

## I. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.013.1

Яримбаш Д. С.<sup>1</sup>, Яримбаш С. Т.<sup>2</sup>, Дівчук Т. Є.<sup>3</sup>, Килимник І. М.<sup>4</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com<sup>2,4</sup>Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна<sup>3</sup>Старш. викладач, Запорізький національний технічний університет, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛЕННЯ МАГНІТНИХ ПОТОКІВ У РЕЖИМІ НЕРОБОЧОГО ХОДУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

**Мета роботи.** Розробка нового підходу до математичного моделювання у структурі засобів FEMM змінних у часі процесів електромагнітного перетворення енергії в силових розподільчих трансформаторах і визначення параметрів неробочого ходу з урахуванням нелінійних магнітних властивостей електротехнічних сталей і особливостей конструкції трифазних шихтованих магнітних систем, що забезпечує підвищення точності визначення розподілення магнітних потоків і параметрів неробочого ходу.

**Методи досліджень.** Чисельне моделювання зв'язаних електричних та магнітних полів в силових розподільчих трансформаторах методами скінчених елементів та теорії електромагнітного поля.

**Отримані результати.** Представлено теоретичні дослідження моделювання зв'язаних електричних та магнітних полів на основі чисельної реалізації методом скінчених елементів узагальненої 2D моделі силового розподільчого трансформатора, яка дозволяє врахувати нелінійність магнітних властивостей електротехнічної сталі та зміни кутових зсувів струмів фазних обмоток у режимі неробочого ходу. Проаналізовано розподілення і форми часових кривих магнітних потоків у магнітній системі трифазного розподільчого трансформатора. Визначено гармонійний склад часових кривих магнітних потоків у стрижнях, ярах, кутах магнітної системи і відповідні коефіцієнти несинусоїдальності. Виконано корегування для розподілу діючих значень магнітних потоків у кутах для визначення активної та реактивної потужності в трифазних магнітних системах, що забезпечує підвищення точності розрахунку параметрів неробочого ходу трифазного розподільчого трансформатора.

**Наукова новизна.** Запропоновано методику для аналізу розподілення і форми часових кривих магнітних потоків у магнітній системі трифазного розподільчого трансформатора, яка дозволяє врахувати нелінійність магнітних властивостей електротехнічної сталі та зміни кутових зсувів струмів фазних обмоток у режимі неробочого ходу. Визначено гармонійний склад часових кривих магнітних потоків в магнітній системі трифазного розподільчого трансформатора і відповідні коефіцієнти несинусоїдальності, а також встановлено їх кількісні відмінності у стрижнях, ярах, кутах магнітної системи.

**Практична значимість.** Запропоновано методику корегування для розподілу діючих значень магнітних потоків у кутах для визначення активної та реактивної потужності в трифазних магнітних системах, яка забезпечує підвищення точності розрахунку параметрів неробочого ходу трифазного розподільчого трансформатора (відносна похибка до 5%) на етапі конструкторської підготовки виробництва.

**Ключові слова:** математична модель, магнітне поле, векторний магнітний потенціал, метод скінчених елементів, неробочий хід, трифазний силовий трансформатор, гармонійний склад, магнітний потік, активна і реактивна потужність.

## ВСТУП

При низькому завантаженні виробничої потужності промислових підприємств, насамперед електрометалургійних, реактивна потужність багатьох розподільчих силових трансформаторів, що працюють у режимі неробочого ходу, істотним чином впливає на роботу енергосистем, особливо на втрати від перетікання реактивної енергії [1]. Це потребує зменшення струмів неробочого ходу для нових типів розподільчих трансформаторів, а також підвищення точності розрахунку параметрів неробочого ходу шляхом застосування сучасних моделей і програмних засобів для підвищення точності визначення параметрів, похибка яких при застосуванні діючої інженерної методики може сягати до 30% [2].

До паспортних даних трансформатора, які потребують обов'язкового визначення для кожного виготовленого або відремонтованого розподільчого трансформа-

тора, відносяться струм і активні втрати неробочого ходу. Струм неробочого ходу є питомою характеристикою реактивної потужності трансформатора, точність визначення якої є недостатньою і потребує істотного поліпшення. Сучасні інженерні методики для визначення параметрів неробочого ходу потребують великої кількості коригуючих коефіцієнтів, що визначаються шляхом порівняльного аналізу розрахункових параметрів і даних випробувань у дослідних і виробничих умовах. Таким чином, достовірна область їх застосування обмежується лише проектуванням окремих типів в існуючих серіях трансформаторів.

