

УДК 621.316.13

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД СТРУМІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

- ДІВЧУК Т.Є.** старший викладач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: DIV2009@i.ua;
- ЯРИМБАШ Д.С.** д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: yarymbash@gmail.com;
- КОЦУР М.І.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних та електронних апаратів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kotsur8@gmail.com;
- ЯРИМБАШ С.Т.** канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних машин Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: kstj06@gmail.com;

Мета роботи. Метою роботи є визначення гармонійного складу струмів неробочого ходу силового трансформатора із застосуванням просторових польових моделей, що враховують конструктивну будову активної частини трансформатора, гістерезис нелінійних магнітних властивостей електротехнічної сталі, електричну асиметрію струмів у фазних обмотках.

Методи дослідження. Дослідження проводилися з використанням методів гармонійного аналізу, теорії магнітних полів, теорії електричних ланцюгів, теорії силових трансформаторів, методів скінченних елементів, симетричних складових.

Отримані результати. На основі чисельної реалізації 3D моделей магнітного поля у силовому трифазному трансформаторі із з'єднанням первинних обмоток за схемою «У» визначено гармонійний склад фазних струмів неробочого ходу. Застосовано удосконалений підхід для підвищення ефективності польового моделювання дослідного режиму неробочого ходу шляхом завдання умов симетрії магнітного поля на площині з осями стрижнів магнітної системи. Це дозволило скоротити об'єм 3D геометричної області у 2 рази та забезпечити пропорційне зменшення часових і обчислювальних ресурсів, необхідних для числової реалізації математичної моделі методом скінчених елементів. Визначено особливості несинусоїдних змін у часі миттєвих значень струмів неробочого ходу та зроблено оцінку їх нерівномірного розподілу по фазах трансформатора, який характеризується збільшенням діючих струмів до 113,2%, 112,9% у фазах А і С та їх зменшенням до 72,4% у фазі В. Показано, що амплітуда основної гармоніки зменшується для прямої послідовності фаз на 5,08% від амплітуди струму неробочого ходу трансформатора і збільшується до 27,91% для зворотної послідовності фаз. Встановлено переважний вплив непарних вищих гармонійних складових фазних струмів НХ, амплітуди яких складають 24, 21% і 4% від амплітуди струму НХ для його третьої, п'ятої і сьомої гармоніки. Застосування системи компенсуючих обмоток, що приєднуються до регулювальних обмоток у зворотній послідовності фаз із фазовим зсувом 120 градусів дозволяє скоротити діюче значення струму НХ зворотної послідовності до 5%, наблизити діюче значення першої гармоніки струму НХ прямої послідовності фаз до 98% струму НХ, а також зменшити відхилення кутів фазових зсувів у порівнянні із симетричним режимом НХ до 2%.

Наукова новизна. На основі теоретичних і експериментальних досліджень визначено переважний вплив третіх гармонійних складових на несинусоїдність фазних струмів неробочого ходу у первинних обмотках, що з'єднані у «У». Застосування додаткових граничних умов симетрії забезпечує істотне підвищення ефективності числової реалізації завдяки двократному скороченню об'єму 3D області моделювання силового трансформатора у режимі неробочого ходу. Для схеми з'єднання обмоток трансформатора «У» без нульового проводу шляхом врахування сполучених впливів властивостей гістерезису і вихрових струмів на питоми втрати і потужність намагнічування, завдяки високій точності опису взаємозв'язків між індукцією та напруженістю магнітного поля у феромагнітних середовищах визначено і експериментально підтверджено нові особливості гармонійного складу струмів неробочого ходу із перевагою третьої гармоніки.

Практична цінність. Запропоновані в роботі підходи та методики дозволяють зменшити струмову похибку і відносну похибку для втрат НХ до 1,41% і 1,2% для 3D моделі трифазного силового трансформатора. Застосування системи КО дозволяє скоротити у 2 – 2,5 рази амплітуди третіх гармонійних складових фазових струмів НХ і шляхом симетрування струмового навантаження фаз зменшити амплітуди фазних струмів НХ і діюче значення струму НХ на 15 – 20 % та втрати НХ – на 14 – 16%.

Ключові слова: польова модель; трифазний трансформатор; неробочий хід, магнітне поле; метод кінцевих елементів; гармонійний аналіз; несинусоїдні і несиметричні струми.

I. ВСТУП

У розподільчих електричних мережах встановлена потужність силових трансформаторів багатократно (у 6-8 раз) переважає встановлену потужність споживання. Втрати енергії, які виникають з моменту підключення трансформаторів до мережі, гармонійний склад і нерівномірний розподіл фазних струмів неробочого ходу силових трансформаторів істотно впливають на ефективність експлуатації та техніко-економічні показники розподільчих мереж та енерго-ефективність електропостачання.

Для номінальної напруги живлення у паспортних даних трансформатора наводяться значення струму і втрат неробочого ходу (НХ), які мають бути визначені вже на етапі проектування. Параметри НХ не залежать від навантаження. Нерівномірні діючі фазні струми НХ, активні втрати НХ виникають одночасно із підключенням трансформатора до електричної мережі. Тому вартість споживання електричної енергії на компенсацію втрат у трансформаторі та від перетоків реактивної потужності, від основної та вищих гармонік струмів НХ є вагомою складовою у загальних витратах на експлуатацію розподільчих мереж.

