулација.

Густијата на магнетниот флуks во магнетното јадро го ограничува опсегот на регулација на приближно 1 : 2,5.

Изборот на вредностите на индуктивитетот односно струите е нормално од 6 до 10 степени, со преклопка која се регулира само кога компензационата пригушница е исклучена од неутралната точка на системот.

3. НОМИНАЛНИ ГОЛЕМИНИ

Номиналниот напон на пригушницата се определува според номиналниот фазен напон на мрежата, затоа што пригушницата во погон со еднофазен земјоспој доаѓа на фазен напон.

$$U_{np} = U_{nf} = U_n / \sqrt{3} \quad (1)$$

Опсегот на регулацијата на струјата на пригушницата се определува со односот:

$$s = I_{min} / I_{max} \quad (2)$$

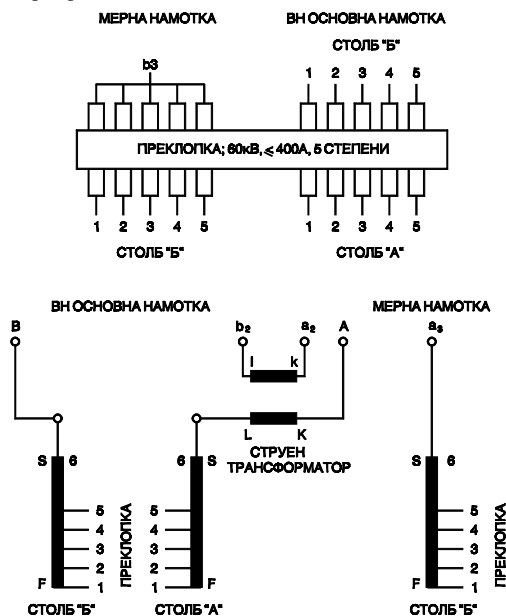
каде I_{min} и I_{max} представуваат минимална и максимална струја на пригушницата, кои се постигнуваат при номинален напон, респективно. Струјата I_{min} , ја определува максималната, а струјата I_{max} минималната вредност на реактансата (импеданса) на пригушницата, која може да се постигне со регулацијата.

Струјата I_{max} воедно представува и номинална струја на пригушницата.

$$I_{np} = I_{max} \quad (3)$$

Номиналната моќност на пригушницата се дефинира како:

$$S_{np} = U_{np} I_{np} \quad (4)$$



Слика 1. Принципиелна шема на компензациона пригушница со отцепки за регулација на струјата

Помошната намотка вградена во пригушницата служи за приклучок на отпорник за кратковремено оптоварување со цел да се зголеми активната компонента на струјата на земјоспој, а со тоа и лоцирање на земјоспојот.

Мерната намотка вградена во пригушницата е со цел да произведе напонски сигнал во состојба на земјоспој.

Во пригушницата е вграден струен трансформатор кој овозможува мерење на струјата на земјоспој.

Нагодувањето на пригушницата на точна компензација се изведува обично према вредностите на напонот во неутралната точка во нормален погон на мрежата кои се воспоставуваат поради асиметрија на мрежата. Точна компензација се постигнува тогаш кога споменатиот напон има најголема вредност за дадена конфигурација на мрежата.

4. ПРЕСМЕТКА НА КОМПЕНЗАЦИОНИ ПРИГУШНИЦИ СО ИЗВОДИ ЗА РЕГУЛАЦИЈА НА СТРУЈАТА

Во овој реферат се разгледуваат пригушници со цилиндрични намотки и магнетно јадро со воздушни зјаеви. Работниот процес во пригушницата со број на навивки w , вкупна должина на патот во магнетното јадро l_{Fe} и вкупна должина на воздушни зјаеви Σl_z , ако се занемарат загубите во јадрото, се определува со Амперовиот закон:

$$I_m w = 0.8 B_z \Sigma l_z + m N_{Fe} l_{Fe} \quad (5)$$

Првиот член во сумата десно представува пад на магнетниот напон во воздушните зјаеви, вториот - во јадрото. Воведувањето на магнетно јадро (при даден магнетен напон) доведува до зголемување на флуксот, а со тоа и на индуктивноста на пригушницата. Но, индуктивноста на пригушницата со магнетно јадро, зависи од струјата, што во многу случаи има суштинско значење.

4.1. Електрична пресметка

Во првиот стадиум се избира пресек на магнетно јадро со дијаметар D_{Fe} на исти начин како кај енергетските трансформатори. После тоа се определува радијалното изолационо растојаније а од намотка до столбот соодветно со потребното ниво на главната изолација и се задаваат приближни димензии на намотката - h висина и b радијална димензија (дебелина на намотка):

$$h = (2 \div 2.6) D_{Fe} \quad ; \quad b = (0.18 \div 0.28) D_{Fe}$$

Се решава равенката [Л.7]

$$1.25 \frac{S_\sigma}{h} w^2 10^2 + \frac{B_{Fe} S_{Fe}}{I_m} w 10^8 - L_n 10^8 = 0 \quad (6)$$

од каде се определува бројот на навивки w во првото приближување. Големината S_σ што фигурира во равенката (6) во првиот стадиум на пресметката може да се пресмета по формулава:

$$S_\sigma = \left[\frac{\pi(D_{Fe} + 2a)^2}{4} - \frac{S_{Fe}}{f_{Fe}} \right] + \pi(D_{Fe} + 2a + b) \frac{b}{3} \quad (7)$$

Пред да се определи големината l_z , неопходно е да се зададе висината на магнетниот сегмент H_{Fe} .

На делови од обиколката на јадрото, еднакво на ширината на крајниот пакет, "страничниот" флукс, пропорционален на големината $\epsilon = f(l_z)$, предизвикува зголемени

загуби од виорни струи во крајните листови. Со намалување на висината на магнетниот сегмент се зголемува нивниот број, а се намалува должината на единечниот воздушен зјај, "страничниот" флукс и негово продирање на површината од крајните листови. На таков начин, од аспект на намалување на загубите во крајните пакети пожелно е да се избере големината H_{Fe} минимална, но од конструктивен и технолошки аспект таа не може да биде помала од одреден минимум, кој зависи од дијаметарот на јадрото.

Практично во пригушници со номинална моќност од неколку десетици до неколку илјада киловолтампери се применува:

$$H_{Fe} = (0.15 \div 0.28) D_{Fe}, \quad (8)$$

при што поголемите вредности на коефициентот се однесуваат за помалите дијаметри.

Бројот на зјаеви n по столб (заокружено до помалиот цел број) се определува од:

$$n = h / H_{Fe}$$

Индукцијата во зјајот, од една страна, еднаква е на:

$$B_z = B_{Fe} S_{Fe} / S_z \quad (9)$$

а од друга

$$B_z = 1.25 I_m w / n l_z. \quad (10)$$

Пред точно определување на големината ΔS , која се јавува како функција од l_z , може со задоволително приближување да се применат:

$$\epsilon = 0.5 l_z \text{ и } \Delta S = \pi D_{Fe} 0.5 l_z \quad (11)$$

Со решавање на равенките (9), (10), (11), се добива:

$$B_{Fe} S_{Fe} n l_z = 1.25 I_m w \left(\frac{S_{Fe}}{f_{Fe}} + 0.5 \pi D_{Fe} l_z \right),$$

од каде за единечниот воздушен зјај се добива:

$$l_z = \frac{1.25 I_m w \frac{S_{Fe}}{f_{Fe}}}{B_{Fe} S_{Fe} n - 2 D_{Fe} I_m w}. \quad (12)$$

Во вториот стадиум по определените величини: D_{Fe} , w , n , l_z , се врши детална пресметка на намотката по исти методи како и за трансформатори.

Димензиите на намотката, се разбира, се разликуваат од оние предпоставените во првиот стадиум. За таа причина стварната индуктивност L се разликува од номиналната L_n . Заради тоа се внесува корекција на избраниот број на навивки.

Пред да се определи еквивалентната ширина " ϵ " на "страничниот" флукс ќе се разгледа распределбата на линиите на индукцијата на магнетното поле на сл. 2.

Како што се гледа од сликата, магнетниот флукс во пригушницата може да се разбие на главен флукс Φ_o и флукс $\Phi_{\sigma o}$, кој минува целосно по немагнетна средина (по "воздух").

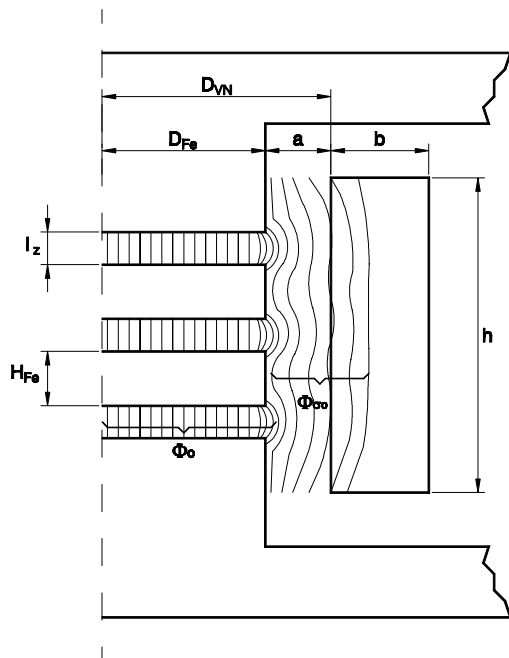
Главниот флукс е еднаков на:

$$\Phi_o = B_{Fe} S_{Fe} = B_z S_z \quad (13)$$

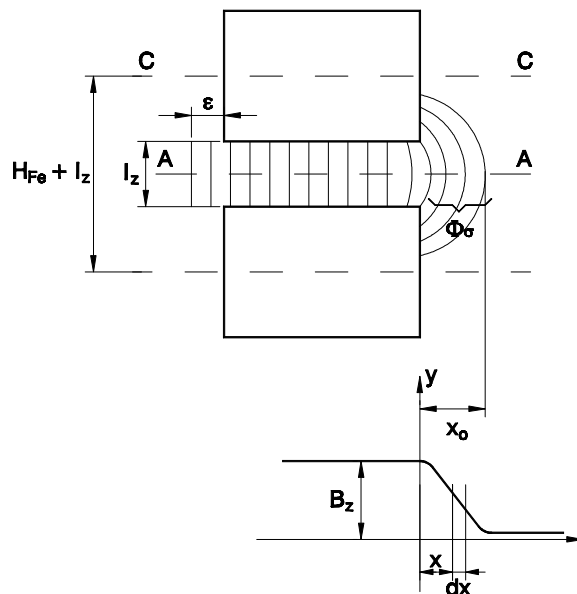
Како што се гледа од сл. 3, главниот флукс навлегува во бочните површини на магнетните сегменти. Заради тоа еквивалентниот пресек S_z е поголем, од геометрискиот пресек на столбот, за некоја големина ΔS :

$$S_z = S_{Fe} / f_{Fe} + \Delta S \quad (14)$$

каде f_{Fe} - коефициент на пополнување на пресекот од столбот



Слика 2. Пресек на компензациона пригушница



Слика 3. Распределба на магнетниот флуks во зјајот

На сл. 3 е представена кривата на промената на индукцијата на "страничниот" флуks Φ_σ во површината на симетрија на воздушниот процес А-А, кој на единица должина на обиколката на столбот е еднаков:

$$\Phi_\sigma = \int_{x=0}^{x=x_0} B_y dx \quad (15)$$

За погодна пресметка реалниот "страничен" флуks може да се замени со фиктивен со постојана индукција B_z , опфатен во пол со ширина ϵ .

Таа големина се определува од условот:

$$B_z \epsilon = \int_{x=0}^{x=x_0} B_y dx \quad (16)$$

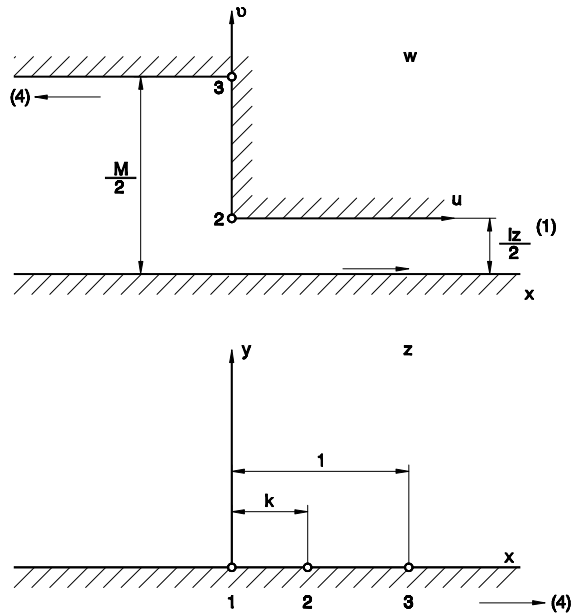
При доволно големи односи a/l_z (сл. 2) можно е без голема грешка да се земе дека површината на симетрија на процесот А-А, и средната површина на магнетниот сегмент С-С (сл. 3) се јавуваат како површини на еднаков магнетен напон. Ако се занемари кривината на столбот и намотката, односно се разгледува планпаралелно поле задачата се сведува на пресметка на полето меѓу "прагот" и бесконечната површина А-А (сл. 4).

Ако сега се занемари магнетниот напон кој дејствува во јадрото, тогаш површината на "прагот" станува еквипотенцијална, при што магнетниот напон меѓу "прагот" и површината е еднаков:

$$F = 0.4\pi wI / 2n \quad (17)$$

каде n - број на зјаеви.

Се врши конформно пресликување на контурата 1-2-3-4 од површината w на горната полуповршина z , така што трите точки 1, 2, 3 од површината w соодветно да попаднат во точки: $z_1 = 0$, $z_2 = k$; $z_3 = 1$. При тоа негативната материјална полуоска во површината z ќе има магнетен напон, еднаков на напонот на линијата А-А ($F=0$), а позитивната - F .



Слика 4.

По теоремата на Шварц:

$$\frac{dw}{dz} = C_1 z^{-1} (z-k)^{\frac{1}{2}} (z-1)^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

Користејќи го односот

$$H_w = H_z \frac{dz}{dw} \quad (19)$$

се пресметува вредноста на H_w во близина на точката w_4 (т.е. $u = -\infty$) и се изедначува со непосредно пресметаната од условот на еднородност на полето во точката $H_w = \frac{F}{M/2}$, каде

$$M = H_{Fe} + I_z, \text{ одкаде } C_1 = \frac{M}{2\pi}. \quad (20)$$

Понатака, со изедначување на вредностите на dw/dz во површината w (во близина на точката $w = w_1$, т.е. $u = \infty$) и во околината со мал радиус на круг во точка $z_1 = 0$, се наоѓа:

$$I_z / 2\pi = C_1 \sqrt{k}, \text{ одкаде } \sqrt{k} = I_z / M. \quad (21)$$

"Страничниот" флуks, пресметан во површината w , се добива од

$$\Phi_{\sigma(w)} = \int_{w_2}^{w_3} H_w dw. \quad (22)$$

Интегрирањето во површината w се заменува со интегрирање во z површината:

$$\int_{w_2}^{w_3} H_w dw = \int_{z_2}^{z_3} H_z dz. \quad (23)$$

Полето меѓу полуоските во горната полуповршина z е еднакво на:

$$H_z = -j \frac{F}{\pi z}. \quad (24)$$

На овој начин се добива за:

$$\Phi_{\sigma(z)} = \frac{F}{\pi} \int \frac{1}{z} dz = \frac{F}{\pi} \ln \frac{M^2}{l_z^2} \quad (25)$$

Во длабочината на зјајот, меѓу магнетните сегменти, очигледно дека е:

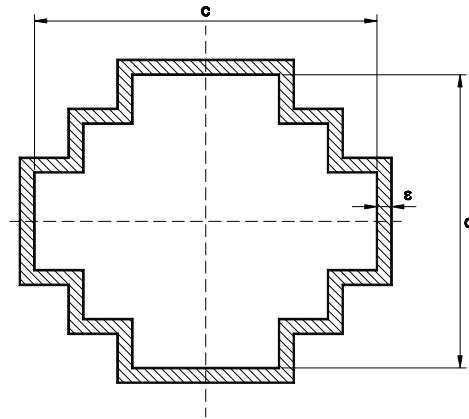
$$H_{w=\infty} = \frac{0.4\pi I w}{nl_z} = \frac{2F}{l_z}$$

Еквивалентната ширина ϵ се пресметува од условот:

$$\epsilon H_{w=\infty} = \Phi_{\sigma}$$

Со помош на изразот (25) се добива формулата за пресметување на еквивалентната ширина ϵ на "страничниот" флуks

$$\epsilon = \frac{l_z}{\pi} \ln \frac{H_{Fe} + l_z}{l_z} \quad (26)$$



Слика 5. Попречен пресек на јадрото од пригушницата

Со определување на еквивалентната ширина се определува еквивалентната површина (сл.5) по која продира "страничниот" флуks, со формулава:

$$\Delta S' = 2(c + d + 2\epsilon)\epsilon \quad (27)$$

Големините S'_z и S'_σ со подобрена точност ќе бидат еднакви на

$$S'_z = \frac{S_{Fe}}{f_{Fe}} + \Delta S' \quad (28)$$

$$S'_\sigma = \frac{\pi(D_{Fe} + 2a)^2}{4} - \frac{S_{Fe}}{f_{Fe}} - \frac{3}{4}\Delta S' + \pi(D_{Fe} + 2a + b)\frac{b}{3} \quad (29)$$

Членот $\frac{3}{4}\Delta S'$ во изразот зема предвид дека во каналот меѓу намотката и столбот (сл. 2) минува едновремено и "страничниот" флуks.

