

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА ЗАСОБАМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ****Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, Д. О. Літвінов***Запорізький національний технічний університет*

Анотація. Представлено методику розрахунку параметрів короткого замикання силового трансформатора засобами математичного моделювання у структурі ПЗ FEMM на прикладі геометричної моделі трансформатора ТМН – 1600/35 – У1. Визначено вплив нелінійних властивостей електротехнічної сталі магнітної системи на енергію магнітного поля та параметри короткого замикання трансформатора. Отримано залежність параметрів короткого замикання від значень фазної напруги відповідних ступенів регулювання.

Ключові слова: Математична модель, магнітне поле, векторний магнітний потенціал, метод скінчених елементів, коротке замикання, магнітна індукція, фазна напруга, струмове навантаження.

Вступ

Розрахунок параметрів короткого замикання (КЗ) силових трансформаторів базується на схемних моделях із спрощеною інженерною методикою їх визначення [1, 2, 3], яка не враховує залежність параметрів КЗ від значень фазної напруги для відповідних ступенів регулювання напруги під навантаженням (РПН) у відповідних типах силових трансформаторів. Це приводить до додаткових похибок в точності розрахунку. Тому при розробці нових серій енергоефективних силових трансформаторів необхідно застосовувати нові сучасні програмні засоби математичного моделювання електромагнітних процесів перетворення енергії змінного струму [4].

Методи чисельно – польового аналізу процесів електромагнітного перетворення енергії успішно апробовані для обертових та статичних електромеханічних систем [5, 6, 7], що збуджуються синусоїдально змінними у часі струмами. Для цього застосовувались універсальні програмні пакети математичного моделювання, які мають статус “freeware” вчасності пакет програм FEMM (Finite Element Method Magnetics) [8, 9, 10]. Приймаючи до уваги подібність електромагнітних процесів у трансформаторах і в обертових електричних машинах із загальмованим ротором, вказані припущення і методики можна застосувати для електромагнітних процесів в силовому трансформаторі, як об'єктів дослідження.

При регулюванні напруги силового трансформатора під навантаженням змінюється кількість витків первинної обмотки, відповідно,

змінюються параметри короткого замикання (КЗ). Тому важливо визначити параметри КЗ на кожному ступені регулювання пристрою РПН. При цьому відомий інженерний підхід до визначення цих параметрів базується на припущенні, що енергія магнітного поля локалізується тільки в області обмоток, а магнітна проникність електротехнічної сталі в магнітній системі наближається до нескінченості. Але вплив магнітного поля, що розподілено поза межами обмоток, а також нелінійності магнітних властивостей активних і конструкційних матеріалів магнітної системи на параметри короткого замикання трансформатора може бути достатньо істотним. Тому для побудови нової методики розрахунку параметрів КЗ з підвищеною точністю необхідно комбінувати методи теорії електромагнітного поля і чисельно-польового моделювання. Чисельну реалізацію математичної моделі електромагнітного поля необхідно здійснювати для кожного ступеня регулювання РПН із порівнянням результатів як для умови локалізації магнітного поля у межах обмоток, так і для активної частини трансформатора в цілому.

Нові версії програмних засобів ПЗ FEMM дозволяють здійснювати чисельно-польове моделювання на основі реалізації рівнянь Максвелла у частотному формулюванні для векторних магнітних потенціалів методами скінчених елементів у багатокомпонентній розрахунковій області активної частини трансформатора із системами обмоток, ізоляції та магнітною системою. Перевагою даного програмного засобу є відкрита ліцензія, що дає змогу його безоплатного використання.

© Яримбаш Д. С., Яримбаш С. Т., Дівчук Т.Є.,
Літвінов Д. О. 2017

Крім того доцільно застосовувати результати моделювання електромагнітних полів для визначення параметрів схемних моделей силового трансформатора, що забезпечує розширення області застосування нової методики для проектування електромеханічних пристроїв із високою точністю розрахунку конструктивних параметрів. Застосування такого комбінованого підходу дозволяє поєднати також переваги обох методів, а саме: простоту і швидкість реалізації схемного методу з інваріантністю і точністю польового моделювання. Це забезпечить єдність підходів для розрахунку різних типів електротехнічних пристроїв, дозволить систематизувати відповідні проектні розрахунки та суттєво підвищити їх точність, що особливо важливо при проектуванні нової електротехнічної продукції з високими показниками енергоефективності та надійності.

Текст статті

Розв'язання задачі моделювання потребує побудови реальної геометричної моделі активної частини трансформатора, яка складається з обмоток та елементів конструкції кістяка, а також завдання струмових навантажень всіх обмоток відповідних фаз.