Для розробки нових серій енергоефективних розподільчих трансформаторів, як правило, застосовуються сучасні програмні засоби математичного моделювання електромагнітних процесів перетворення енергії змінного струму, наприклад ANSYS, Maxwell, Edmag3D,

COMSOL Multiphysics, [3]. Наведені програми характеризуються великою вартістю, складними інтерфейсами, значними вимогами відносно швидкодії та ресурсів обчислювальної техніки, що істотно обмежує доступ до них користувачів проектних установ і підприємств.

Альтернативою до наведених програмних засобів є універсальні програмні пакети математичного моделювання, які мають статус freeware. Вони є доступними і зручними в інженерній практиці але мають обмеження щодо моделювання змінних у часі процесів. Тому розробка методики застосування сучасних засобів математичного моделювання і програмного забезпечення із статусом freeware для підвищення ефективності конструкторської підготовки виробництва є актуальною задачею у науковому і практичному плані. Одним із найбільш розповсюджених пакетів програм є FEMM (Finite Element Method Magnetics) [4], але його застосування обмежено лише 2D частотними моделями або моделями постійного струму. Це потребує розробки спеціальних підходів і методики для моделювання процесів електромагнітного перетворення енергії змінного струму у середовищах з нелінійними магнітними властивостями.

## ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є розробка нового підходу до математичного моделювання у структурі засобів FEMM змінних у часі процесів електромагнітного перетворення енергії в силових розподільчих трансформаторах і визначення параметрів неробочого ходу з урахуванням нелінійних магнітних властивостей електротехнічних сталей і особливостей конструкції трифазних шихтованих магнітних систем, що забезпечує підвищення точності визначення розподілення магнітних потоків і параметрів неробочого ходу.

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

Необхідно взяти до уваги позитивний досвід застосування FEMM до чисельно-польового моделювання обертових електричних машин, які збуджуються синусоїдально змінними у часі струмами, а також до розрахунку струмів, що індуковані змінним магнітним полем у провідникових середовищах [5]. Із врахуванням подібності електромагнітних процесів в обертових електричних машинах і силових трансформаторах у режимі неробочого ходу математичній моделі змінного у часі електромагнітного поля ставлять у відповідність сукупність стаціонарних моделей постійного струму, значення якого відповідають миттєвим значенням струмів обмоток різних фаз трансформатора у визначені моменти часу. Наведені припущення повністю відповідають класичному підходу до визначення впливу нелінійних властивостей електротехнічної сталі магнітної системи на форму кривих індукції та магнітних потоків у поперечних перерізах стрижнів і ярм [2].

Таким чином, математичній моделі змінного у часі магнітного поля у формулюваннях векторного магнітного потенціалу [4,6]:

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

можна поставити у відповідність вектор математичних моделей стаціонарного магнітного поля [4]:

$$\begin{cases} \operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu_0 \cdot \mu(\mathbf{H}_k)}\operatorname{rot}\mathbf{A}_k\right) = \mathbf{J}_k, \\ \mathbf{B}_k = \operatorname{rot}\mathbf{A}_k, \\ \mathbf{B}_k = \mu_0 \cdot \mu(\mathbf{H}_k) \cdot \mathbf{H}_k, \\ \mathbf{H}_k = \mathbf{i} \cdot \mathbf{H}_{xk} + \mathbf{j} \cdot \mathbf{H}_{yk}, k = (1, \dots, K) \end{cases} \quad (2)$$

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

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

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

$$\{\tau_k\} = \{(k-1) \cdot \Delta\tau\}, k = (1, \dots, K), \Delta\tau = 0,02/(K-1), \quad (4)$$

де  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}_k$  – векторні магнітні потенціали,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{H}$  – вектори магнітної індукції та напруженості магнітного поля із проекціями,  $\mu_0 \cdot \mu$  – магнітна проникність підобластей у розрахунковій області,  $W$  – число 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,  $\omega$  – кутова частота,  $\Delta\tau$  – часовий такт,  $\tau_k$  – момент часу  $k$ -го такту.

Береться до уваги, що трифазні розподільчі силові трансформатори мають плоский тип магнітної системи. Тому достатньо обмежитися 2D областю моделювання у перерізі силового трансформатора вертикальною площиною. Вказана площина проходить через осі стрижнів

магнітної системи. До розрахункової області взято магнітну систему із стрижнями, ярмами, кутами із повним косим стиком, первинними обмотками і баком трансформатора. Товщину конструкційної сталі баку трансформатора для режиму неробочого ходу можна не враховувати. Контур баку збігається із зовнішньою конфігурацією розрахункової області. Глибина розрахункової області обирається таким чином, щоб площа ступінчастих стрижнів фаз співпадала із площами відповідних прямокутників із сторонами, які дорівнюють діаметрам стрижнів.