После определување на големините S'_z и S'_σ се определува индуктивноста L' :

$$L' = \frac{\Psi'}{I_m} = 1.25w^2 \left[\frac{S'_z}{nl_z} + \frac{S'_\sigma}{h} \right] 10^{-6} \quad [H] \quad (30)$$

За определување на бараната индуктивност L_n бројот на навивки се определува од изразот:

$$w' = w \sqrt{\frac{L_n}{L}} \quad (31)$$

Обично N' се разликува од N само за неколку проценти. Оваа корекција не влијае на димензиите, ниту на структурата на намотката.

Горната вредност претставува максимална индуктивност и се однесува за минималната струја на регулацијата.

Горната постапка се повторува за сите степени на регулација при тоа водејќи сметка да не се доведе јадрото во состојба на заситување. Препорака е изводите по степени да се изведат на почеток или крај од слојот кај слојните односно дискот кај дисковите намотки, задржувајќи при тоа цилиндричен облик на геометријата на намотката.

Изложената метода за пресметка на пригушницата дава многу точно совпаѓање на пресметката со испитувањето.

4.2. Термичка пресметка

Загубите на моќност во пригушницата можат да се категоризираат како

$$P = I^2 R + P_a + P_r + P_c + P_d \quad (32)$$

каде што се:

- $I^2 R$ - загуби поради отпорот на намотките,
- P_a - загуби од виорни струи во намотката од аксијалната компонента на магнетното поле,
- P_r - загуби од виорни струи во намотката од радијалната компонента на магнетното поле,
- P_c - загуби во магнетното коло,
- P_d - дополнителни загуби во други метални делови.

Со адекватен избор на каналите во намотката е подобро оддавањето на топлината кон разладното средство, со што се постигнати и пониски градиенти на температура.

Активните загуби на пригушницата не ги надминува 2.5 % од номиналната моќност.

Вишите хармоници во струјата на пригушницата одсуствуваат.

Користејќи ги равенките од електричната и термичката пресметка направен е компјутерски програм, со кој се добива оптимално решение за разгледувана пригушница.

Димензиите на сите големини се изразуваат во SI системот (International System of Units).

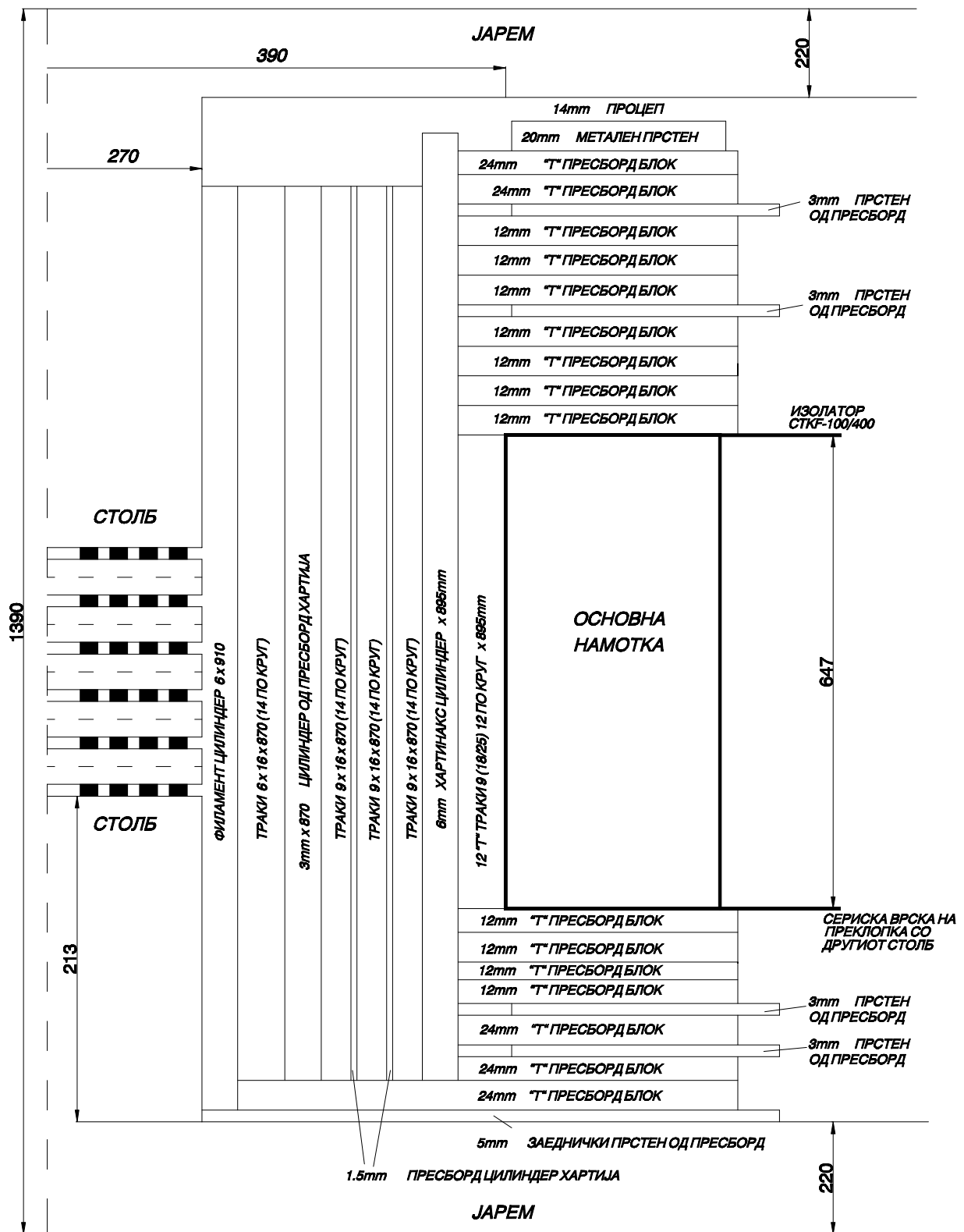
4.3. Механичка пресметка, вибрации и бука

Посебно е обратено внимание на адекватно димензионирање на стегите на активниот дел и надолжните штрафови за стегање на магнетните сегменти од јадрото во аксијална насока, затоа што при појавата на доземен спој се јавуваат големи електродинамички сили.

Материјалот на надолжните штрафови е прохром (отпорен на корозија и немагнетен), а изборот е направен заради специфичната местоположба во активниот дел од пригушницата.

Посебно внимание е посветено на редуцирање на нивото на буката на апсолутен минимум, а тоа е направено со воведување на цврста носечка конструкција, импрегнирајќи ги магнетните сегменти со синтетска смола или двокомпонентен лепак компатибилни со трансформаторското масло.

4.4. Изведба на изолацијата на пригушницата



4.5. Фактор на доброта

Факторот на доброта на една пригушница е дефиниран со равенката

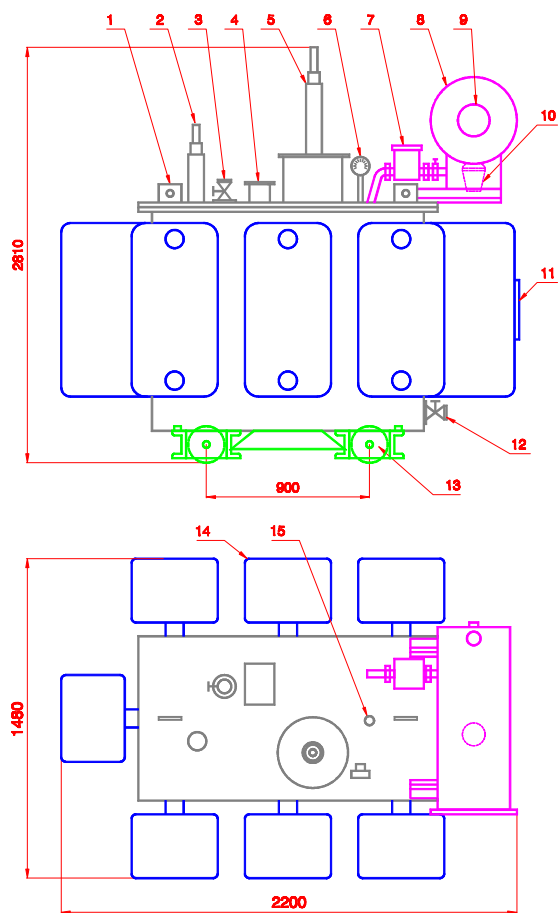
$$Q_L = \omega L / R_L \quad (33)$$

каде што L е индуктивност, а R_L е отпорност на пригушницата.

Големината Q_L , која ги определува резонантните својства на колото се нарекува и доброта на колото.

За добри резонантни карактеристики Q_L факторот не смее да биде помал од 100, а пожелно е да биде поголем. За предметната пригушница овој фактор на доброта изнесува 200 за 20.8 A, 170 за 52 A.

5. ТЕХНИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ И НАДВОРЕШЕН ИЗГЛЕД



1. LIFTERS
2. EARTHING HV TERMINAL
3. FILTER VALVE
4. TERMINAL BOX
5. HV TERMINAL
6. CONTACT THERMOMETER
7. BUCHHOLZ RELAY
8. CONSERVATOR
9. MAGNETIC OIL LEVEL INDICATOR
10. SILICA GEL BREATHER
11. RATING PLATE
12. DRAIN VALVE
13. WHEELS
14. RADIATORS WELDED TO TANK
15. TAPPING SWITCH CONTROL

TECHNICAL DATA

STEPWISE ASC

1. Manufacturer	EMO OHRID, MACEDONIA
2. Rated voltage (V)	66000/ $\sqrt{3}$
3. Rated current (A)	52
4. Regulation stepwise	40-50-63-80-100 % of rated current
5. ASC far-operated	no
6. Equipment for automatic regul.	no
7. Oil	IEC 296 grade II
8. Drain valve	yes
9. Finish	painted execution
10. Auxiliary and signal voltage	no
11. Pressure relief device	no
12. Main container	with conservator
13. Execution of cover	bolted
14. Aproximate dimensions of ASC	
- lenght (mm)	2200
- width (mm)	1780
- height (mm)	3520
15. Contact thermometer	yes
16. Instrument size and type	no
17. Built-in current trafo	60/5 A-15 VA, class 1
18. Voltage winding	66/ $\sqrt{3}$ / 0.11 kV, 100 VA
19. Power winding	no
20. Zero point resistance	no
21. Transport arrangement	wheels
22. Aproximate Oil weight (kg)	1520
23. Aproximate Total weight (kg)	4700
24. Losses(*) : iron (W) copper (75°C)	4000 25500
* loss figure is not guaranteed	
25. Outline drawing	EJ 403355/R
26. Standard	IEC 289, DEFU 3
27. HV bushings:	
- type CTKf 100/400-IEC 137/73, on the zero-point	
- type 30Nf-DIN 42531, on the earthing	
28. ASC is dimensioned to work with the zero-point power short-time duty 2 hours (KB 2h).	
29. Note: ASC is dimensioned with taps for regulation.	

DMF66/2000/REV.

2PSR 2000-52/66

6. ПРЕГЛЕД НА УПОТРЕБЕНИ ОЗНАКИ

U_{np}	- номинален напон на пригушницата
I_{np}	- номинална струја на пригушницата
S_{np}	- номинална снага на пригушницата
f	- фреквенција
w	- вкупен број на навивки
L_n	- номинална индуктивност на пригушницата
B_{Fe}	- густина на флукс во магнетно јадро
B_z	- густина на флукс во воздушен процес
H_{Fe}	- должина на магнетен сегмент
l_z	- должина на единечен воздушен процес
n	- вкупен број на зјаеви
Φ_o	- главен флукс
$\Phi_{\sigma o}$	- флукс низ немагнетна средина ("воздух")
S_{Fe}	- ефективен пресек на магнетно јадро
S_z	- ефективен пресек на воздушен процес
ε	- еквивалентна ширина на "страничниот" флукс
Q_L	- фактор на доброта

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Christoffel, "The Design and Testing of EHV Shunt Reactors", IEEE Trans. (Power Apparatus and System), Vol.86, pp 684-692, June 1967 .
- [2] William T. Hunt, Jr.Robert Stein, "Static Electromagnetic Devices", Allyn and Bacon, Inc., Boston,1963.
- [3] TRENCH ELECTRIC paper 0300 01 E 91 09 TE, "High Impedance (Resonant) Grounding", 1991
- [4] Jovan M. Nahman,"Uzemljenje neutralne ta~ke distributivnih mre`a", Nau~na Knjiga, Beograd, 1980
- [5] J.P.Vora, B.L.Johnson, H.C.Barnes, "A new shunt reactor principle proved: Designed data and factory test results for units built on the insulated core principle", IEEE Winter Meeting, New York, January 1972.
- [6] Branko D. Popovi}, "Zbornik problema iz elektromagnetike", Gra | evinska knjiga, Beograd, 1977
- [7] Расим Салкоски, "Компензациона пригушница со регулиран процес" , Прво советување МАКО СИГРЕ, СТК 12, Стр. 121-131

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ СИГРЕ
ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Јовче Донески, дипл ел. инж.
ЕМО - Охрид

ЕКОНОМИЧНОСТ ПРИ ПАРАЛЕЛНА РАБОТА НА ТРАНСФОРМАТОРИ

1. СОДРЖИНА

Во рефератот се изложени условите за паралелна работа на трансформатори, како и условите за паралелна работа со минимални загуби на моќност, односно економична паралелна работа.

1.1. КЛУЧНИ ЗБОРОВИ

Трифазен трансформатор, векторска група, струја на изедначување, напон на куса врска, паралелна работа.

THE ECONOMICS OF PARALLEL OPERATION OF TRANSFORMERS

1. SUMMARY

This paper deals with the conditions of the parallel operation of transformers, as well as the conditions for the parallel operation with minimum power losses, i.e. optimal parallel operation.

1.1. KEY WORDS

Three phase transformer, vector group, equalizing current, impedance voltage, parallel operation.

2. ВОВЕД

Трансформаторот е електроенергетски уред, кој ја трансформира електричната енергија со едни вредности на напонот и струјата во други, при иста фреквенција. Местата каде што се инсталираат трансформаторите се нарекуваат трафостаници. Ако во една трафостаница е инсталиран само еден трансформатор кој ги задоволува потребите на потрошувачите, при негов дефект сите потрошувачи ќе останат без електрична енергија, се додека не се отстрани дефектот. Исто така и при зголемување на моќноста на потрошувачите кои се напојуваат од таа трафостаница, може да дојде до преоптоварување на трансформаторот. Затоа се практикува во трафостаниците да се инсталираат два или повеќе трансформатори кои ќе работат паралелно.

Паралелна работа на трансформаторите имаме кога тие се поврзани на ист електроенергетски систем на примарна и на секундарна страна. Има два вида на паралелна работа: паралелна работа со собирница и паралелна работа со систем.

3. НОМИНАЛНИ ГОЛЕМИНИ

Преносниот однос на напоните на трансформаторот е дефиниран како однос помеѓу номиналните напони на примарната и секундарната намотка, во празен од:

$$k = U_{n1} / U_{n2} \quad (1)$$

Векторската група го означува фазното изместување помеѓу индуцираните напони во примарната и секундарната намотка.