В скінченно-елементних програмних засобах на основі графічного інтерфейсу FEMM, які набули широко використання, слід встановлювати три основні функціональні блоки:

1. Відображення геометричної розрахункової області, ідентифікація та присвоєння фізичних якостей її окремих частин.

2. Розрахунок параметрів моделі методом скінчених елементів.

3. Вивід результатів розрахунків.

Розрахунок двомірних магнітних полів в ПЗ FEMM відрізняється, насамперед, простотою використання графічного інтерфейсу, а також доступністю програми.

Відповідно до результатів попередніх досліджень [1] застосовано двомірну геометричну модель активної частини трифазного трансформатора у її перерізі вертикальною площиною, яка проходить через вісі стрижнів магнітної системи трансформатора.

Це дозволило обмежити математичне моделювання розглядом рівнянь у часткових похідних відносно векторного магнітного потенціалу [7, 8, 9]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right) + \sigma\partial\mathbf{A}/\partial t = \mathbf{J}_{\text{ex}}, \\ \mathbf{B} = \operatorname{rot}\mathbf{A}, \\ \mathbf{B} = \mu_0 \cdot \mu(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H}, \\ \mathbf{H} = \mathbf{i} \cdot \mathbf{H}_x + \mathbf{j} \cdot \mathbf{H}_y, \end{cases} \quad (1)$$

Математичній моделі змінного у часі магнітного поля у формулюваннях векторного магнітного потенціалу можна поставити у відповідність вектор математичних моделей стаціонарного магнітного поля [10, 11]:

$$\begin{cases} \left\{ \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(\mathbf{H}_k)}\operatorname{rot}\mathbf{A}_k\right) = \mathbf{J}_k \right\}, \\ \left\{ \mathbf{B}_k = \operatorname{rot}\mathbf{A}_k \right\}, \\ \left\{ \mathbf{B}_k = \mu_0 \cdot \mu(\mathbf{H}_k) \cdot \mathbf{H}_k \right\}, \\ \left\{ \mathbf{H}_k = \mathbf{i} \cdot \mathbf{H}_{xk} + \mathbf{j} \cdot \mathbf{H}_{yk} \right\}, k = (1, \dots, K) \end{cases}$$

компоненти якого відповідають компонентам векторів значень сил намагнічування, що визначаються для обмоток кожної з трьох фаз:

$$\begin{cases} \left\{ I_{A,k} \right\} = \left\{ I_m \cdot W \cdot \sin(\omega \cdot \tau_k) \right\}, \\ \left\{ I_{B,k} \right\} = \left\{ I_m \cdot W \cdot \sin\left(\omega \cdot \tau_k - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right\}, \\ \left\{ I_{C,k} \right\} = \left\{ I_m \cdot W \cdot \sin\left(\omega \cdot \tau_k - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right) \right\}, \\ k = (1, \dots, K), \end{cases}$$

у відповідності до вектору моментів часу, що задані із постійним часовим тактом для одного періоду змінного струму частотою 50 Гц:

$$\begin{aligned} \left\{ \tau_k \right\} &= \left\{ (k-1) \cdot \Delta\tau \right\}, k = \\ &= (1, \dots, K), \Delta\tau = 0.02/(K-1), \end{aligned}$$

де \mathbf{A} , \mathbf{A}_k – векторні магнітні потенціали, \mathbf{B} , \mathbf{H} – вектори магнітної індукції та напруженості магнітного поля із проєкціями, $\mu_0 \cdot \mu$ – магнітна проникність підобластей у розрахунковій області, W – кількість витків первинної обмотки (обмотки високої напруги), $I_{A,k}$, $I_{B,k}$, $I_{C,k}$, I_m – фазні струми і амплітуда струму в первинних обмотках трансформатора, ω – кутова частота, $\Delta\tau$ – часовий такт, τ_k – момент часу k -го такту.

Система рівнянь (1) замикається векторами граничних умов і умов спряження. На зовнішньому контурі Γ області моделювання мають виконуватися однорідні умови Дирихле для векторного магнітного потенціалу, які вказують на відсутність перетинання магнітним потоком зовнішньої конфігурації розрахункової області для кожного моменту часу τ_k :

$$\{\mathbf{A}_k|_{\Gamma} = 0\}, k = (1, \dots, K).$$

Між різними елементами конструкції активної частини силового трансформатора та іншими суцільними середовищами із різними електрофізичними властивостями задаються умови, які визначають рівність дотичних складових напруженості магнітного поля на внутрішніх границях спряження:

$$\{\mathbf{H}_{\tau k,1} = \mathbf{H}_{\tau k,2}\}_{\Pi} = 0.$$

В структурі засобів програмного забезпечення FEMM для нелінійної постановки властивості матеріалів вважаються ізотропним і задаються залежності В-Н для феромагнітних матеріалів, які представлені кубічними сплайнами.