Система рівнянь (1) замикається векторами граничних умов і умов спряження. На зовнішньому контурі Г 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  $\tau_k$ :

$$\{\mathbf{A}_k|_{\Gamma} = 0\}, k = (1, \dots, K). \quad (4)$$

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:

$$\{\mathbf{H}_{\tau k,1} = \mathbf{H}_{\tau k,2}\}_{\Pi} = 0. \quad (5)$$

Магнітні властивості електротехнічної сталі задаються дискретними масивами  $\{B_j, H_j\}$ , що відображають залежність магнітної індукції від напруженості магнітного поля.

Перевагою FEMM є наявність засобів, які дозволяють інтерполювати наведені дискретні масиви методами сплайн-інтерполяції та отримати безперервну функцію залежності  $B = f(H)$

### ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

В режимі неробочого ходу розрахунки магнітного поля в 2D області активної частини силового трансформатора ТМ 1600/35 здійснюються шляхом реалізації математичної моделі (1)–(5) методом скінчених елементів у програмному пакеті FEMM для 40 миттєвих значень часу із тактом 0,005 с.

За допомогою інтерфейсу візуалізації програми FEMM отримуються розподіли силових ліній (ліній рівня для різних сталей значень векторного магнітного потенціалу) та модулів магнітної індукції по поверхні 2D області моделювання (рис. 1), які також оцифровуються і накопичуються, як файли чисельно-польового експерименту.

Засобами FEMM за даними моделювання для кожного моменту часу обчислюються значення магнітних потоків у стрижнях, ярмах і кутах з косим стиком для крайніх стрижнів магнітної системи:

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

та середні значення індукції:

$$B_m = \Phi_m / S_m,$$

які представлено на рис. 2.

Всі криві середніх значень індукції характеризуються областями сплюснення, протяжність яких наближається до 24% від часового періоду.

Для подальшого аналізу визначаються діючі значення індукції:

$$B_{mд} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T B_m^2 dt} \approx \sqrt{\frac{1}{40} \sum_{k=1}^{40} B_{m,k}^2}. \quad (6)$$

та коефіцієнти гармонійних складових:

$$\left\{ \begin{aligned} a_{kA} &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдA_i} \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot i \Delta \tau), b_{kA} = \\ &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдA_i} \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot i \Delta \tau), \\ a_{kB} &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдB_i} \cdot \cos\left(k \cdot \left(\omega \cdot i \Delta \tau - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)\right), b_{kB} = \\ &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдB_i} \cdot \sin\left(k \cdot \left(\omega \cdot i \Delta \tau - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)\right), \\ a_{kC} &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдC_i} \cdot \cos\left(k \cdot \left(\omega \cdot i \Delta \tau - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)\right), b_{kC} = \\ &= \frac{2}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} B_{mдC_i} \cdot \sin\left(k \cdot \left(\omega \cdot i \Delta \tau - \frac{4 \cdot \pi}{3}\right)\right) \end{aligned} \right. \quad (7)$$

у гармонійній апроксимації середніх значень індукції в стрижнях (рис. 2)

$$\left\{ \begin{aligned} B_A(\tau) &= a_{0A} / 2 + \\ &+ \sum_{i=0}^K [a_{iA} \cos(\omega \cdot \tau) + b_{iA} \sin(\omega \cdot \tau)], \\ B_B(\tau) &= a_{0B} / 2 + \\ &+ \sum_{i=0}^K [a_{iB} \cos(\omega \cdot \tau - 2\pi/3) + b_{iB} \sin(\omega \cdot \tau - 2\pi/3)], \\ B_C(\tau) &= a_{0C} / 2 + \\ &+ \sum_{i=0}^K [a_{iC} \cos(\omega \cdot \tau - 4\pi/3) + b_{iC} \sin(\omega \cdot \tau - 4\pi/3)] \end{aligned} \right. \quad (8)$$