Напон на куса врска u_{kn} е напон кој треба да се приклучи кон една од намотките на трансформаторот, кога другата е кусо сврзана, да низ нив потечат номинални струи при номинална фреквенција. Напонот на куса врска при номинална струја обично е изразен како процент од номиналниот напон на намотката на која се доведува напонот.

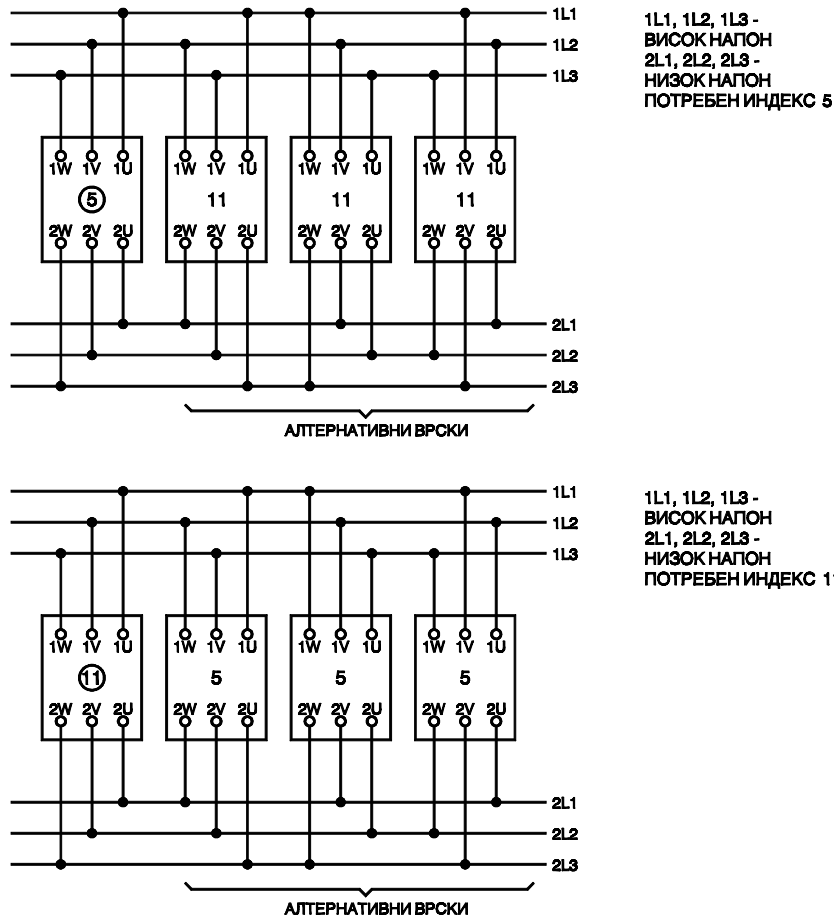
Напонот на куса врска u_k при некоја друга вредност на струјата и/или друга отцепка освен главната, изразен како процент од номиналната струја е:

$$u_k = u_{kn} \frac{I}{I_n} [\%] \quad (2)$$

4. ОПШТИ УСЛОВИ ЗА ПАРАЛЕЛНА РАБОТА

4.1. Трансформатори со исти векторски групи

Трансформаторите со исти векторски групи се прикладни за паралелна работа. Приклучоците со исто обележување мора да бидат взаемно сврзани. Меѓутоа, исто така е можно да бидат во погон во паралелна работа трансформатори кои припаѓаат на различни векторски групи ако приклучниците се заменети соодветно. На сликата 1 се прикажани можните шеми за паралелна работа на трансформатори со векторски групи: 5 и 11.



Слика 1. Алтернативни шеми за паралелна работа на трансформатори со векторски групи: 5 и 11

4.2. Трансформатори со приближно еднаков преносен однос и опсег на регулација на напонот

Кога преносните односи се еднакви вкупното оптоварување се распределува помеѓу паралелно вклучените трансформатори право пропорционално на моќностите на трансформаторите и обратно пропорционално на нивните напони на куса врска. Кога преносните односи на напоните на трансформаторите што работат паралелно се различни, тогаш низ намотките ќе тече струја на изедначување, која може да се пресмета од следнава приближна формула:

$$I_{iz1} \approx \frac{|\Delta u|}{u_{kn1} + \frac{S_{n1}}{S_{n2}} \left(\frac{U_{n2}}{U_{n1}} \right)^2 u_{kn2}} 100 [\%], \quad (3)$$

каде е I_{iz1} - Струја на изедначување во % од номиналната струја на првиот трансформатор.

$|\Delta u|$ - Апсолутна вредност на разликата на секундарните напони на трансформаторите како % од секундарниот напон во празен од на првиот трансформатор.

- u_{kn1} - Напон на куса врска при номинална струја на првиот трансформатор.
- u_{kn2} - Напон на куса врска при номинална струја на вториот трансформатор.
- $\frac{S_{n1}}{S_{n2}}$ - Однос на номиналните моќности на двата трансформатори.
- $\frac{U_{n1}}{U_{n2}}$ - Однос на секундарните напони во празен од на двата трансформатори.

Струјата на изедначување е независна од оптоварувањето и неговата распределба. Таа тече и кога нема оптоварување, а трансформаторите се вклучени во паралелна работа.

При оптоварување на трансформаторите, струјата на оптоварување се додава векторски кон струјата на изедначување. Ако струјата на оптоварување има индуктивен карактер, тогаш тоа резултира со зголемена вкупна струја во трансформаторот со поголем секундарен напон и намалена вкупна струја во трансформаторот со помал секундарен напон.

Пример 1:

Трансформатор	Секундарен напон во празен од [V]	Номинална моќност [kVA]	Напон на куса врска при номинална струја [%]
1	400	400	4.3
2	390	630	3.7
$ \Delta u = \left \frac{400 - 390}{400} \cdot 100 \right = 2.5\% \qquad \frac{S_{n1}}{S_{n2}} = \frac{400}{630} = 0.635 \qquad \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = \frac{390}{400} = 0.975$			
$I_{iz1} \approx \frac{2.5}{4.3 + 0.635 \cdot 0.975^2 \cdot 3.7} \cdot 100 \approx 38.3\%$			

Примерот 1 се однесува за трансформатор со помала моќност, кој има поголем секундарен напон и поради тоа мора да поднесе поголема вкупна струја. Ако претпоставиме дека факторот на моќност при оптоварувањето е сличен со факторот на моќност при куса врска (≈ 0.28 во примерот), струјата на изедначување кај трансформаторот со повисок секундарен напон се додава речиси аритметички на струјата на оптоварување. Ако го анализираме примерот 1 кога струјата на изедначување е 38.3% може да се заклучи дека дозволената струја на оптоварување е само 61.7% од номиналната струја на трансформаторот 1. Затоа двата паралелно сврзани трансформатори може да работат со 61.7% од нивната вкупна номинална моќност ($630+400=1030$ kVA) односно со 636 kVA.

При одредени околности менувањето на положбата на преклопката на трансформаторот 1 може да го подобри вкупното оптоварување на трансформаторите. Ако, во случај на 400 kVA трансформатор даден во пример 1 постои можност да се избере повисока отцепка на ВН намотка (5% повеќе навивки)

тоа би довело до секундарен напон снижен за 1/1.05, односно 381 V наместо 400 V, заради снижената индукција кога трансформаторот е приклучен на истиот примарен напон. Ако на овој начин се добие премногу низок секундарен напон, алтернатива - ако е можно - би била да се избере пониска отцепка на ВН намотка на 630 kVA трансформатор (на пример 5% помалку навивки), кое би довело до секундарен напон зголемен за 1/0.95, односно 411 V наместо 390 V, заради зголемената индукција. Треба ова да се провери дали е тоа дозволено поради зголемената бука, зголемената температура на јадрото и струјата во празен од.

Кога се нагодува регулацијата на напонот мора да се внимава и на тоа дека тогаш се менува и напонот на куса врска. Кај ЕМО-вите трансформатори спрема ИЕК, или друг сличен стандард, индиректната напонска регулација, што е поврзана со промена на индукцијата го менува напонот на куса врска приближно пропорционално со процентот од зголемените или намалените навивки.

Во примерот 2 се повторува примерот 1, за случај 5% помалку навивки на ВН намотка на 630 kVA трансформатор.

Пример 2:

Трансформатор	Секундарен напон во празен од [V]	Номинална моќност [kVA]	Напон на куса врска при номинална струја [%]
1	400	400	4.3
2	411	630	3.5 ($\approx 95\%$ од 3.7)
$ \Delta u = \left \frac{400 - 411}{400} 100 \right = 2.75\% \quad \frac{S_{n1}}{S_{n2}} = \frac{400}{630} = 0.635 \quad \frac{U_{n2}}{U_{n1}} = \frac{411}{400} = 1.028$			
$I_{iz1} \approx \frac{2.75}{4.3 + 0.635 \cdot 1.028^2 \cdot 3.5} 100 \approx 41.4\%$			

Бидејќи трансформаторот 2 има повисок секундарен напон во празен од, тој ја поднесува вкупната струја на оптоварување и струјата на изедначување, и со тоа се одредува дозволеното вкупно оптоварување на паралелно вклучените трансформатори.

Струјата на изедначување што тече низ намотките на трансформаторот 2 се пресметува од следниов израз:

$$I_{iz2} = I_{iz1} \frac{S_{n1}}{S_{n2}} \frac{U_{n2}}{U_{n1}} \quad (4)$$

Применувајќи го изразот (4) во примерот 2, за струјата на изедначување што се однесува на трансформаторот 2 се добива:

$$I_{iz2} = 41.4 \frac{400}{630} 1.028 = 27\%$$

Дозволената струја на оптоварување за трансформаторот 2 е $100 - 27 = 73\%$ од неговата номинална струја. Следователно на тоа, кога е $\cos\phi < 0.9$

трансформаторите што се во паралелна работа, може сега да се оптоварат со приближно оптоварување 73% од нивната вкупна моќност 1030 kVA, односно со приближно 752 kVA.

4.3. Трансформатори со приближно еднакви напони на куса врска

Напоните на куса врска на трансформаторите што работат паралелно не треба да отстапуваат повеќе од $\pm 10\%$ од нивната средната вредност.

Ако $S_{n1}, S_{n2}, \dots, S_{np}$, се номиналните моќности на паралелно вклучените трансформатори, и $u_{kn1}, u_{kn2}, \dots, u_{knp}$, нивните напони на куса врска при номинална струја (најмалиот индекс 1 соодветствува на најмалиот напон на куса врска, итн.) оптоварувањата на поедините трансформатори, кога преносните односи на напоните се еднакви се однесуваат според следнава релација:

$$S_1 : S_2 : \dots : S_p \approx \frac{S_{n1}}{u_{kn1}} : \frac{S_{n2}}{u_{kn2}} : \dots : \frac{S_{np}}{u_{knp}} \quad (5)$$

Вкупното оптоварување е:

$$S = S_1 + \dots + S_p \quad (6)$$

Од ова може да се заклучи дека трансформаторот со помал напон на куса врска е повеќе оптоварен отколку трансформаторот со поголем напон на куса врска. Затоа за да се избегне неговото преоптоварување, максималното дозволено вкупно оптоварување S може да се пресмета од следнава приближна формула:

$$S \approx S_{n1} + S_{n2} \frac{u_{kn1}}{u_{kn2}} + S_{n3} \frac{u_{kn1}}{u_{kn3}} + \dots + S_{np} \frac{u_{kn1}}{u_{knp}} \quad (7)$$

Во примерот 3 е дадено поединечното оптоварување на три паралелно вклучени трансформатори со приближно еднакви напони на куса врска.

Пример 3:

Трансформатор	Номинална моќност [kVA]	Напон на куса врска при номинална струја [%]	Оптоварување во паралелна работа [kVA]
1	630	3.7	630.00
2	250	4.0	231.25
3	400	4.3	344.18

За вкупното оптоварување на трите паралелно вклучени трансформатори според изразот (7) се добива:

$$S \approx 630 + 250 \frac{3.7}{4.0} + 400 \frac{3.7}{4.3} \approx 1205.43 \text{ kVA}$$

Додека трансформаторот 1 може да се оптовари со 100% од номиналната моќност, трансформаторот 2 може да се оптовари со 92.5% од номиналната моќност, додека трансформаторот 3 може да се оптовари со 86% од номиналната моќност.

Отстапувањата на напоните на куса врска помеѓу 10 и 20% се економски прифатливи, доколку трансформаторот со помала моќност има повисок напон на куса врска. Во спротивен случај дури 1:3 однос на моќностите на паралелно вклучените трансформатори може да доведе до неекономична работа. Како корективна мерка може да се поврзе паралелен реактор во серија со преоптоварениот трансформатор, на пример на нисконапонската страна. Неговата функција е да го зголеми напонот на куса врска. Тој не е прикладен за ограничување на струјата на куса врска поради заситувањето кое се јавува на јадрото на реакторот.

Совршено задоволителна паралелна работа е можна при горе споменатите услови.

Поголеми отстапувања во напоните на куса врска се дозволени при одредени околности, доколку трансформаторите работат паралелно преку систем а не со собирници.

5. ОПТИМАЛЕН РЕЖИМ ПРИ ПАРАЛЕЛНА РАБОТА НА ИДЕНТИЧНИ ТРАНСФОРМАТОРИ

Кога една група од неколку паралелно вклучени трансформатори е подложена на променливо оптоварување за еден определен временски период, минималните вкупни загуби може да се постигнат со вклучување или исклучување на поединечните трансформатори. Загубите при оптоварување се менуваат во зависност од струјата на оптоварувањето. Сумата на загубите на оптоварување и загубите во празен од, кога оптоварувањето е распределено помеѓу повеќе трансформатори, може да биде помала отколку кога е распределена на помалку трансформатори.

Моќноста на групата паралелно вклучени трансформатори при која вклучувањето на друг идентичен трансформатор (трансформаторот со индекс p) постанува економично, може да се пресмета на следниов начин:

$$S_{\text{група}} = n \cdot S_n \quad (8)$$

каде што S_n е номиналната моќност на поединечниот трансформатор, а n е фактор на моќност на групата и може да се пресмета од следнава формула:

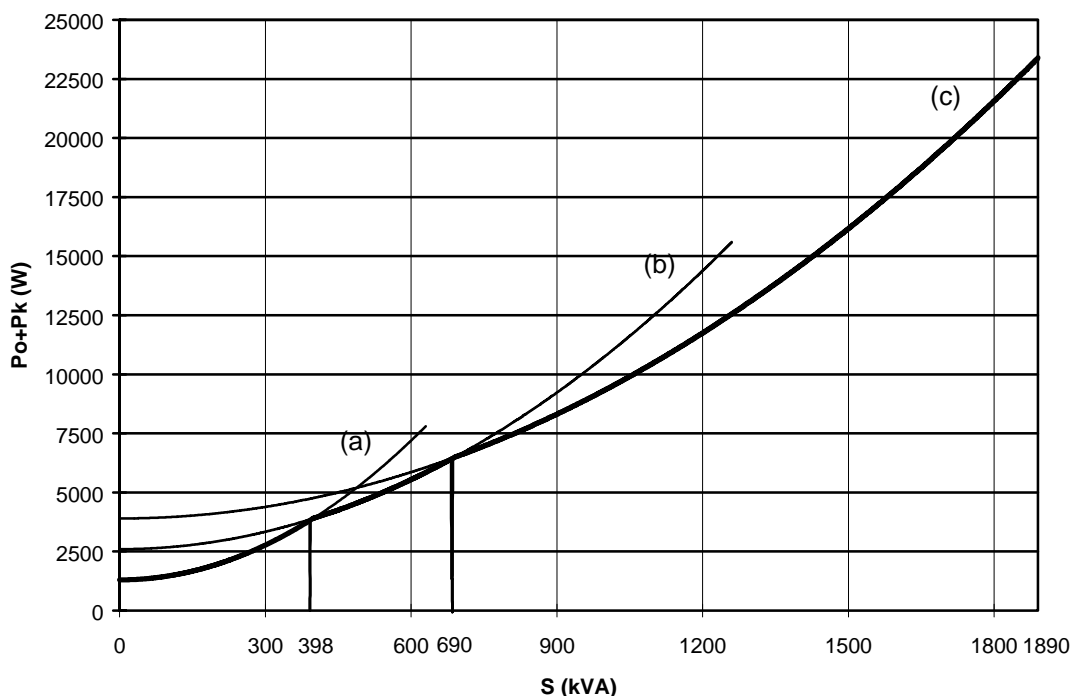
$$n = \sqrt{\frac{p \cdot (p-1) \cdot P_0}{P_k}} \quad (9)$$

каде што P_0 се загубите на моќност во празен од, а P_k загубите на моќност при оптоварување на трансформаторот.