Відповідні блоки геометричної моделі, в яких задана одна й та сама сила намагнічування, можуть розглядатися як сполучені послідовно. У цьому випадку густина струму в кожному блоці буде обчислюватися діленням добутку силу струму і загального числа його витків на площу поперечного перерізу блоку.

Розрахунок параметрів короткого замикання в трансформаторі чисельними методами дозволяє детально дослідити їх в окремих елементах магнітного ланцюга.

Для дослідження обрано трифазний силовий трансформатор ТМН – 1600/35 – У1 з номінальними параметрами: $S = 1600$ кВА; $m=3$; $f=50$ Гц; $U_2 = 35 \pm 6 \times 1.5\%$ кВ; $U_1 = 0.69$ кВ, схемою та групою з'єднання обмоток Y/Y_n-0 ; $U_k=6,5\%$; $i_{0n}=1,1\%$; $P_{нх} = 3650$ Вт; $P_{кз} = 18$ кВт, проект якого виконано за методикою [1].

Для номінального режиму силового трансформатора кількість витків обмотки ВН та НН складають відповідно 21 та 1065 витків. Вхідні значення струмів обмоток НН та ВН складають 1338, 783 А та 26, 393 А відповідно.

Збалансувавши струми (розбаланс значень напруженостей обмоток ВН та НН складає 5,89

А·витків) отримали скореговане значення струму обмотки НН, який складає 1338,502 А. Використавши пропорцію витків розраховуємо відповідні струми обмотки ВН при різних ступенях регулювання напруги, тобто вверх і вниз відносно номінального режиму трансформатора ТМН – 1600/35 – У1, що виконується за допомогою РПН, який винесено окремим концентром і розташовано зовні обмотки ВН через осьовий охолоджуючий канал.

У схемі регулювання напруги передбачено $n_p=6$ рівнів регулювання вище та нижче номінального значення напруги. Напруга одного рівня регулювання складає $\Delta U=303,521$ В. Кількість витків на одному ступені регулювання складає $W_c=16$ витків. Всього регульовальна обмотка вміщує 96 витків.

В процесі розрахунку зроблено припущення щодо струму обмотки НН який є незмінним при незмінній потужності трансформатора, який розраховуємо в комплексній формі для трьох фаз «а», «b», «с» при $t=0$:

$$\begin{cases} I_{1a} = \sqrt{2} \cdot I_{NN} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t}, \\ I_{1b} = \sqrt{2} \cdot I_{NN} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t - j \cdot \frac{2\pi}{3}}, \\ I_{1c} = \sqrt{2} \cdot I_{NN} \cdot e^{-j \cdot 2\pi \cdot f \cdot t - j \cdot \frac{4\pi}{3}}. \end{cases}$$

Струми обмотки ВН при різних ступенях регулювання напруги розраховуємо також в комплексній формі при $t=0$ за такою ж системою рівнянь як і для обмотки НН.

Значення отриманих струмів обмотки ВН та НН в комплексній формі при короткому замиканні занесені до таблиці 1

Задані значення фазних струмів визначено на основі схеми заміщення трифазного трансформатора у режимі КЗ [2]:

$$\begin{cases} I_{NN} \cdot W_{NN} + I_{VN} \cdot W_{VN} = I_0 \cdot W_{NN}, \\ I_{NN} \cdot W_{NN} + I_{VN} \cdot W_{VN} = 0, \\ I_{NN} \cdot W_{NN} = -I_{VN} \cdot W_{VN}. \end{cases}$$

Магнітне поле при опитному короткому замиканню є полем розсіяння тому параметри короткого замикання зв'язані відношеннями:

Таблиця 1

Струми обмоток ВН та НН при 13 ступенях РПН в режимі короткого замикання трансформатора