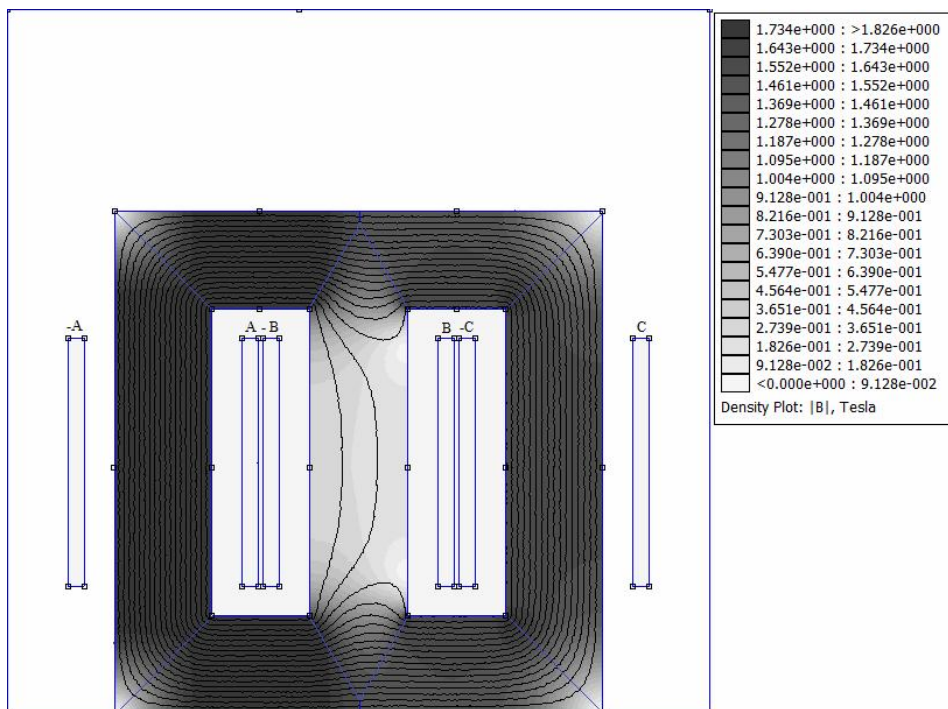


Рисунок 1 – Розподіл ліній рівного магнітного потенціалу та індукції магнітного поля трансформатора для режиму неробочого ходу

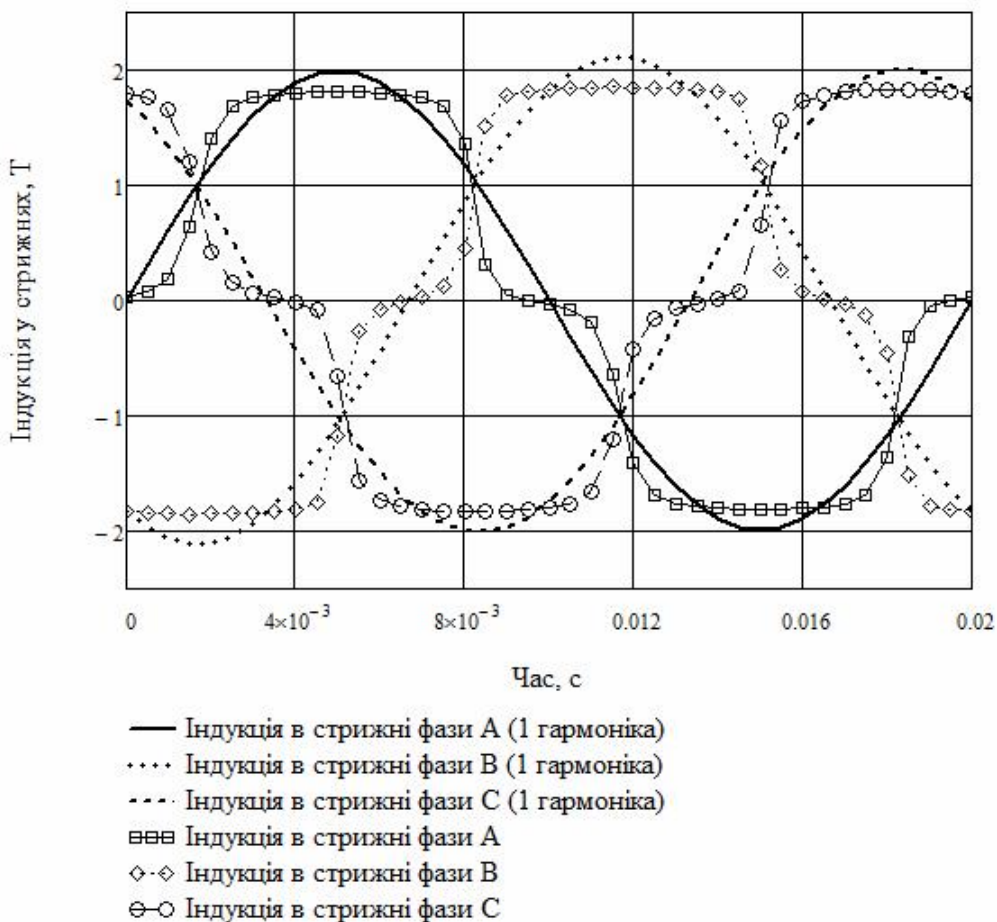


Рисунок 2 – Часові зміни індукції магнітного поля у стрижнях трансформатора для режиму неробочого ходу