Пример 4:

Да претпоставиме дека во една трафостаница работат паралелно три идентични трансформатори ETN 630-10/0.4, производ на ЕМО - Охрид, со следниве карактеристики:

Номинална моќност	630 kVA
Загуби во железо	1300 W
Загуби во бакар	6500 W



Слика 2. Криви за вкупни загуби на моќност на паралелно вклучени 630 kVA трансформатори:

- (a) 1 трансформатор,
- (b) 2 трансформатори,
- (c) 3 трансформатори во паралелна работа.

Факторот на делумно оптоварување според равенката (9) ќе биде:

$$n = \sqrt{\frac{3 \cdot 2 \cdot 1300}{6500}} = \sqrt{1.2} = 1.095$$

Моќноста на групата според равенката (8) ќе биде:

$$S_{\text{група}} = 1.095 \cdot 630 \approx 690 \text{ kVA}$$

Значи, најекономично е да се вклучи трет трансформатор при 690 kVA. Овае прикажано на слика 2.

6. ЗАКЛУЧОК

По пат на одредување на вкупните загубите на моќност на трансформаторите кои се во паралелна работа, можно е да се најде граничното оптоварување на трансформаторите, при кое се преоѓа од работа на еден трансформатор кон паралелна работа на два, три и.т.н. трансформатори, со цел да се постигне вкупните загуби на моќност да бидат минимални односно паралелната работа да биде економична.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] "Three-phase Distribution Transformers 50 to 2500 kVA - Technical Notes" - Trafo-Union
- [2] "IEC 76 Power Transformers" - International Standard
- [3] Г.Н. Петров, "ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ", Москва, 1974
- [4] Hrvoje Pozar, "Visokonaponska Rasklopna Postrojenja", Tehnicka Kniga, Zagreb, 1973

Дионис Манов, дипл.инж.
Методија Камировски, дипл.инж.
Електротехнички факултет, Скопје

МОДЕРНИЗАЦИЈА НА ИМПУЛСНИТЕ ИСПИТУВАЊА НА ИЗОЛАЦИЈАТА НА НАМОТКИТЕ ОД ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

СОДРЖИНА

Во трудов е изложена модернизацијата на системот за осцилографирање на напонот и струјата при типското испитување на изолацијата на намотките на енергетските трансформатори со импулсни напони, генерирани со импулсен генератор а осцилографирани со дигитален мемориски осцилоскоп. Прикажани се осцилограмите на напоните и струите од испитувањето на изолацијата на намотките со импулсни напони на трофазен енергетски трансформатор, во високонапонската лабораторија на ЕМО во Охрид. Изложени се предностите на модернизираниот систем за осцилографирање во споредба со класичниот.

UPGRADING THE IMPULSE TESTS OF WINDING INSULATION ON POWER TRANSFORMERS

ABSTRACT

In this paper upgrading of impulse tests method of winding insulation on power transformers, using digital storage oscilloscope and PC computer is described. Voltage and current oscillograms of impulse tests carried out on three-phase power transformer in highvoltage laboratory EMO Ohrid, as well as the advantages of the upgraded method are presented.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ: Енергетски трансформатор, изолација на намотка, испитувања со импулсен напон, импулсен генератор, дигитален мемориски осцилоскоп.

KEY WORDS: Power transformer, winding insulation, impulse testing, impulse generator, digital storage oscilloscope.

1. ВОВЕД

Енергетските трансформатори во текот на експлоатацијата се изложени на импулсни напонски бранови од атмосферски празнења и комутациони процеси во водовите и трансформаторите. Импулсните напонски бранови од местото на настанувањето се простираат на сите страни низ водовите и со своето стрмо чело продираат директно во намотката на трансформаторот.

Современите принципи на координација на изолацијата во електроенергетскиот систем бараат од трансформаторите да ги издржат овие напонски напрегања.

Денешните енергетски трансформатори во поглед на изолациониот систем се проектираат, конструираат и подвргнуваат на соодветни технолошки постапки за постигнување висока диелектрична цврстина.

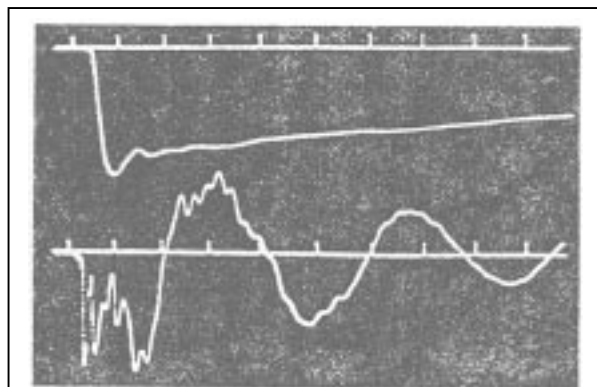
За да се утврди состојбата на изолациониот систем на трансформаторот, при приемните испитувања, се вршат испитувања и со импулсни напони. Овие испитувања спаѓаат во типските испитувања и се изведуваат според препораките на ИЕК и националните стандарди. Од импулсниот генератор, како извор на импулсни напони, се доведуваат кон испитуваната намотка на трансформаторот, импулсни напони со определени: амплитуда, поларитет и облик. При тоа, со цел за откривање на евентуална грешка или оштетување (прескок или пробој) на изолацијата, се врши осцилографирање на брановите на напонот и струјата во испитуваната фазна намотка, според однапред утврдена програма-договорена помеѓу купувачот и производителот на трансформаторот, а во согласност со препораките на: ИЕК76-3/1980, ИЕК722/1988 и ИЕК60/1962.

Постојат неколку усовершени методи со кои со сигурност може да се потврди дали трансформаторот го издржал испитувањето со импулсни напони, односно дали има оштетување во изолациониот систем.

Мерната дигитална и компјутерска техника денес наоѓа се поголема примена во сите области на електротехниката. Во овој труд е изложена модернизацијата на мерниот систем за осцилографирање на напонските и струјните бранови при испитувањата на изолациониот систем на енергетски трансформатори со импулсни напони.

2. ДИГИТАЛНА МЕТОДА ЗА МЕРЕЊЕ НА ИМПУЛСНИ НАПОНИ И СТРУИ

При воведувањето на методата на типско испитување на изолацијата на намотките на енергетските трансформатори со импулсни напони, облиците на напонот и струјата се



Сл.1 Фотографија на импулсниот напон и струја при испитување на енергетски трансформатор

регистрали со фотографирање на осцилограмот добиен на двоканален аналоген мемориски осцилоскоп. Оваа постапка е доста макотрпна, бидејќи од мигот на фотографирањето до мигот кога се добива самата фотографија неминовен е процесот на хемиско развивање на филмот и изработката на фотографијата. При оваа постапка може да се добијат и некавалитетни фотографии поради што мерењата мора да се повторат.

На Сл.1 е дадена фотографијата на напонот и струјата добиени при испитувања со метода на фотографирање. Втор недостаток на оваа метода е тоа што не се знаат мерите за временската, напонската и струјната оска.

Тоа создава дополнителни потешкотии при интерпретацијата на добиените резултати.

Денес се користи современа технологија за снимање, меморирање, прикажување и печатење на импулсните напони и струи при импулсните испитувања на енергетските

трансформатори. Имено, денес се користи дигитален мемориски осцилоскоп, наместо аналоген мемориски осцилоскоп. Дигиталниот мемориски осцилоскоп врши мерење на 1000 точки на напонот од еден канал од мигот кога тој ќе биде тригериран. Овие податоци се во дигитален облик, тие се сместуваат во меморијата на осцилокопот и во наредниот чекор се прикажуваат на екранот од осцилокопот. Со определена постапка тие можат да се префрлат во меморијата на персонален компјутер од типот ИМВ/АТ, за понатамошна обработка.

Времетраењето на снимената појава може да се избере по желба, со помош на параметрите на дигиталниот осцилоскоп. Осцилокопот овозможува избор на точката на тригерирање на осцилограмот и нејзино задоцнување од мигот на тригерирањето. Сите овие параметри се поставуваат во вид на бројки на предната плоча од осцилокопот.

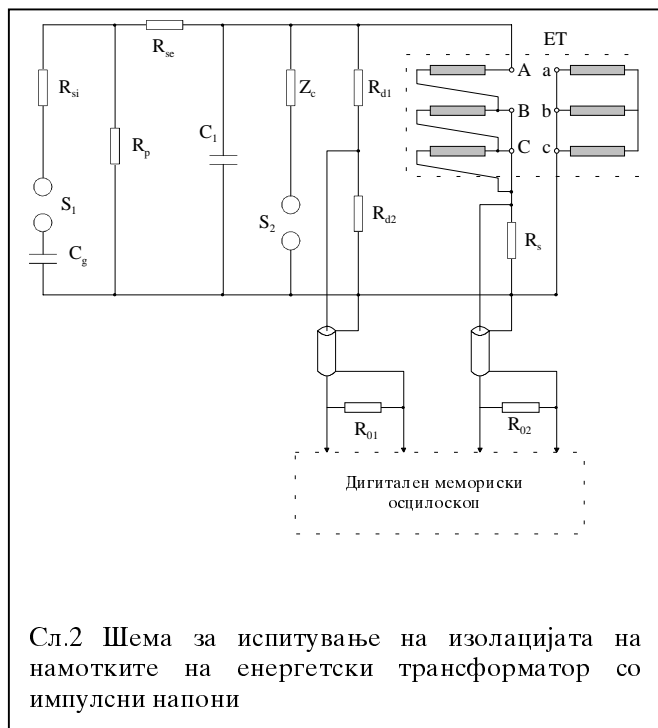
Втората, исто така многу важна предност на оваа метода е фактот што од вака добиените бројчани резултати, со помош на соодветен програмски пакет како на пример MATLAB или MICROSOFT EXCEL, лесно се добива печатен документ на хартија со помош на ласерски печатар на кој многу квалитетно се прикажани облиците на измерените импулсни напони и струи. Освен тоа, на еден ист дијаграм можат да се прикажат осцилограмите на струите од две различни мерења на струјата низ иста испитувана намотка, за нивно полесно споредување и за определување на евентуална грешка во изолацијата на намотката на енергетскиот трансформатор.

Покрај едноставноста и брзината во добивањето на печатениот документ, треба да се истакне дека трошоците за ова испитување се далеку пониски во споредба со класичната метода со фотографирање, што е уште една предност на оваа метода.

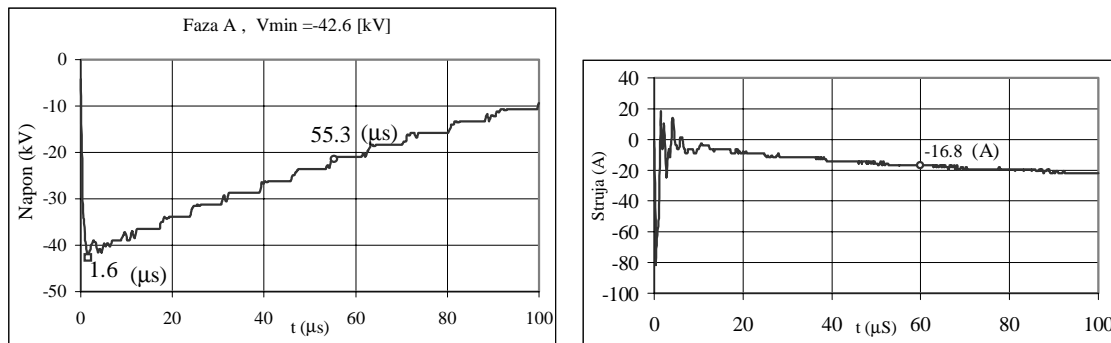
3. РЕЗУЛТАТИ ОД ИСПИТУВАЊЕ НА ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОР

Во продолжение се прикажани резултатите од испитувањата на изолацијата на намотките на енергетски трансформатор со импулсни напони, извршени во високонапонската лабораторија при ЕМО - Охрид.

На Сл.2 е дадена шемата за поврзувањето на опремата за ова испитување.



Резултатите од испитувањето се дадени на Сл.3. На оваа слика се прикажани облиците на напонот и на струјата при испитувањето на фазната намотка А на трансформаторот, за определен степен на изолацијата. Слични осцилограми се снимени за другите фазни намотки: В и С. Освен предностите изложени во т.2, предноста на оваа метода е и во тоа што на осцилограмите се нанесени мерите за временската, напонската и струјната оска. Исто така, на осцилограмите се обележени некои карактеристични точки од кои директно се читаат нивните вредности. Така точката маркирана со правоаголник на осцилограмот за напон, го дефинира челото на бранот и за конкретниот случај тоа изнесува $1.6\mu s$. Точката маркирана со крукче го определува времето за кое импулсниот напон паѓа на половина вредност. Тоа време во овој случај изнесува $55.3\mu s$.



Сл.3 Осцилограми на импулсни напон и струја снимена со дигителен мемориски осцилоскоп при испитување на енергетски трансформатор

4. ДИСКУСИЈА

Импулсните напони на коишто се изложени енергетските трансформатори во текот на нивната експлоатација, се особено опасни за изолацијата меѓу навивките на намотките на трансформаторот, наречена подолжна изолација.

Пробојот на главната изолација на намотките на трансформаторот при испитувањата со импулсни напони лесно се забележува според силниот звук (бучава) и изобличувањето на импулсниот напонски бран на осцилограмот.

Отривањето грешки на подолжната изолација на намотката, особено на елементарните делови од намотката (на пример помеѓу соседните секции), претставува главен проблем при спроведувањето на импулсни испитувања на енергетските трансформатори. Основен показател за грешка во изолацијата е појавата на осцилации во осцилограмите на напонот и струјата што тече во намотката, во текот на импулсните испитувања на трансформаторот.

При пробој на изолацијата на елементарен дел од намотката, обликот на напонот е деформиран. Тоа е знак дека настанал пробој или прескок во изолацијата. Осцилограмите при овие испитувања се нарекуваат дефектограми. Како еталони за споредување на дијаграмите служат осцилограмите снимени при снижена амплитуда на импулсниот напон (снижен полн бран и снижен сечен бран). При тоа се внимава напонот да не е повисок од 60% од специфицираниот испитен номинален напон, според препораките на ИЕК 722. Со тоа може да се избегне веројатноста за пробој на изолацијата, поради што тие се нарекуваат нормограми. Мерите за испитните напони и струи се избираат така што осцилограмите на нормограмите и дефектограмите кога нема пробој се поклопуваат.

Интерпретацијата на осцилограмите се засновува врз споредувањето на напонските и струјните бранови облици снимени при снижени и номинални испитни напони, или меѓу две едноподруги снимања при номинален испитен напон. Ова е стручна работа и често пати е многу тешко да се откријат грешките во изолацијата со класичната метода без доволно искуство, поради многуте пречки од различно потекло при испитувањето. Пречките при испитувањето можат да бидат од различно потекло а особено се изразени при несоодветно заземјување на испитното коло и/или лошото заземјување на високонапонската лабораторија.

Предноста на оваа метода во однос на класичната е и во тоа што е можно да се изврши споредување на осцилограмите, со одземање на вредностите од две едноподруго снимања и со анализирање на разликата, која може да се зголеми неколку пати за да се подобро воочи, да се открие евентуалната грешка во изолацијата.

Освен дефектограмите за откривање пробои на изолацијата при импулсните испитувања на трансформаторите, се користат и следниве поважни пропратни појави:

- изобличување на формата од импулсите на напонот и струјата,
- силен звучен удар во трансформаторскиот сад и
- појава на акустички (звучни или ултразвучни) осцилации во маслото, регистрирани со специјален индикатор. Поради тоа импулсните испитувања во некои случаи кога е тоа потребно и можно, се вршат со отворен капак на трансформаторот.

5. ЗАКЛУЧОК

Снимањето осцилограми на напоните и струите при испитувањата на изолацијата на намотките на енергетските трансформатори со импулсни напони, е препорачливо да се вршат со употреба на дигитален мемориски осцилоскоп. Тоа овозможува поедноставно снимање-мерење на напоните и струите при испитувањето, нивно чување во дигитален облик во меморијата на персонален компјутер, поедноставно, поквалитетно и поефтино печатење на осцилограмите на хартија и поедноставна промена на напонските и струјните мери на осцилограмите за нивно полесно споредување.