«Ступінь»	$U_{\phi VN}, B$	$W_{VN}, \text{ВИ-ТКІВ}$	I_H, A	Фаза	I_{VN}, A	I_{NN}, A
+6	22028,387	1065 + 96	24,21063	«a»	34.239	1892.927
		1161		«b»	-17.12-29.652i	-946.463-1639.323i
				«c»	-17.12+29.652i	-946.463+1639.323i
+5	21724,866	1065 + 80	24,54894	«a»	34.717	1892.927
		1145		«b»	-17.359-30.066i	-946.463-1639.323i
				«c»	-17.359+30.066i	-946.463+1639.323i
+4	21421,345	1065 + 64	24,89685	«a»	35.209	1892.927
		1129		«b»	-17.605-30.492i	-946.463-1639.323i
				«c»	-17.605+30.492i	-946.463+1639.323i
+3	21117,823	1065 + 48	25,25475	«a»	35.716	1892.927
		1113		«b»	-17.858-30.931i	-946.463-1639.323i
				«c»	-17.858+30.931i	-946.463+1639.323i
+2	20814,302	1065 + 32	25,62310	«a»	36.237	1892.927
		1097		«b»	-18.118-31.382i	-946.463-1639.323i
				«c»	-18.118+31.382i	-946.463+1639.323i
+1	20510,781	1065 + 16	26,00235	«a»	36.773	1892.927
		1081		«b»	-18.386-31.846i	-946.463-1639.323i
				«c»	-18.386+31.846i	-946.463+1639.323i
НОМ	20207,259	1065	26,393	«a»	37.325	1892.927
				«b»	-18.663-32.325i	-946.463-1639.323i
				«c»	-18.663+32.325i	-946.463+1639.323i
-1	19903,738	1065 - 16	26,79556	«a»	37.895	1892.927
		1049		«b»	-18.947-32.818i	-946.463-1639.323i
				«c»	-18.947+32.818i	-946.463+1639.323i
-2	19600,217	1065 - 32	27,21059	«a»	38.482	1892.927
		1033		«b»	-19.241-33.326i	-946.463-1639.323i
				«c»	-19.241+33.326i	-946.463+1639.323i
-3	19296,696	1065 - 48	27,63868	«a»	39.087	1892.927
		1017		«b»	-19.544-33.85i	-946.463-1639.323i
				«c»	-19.544+33.85i	-946.463+1639.323i
-4	18993,174	1065 - 64	28,08046	«a»	39.712	1892.927
		1001		«b»	-19.856-34.391i	-946.463-1639.323i
				«c»	-19.856+34.391i	-946.463+1639.323i
-5	18689,653	1065 - 80	28,53659	«a»	40.357	1892.927
		985		«b»	-20.178-34.95i	-946.463-1639.323i
				«c»	-20.178+34.95i	-946.463+1639.323i
-6	18386,132	1065 - 96	29,00778	«a»	41.023	1892.927
		969		«b»	-20.512-35.527i	-946.463-1639.323i
				«c»	-20.512+35.527i	-946.463+1639.323i

$$\begin{cases} U_k = \sqrt{U_a^2 + U_p^2}, \\ u_a \% = r_k \% = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100\%, \\ u_p \% = x_k \% = \frac{Q_k}{S_n} \cdot 100\%, \end{cases}$$

де U_k, U_a, U_p - напруга КЗ та її активна та реактивна складові, P_k - втрати КЗ; $Q_k = \omega \cdot W_m$ - реактивна потужність поля розсіяння, W_m - амплітуда енергії магнітного поля розсіяння при номінальному струмі; S_n - номінальна потужність, Z_k, r_k, x_k - опір КЗ та його активна та реактивна складові:

$$Z_k = r_k + j \cdot x_k = \frac{U_a + j \cdot U_p}{I_{н.ф}} = \frac{U_{н.ф}}{I_{н.ф}} \cdot \frac{u_a \% + j u_p \%}{100\%}$$

$$r_k = \frac{P_k}{m \cdot I_{н.ф}^2}, \quad x_k = \frac{Q_k}{m \cdot I_{н.ф}^2}$$

$$x_k = \omega \cdot L_k = \omega \frac{\Psi_k}{I_{н.ф}}$$

$I_{н.ф}, U_{н.ф}$ - номінальний фазний струм та напруга, m - кількість фаз, L_k - індуктивність розсіяння, Ψ_k - потокозчеплення обмотки при КЗ.

Для застосування інтерфейсів FEMM окремі підобласті кістяка трансформатора шихтованого з пластин холоднокатаної текстурованої сталі марки 3405 (товщина листів 0.3 мм) із різними нелінійними магнітними властивостями позначено мітками «Stal», «Stal2», «Stal3», «Stal4». Магнітні властивості електротехнічної сталі задаються дискретними масивами $\{B_j, H_j\}$, що відображають залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля.

Розрахункова область активної частини із системами обмоток: «NN_a_Left» та «NN_a_Right», «NN_b_Left» та «NN_b_Right», «NN_c_Left» та «NN_c_Right», «VN_a_Left» та «VN_a_Right», «VN_b_Left» та «VN_b_Right», «VN_c_Left» та «VN_c_Right», «RO_a_Left» та «RO_a_Right», «RO_b_Left» та «RO_b_Right», «RO_c_Left» та «RO_c_Right», маслобар'єрної ізоляції обмежена баком трансформатора. На зовнішній границі цієї області задано однорідні умови Дирихле (граничні умови першого роду). Тобто величина векторного потенціалу з нульовим значенням визначає, що електромагнітне поле не виходить за межі бака. Побудова геометричної моделі та завдання електрофізичних властивостей її підобластей доповнюється завданням значень струмів обмоток ВН і НН різних фаз через відповідний інтерфейс схемних параметрів FEMM.