із амплітудами та діючими значеннями індукцій у відповідних стрижнях:

$$\begin{cases} B_{mA_i} = \sqrt{a_{iA}^2 + b_{iA}^2}, B_{дA_i} = B_{mA_i} / \sqrt{2}, \\ B_{mB_i} = \sqrt{a_{iB}^2 + b_{iB}^2}, B_{дB_i} = B_{mB_i} / \sqrt{2}, \\ B_{mC_i} = \sqrt{a_{iC}^2 + b_{iC}^2}, B_{дC_i} = B_{mC_i} / \sqrt{2}, \end{cases} \quad (9)$$

за якими визначаються також коефіцієнти несинусоїдності:

$$\begin{aligned} & \left\{ K_A = \sqrt{\sum_{i>1}^K (B_{mA_i})^2} / B_{mA_1}, K_B = \right. \\ & \left. = \sqrt{\sum_{i>1}^K (B_{mB_i})^2} / B_{mB_1}, K_C = \sqrt{\sum_{i>1}^K (B_{mC_i})^2} / B_{mC_1} \right\}. \quad (10) \end{aligned}$$

Для сплющеної форми часових кривих індукцій у стрижнях (рис. 2) коефіцієнти несинусоїдності (10) наближаються до 20%.

Відповідно до інженерної методики розрахунок параметрів неробочого ходу здійснюється лише за діючими значеннями перших гармонійних

складових індукцій у стрижнях  $\left( \frac{B_{mA_1} + B_{mB_1} + B_{mC_1}}{3 \cdot \sqrt{2}} \right)$ ,

ярмах  $\frac{1}{k_{\text{я}}} \cdot \left( \frac{B_{mA_1} + B_{mB_1} + B_{mC_1}}{3 \cdot \sqrt{2}} \right)$  і косих стиках –

$\left( \frac{B_{mA_1} + B_{mB_1} + B_{mC_1}}{6} \right)$ .

Похибка інженерних розрахунків діючих значень індукцій не перевищує 1,00% у порівнянні з даними чисельно-польового моделювання і співвідношення (6).

Засобами чисельно-польового моделювання доводиться, що припущення інженерної методики щодо рівномірного розподілу індукцій у стиках крайніх стрижнів (фази А, С) із верхніми та нижніми ярмами не виконуються, адже цей розподіл є різко нерівномірним (рис. 3). Оскільки залежності питомих втрат і питомої реактивної

потужності від значень індукції є нелінійними, то значно збільшується їх нерівномірність у косих стиках (рис. 3).

До обробки дискретних даних моделювання застосовуються методи нормування і поліноміальної регресії із ступенями поліномів, які дорівнюють 6

$$\begin{aligned} & \{B_{cm}(r), p_{cm}(r), q_{cm}(r)\} = \\ & = \left\{ \sum_{i=0}^6 \tilde{b}_{cm,i} \cdot r^i, \sum_{i=0}^6 \tilde{p}_{cm,i} \cdot r^i, \sum_{i=0}^6 \tilde{q}_{cm,i} \cdot r^i \right\}, \quad (11) \end{aligned}$$

що дозволило зменшити похибку обробки даних до 0,925%. Коефіцієнти поліноміальної регресії наводяться у табл. 1.

Втрати і реактивні потужності у косих стиках зовнішніх кутів магнітної системи розраховуються із застосуванням нормованих рівнянь поліноміальної регресії (11). Відзначається, що для дослідного трансформатора активні втрати у косих стиках є більшими на 17,386%, а реактивна потужність – на 39,242% порівняно із значеннями, які розраховуються за класичною інженерною методикою [2]. Це призводить до визначення активних втрат неробочого ходу більшими на 2,4% і струму неробочого ходу на 5,6% щодо розрахунків за інженерною методикою. Наведені похибки інженерної методики, як правило, компенсують шляхом введення коригуючих емпіричних коефіцієнтів, які визначають шляхом обробки даних багатьох трансформаторів різних типів і потужності [2]. Але дані коефіцієнти є достовірними лише для проектування трансформаторів у межах їх попередніх серій.