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1]. HIPOTRONICS –HIGH VOLTAGE LABORATORY EQUIPMENT, Digital impulse measurement system., 1998
- [2]. Nils Nyhlen Cavallius HIGH VOLTAGE LABORATORY PLANING, Basel, Suisse.
- [3]. Препораки на: ИЕК 76-3/1980, ИЕК 722/1982 и ИЕК 60/1962.

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ - СИГРЕ С К О П Ј Е

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО-СИГРЕ

Ацо Ристески, дипл.ел.инж.
ЈП ЕСМ - Подружница "Електропренос" - Скопје

УТВРДУВАЊЕ НА СОСТОЈБАТА И ОТКЛОНУВАЊЕ НА ДЕФЕКТ НА ГОЛЕМИ ТРАНСФОРМАТОРИ ВО ТЕРЕНСКИ УСЛОВИ

СОДРЖИНА

Земајќи го предвид значењето на експлоатационата сигурност на енергетските трансформатори (Е.Т.) и штетите кои може да настанат како последица на дефект, стручните служби на "Електропренос" во последниве неколку години превземаат низа технички мерки за утврдување на нивната погонска состојба. Во трудот е обработуван трансформаторот лоцирани во ТС Скопје 1 220/110/35 кV, при што ќе се увиди потребата од извршување на комплетни дијагностички мерења, со кои целосно се дефинира состојбата на Е.Т.

Клучни зборови: енергетски трансформатор, профилактични испитувања, изолационен систем масло- хартија, регулациона преклопка.

ABSTRACT

Considering the importance of regular function of the power transformers and damage that could happen as a result of failure on them, Electric Power Transmission-Skopje in the last few years has done important revisins on power transformers. The subject of this paper are power transformers located in TS Skopje1 220/110/35kV, from which we can see the need of performing complete prophylactic testings, as a method for fully defining their condition.

Key words: Power transformer, prophylactic testings, oil-paper insulation system , on load tap-changers

1. ВОВЕД

Еден од основните предуслови за правилно функционирање на електроенергетскиот систем е доверливоста на елементите во построенијата. Оваа доверливост помеѓу другото се обезбедува со систематско спроведување на превентивните методи на испитување на карактеристиките на опремата.

Техничката и правната регулатива предвидуваат: периодични испитувања, визуелни прегледи, ревизии и ремонти на електроенергетските построенија кои се во експлоатација. Погонската состојба или конструктивната изведба на построението не секогаш овозможуваат поедини елементи да бидат исклучени од погон заради периодичните испитувања.

Разгледуваниот Е.Т. лоциран во ТС Скопје 1 е во погон од 1967 година. Од 1973 година, кога е настаната хаварија на регулационата преклопка на ЕТ ТаЗ, тие се во таква состојба што во тоа време, е донесено одлука со нив да не се врши регулација на напон, односно регулационата преклопка од овој период работи поставена во положба 14. Од 1991 година освен основните профилатички испитувања (регулирани со соодветни прописи), зголемен е бројот и на дополнителните испитувања со цел да се добие поголем број на податоци, заради дефинирање на комплетната состојба на Е.Т.

2. ТЕХНИЧКИ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ТРАНСФОРМАТОРОТ

Табела 1

Производител	Р.Кончар	Група на врска	YN,yn0,d5
Тип	KFRM 1843r/220 E	Напон на куса врска	VN:SN 10,68%
Фабричен број	337003		VN:NN 4,91%
Год. на производ.	1966 год.		SN:NN 1.29%
Год. во погон	1967 год.	Класа на изолација	A
Ном. моќност	150000 (KVA)	Ладење	OFAF
Ном. напон	220/110/35 (kV)	Тежина на масло	20 t
Ном. струја	349/754/2750 (A)	Тежина вкупно	79 t

3. УТВРДУВАЊЕ НА ДЕФЕКТ НА Е.Т.

За следење на состојбата на големите Е.Т. вршени се дијагностички испитувања и мерења во обем кој се сметал за доволен во различни периодични прегледи, а што бил диктиран и од погонската состојба на Е.Т. во ТС Скопје 1. Во трудот се обработувани и презентирани резултатите од дијагностичките мерења на Е.Т. бр 3, истите дијагностички мерења се изведени и на Е.Т. бр. 4 и заклучоците изнесени во трудот за Е.Т. бр. 3 се однесуваат и за Е.Т. бр. 4.

3.1. Мерење отпор на изолација нанамотките

Отпорите на изолацијата на намотките се мерени се според метода на "три точки" со мерен инструмент "Siemens Norma", тип 3837.

Резултатите од мерењата на $R_i 60''$, сведени на референтна температура, се дадени во табела 2.

Табела 2

Отпорите на изолација $R_i 60''$ при 20^0 C						
Мерено помеѓу	$R_i 60''$ (M Ω)					група на квалитет
	DM1 1990	DM2 1993	DM3 1996	DM4 1996	DM5 1998	
VN+SN : NN (m)	15500	15000	13650	14750	18760	И
VN+SN:M (NN)	3800	3600	3510	4960	8576	И
NN:m (VN+SN)	4200	3400	3360	3472	5360	И
VN:SN : NN+m	3500	3200	3740	3860	6089	И
NN : VN+SN+m	3250	2850		3775	4556	И

Анализирајќи ги измерените вредности за $R_i 60''$, може да се забележи дека тие немаат тенденција на намалување, односно состојбата на изолациониот систем се дефинира како добра. Според измерените вредностите на $R_i 60''$, изолациониот систем на Е.Т. се категоризира во прва група на квалитет.

Последното зголемување на вредностите на отпорот на изолацијата на намотките се должи на извршената обработка на трансформаторското масло и сушењето на трансформаторот, по отклонување на дефектот кој подоцна ќе биде анализиран.

3.2. Мерење омски отпор на намотките (R_i)

Мерењето на омскиот отпор на намотките при периодичните профилатички испитувања не е вршено поради забраната за користење на регулационата преклопка од 1973 год. Поради што не ни беше позната состојбата на регулационата преклопка.

На ден 11.1995 извршена е гаснохроматографска анализа на трансформаторското масло. Резултатите од анализата на гасовите растворени во трансформаторското масло укажуваат на дефект поради што е пристапено кон мерење

на отпорите на намотките на ВН намотка и тоа само во затечената состојба на регулационата преклопка Р.П.

Со мерење на отпорот на намотките, утврдено е дека дошло до големо зголемување на вредностите на отпорот на намотката во фаза "В", помеѓу приклучоците "В-Н". Хроматографската анализа извршена повеќе пати во овој период укажува на топло место во трансформаторот, без разорување на хартиената изолација. Овие два показателя укажуваат на можност на лош контакт на бирачот на регулационата преклопка.

За попрецизно да се одреди местото на дефектот, одлучено е да се мери отпорот само преку еден отцеп на регулационата намотка со приклучување на контактите I и II, на дното од цилиндерот на теретната преклопка во сите три фази.

Резултатите од извршените мерења се дадени во табела 3.

Табела 3

Мерење на отпор на еден отцеп на регулационата намотка преку контактите на регулационата преклопка I и II												
Фаза А				Фаза В				Фаза С				
Пол.	А	mV	mOhm	Пол.	А	mV	mOhm	Пол.	А	mV	mOhm	
1	4.96	51.60	10.403	1	4.97	250.00	50.302	1				
2	5.02	51.70	10.299	2	4.94	200.00	40.486	2	4.97	64.00	12.877	
3	5.00	51.40	10.280	3	4.94	181.70	36.781	3	4.99	63.60	12.745	
4	5.01	56.30	11.238	4	4.95	194.00	39.192	4	4.98	63.30	12.711	
5	5.01	56.60	11.297	5	4.96	201.00	40.524	5	4.96	66.00	13.306	
6	5.00	56.20	11.240	6	4.98	191.00	38.353	6	5.00	66.00	13.200	
7	5.01	57.20	11.417	7	4.98	166.00	33.333	7	5.01	66.00	13.174	
8	5.01	56.70	11.317	8	4.96	188.90	38.085	8	4.99	66.80	13.387	
9	5.00	56.40	11.280	9	4.98	228.00	45.783	9	5.00	66.20	13.240	
10	5.01	55.40	11.058	10	4.93	254.00	51.521	10	4.94	65.40	13.239	
11	4.98	54.50	10.944	11	4.96	218.00	43.952	11	4.99	64.80	12.986	
12	4.97	54.10	10.885	12				12	4.97	63.90	12.857	
13	5.02	55.00	10.956	13				13	4.98	63.50	12.751	
14	4.95	54.50	11.010	14	4.96	193.30	38.972	14	4.95	63.00	12.727	
15	4.95	55.20	11.152	15	5.01	206.00	41.118	15	5.00	64.60	12.920	
16	4.98	56.20	11.285	16	4.97	208.00	41.851	16	4.98	64.70	12.992	
17	5.00	56.30	11.260	17	4.96	211.00	42.540	17	4.97	65.90	13.260	
18	5.00	57.00	11.400	18	4.98	179.90	36.124	18	4.94	65.70	13.300	
19	4.99	56.00	11.222	19	4.95	206.00	41.616	19	4.97	66.60	13.400	
20	4.97	56.20	11.308	20	4.97	188.40	37.907	20	4.98	65.90	13.233	
21	4.96	55.50	11.190	21	4.93	156.40	31.724	21	4.93	65.50	13.286	
22	4.89	51.20	10.470	22	5.00	180.60	36.120	22	4.93	65.80	13.347	
23	5.00	52.00	10.400	23	4.92	186.70	37.947	23	4.97	63.40	12.757	
24	4.97	53.10	10.684	24	5.02	221.00	44.024	24	4.98	63.50	12.751	
25				25				25	4.96	63.80	12.863	

Во фазите **A** и **C** нема големи отстапувања помеѓу вредностите на измерените омски отпори, додека во фаза **B** отпорот значајно се менува по промената на степенот на регулационата преклопка, а вредноста на отпорот е многу поголема во споредба со измерените вредности во другите две фази. Со ова мерење воедно е контролиран и дијаграмот на прекопчување па е уочено дека во фаза **B** бирачот не работи правилно, односно не се уочени прекини на контактот **II** во време кога контактот **II** треба да помине од еден непарен на друг непарен контакт. Исто така е констатирано дека има прекин на контактот во положба 13, односно не е можно да потече струја за да се измери отпорот на намотката во таа положба.

3.3. Мерење на факторот на диелектричните загуби

Факторот на диелектричните загуби ($\text{tg}\delta$) на Е.Т. со заземјен котел, е мерен со универзален мост производ "ТЕТЕХ", тип 2805, напојуван со високонапонски извор производ "ТЕТЕХ" тип 5281.

Резултатите од мерењето на ($\text{tg}\delta$) сведени на референтна температура 20 C се дадени во табела 4.

Табела4

Фактор на диелектрични загуби ($\text{tg}\delta$) сведен на 20⁰ C				
Мерено помеѓу	$\text{tg}\delta (10^{-2})$			
	DM1 1996	DM2 1996	DM3 1998	квали тет
VN+SN : NN (m)	0.42	0.41	0.406	I
VN+SN : NN + m			0.525	I
VN+SN : m (NN)	0.4	0.33	0.378	I
NN : VN+SN+m			0.487	I
NN:m (VN+SN)	0.43	0.41		I

Според измерените вредности за аголот на диелектричните загуби ($\text{tg}\delta$), за целото време за следење на Е.Т. истиот спаѓа во прва група на квалитет. Според овие вредности Е.Т. може да се стави во употреба без никаква претходна интервенција. Фабрички вредности за аголот на диелектрични загуби не постојат. Првото мерење е извршено во 1996 год, така да нема можност да се врши следење и споредување на состојбата на изолациониот систем на Е.Т.

3.4. Мерење струи на магнетизирање со снижен напон

Мерењата се изведени со трифазен снижен напон (380 V, 50Hz), и тоа посебно на ВН,СН иНН намотка.Резултатите за измерените вредности на струите на магнетизирање се дадени во табела 5.

Табела 5

Мерење на струи на магнетизирање				
намотка	1972	1973	1996	1998
	A / B / C	A / B / C	A / B / C	A / B / C
VN (mA)	4.4 / 3 / 4.7	3.2 / 2.0 / 3.4	5.7 / 3.8 / 6.0	4.0 / 3.2 / 4.3
SN (mA)	12.8 / 8.9 / 13.7	8.6 / 5.5 / 9.8	16.2 / 11.0 / 17.1	12.0 / 9.2 / 12.4
NN (mA)	380 / 400 / 530	250 / 350 / 440	418 / 490 / 638	338 / 410 / 490

Анализата на вредностите за струите на магнетизирање, не укажуваат на можни грешки во намотките или во магнетното јадро на Е.Т.

3.5. Трансформаторско масло

Вршени се редовни контроли на диелектрична цврстина на трансформаторското масло,при што се добивани вредности поголеми од 250 kV/cm, според што маслото е категоризирано во прва група на квалитет.

На 11.1995 год. извршена е гаснохроматографска анализа на гасовите растворени во маслото, од која е утврдена состојба за која се смета дека Е.Т. е сомнителен на дефект.Во наредниот период извршени се уште неколку испитувања кои се дадени во табелата 6, а кои укажуваат на зголемување на концентрацијата на гасовите растворени во маслото.

Табела 6.

Датум м/г	ниво ГСД	Вкуп- но гас m1/1	ГАС ОД МАСЛО $\mu\text{l/l}$ (ppm)								Ди- ја- гно- за ABC
			водо- род H ₂	метан CH ₄	ацети- лен C ₂ H ₂	ети- лен C ₂ H ₄	етан C ₂ H ₆	јагл. мон. CO	јагл. дио. CO ₂	кисл- ород O ₂	
11/95	Д	80.0	51	126	1	246	72	699	3544	16068	B022
04/96	Г	90.0	248	651	10	968	235	715	3741	16837	C022
04/96	Д	97.4	182	607	5	950	232	621	3711	18942	C022
06/96	Г	39.3	3	7	0	16	2	13	193	8145	
06/96	Д	59.5	10	23	1	35	7	59	584	12360	
02/97	Г	58.7	12	17	1	36	5	189	1161	9718	A
02/97	Д	62.8	13	21	1	44	7	231	1394	14285	A

Напомена: А- исправен; В - сомнителен на дефект(шифра); С-неисправен (шифра);
Г-горно; Д-долно; С-средно ниво

Анализата на трансформаторското масло е извршена во Институтот "Никола Тесла" -Београд и според нивниот извештај, е присутно термичко разложување на маслото, при високи локални температури ($>700\text{ C}$). Оваа појава е можна на места каде доаѓа до прегревање на бакарот поради вртложни струи, лоши контакти, односно споеви, дури и до струи кои циркулираат во јадрото и котелот.

4. ОТКЛОНУВАЊЕ НА ДЕФЕКТОТ

Врз основа на извршените дијагностички мерења и резултатите добиени од нив се направи претпоставка дека дефектот е на бирачот на регулационата преклопка во фаза **В**. Одлучено да се влезе во котелот на трансформаторот низ ревизиониот отвор за да се изврши преглед на состојбата на бирачот и да се утврди обемот и местото на оштетувањето на истиот.

За таа цел испуштено е маслото од казанот на Е.Т. во предходно подготвени цистерни. Маслото е преработено во цистерните за време на отстранувањето на оштетувањата на бирачот од регулационата преклопка.

Со влегување во казанот на Е.Т. е извршен преглед на бирачите на трите регулациони преклопки при што е констатирано следново:

- подвижните контакти од бирачот на фаза **VI** и **II** беа завртени на изолационото вратило во неисправна положба, не беа прицврстени за вратилото така да можеа да се придвижат во која било положба;

- одводниот контакт на бирачот **II** на контактното место помеѓу контактниот нож и одводниот колекторски прстен беше нагорен. Потполно е уништен неподвижниот контакт и неговата опруга, а на контактниот прстен имаше помали оштетувања;

- контактот на преклопникот **VI** на контактното место помеѓу контактниот нож и полупрстенот е нагорен. Потполно е уништен неподвижниот контакт и неговата опруга а на полупрстенот има помали оштетувања;

- на бирачите во фаза **A** и **C** не се уочени никакви оштетувања, подвижните контакти завземаат исправна положба. Подвижните контакти се прицврстени на изолационото вратило и може да се констатира дека бирачите во фаза **A** и **C** се исправни.