На рисунку 1 показана розрахункова область з побудованою картиною поля у вигляді ліній магнітного потоку за допомогою ПЗ FEMM та результатами які виводяться у вигляді інформаційних вікон.

З рисунку 1 видно, що магнітне поле трансформатора ТМН-1600/35-У1 при опитному короткому замиканні зосереджене в основному в обмотках та в каналі розсіяння між ними, але частково воно захоплює й зону магнітної системи. Для подальшої обробки отриманих даних використовуємо програму MathCAD. В ході розрахунку проводимо 13 дослідів, які відповідають ступеням регулювання фазної напруги обмотки ВН. Під час кожного дослідів у властивостях блоків VN змінювались значення струмів в комплексній формі.

Із застосуванням інтерфейсів програми FEMM, спеціальних меню відповідних вікон цієї програми на основі дискретних даних моделювання режиму короткого замикання було визначено енергія магнітного поля трансформатора ТМН-1600/35-У1 (табл. 2).

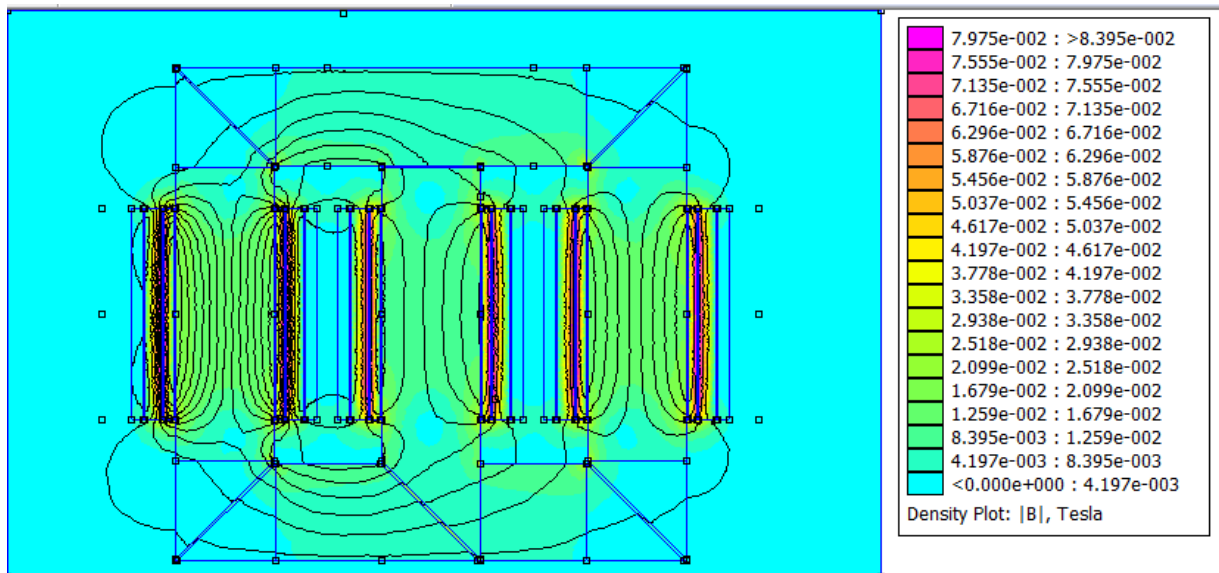


Рис.1. Зонна картина поля розподілення магнітної індукції трансформатора ТМН – 1600/35 – У1

Таблиця 2

Енергія магнітного поля трансформатора ТМН – 1600/35 – У1, визначена ПЗ FEMM

Ступені РПН	W_{VN} , витків	Енергія поля в зоні магнітної системи	Енергія поля з урахуванням зони обмоток та каналу розсіювання
+6	1161	148,22	143,18
+5	1145	147,02	142,09
+4	1129	145,85	141,02
+3	1113	144,69	139,96
+2	1097	143,56	138,94
+1	1081	142,45	137,93
ном	1065	141,38	136,96
-1	1049	140,34	136,02
-1	1033	139,34	135,13
-3	1017	138,39	134,28
-4	1001	137,49	133,48
-5	985	136,65	132,74
-6	969	135,87	132,06

Засобами FEMM за даними моделювання обчислюється значення магнітних потоків:

$$\Phi_m = \int_{S_m} (B, ds)$$

Для подальшого дослідження визначається інтервал, на якому відбувається сплайнова інтерполяція та виводяться розрахункові значення.

Результатом інтерполяції є сплайнова апроксимація (рис. 2) впливу магнітної системи і

поля поза обмотками на напругу короткого замикання трансформатора ТМН – 1600/35 – У1.