Запропонований підхід до визначення параметрів неробочого ходу трансформатора врахує нерівномірність розподілу індукції у косих стиках ярм і крайніх стрижнів. Це усуває вказаний недолік інженерної методики розрахунку і розширює область її застосування для проектування нових трансформаторів поза існуючими серіями та для нових марок електротехнічних сталей. Застосування чисельно-польового моделювання в структурі засобів FEMM не потребує будь-яких витрат на дороге спеціалізоване програмне забезпечення, а простота інтерфейсу FEMM не висуває додаткових вимог до проєктантів.

### ВИСНОВКИ

Запропонована 2D модель магнітного поля силового трансформатора в режимі неробочого ходу і методика

Таблиця 1 – Коефіцієнти поліноміальної регресії

Ступінь	$r^0$	$r^1$	$r^2$	$r^3$	$r^4$	$r^5$	$r^6$
Індукція	1	-0,384	4,33	-20,945	40,754	-38,458	13,703
Питомі втрати	0,999	-0,024	-1,378	4,212	-15,317	17,759	-6,25
Питома реактивна потужність	0,998	-1,009	9,538	-49,542	85,588	-61,549	15,976

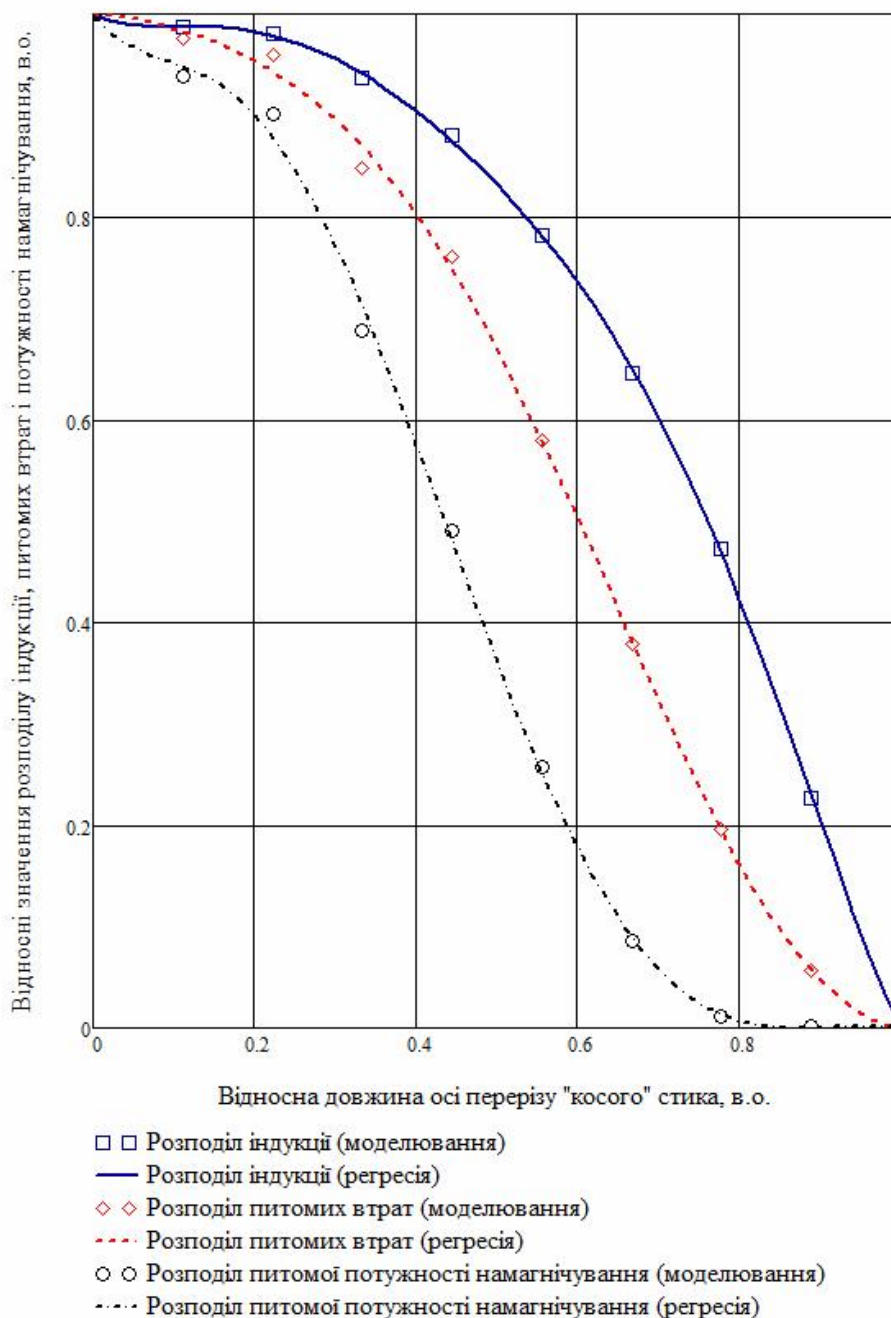


Рисунок 3 – Розподіл нормованих значень індукції, питомих втрат і потужності намагнічування в «косому» стика

чисельно-польового моделювання дозволяють врахувати впливи вищих гармонійних складових магнітного потоку і нерівномірність розподілу індукції у косих стиках крайніх стрижнів на питомі втрати і питому реактивну потужність.

Використання методів нормування і поліноміальної регресії забезпечує достовірне визначення додаткових втрат у косих стиках, розширює область застосування інженерної методики для проектування нових типів силових трансформаторів і електротехнічних сталей та істотно підвищує точність розрахунку параметрів неробочого ходу із зменшенням похибок майже на 5%.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена Наказом Міністерства палива та енергетики України 17 січня 2002 р. № 19, зареєстрована в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за № 93/6381, <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0093-02>.
2. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.

- 3 Васьковський Ю. М., Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.
- 4 Байда Е. І. Расчет электромагнитных и тепловых полей с помощью программы FEMM / Е. І. Байда – Харьков НТУ ХПИ, 2015 – 94 с.
- 5 Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка та електроенергетика – 2013. – №2. – С. 5–13.
- 6 Буль О. Б., Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов/ О. Б. Буль – М.: Академия, 2005. – 337с.

Ярымбаш Д. С.<sup>1</sup>, Ярымбаш С. Т.<sup>2</sup>, Дивчук Т. Е.<sup>3</sup>, Килимник І. М.<sup>4</sup>,

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина, e-mail: Yarymbash@gmail.com