По извршената дефектажа, се пристапи кон отклонување на дефектот на лице место, односно во теренски услови. За таа цел на бирачот од регулационата преклопка **В** извршени се следниве интервенции:

- бирачот е исчистен од остатоците на нагорувањето;

- подвижните контакти на бирачот се подесени во исправна положба и така се прицврстени;

- извршена е промена на сите оштетени контакти на преклопникот **VI** и оштетените контакти на бирачот **VI**.

По овие интервенции бирачот е склопен и извршена е проверка на функционалност во целото негово подрачје и констатирана е негова исправна работа.

При контрола на теретните преклопки на сите три фази е запазено дека теретната преклопка во фаза С понекогаш останува во меѓуположба. Горниот дел од теретната преклопка не префрлаше до крај и тогаш теретната преклопка останува во меѓуположба. Долниот сегмент останува трајно затворен, а горниот сегмент се ниша помеѓу две положби во зависност од положбата на полугата за придвижување на теретната преклопка. За да се отклони недостатокот на теретната преклопка на фаза С, а кој не гарантира сигурна работа на Е.Т., таа е демонтирана и испратена во фабриката овластена за сервисирање на овој тип на преклопки **Maschinenfabrik Reinhausen** со цел истата да се сервисира. На нејзино место поставена е крута врска(свездиште) изработено од бакарни профили 100x10 и 60x10 кои се меѓусебно тврдо лемени. Со крутата врска се преспоеени контактите "I" и "II" (после монтирање на ремонтаната теретна преклопка, трансформаторот ќе биде спремен за нормална регулација во целиот опсег под терет).

По завршување на сите горе опишани интервенции на Е.Т. извршено е завршно испитување а резултатите од ова испитување се прикажани во претходно наведените табели(дијагностичко мерење извршено 1998 год.).

Табела 7

Мерење на отпорот на ВН намотка во дозволените положби по извршените работи на преклопката												
Фаза А				Фаза Б				Фаза Ц				
Пол.	А	mV	mOhm	Пол.	А	mV	mOhm	Пол.	А	mV	mOhm	
14	4.92	2.71	0.551	14	4.89	2.72	0.556	14	4.92	2.70	0.549	
16	4.85	2.73	0.563	16	5.00	2.92	0.584	16	4.84	2.76	0.570	
18	4.98	2.93	0.588	18	5.03	3.03	0.602	18	4.88	2.83	0.580	
20	5.00	3.04	0.608	20	5.01	3.12	0.623	20	4.99	3.01	0.603	
22	4.97	3.09	0.622	22	4.95	3.18	0.642	22	5.01	3.19	0.637	
24	4.93	3.16	0.641	24	4.92	3.26	0.663	24	5.06	3.31	0.654	

Како завршно испитување во склоп на другите дијагностички мерења , извршено е мерење на отпорот на намотките во положбите во кои е спремен трансформаторот да работи. Од добиените резултати може да се заклучи дека отпорите во сите три фази се исти, односно со извршената интервенција на делот од бирачкиот дел од регулационата преклопка истата е доведена во исправна состојба.

5. ЗАКЛУЧОК

Од трудот може да се заклучи дека неприменувањето на сите расположиви дијагностички мерни методи, доведува до погрешна проценка на состојбата на Е.Т. Како краен ефект на лошата проценка на состојбата на Е.Т. може да дојде до поголеми оштетувања на трансформаторот ,а за отклонување на дефектот најчесто е потребно Е.Т. да се носи во сервис, што во случај на овие енергетски трансформатори значи производител, заради можностите кои ги има.

Со следење на состојбата на Е.Т. со примена на комплетни профилатички мерни методи, во разгледуваниот случај навремено се откриени недостатоците кои настанале во текот на експлоатацијата на Е.Т. и истите се отклонети во теренски услови, со помала интервенција, при што се потрошени минимални финансиски средства.

Со спроведување на навремена и целосна контрола на елементите на трафостаницата се зголемува сигурната работа на електроенергетскиот систем и сигурноста на снабдување на потрошувачите со електрична енергија и се смалуваат трошоците на производството и преносот на електричната енергија со смалување на бројот на хаварии и со продолжување на работниот век на трансформаторите.

ЛИТЕРАТУРА

1.Технички упатства-Енергетски трансформатори во погон,Електропренос, Скопје 1996.

2.Контрола на состојбата на контактите на регулационата преклопка,Сигре 1994 Париз.

Вилма Мавкова, дипл. инж. технолог,
Подружница “Електропренос”, ЈП “ЕСМ”

СТАРЕЕЊЕ НА ЦЕЛУЛОЗНАТА ИЗОЛАЦИЈА НА ТРАНСФОРМАТОРИТЕ: АНАЛИЗА НА ДЕРИВАТИТЕ НА ФУРАН

СОДРЖИНА

Во нашиот електро-енергетски систем голем е бројот на електрична опрема која повеќе од 30 години непрекинато се наоѓа во погон. Затоа поинтензивно треба да се следи процесот на стареење на изолациониот систем масло/хартија кој е составен дел на оваа опрема.

Во овој труд опишан е процесот на стареење на цврстата изолација кај енергетските и мерните трансформатори. Исто така објаснети се најважните критериуми и аналитички методи кои се користат за дијагностицирање на вистинска состојбата на изолационата хартија .

Клучни зборови: цврста изолација, стареење, фурани, течна хроматографија, енергетски и мерни трансформатори.

AGEING OF CELLULOSIC ISOLATION OF TRANSFORMERS: FURANIC COMPOUNDS ANALYSIS

SUMMARY

Nowadays, the number of comparatively old components in our electric power system is very high. Therefore a great attention has to be given to the analysis of the ageing of insulating system, especially of cellulosic paper, in oil-filled electrical equipment.

The objective of the paper is to present the proces of solid insulation ageing of transformers. Also, different analytical methods and criteria for it's condition diagnosis were represented.

Keywords: solid isolation, ageing, furanic compounds, liquid chromatography, transformers.

ВОВЕД

Кај енергетските и мерните трансформатори најчесто употребуван изолационен систем е комбинацијата минерално масло и целулозна хартија. Под дејство на околните услови кои се создаваат при редовната работа на опремата овие органски материи доживуваат низа хемиски промени. При тоа доаѓа до менување на нивните електрични и термички својства, па се помалку се во состојба да ја одиграат својата, пред се изолациона, улога. Така со текот на времето се зголемува веројатноста од појава на дефекти во опремата. Долгогодишните истражувања во оваа област покажале дека разградувањето на течната и на цврстата изолацијата на трансформаторот пред се зависи од температурата и времето на работа на опремата, но исто така зависи и од количеството на вода и кислород во нив.

Определувањето на физичко–хемиските и електричните карактеристики на изолационото масло е веќе добро обработена проблематика и денес се прави без некои поголеми потешкотии. Поголем дел од електричната опремата е така конструктивно решена, да многу лесно може да се земаат примероци на трансформаторското масло. Од добиените лабораториски резултати, посебно оние од гасната хроматографија, со правилна интерпретација може со голема точност да се идентификуваат евентуално присутните термички и електрични дефекти во опремата.

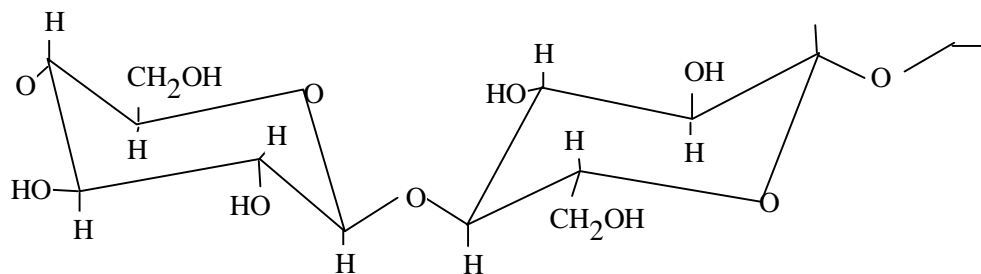
Од друга страна целулозната изолација е многу тешко речиси невозможно да се земаат примероци за анализа без целосно отворање на електричната опремата. Овој зафат не само што е ризичен и обемен за работа туку е и доста скап. Како алтернативно решение на овој проблем долго време се разработувала идеата за конструкција на специјални места (цепови) на трансформаторскиот казан од кои ќе може и без веќе споменатото отворање лесно да се зема проба од цврстата изолација. Во пракса тоа се покажало дека е тешко изводливо, па вниманието се свртело кон други поедноставни методи кои индиректно преку анализи на маслото ќе ни дадат податоци за состојбата на цврстата изолација. Така во последните две децении се поинтензивно се работи на методите на одредување на количеството на дериватите на фуран растворени во трансформаторското масло. Овие соединенија се продукти кои настануваат само при деградацијата на целулозната изолација па со нивното определување може да се дојде до значајни сознанија.

Цел на овој труд е да се даде подетален опис на употребата на Високо резолуционата течна хроматографија (HPLC) за определување на количеството на дериватите на фуран растворени во трансформаторското масло, а индиректно и на степенот на остареност на цврстата изолација кај електрична опрема. Резултатите добиени со оваа метода се од голема полза и при интерпретацијата на Гасно-хроматографските анализи на трансформаторското масло.

ХЕМИСКИ СОСТАВ НА ЦЕЛУЛОЗНАТА ИЗОЛАЦИЈА И МЕХАНИЗАМ НА СОЗДАВАЊЕ НА ДЕРИВАТИТЕ НА ФУРАНОТ

Изолационата хартијата структурно претставува мрежа од целулозни влакна екстрахирани од дрвени и други растителни суровини. Целулозата пак од своја страна е линеарен кондензационен полимер на D-анхидроглукопиранозни единици поврзани меѓу себе со β -1,4 – глукозидни врски како што е претставено на слика 1.

Ренгенските испитувања на структурата на овој линеарн полимер покажуваат дека содржи и внатрешни и надворешни водородни врски. Така целулозното влакно е всушност образувано од целулозните ланци цврсто поврзани со водородни врски.

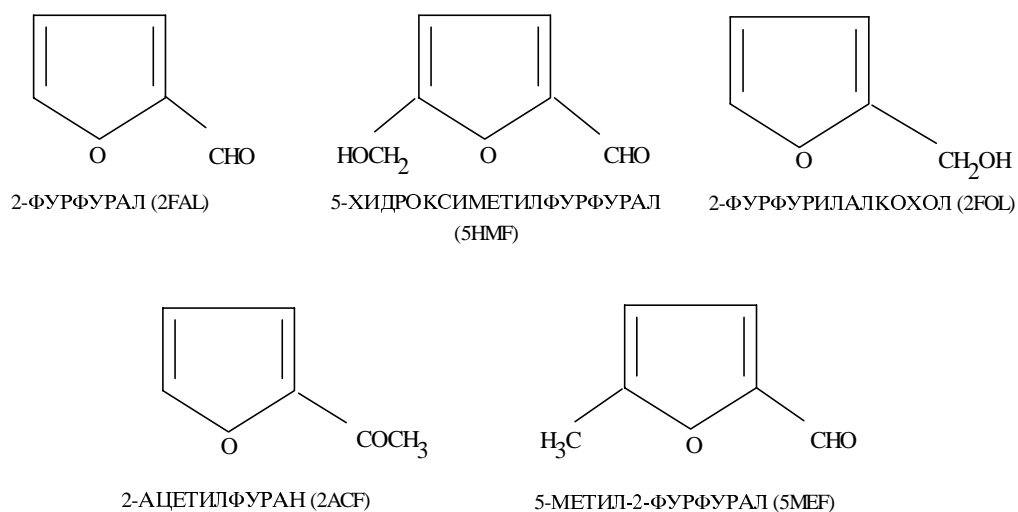


Слика 1: Хемиска структура на целулозата

Целулозната деградација е комплексен процес кој настанува при комбинирано дејство на температурата во околната средината и количеството на вода и кислород во опремата. Неколку различни механизми се предложени за објаснување на целулозната деградација.

Во првиот случај при пиролиза на глукозата, што се појавува при термичка деградација, реакцијата се одвива преку левоглюкозанот (1,6-анхидро- β -Д-глюкопираноза) кој по повеќекратна реорганизација на хемиските врски и губење на молекул вода и формалалдеhid (или водород со јаглерод монооксид) преоѓа претежно во фурфуралдеhid и мали количини др. фурани (слика 2).

При хидролиза на глукозата, што е резултат на присуството на поголеми количини вода), прво се формираат епоксиди или еноли кои потоа по истиот пат како левоглюкозанот создаваат формалалдеhid и други фуранови деривати (сл. 2).



Слика 2. Структурни формули на дериватите на фуран кои се создаваат при деполаризација на цврстата изолација

При термичката деградација на целулозата водата и јаглерод диоксид се главните нус-продукти, фураните и карбонилните деривати се втори по значење деградативни продукти а пак алкохолите, киселините и ароматите се продуцираат во незначителни количини.

Водата и јаглеродниот диоксид се соединенија кои се создаваат во значителни количини и при деградација на течната изолација, па не може да се користат за прецизно определување на остареност на цврстата изолација. Од друга страна дериватите на фуранот, посебно 2-фурфурал (2FAL) и 5-хидроксиметилфурфурал (5HMF), се создаваат само при деградација на целулозата и со нивното определување може да се добие јасна претстава за состојбата на изолационата хартија во трансформаторите во погон..

МЕТОДИ ЗАОПРЕДУВАЊЕ НА КОЛИЧЕСТВОТО НА ДЕРИВАТИТЕ НА ФУРАН РАСТВОРЕНИ ВО ТРАНСФОРМАТОРСКОТО МАСЛО

Минералните изолациони масла содржат голем број на слични хемиски соединенија и многу е тешко да се одредува директно количеството на само една од нив. Една алтернативна процедура би била селективната екстракција на саканата компонента со соодветни физички или хемиски средства. Втората можност би била употребата на селективни реагенси кои би можеле да ја насочат анализата.

Во секој случај денес се разгледуваат и разработуваат три различни аналитички методи за детекција на фурани и нивните деривати во трансформаторското масло.

1. **HPLC методата (High Performance Liquid Chromatography):** понатаму обработена.
2. **Спектрофотометриска:** за брза селекција на трансформаторите и кога треба да се анализира голем број на проби. При оваа метода фурфуралдехидот (2-FAL) кој е растворен во трансформаторското масло реагира со анилин ацетат и продуцира розово обоено комплексно соединение. Бојата на добиениот раствор се мери на 526 nm со помош на спектрофотометар. Резултатите определени со оваа метода не отстапуваат по точноста од оние добиени со HPLC методата, но недостаток и е што со неа може да се одреди само еден од фурановите деривати.
3. **Капиларна гасна хроматографија:** кај која растворените гасови и фурановите деривати се анализираат истовремено со едно пуштање на пробата низ хроматографска колона. При тоа треба да се користи специјално изработени колони кои засега се многу поскапи од оние при HPLC методата.