До обробки дискретних даних моделювання застосовуються методи нормування і поліноміальної регресії із ступенями поліномів [8], які дорівнюють

$$r(W_{VN}) = \sum_{i=0}^2 r_i \cdot W_{VN}^i,$$

що дозволило зменшити похибку обробки даних до 3,5 %. Коефіцієнти поліноміальної регресії наводяться у табл. 3.

Коефіцієнти поліноміальної регресії

Ступінь регресії	r^0	r^1	r^2
Коефіцієнт регресії в зоні магнітної системи	1,127	$-6,513 \cdot 10^{-4}$	$5,281 \cdot 10^{-7}$
Коефіцієнт регресії з урахуванням зони обмоток та ізоляційного каналу	1,141	$-6,911 \cdot 10^{-4}$	$5,249 \cdot 10^{-7}$

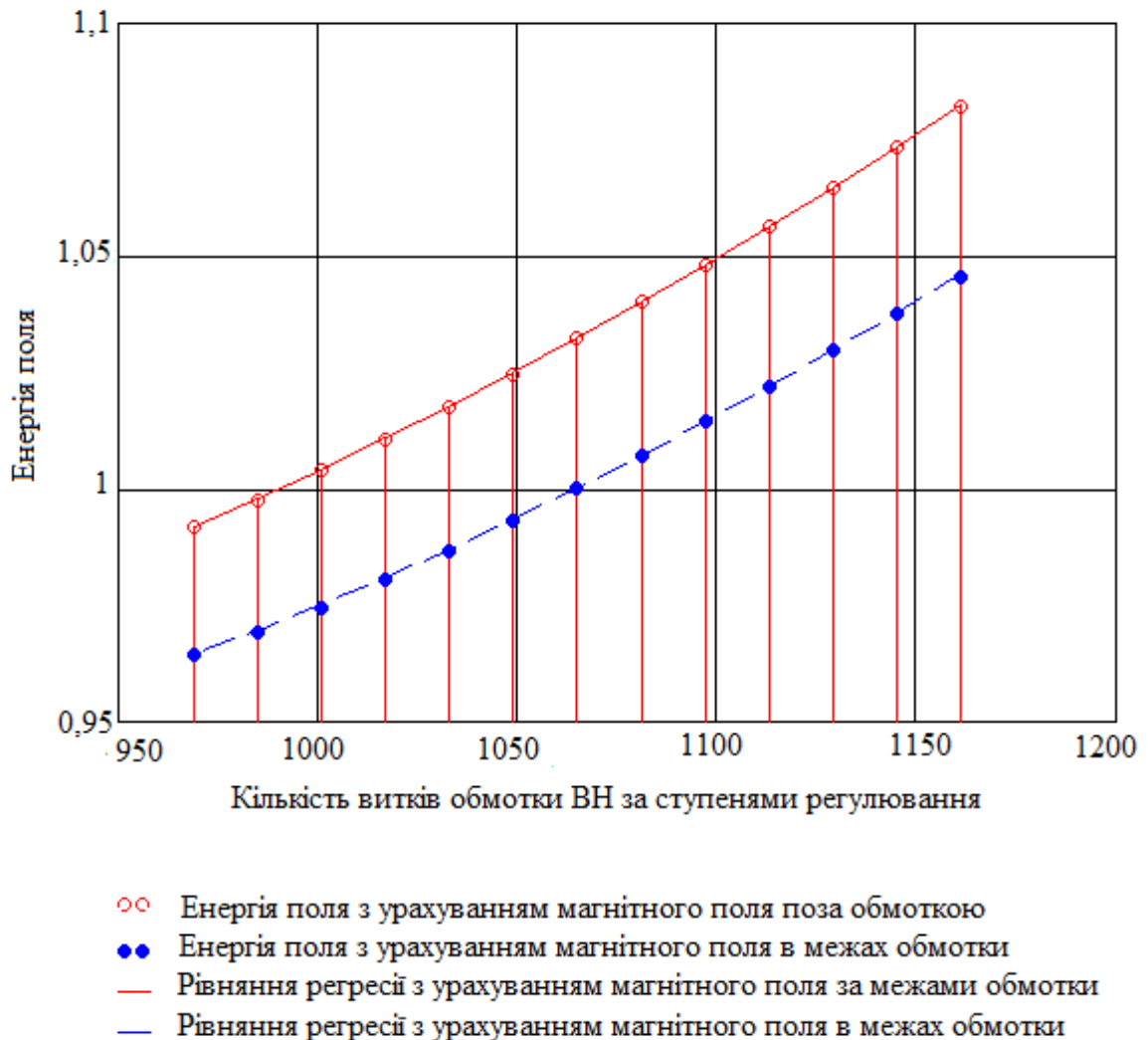


Рис. 2. Графік впливу магнітної системи і магнітного поля поза обмотками на напругу короткого замикання

Верхній графік (червоний) – рівняння, отримане за даними моделювання з урахуванням впливу магнітної системи і магнітного поля поза обмоток. Нижній графік (синій) – рівняння, в якому не враховується дане моделювання (не виходить зі своїх меж), а напруга короткого замикання розраховується тільки по магнітній енергії в обсязі системи обмоток трансформатора.