<sup>2,4</sup>Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина,

<sup>3</sup>Старш. преподаватель, Запорожский национальный технический университет, Украина.

#### **ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ В РЕЖИМЕ ХОЛОСТОГО ХОДА СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ**

**Цель работы.** Разработка нового подхода к математическому моделированию в структуре средств FEMM переменных во времени процессов электромагнитного преобразования энергии в силовых распределительных трансформаторах и определение параметров холостого хода с учетом нелинейности магнитных свойств электротехнических сталей и особенностей конструкции трёхфазных шихтованных магнитных систем, которая обеспечивает повышение точности определения распределения магнитных потоков и параметров холостого хода.

**Методика исследования.** Численное моделирование сопряженных электрических и магнитных полей в силовых распределительных трехфазных трансформаторах методами конечных элементов и теории электромагнитного поля.

**Полученные результаты.** Представлены теоретические исследования моделирования сопряженных электрических и магнитных полей на основе численной реализации методом конечных элементов обобщенной 2D модели силового распределительного трансформатора, которая позволяет учесть нелинейность магнитных свойств электротехнической стали и изменения угловых смещений токов фазных обмоток в режиме холостого хода. Проанализированы распределения и формы временных кривых магнитных потоков в магнитной системе трехфазного распределительного трансформатора. Определены гармоничный состав временных кривых магнитных потоков в стержнях, ярмах, углах магнитной системы и соответствующие коэффициенты несинусоидальности. Выполнено корректировка распределения действующих значений магнитных потоков в углах для определения активной и реактивной мощности в трехфазных магнитных системах, которая обеспечивает повышение точности расчета параметров холостого хода трехфазного распределительного трансформатора.

**Научная новизна.** Предложена методика анализа распределения и формы временных кривых магнитных потоков в магнитной системе трехфазного распределительного трансформатора, которая позволяет учесть нелинейность магнитных свойств электротехнической стали и изменения угловых смещений токов фазных обмоток в режиме холостого хода. Определены гармоничный состав временных кривых магнитных потоков магнитной системе трехфазного распределительного трансформатора и соответствующие коэффициенты несинусоидальности, а также установлены их количественные различия в стержнях, ярмах, углах магнитной системы.