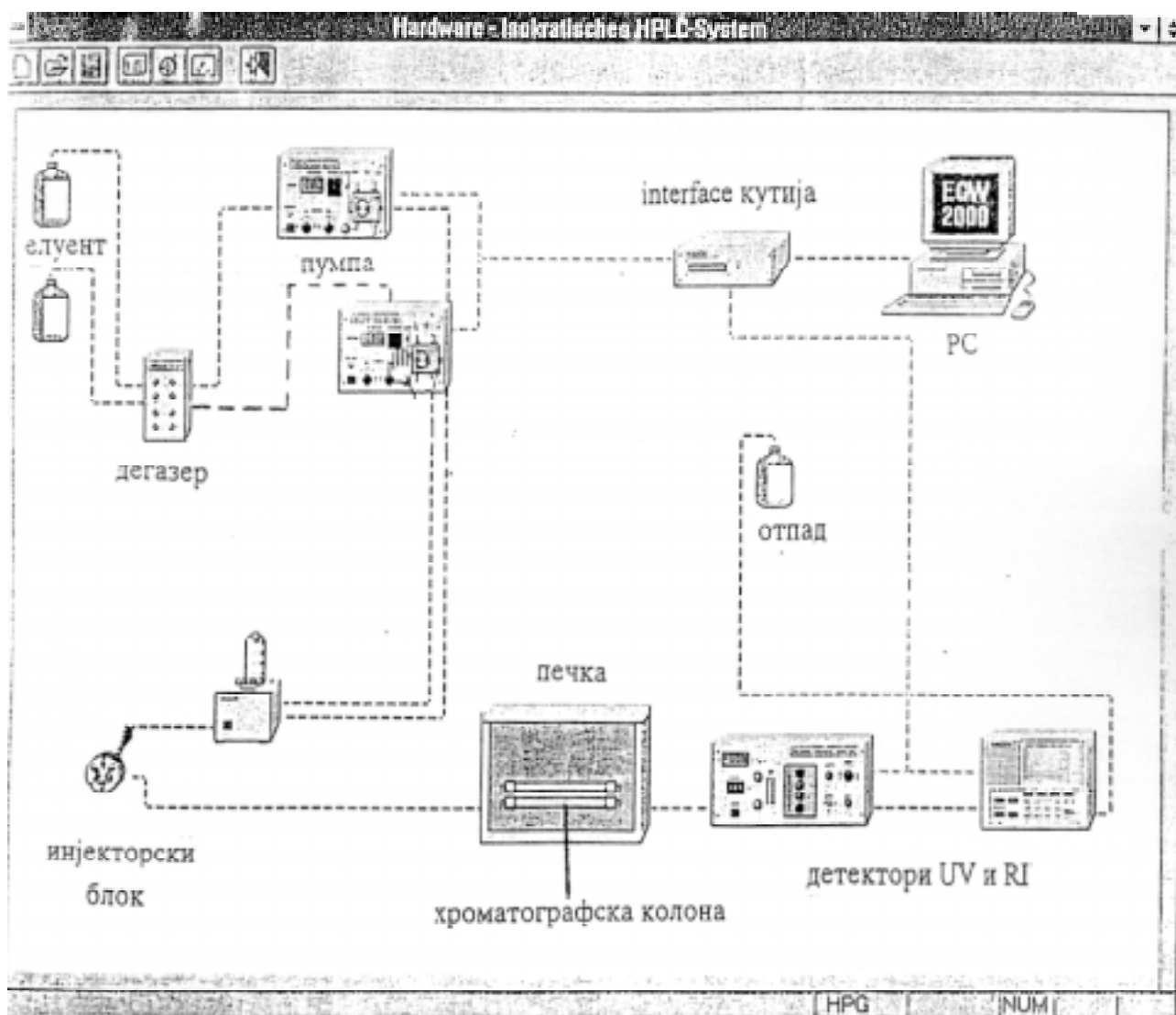
ВИСОКО РЕЗОЛУЦИОНА ТЕЧНА ХРОМАТОГРАФИЈА

Високо резолуционата течна хроматографија (High-Performance Liquid Chromatography) преставува мошне ефикасна и брза метода за разделување на компонентите од реакционата смеса. Таа е незаменлива техника за анализа на јагленихидрати, аминокиселини, карбоксилни соединенија и др.

Постојат повеќе техники за разделување на компонентите од некоја проба во колона но најупотребувана е елуентната техника која се применува и при испитување на фураните. При оваа анализа пробата (чији компоненти треба да се разделат) се внесува од едниот крај на колоната и потоа се пропушта подвижната фаза (елуентот) кој е инертен во однос на цврстото полнење на колоната (стационарна фаза). Секоја од компонентите на пробата се движи по должината на колоната со различна брзина која зависи од нејзиниот афинитет кон стационарната фаза. На тој начин компонентата со најголема брзина, односно онаа која има најмал афинитет спрема стационарната фаза, прва ќе го напушти системот.

Разделувањето на компонентите во HPLC системот денес е мошне брзо и ефикасно што се должи на современите колони наполнети со многу ситни честички атсорбент или носач на неподвижната течна фаза. Протокот на подвижната фаза под притисок низ ваква колона се обезбедува со внесување на течната фаза под притисок, кој го дава пумпата која е задолжителен дел на апаратот.

За посlikовита престава на оваа апаратура на слика 3 шематски се прикажани составните делови и нивната поврзаност на еден стандарден тип на течен хроматограф од германската фирма KNAUER:



Слика 3. Шематски приказ на вообичаена HPLC опрема

Досега се разработени две постапки за подготвување на пробите од масло пред да се употребат во HPLC апаратурата:

1. Течно-течна екстракција: при која интензивно се мешаат познат волумен на масло и метанол или ацетонитрил. Се остава да се оделат маслото и растворот и од последниот точно определено количество се вбризгува во хроматографската колона.
2. Цврсто-течна екстракција: кога во n-пентан се раствора одредено количество масло па се филтрира низ колони со silica – gel, Под овие услови повеќето поларни компоненти во маслото меѓу кои се и дериватите на фуран се задржуваат на silica полнењето. Потоа се раствораат со помош на метанол или ацетонитрил и се анализираат со HPLC методата.

HPLC анализите на дериватите на фуран се прават со помош на reversed phase хроматографски колони полнети со октил и октадецил деривати на silica. Елуентот се анализира со UV-детектор. Фурфурал алкохолот има максимална абсорбанца околу 220 nm а другите 4 деривати се околу 276 nm. За да може само со една анализа да се детектираат сите 5 соединенија се препорачува употреба на диоден тип на UV-детектор. Смесата на метанол и вода или ацетонитрил и вода се покажала како задоволувачки елуент.

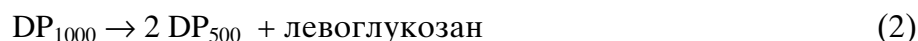
ОБРАБОТКА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ДОБИЕНИ ПРИ HPLC АНАЛИЗА

За полесна обработка и објаснување на резултатите добиени со HPLC анализите се прави нивна споредба со степенот на полимеризација. Степенот на полимеризација(DP) е мерило за бројот на глукозни молекули поврзани во верига на целулозата. Со помош на оваа вредност лесно може да се оцени состојбата на цврстата изолација и нејзините основни својства. Што е поголем степенот на полимеризација толку цврстата изолација има подобри својства.

Повеќето лабораториски испитувања направени во оваа област ширум светот покажале дека постои линеарна зависност помеѓу степенот на полимеризација и концентрациите на 2FAL и 5HMF дериватите. За да се определи оваа корелација треба да го поедноставиме работниот модел:

1. Да се претпостави дека нова недеградирана целулоза има степен на полимеризација 1000 односно дека секоја нејзина верига е изградена од 1000 глукозни единици.

2. Да се претпостави дека термичката деградација на целулозата започнува со цепење на веригата од целулозното влакно на пола. Една од создадените две нови вериги е нестабилна и по серија од брзи промни на структурата губи една глукозна молекула. Ова може да се претстави со упростена шема:



Од друга страна при анализи на промената на степенот на полимеризација добиена е следнава зависност:

$$DP = \frac{xDP_0 + 2y(DP_0/2)}{x + 2y} \quad (3)$$

каде **x** е бројот на молекули кои сеуште не се оделиле од целулозната верига, а **2y** е бројот на нови молекули кои се создале при деградацијата. При овие пресметки се воведува и нова величина **M** која одговара на бројот на молекули во почетниот ланец на целулоза и се пресметува:

$$M = x + y \quad \text{или} \quad (4)$$

$$M \text{ (mol)} = w/162DP_0 \quad (5)$$

каде **w** е тежината на деградираната целулоза, а **162** е молекулската маса на глукозните единици кои се оделуваат од веригата. Од равенката (4) се добива:

$$x = M - y \quad (6)$$

и со замена во равенката (3):

$$DP = \frac{(M-y)DP_0 + 2y(DP_0/2)}{M - y + 2y} = \frac{MDP_0 - yDP_0 + yDP_0}{M + y} = \frac{MDP_0}{M + y} \quad (7)$$

со реорганизација на оваа равенка се добива крајниот и најважен облик:

$$y = \frac{M(DP_0 - DP)}{DP} \quad (8)$$

Под **y** се подразбира бројот на целулозни вериги кои се деградирале во тек на одредено временски интервал како и бројот на прекурсорни молекули формирани при деградација. Со анализа на равенката (8) може да се забележи дека процесот на деградација на цврстата изолација е независен од самиот механизам на формирање на фураните како и од почетната молекулска маса на целулозата. Преку оваа релација лесно може, со употреба на молекулските маси на конкретните деривати на фуран, да се одреди нивната теоретска концентрација при даден степен на деградација на целулозата.

Од друга страна ако се знае дека само околу 30% од создадените деривати на фуран при деградативните процеси (вредноста **y**) се раствораат во маслото лесно може со употреба на равенката (8) да се користат резултатите добиени со HPLC методата за одредување на степенот на полимеризација. Така брзо и едноставно без поголеми зафати и трошоци може да се определи оваа важна величина преку која се опишува состојбата на цврстата изолација.

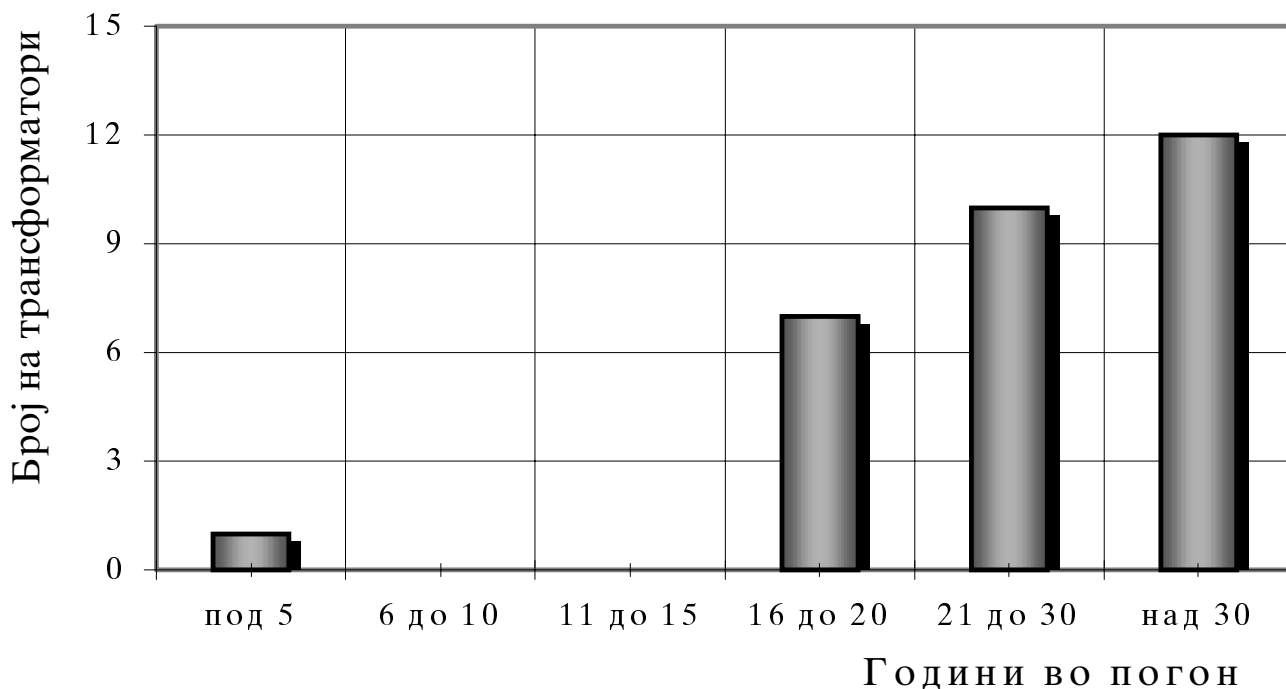
НАМЕСТО ЗАКЛУЧОК

Статистичките анализи направени од страна на работната група на CIGRE 15.01.03 од 1984 година, покажале дека по испитување на 5000 енергетски трансформатори кај поголем број од нив се измерени повисоки концентрации на фурани и тоа посебно кај постарата електрична опрема (над 30 години погон).

Ако ја погледнеме старосната структура на енергетските трансформатори само што се под надлежност на Подружница ЕЛЕКТРОПРЕНОС (табела I и сл.4) оваа констатација станува мошне значајна..

Табела I: Старосна структура на енергетските трансформатори Подружница “ЕЛЕКТРОПРЕНОС” – Скопје, ЈП “Електростопанство на Македонија”

Реден број	Трансфорска станица	Трансформација (кV)	Год. на пуштање	Производител
1.	Штип	ТР 2 / 110/35	1959	Раде Кончар
2.	Битола	ТР 1 / 150/110	1960	Дилегнано
3.	Скопје 1	ТР 1 / 110/35	1961	Раде Кончар
4.	Штип	ТР 1 / 110/35	1962	Раде Кончар
5.	Скопје 1	ТА 5 / 220/110	1965	Елин
6.	Прилеп	ТР 2 / 110/35	1965	Раде Кончар
7.	Велес	ТР 2 / 110/35	1965	Раде Кончар
8.	Скопје 1	ТА 3 / 220/110	1966	Раде Кончар
9.	Битола	ТР 4 / 110/35	1967	Ел. Путере
10.	Прилеп	ТР 1 / 110/35	1967	Раде Кончар
11.	Кавадарци	ТР 1 / 110/35	1967	Ел. Путере
12.	Кавадарци	ТР 2 / 110/35	1967	Ел. Путере
13.	Скопје 1	ТА 4 / 220/110	1971	Раде Кончар
14.	Битола	ТР 2 / 150/110	1972	Диленано
15.	Велес	ТР 1 / 110/35	1973	Раде Кончар
16.	Скопје 2	ТР 1 / 110/35	1975	Раде Кончар
17.	Скопје 3	ТР 1 / 110/20	1976	Минел
18.	Скопје 3	ТР 2 / 110/20	1976	Минел
19.	Скопје 4	ТР 1 / 400/115	1977	Раде Кончар
20.	Дуброво	ТР 2 / 400/115	1977	Раде Кончар
21.	Бучим	ТР 1 / 110/6	1977	Елта
22.	Бучим	ТР 2 / 110/6	1977	Елта
23.	Битола	ТР 3 / 110/35	1978	Минел
24.	Скопје 4	ТР 2 / 400/115	1979	Раде Кончар
25.	Дуброво	ТР 1 / 400/115	1979	Раде Кончар
26.	Скопје 1	ТР 3 / 110/35	1980	Минел
27.	Скопје 2	ТР 2 / 110/35	1980	Минел
28.	Самоков	ТР 1 / 110/35	1981	Минел
29.	Самоков	ТР 2 / 110/35	1981	Минел
30.	Скопје 1	ТР 2 / 110/35	1997	Раде Кончар



Слика 4: Старосна структура на енергетските трансформатори Подружница “ЕЛЕКТРОПРЕНОС” – Скопје – “Електростопанство на Маедонија”

Ако кон ова се додадат и трансформаторските единици во дистрибутивните мрежи и трансформаторите во склоп на ХЕ и ТЕ, кои се со слична старосна структура и големиот број мерни трансформатори, кај кои состојбата на цврстата изолација е од особено значење посебен заклучок не е потребен.

Современите хроматографски методи во кои спаѓа и Течната хроматографија се повеќе се применуваат во разни области и во нашата земја. Затоа не е нереално да се размислува за примена на истите и во областа на одржување на енергетските и мерните трансформатори чија поединечна цена далеку ги надминува трошоците на најсовремената Хроматографска опрема.

ЛИТЕРАТУРА

1. A., de Pablo and B., Pahlavanpour, Furanic compounds analysis: A tool for predictive maintenance of oil-filled electrical equipment, ELECTRA No. 175, December 1997.
2. V. Pejovic, Utvrđivanje ostarelosti papirne izolacije transformatora analizom jedinjenja furana rastvorenih u transformatorskom ulju, CIGRE 1995.
3. A. Mikulecky - S. Cabrajac, Odrzavanje energetskih transformatora, Energija Br.6, 1991.
4. A. Mikulecky - S. Cabrajac, Produzenje vijeka trajanja energetskih transformatora, Hrvatski Komitet na CIGRE 1993.

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ - СИГРЕ
СКОПЈЕ

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО-СИГРЕ

Александар Шеќерински, дипл. ел. инж.
ЈП "ЕСМ", Подружница "Електропренос"

РЕВИТАЛИЗАЦИЈА НА ЕНЕРГЕТСКИ ТРАНСФОРМАТОРИ

СОДРЖИНА

Во информацијата се изложени размислувањата при донесување одлука за интервенција во сервис на стари енергетски трансформатори како и за обемот на интервенцијата.

Клучни зборови: енергетски трансформатор, доверливост, ревитализација.

REVITALIZATION OF POWER TRANSFORMERS

ABSTRACT

The information contains the analysis needed for decision on intervention on old power transformers in reparation workshop and the level of the intervention.

Key words: power transformer, reliability, revitalisation.