В практиці проектування прийнято вважати доведеним необхідність користування засобами

математичним моделюванням при розрахунку параметрів КЗ. Це не потребує додаткових витрат та достатньо просто так як ПЗ FEMM має достатньо простий інтерфейс, що дозволяє підвищити точність розрахунків на етапі конструкторської підготовки на 3-4 % при дозволених 10 % на КЗ [1, 3] та конструкторських 5 % що є дуже значним покращенням.

Аналогічно можуть бути визначені параметри КЗ трансформаторів іншої конструкції, потужності та класу точності.

Висновки

Отриманий метод розрахунку магнітної енергії дозволяє збільшити точність визначення напруги короткого замикання на 3 – 4 %, враховуючи вплив магнітної системи і магнітного поля поза обмотками трансформатора.

Запропонований метод розрахунку параметрів КЗ дозволяє збільшити точність розрахунку струмів, динамічної стійкості при КЗ та точність відповідності трансформаторів при ввімкненні їх на паралельну роботу.

Список використаної літератури

1. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. - М.: Энергоатомиздат, 1986, 528 с.
2. Лейтес, Л. В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л. В. Лейтес, А. М. Пинцов. - М.: Энергия, 1974, 192 с.
3. Ярымбаш, Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 1, С.12-17. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-1-2>
4. Васьковський, Ю. М. Польовий аналіз електричних машин [Текст] / Ю. М. Васьковський. К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.
5. Милых, В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания [Текст] / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка та електроенергетика. 2013. № 2, С. 5–13.
6. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика, 2016, № 2, С. 43-50. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
7. Ярымбаш, Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2012. № 2.

С. 55 – 61. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2012-2-10>

8. Буль, О. Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов [Текст] / О. Б. Буль. - М.: Академия, 2005. – 337с.

9. Ярымбаш, Д. С. Особливості розподілу магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 2 С. 5 – 12. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-1>

10. Байда, Е. И. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM [Текст] / Е. И. Байда. - Харьков НТУ ХПИ, 2015, 94 с.

11. Ярымбаш, Д. С. Особенности обработки данных регистрации электрических параметров электротехнических комплексов графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2014. № 2, С. 48–54.

References

1. Tihomirov, P. M. (1986) Calculation transformers [Raschet transformatorov], Moscow, Energoatomizdat, 528 p.
2. Leytes, L. V. (1974) Equivalent circuit multiple winding transformers [Shemyi zamesheniya mnogoobmotochnyih transformatorov], Moscow, Moscow Energy, 192 p.
3. Yarymbash, D. S., Yarymbash S. T., Divchuk T. E., Kylymhyk I. M. (2016) Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling [Osoblivosti viznachennya parametriv korotkogo zamikannya silovih transformatoriv zasobami polovogo modelyuvannya] Zaporozhye, Electrotechnics and electroenergetics № 1, pp. 12–17.
4. Vaskovskiy, Yu. M. (2007) Field analysis of electric machines [Poloviy analiz elektrichnih mashin], Kiev NTU «KHPi», 192 p.
5. Milykh, V. I., Polyakova N. V. (2013) Analysis of harmonic composition of the alternating magnetic field associated with rotating rotor of turbogenerator in the no-load and short-circuits modes [Analiz garmonicheskogo sostava peremennogo magnitnogo polya, svyazannogo s vraschayuschimsya rotorom turbogeneratora, v rezhimakh holostogo hoda i korotkogo zamykaniya] Zaporozhye, Electrotechnics and electroenergetics № 2, pp. 5–13.
6. Yarymbash, D. S., Kotsur M. I., Yarymbash S. T., Kotsur I. M. (2016) Features of three-

dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors [Osobnosti trehmernogo modelirovaniya elektromagnitnyih poley asinhronnogo dvigatelya], Zaporozhye, Electrotechnics and electroenergetics № 2, pp. 43–50.

7. Yarymbash, D. T., Yarymbash S. T., Kylymhyk I. M., Litvinov D. O. (2010) Identification of system characteristics of resistive heating for the transportation of chlorine by methods of mathematical modeling. [Identifikatsiya elektricheskikh parametrov shihtovannyih shinnyih paketov moschnyih korotkih setey] Vestnik NTU KHPI, pp. 398 – 401.

8. Bul, O. B. (2005) Methods of calculation of magnetic systems of electric devices [Metodyi rascheta magnitnyih sistem elektricheskikh apparatov] Moscow, Academy, 337 p.