**Практическая значимость.** Предложена методика корректировки распределения действующих значений магнитных потоков в углах для определения активной и реактивной мощности в трехфазных магнитных системах, которая обеспечивает повышение точности расчета параметров холостого хода трехфазного распределительного трансформатора (относительная погрешность до 5%) на этапе конструкторской подготовки производства.

**Ключевые слова:** математическая модель, магнитное поле, векторный магнитный потенциал, метод конечных элементов, холостой ход, трехфазный силовой трансформатор, гармонический состав, магнитный поток, активная и реактивная мощности.

Yarymbash D. S.<sup>1</sup>, Yarymbash S. T.<sup>2</sup>, Divchuk T. E.<sup>3</sup>, Kylymnik I. M.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Engineering Sciences, Associat. Prof., Zaporozhzhya National Technical University, Ukraine

<sup>2,4</sup>Candidat of Engineering Sciences, Associat. Prof., Zaporozhzhya National Technical University, Ukraine

<sup>3</sup>Senior lecturer, Zaporozhzhya National Technical University, Ukraine

#### **THE FEATURES OF MAGNETIC FLUX DISTRIBUTION OF THE IDLING MODE OF THE POWER TRANSFORMERS**

**Purpose.** The development of a new implementation of mathematical modeling in the FEMM tools structure to time variable processes of electromagnetic energy transformation in power distribution transformers and determination of idle parameters in view of nonlinear magnetic properties of electrical steels and features design of three phase magnetic systems to provide the accuracy increase of the magnetic flux distribution and idle parameters.

**Research methods.** Numerical modeling of the conjugate electric and magnetic fields in the three-phase power transformer by finite element method and theory of electromagnetic field.

**The obtained results.** The theoretical research and modeling of the conjugate electric and magnetic processes on the basis of realization by numerical finite element method of the generalized two-dimensional models of the three-phase power transformer are proposed. The nonlinearity of the magnetic properties of electrical steel and the change of the phase angles of the currents in the phase windings at idle are taken into account. The distribution and form of the time dependences of the magnetic fluxes in the magnetic system of the three-phase power transformer are analyzed. The harmonic components of the time dependences of the magnetic fluxes in the cores, the yokes, the magnetic system corners and related non-sinusoidal coefficients are defined. The correction of the distribution of the magnetic flux values in the corners and calculations of the three-phase systems active and reactive power are made. The calculation accuracy of parameters of three-phase distribution transformer idling is increased.

**Scientific novelty.** The technique for the analysis of distribution and form of the time dependences of the magnetic fluxes in the magnetic system of the three-phase power transformer are presented, the non-linear magnetic properties of electrical steel and the change of the phase angles of the currents in the phase windings at idle are taken into account. The harmonic components of the time dependences of the magnetic fluxes and related non-sinusoidal coefficients are defined, their differences in the cores, the yokes, the magnetic system corners are set.

**Practical significance.** The method of correction for the distribution of the magnetic flux value in the corners and calculations of the three-phase systems active and reactive power are proposed. The calculation accuracy of parameters of three-phase distribution transformer idling (relative error is to 5%) at the design stage is increased.

**Keywords:** the mathematical model, the magnetic field, the magnetic vector potential, finite element method, idling, three-phase power transformer, harmonic structure, magnetic flux, active and reactive power.

## REFERENCES

1. Metodyka obchyslennia platy za peretikannia reaktivnoi elektroenerhii mizh elektroperedavalnoiu orhanizatsiieiu ta yii spozhyvachamy. Zatverdzhena Nakazom Ministerstva palyva ta enerhetyky Ukrainy 17 sichnia 2002 r. № 19, zareiestrovana v Ministerstvi yustytstii Ukrainy 1 liutoho 2002 r. za № 93/6381, <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0093-02>.
2. Tihomirov P. M. Raschet transformatorov. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 528 p.
3. Vaskovskiy Iu. M. Polovyi analiz elektrychnykh mashyn. Kiev, NTUU «KPI», 2007, 192 p.
4. Baida E. Y. Raschet elektromahnytnykh y teplovykh polei s pomoshchiu prohrammy FEMM. Kharkov NTU KhPI, 2015, 94 p.
5. Milyih V. I., Polyakova N. V. Analiz garmonicheskogo sostava peremennogo magnitnogo polya, svyazannogo s vraschayuschimsya rotorom turbogeneratora, v rezhimakh holostogo hoda i korotkogo zamyikaniya, *Elektrotekhnikha ta elektroenerhetyka*, 2013, No 2, pp. 5–13.
6. Bul O. B. Metodyi rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Moscow, Akademiya, 2005, 337 p.