Енергетските трансформатори како елементи на високонапонските постројки најчесто ја "наживуваат" останатата опрема, при што таа се заменува било поради хаварија, било поради надминување на нејзините перформанси. Секако дека и кај трансформаторите (ЕТР) има хаварии, но, најчесто поради затајување на опремата која треба да ги заштити (прекинувачите, релејната заштита и т.н.). А, одлука за исфрлување од употреба на ЕТР заради старост многу тешко се донесува. Заради тоа сеуште се во погон ЕТР од времето на формирањето на преносната мрежа (далечната 1959 година).

Векот на траење на ЕТР е многу комплексно прашање, а кога се поставува некоја граница (различна во различни литератури) тогаш тоа се прави со наведување на повеќе услови, во основа врзани за погонските настани, начинот на експлоатацијата и локацијата во системот.

За најстарите ЕТР во мрежата на ЕСМ може да се каже дека поминале значаен период на максимални напрегања, како поради преоптовареност, така и поради чести проблеми во големите мрежи кои ги напојувале (до помасовното превземање на дистрибутивниот конзум на 110 kV). Во оваа група секако треба да се опфатат и ЕТР за десет години помлади, активирани до 1970 година.

Се наметнува прашањето: до кога можеме да сметаме на нив? Со каква доверливост и економичност ?

Ова исто прашање често пати се поставува меѓу стручните лица во Електростопанство на Македонија одговорни за одржувањето на трансформаторските станици.

Дискусија се води на повеќе места со различни учесници.

И во случаите кога заклучоците се исти до нив се дошло со многу повторени дискусии, со многу потрошено време, а конечно, останале дилеми и сомневања: дали се постапило правилно, односно дали има оправдување тоа што е направено, дали има други, посоодветни решенија.

• • •

Како учесник во вакви дискусии почувствував потреба, преку оваа информација да го изложам прашањето на старите трансформатори, пред поширок круг на стручни луѓе на кои им е блиска оваа проблематика. Во стари трансформатори се воврстени и оние кои предвреме се остарени со начинот како се експлоатирани. Има и уште една важна група на ЕТР, а тоа се оние кои се стари по години а сепак се во добра состојба, според резултатите од мерењата (таков е Тр 110/35 kV од 1959 година во ТС Штип 1).

Одлуките околу активностите за одржувањето на овие трансформатори можат да одат во две крајности: едната е ништо да не се превзема и да се чека ЕТР да стане неупотреблив или во другата ЕТР да се носи во сервис за да се види што ќе се прави.

Убеден сум дека, во денешно време, никаде не се оди во овие крајности.

Зад нас е времето кога провејуваше мислењето: да се чека да дојде до хаварија, затоа што тогаш ќе се наплати преку осигурувањето.

Меѓутоа, како спротивност, не смееме да почнеме да размислуваме: да се носи во сервис за секој случај.

Интервенцијата на ЕТР во сервис мора да биде аргументирана во смисла: зошто се прави, што ќе се направи и што се очекува да се постигне. Нов трансформатор неможе да се добие, меѓутоа, зависно од она што ќе се изврши на ЕТР му се подобруваат условите за работа.

Основно прашање на кое треба да се одговори е дали се зголемува доверливоста на ЕТР со интервенцијата и колку тоа чини.

Утврдувањето на степенот на доверливоста е комплексна задача, а уште повеќе во случајот на интервенција на ЕТР. Дека е така може да се цени и по именувањето на она што се извршува во сервис. Имено, полесно е да се зборува за интервенција или зафат, одколку со чисто технички речник кога треба да се каже: дека е извршена ревизија или ремонт или пак ревитализација (со или без подобрувања).

Самиот наслов на информацијава повеќе има значење да посочи за која област станува збор, одколку дека е содржината на текстот за ревитализација.

Дилемите се најбројни, а и текстот е во основа посветен на случаите кога не се менуваат намотките. Инаку, кога се врши замена на намотките (од било кои причини) ситуацијата е многу појасна во смисла на тоа што може да се очекува. Меѓутоа, замената на намотките е скапа интервенција и повлекува и други работи на трансформаторот, што се заедно ваквиот зафат го прави доста скап. Се поставува прашање: дали оваа интервенција се исплатува кај стар трансформатор?

При сите размислувања потребно е да се имаат предвид и цените на нови ЕТР. Тие се најскапите, поединечно, елементи во една постројка, па одтаму произлегува и особено внимание кон нив. Еден ЕТР 110/35 kV од 40 MVA пуштен во погон чини повеќе од 25 милиони денари. Меѓутоа, темава е актуелна и за поголемите единици во ЕЕС на Македонија, какви што се најстарите автотрансформатори 220/110 kV во ХЕ Вруток и во ТС Скопје 1, чија вредност е повеќе од 3 пати поголема од претходниот ЕТР.

Сразмерно на цената на нов ЕТР високи се и цените на интервенциите. Тоа е причина што на нив мора да им се посвети особено внимание во текот на експлоатацијата. Цената на интервенцијата вклучувајќи ги и сите други трошоци треба да влијае при донесувањето одлука за/против работа во сервис и при утврдување на обемот на работите (во случај за).

Веднаш се наметнува за разгледување варијантата: сервисирањето (зафатот) да се изврши на лице место (особено за ЕТР до 20 MVA).

Се намалуваат трошоците и ризикот од транспортот (но мора да се смета со времето на дигалката), а се намалуваат и други трошоци од работењето во сервис. Транспортот е неоправдано скап. За оваа варијанта значајно е и прашањето на сушењето во печка на ЕТР чија хартиена изолација е веќе импрегнирана со масло.

Ова не е изнесување став, туку понатамошно изнесување на дилемите кои се присутни.

Следна дилема, при работа во сервис, е дали да се демантираат намотките. Тоа е работа која носи ризик. Меѓутоа, само на тој начин е овозможена целосна ревизија и чистење од талог. Ако нема индикации за особено големо таложење, тогаш дали чистењето е доволен аргумент за демантирање на намотките?

Секако дека заклучок за состојбата може да се изведе со мерења. Треба да се располага со податоците од приемното испитување, особено резултатите од мерењата на индуктивноста, напонот на куса врска и др.

Во информацијава анализирани се неколку карактеристични случаи во врска со интервенциите врз старите и дотраените енергетски трансформатори, кои ќе бидат посебно изложени.

- *Случај А:* Маслото мора да се замени.

Ако разгледуваме состојба кога маслото мора да се менува можни се два случаја во врска со состојбата на хартиената изолација: кога истата е во добра состојба (која секако може да биде и на долна граница) и кога е деградирана. Прашање е со колку податоци се располага за состојбата на хартиената изолација или пак првиот податок се добива одкако ЕТР ќе биде демантиран.

За жал, ова е така кај нас затоа што не располагаме со инструменти и методи кои служат за дијагностицирање на состојбата на хартиената изолација, без да се дојде до неа. (Познати ни се две различни методи: едната преку анализа на маслото (да се види рефератот на таа тема), а другата се базира на анализа на поларизацијата во изолациониот систем).

Најтешко е одлучувањето кога хартиената изолација е деградирана. Меѓутоа, најтешко е само во случаите кога нема нов ЕТР за замена, а присутна е и дилемата за замена на намотките кај стар ЕТР (каква е состојбата на јадрото и другите делови, колкави се загубите?).

Кога би имало нов ЕТР тогаш нема дилема - треба да се исфрли ЕТР кај кој маслото мора да се замени, хартијата е деградирана, загубите на моќност (во железо се големи) и нормално се друго е старо.

Кога хартиената изолација е навистина добра и ако уште и јадрото е во добра состојба и карактеристики, тогаш полесно се донесува и одлука за носење во сервис, меѓу другото и заради тоа што веќе се прави значаен трошок за ново масло.

За ваквите случаи многу би била корисна анализа на доверливоста и животниот век на ЕТР после интервенцијата.

- *Случај Б:* маслото се заменува.

Оваквата интервенција веќе претставува определен степен на ревитализација на ЕТР.

Кога веќе ЕТР е во сервис, тогаш се извршуваат сите можни работи, без демонтажа на намотките (освен ако нема индикација дека мора). Ако за состојбата на хартијата сознаваме тек сега, по отварањето и земањето примерок, тогаш, доколку се покаже дека хартијата е добра, сме свршиле голема работа. Меѓутоа, во случај кога хартијата е деградирана, се останува со дилемите околу оправданоста на понатамошните интервенции.

Неопходно е опремувањето за спроведување на мерна метода за утврдување на состојбата на хартијата. Така ќе се донесуваат на време квалитетни одлуки, а ќе се избегнат погрешни - да се дадат многу пари, а да не се постигне скоро ништо.

На ЕТР, кој е веќе отворен, во сервисни услови, ќе може, а и треба, да се извршат максимум можни работи, а особено кај оној со добра хартиена изолација. Секако е потребно: чистење, презатегање на достапните делови од намотките и изводите, ревизија на регулационата преклопка, замена на заптивни елементи и др. Кај ЕТР со добра хартија сигурно треба да се посвети особено внимание на ладењето, евентуална замена (а ако нема, да се стави ново) на заштитното гасно реле на регулационата преклопка, контактен термометар, замена на елементи, кабли од командните ормари (од регулационата преклопка, вентилатори).

Секако дека овие трошоци ќе се оправдуваат во текот на процената за очекуваната состојба на ЕТР со сите зафати.

Во секој случај се добива ЕТР на кој може да се смета со поголема доверливост во наредниот експлоатационен период.

Се поставува прашањето на обемот на приемните испитувања после сервисирањето, (како на пример висината на напонот), а и прашањето на гаранцијата од изведувачот на работите.

Кога веќе толку работи ќе се извршат (и соодветно пари ќе се потрошат) не смее да се заборави дека и понатаму најосетливиот, на стареење, дел од ЕТР, хартиената изолација, е стар и понатаму.

Значи ЕТР е неопходно да се заштити од напрегања. Тоа ќе се постигне со ремонтирани (или нови) прекинувачи, добра релејна заштита и заштита од пренапони. Најдобро решение е замена на најчесто и онака нефункционалните стари одводници на пренапони.

Може да се каже дека ревитализацијата на ЕТР оправдува и налага определен степен на ревитализација и во трафо полињата на двете напонски нивоа.

Обете активности се алки на ланецот на доверливост на трансформаторската станица. Тоа значи уште трошоци (помали од оние за ЕТР) но секој пат кога ќе се постави (од било кого) дилемата "скапо е", веднаш мора да се земе предвид дали има друго решение.

Не коректни се и не корисни укажувањата дека е скапо, кога не се предлага друго решение.

(Што би рекле на руската, СССР, пракса, сретната во литература, да се врши сервисирање на ЕТР со отварање на секои десетина години? Можеби во друго време, со друг квалитет на материјали).

- *Примери:* од праксата на Електропренос.

Во изминатите две години се извршија три интервенции со замена на масло на стари ЕТР и тоа: две кај ЕТР 110/35 kV без замена на намотки и една кај ЕТР 220/110 kV, со замена на намотките (станува збор за автотрансформатор Та5 од 150 MVA во погон од 1965 година). Од овие интервенции на ЕТР стекнати се некои лични искуства кои ќе бидат изложени посебно.

Каков беше редоследот на одлуките?

- *Случај 1:* во ТС Скопје 1

После хаварија на Та5 во 1995 година е однесен во сервис. Хаваријата е на терциерната намотка на која беше приклучен синхрониот компензатор.

По целосна демонтажа на намотките се одлучува да се заменат сите намотки. Размислувањето почнува со сомневање како ќе се вклопи терциерот, намотките се стари, јадрото и јаремот се во добра состојба, како и сите други делови, се доби согласност од осигурителната компанија, а за нов ЕТР не се ни помислуваше заради високата цена но пред се заради иднината на напонското ниво 220 kV. Конечно, се очекува да се обезбеди високо ниво на расположивост, а тоа не е можно со стар ЕТР.

Следуваше одлука за ново масло, кое чинеше нешто како транспортот.

Се доби трансформатор со одлични параметри.

Во исто време се дискутираше за судбината на Тр1, 110/35 kV од 31,5 MVA во истата трансформаторска станица. Овој ЕТР е од 1961 година. Резултатите од мерењата подолго време биле лоши, па се дискутирало исто толку време, а еднаш на лице место е отворен и затворен без посебни интервенции.

Меѓутоа, Тр1 е оставен, како резерва, што значи за во погон.

Така не смееше да остане, се донесе одлука да се носи во сервис, а имавање и олеснителна околност, го имавање маслото од Та5, сосема добро за напонско ниво 110 kV.

На Тр1 се изврши ремонт и на циркулационите пумпи за масло, на регулационата преклопка, се исфрли голема количина талог, се преработи инсталацијата во ормарите, се замени недоверливото бухолц реле, се изврши дихтување и т.н.

За жал хартијата е во лоша состојба.

Мерењата пред пуштање во погон покажаа значително подобрување, а и наредните мерења покажаа добри резултати.

- *Случај 2:* во ТС Кавадарци

Ова е случај на ЕТР со масло, на кое, поради карактеристиките и состојбата не смее да му се додава ново масло (станува збор за ЕТР 110/35 kV Електропутере, 20 MVA од 1967 година).

Анализата на примерок од хартијата покажа дека хартијата е во добра состојба. Значи со промената на маслото и предходните работи во сервис се доби добар ЕТР.

Овој ЕТР во приоритетот беше после ЕТР со исти параметри од ТС Битола 1. Меѓутоа, во текот на грејната сезона неможеше во ТС Битола 1 да се извршат потребните работи за демонтажа и монтажа на ЕТР (од конструктивни причини во ТС). Поради тоа а имајќи ја предвид крајно лошата состојба на маслото на ЕТР во ТС Битола 1 се одлучивме да го припремиме ЕТР од ТС Кавадарци, кој при потреба би бил однесен во ТС Битола 1.

- *Случај 3:* во ТС Битола 1

Со наполно деградирано масло, без можност за доливање (со додавање ново масло издвојувањето на талог од старото би се зголемило), за интервенција на овој ЕТР се чека да се добие новото масло.

И покрај тоа што се измерени многу ниски вредности на отпорот на изолација ЕТР, во текот на изминатата сезона, мораше да биде пуштан во погон. Некој мораше да ја носи одговорноста.

• • •

Како што беше речено понапред целта на текстот (во кој нема ништо ново, непознато) е да ја постави темата околу судбината на старите ЕТР на јавна расправа, да се донесат, односно да се работи на донесување, заеднички заклучоци, а не и понатаму секој да работи за случајот на "сопствениот" ЕТР.

Уште еднаш ќе го потенцираат размислувањето: ако ЕТР е стар и со лоши карактеристики мора да се исфрли од употреба, а ако се чува, макар како резерва (што не менува ништо, бидејќи во извесна состојба се очекува да биде во погон) тогаш мора нешто да се превземе.

Што да се превземе?

Предлогот е решението да се бара за сите ЕТР доспеани за ваква анализа. Работејќи по приоритетен редослед ќе се постигне најголем ефект.



Но, дали воопшто оваа тема е битна кај нас?
Ако станува збор за неколку ЕТР, тогаш и не е некој проблем.

Но, ако се повеќе тогаш е проблем, па е потребна целосна ранглиста.

- *Заклучоци*

При изнесување на заклучоците морам да го изразам жалењето што сме принудени да бидеме преокупирани со решенија за дотраени ЕТР за кои, што е уште пострашно многу често нема доволно податоци за состојбата. Во исто време во светот, наши колеги, експлоатираат ЕТР со нови технички решенија, а кај ЕТР со старите технички решенија располагаат со системи за континуиран мониторинг во погонски услови. На големо веќе се работи на редовно одржување според состојба.

- Но, ние мораме и понатаму да ја потенцираме потребата од:
- Редовни мерења и испитувања на ЕТР.
 - Повеќегодишни податоци од таквите мерења, за донесување квалитетни одлуки.
 - Посебни програми за следење на состојбата на сервисираните ЕТР.

За изработка на програма која ќе ги опфати сите ЕТР досеани, а и оние во блиска иднина, за интервенција потребно е задачата да му се довери на стручен тим.

Стручниот тим треба:

- да ги утврди критериумите со кои ќе се изготви приоритетен редослед,
- да ја утврди спецификацијата на работите за поедини случаи,
- да направи оценка на доверливоста и преостанатиот животен век, за различни обеми на интервенции,
- да каже кои ЕТР не се за употреба.

Значи станува збор за изработка на програма за одреден степен на ревитализација, која ќе ги растерети поединците од дилеми, а ќе овозможи разрешување на прашањето околу старите ЕТР, а што е најважно тоа да биде со најмали трошоци.