9. Yarymbash, D. S., Yarymbash S. T., Divchuk T. E., Kylymhyk I. M. (2016) The features

of magnetic flux distribution of the idling mode of the power transformers [OsoblivostI rozpodllu magnitnih potokiv u rezhimI nerobochogo hodu silovih tran-sformatoriv], Zaporozhye, Electrotechnics and electroenergetics №2, pp. 5–12. DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-1

10. Bayda, E. I. (2015) Calculation of electromagnetic and thermal fields using the program FEMM [Raschet elektromagnitnyih i teplovyih poley s pomoschyu programmy FEMM] Kharkov, NTU HPI, 94 p.

11. Yarymbash, D. S. (2014) Features of processing of registration of electrical parameters of electrotechnical complexes of the graphitization AC [Osobnosti obrabotki dannyih registratsii elektricheskikh parametrov elektrotehnicheskikh kompleksov grafitatsii peremennogo toka], Energy saving. Power engineering. Energyaudit № 2, pp. 48–54.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF SHORT CIRCUIT OF POWER TRANSFORMER BY MEANS OF MATHEMATICAL MODELING

D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, T. E. Divchuk, D. A. Litvinov

Zaporozhzhya National Technical University

Abstract. Calculation method of power transformer's short-circuit parameters is presented by mathematical modeling by means software structure FEMM on the example of geometrical model three-phase power transformer, with capacity 1600 kVA, voltage index 35 kV. Transformer's short-circuit parameters calculation has been carried out at the basis of electromagnetic field mathematical model in vector magnetic potential formulations by polynomial regression means. It has been defined the influence of electrotechnical steel nonlinear properties in magnetic system at magnetic field energy and at transformers short-circuit parameters. It has been received the dependence of short-circuit parameters from phase tension values for corresponding voltage control stages. Reliability and accuracy of calculations have been proved by the comparative analysis with a classical technique data and experimental test data in short-circuit mode. It has been shown that by means of mathematical modeling application in software structure FEMM has allowed to increase calculation accuracy of short-circuit parameters at 3-4%.

Keywords: Mathematical model, magnetic field, vector magnetic potential, finite element method, short-circuit, magnetic induction, phase voltage, current load.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Е. Дивчук, Д. А. Литвинов

Запорожский национальный технический университет

Аннотация. Представлена методика расчета параметров короткого замыкания силового трансформатора средствами математического моделирования в структуре ПО FEMM на примере геометрической модели силового трансформатора типа ТМН – 1600/35 – У. Определено влияние нелинейных свойств электротехнической стали магнитной системы на энергию магнитного поля и параметры короткого замыкания трансформатора. Получена зависимость параметров короткого замыкания от значений фазного напряжения соответствующих ступеней регулирования.

Ключевые слова: Математическая модель, магнитное поле, векторный магнитный потенциал, метод конечных элементов, короткое замыкание, магнитная индукция, фазное напряжение, токовая нагрузка.

Отримано 15.05.2017



Яримбаш Дмитро Сергійович, доктор технічних наук, доцент, завідуючий кафедрою Електричних машин Запрізького національного технічного університета. Вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, E-mail: yarymbash@gmail.com, тел. +380(61)7698411

Yarymbash D.S., Dr. of Science, Associat. Prof., Head of the Department of Electrical machine, Zaporozhzhya National Technical University, Zhukovskogo ave., 64, Zaporozhye, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-2324-9303



Яримбаш Сергій Тимофійович, кандидат технічних наук, доцент, проректор з науково – педагогічної роботи і виховання студентів Запрізького національного технічного університета. Вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, E-mail: kstj06@gmail.com, тел. +380(61)7698411

Yarymbash S. T., Candidat of Engineering Sciences, Associat. Prof, Vice-rector for scientific and pedagogical work and education of students, Zaporozhzhya National Technical University, Zhukovskogo ave., 64, Zaporozhye, Ukraine

ORCID ID: 0000-0003-4661-7076



Дівчук Тетяна Євгеніївна, старший викладач кафедри Електричних машин Запрізького національного технічного університета. Вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, E-mail: DIV2009@i.ua, тел. +380(61)7698411

Divchuk T. E. Senior lecturer Zaporozhzhya National Technical University, Zhukovskogo ave., 64, Zaporozhye, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-9947-8527



Літвінов Дмитро Олександрович, старший викладач кафедри Електричних машин Запрізького національного технічного університета. Вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, E-mail: delit@mail.ru тел. +380(61)7698411

D. A. Litvinov Senior lecturer Zaporozhzhya National Technical University, Zhukovskogo ave., 64, Zaporozhye, Ukraine

ORCID ID: 0000-0002-4043-954X