У багатьох випадках розбіжності між проектними параметрами і даними випробувань силового трансформатора у режимі НХ можуть сягати 15-20% і більше [1]. Для зменшення зазначених похибок, як правило, модифікують існуючі розрахункові методики та застосовують багатовимірні вектори з емпіричними коригуючими коефіцієнтами [2]. Проте навіть модифіковані методики обмежуються проектними розрахунками для основних (перших) гармонік фазних струмів і спрямовуються на існуючі серії трансформаторного обладнання. Отже на цей час діюча теорія і практика проектування не здатні забезпечити в повному обсязі невідкладні завдання щодо підвищення точності визначення проектних параметрів нових типів силових трансформаторів для розподільчих електричних мереж із врахуванням реального гармонійного складу і нерівномірності розподілу струмів НХ по фазах трансформатора.

Таким чином вирішення складної проблеми підвищення точності визначення номінальних параметрів НХ із врахуванням реального гармонійного складу і нерівномірності розподілу струмів НХ по фазах силових трансформаторів слід розглядати як комплекс актуальних завдань у науковому і прикладному плані.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Для розрахунків проектних параметрів і характеристик силових трансформаторів, як правило, застосовуються схемні моделі, методи і програмне забезпечення, що базуються на теорії електричних та магнітних кіл [3], [4]. На етапі конструкторської підготовки виробництва простота алгоритмів комп'ютерної реалізації обумовила використання схемних моделей в інженерних розрахунках [5], [6]. Більшість сучасних

методик розрахунку параметрів НХ ґрунтуються на методі «ділянок» [2]. За схемами шихтування пакетів магнітної системи виділяють ділянки із рівномірним розподілом магнітної індукції та здійснюють розрахунок її значень за умови незмінності магнітного потоку у шихтованих стрижнях, ярах і кутах магнітної системи [7]. Для обраної проектантом марки електротехнічної сталі за значеннями магнітної індукції визначають питомі втрати і питому потужність намагнічування, номінальні параметри НХ і параметри схеми заміщення силового трансформатора. Проте цілий ряд припущень і спрощень, що покладені в основу лінійних і нелінійних схемних моделей, призводять до спотворення реальної картини магнітних полів під час трансформування енергії змінного струму [8]. До істотних похибок проектних розрахунків призводить нехтування нерівномірним розподілом по фазах струмів НХ і переважним впливом їх третіх гармонійних складових [9], що обумовлені конструктивними особливостями трифазних магнітних систем стрижневого типу, багатокомпонентною будовою активної частини, анізотропією магнітних властивостей та нелінійністю гістерезисних кривих намагнічування холоднокатаних електротехнічних сталей, нерівномірністю миттєвого розподілу магнітних потоків, геометричних складових магнітної індукції [10]-[14].

Більш точно врахування конструктивних факторів на параметри і гармонійний склад струмів НХ можна забезпечити засобами тривимірного польового моделювання на основі методів кінцевих елементів [15], [16]. Проте для силових трансформаторів їх комп'ютерну реалізацію ускладнено значними витратами часу і вимогами до обчислювальних ресурсів [17]. Для визначення електричних та електроенергетичних параметрів електротехнічних систем трансформування змінного струму в роботі [18] запропоновано тривимірну модель електромагнітних процесів. Однак для її використання необхідно обмежитися активними матеріалами з лінійними магнітними властивостями або ліанеризованими характеристиками. Для ефективної реалізації польових моделей в роботах [19], [20] застосовується диференціація розмірів кінцевих елементів і апроксимація поліномами Лагранжа першого порядку. Проте нелінійність магнітних властивостей та розбіжності у геометричних розмірах окремих елементів активних частин силових трансформаторів значно ускладнюють застосування такого підходу [21]. Деякі автори намагаються вносити спрощення у геометричну модель, нехтувати нелінійністю магнітних властивостей матеріалів [22] або застосовувати двовимірні моделі [23]. Проте зазначені припущення і спрощення істотно знижують точність результатів моделювання та в окремих випадках можуть спотворити реальну картину електромагнітних процесів. У роботі [22] запропоновано інваріантну чисельну реалізацію нестационарних схемних моделей НХ трансформатора і просторових моделей стаціонарного магнітного поля. Однак відсутність верифікації

і валідації даних моделювання унеможливила достовірну оцінку гармонійного складу фазних струмів НХ [22]. Розрахункова польова модель для режиму дослідного НХ силового трансформатора має детально відображати багатокомпонентну будову активної частини та враховувати нелінійності електрофізичних і магнітних властивостей активних матеріалів. Ефективність чисельної реалізації польової моделі повинна відповідати вимогам задач оптимізації конструктивних параметрів. Це обумовлює актуальність розробки удосконалених взаємопов'язаних схемних і просторових польових моделей, що враховують конструктивну будову активної частини трансформатора, гістерезис нелінійних магнітних властивостей електротехнічної сталі, несиметрію і несинусоїдні часові зміни струмів у фазних обмотках і дозволяють забезпечити обчислювальну ефективність, високу точність визначення гармонійного складу струмів і паспортних параметрів НХ силового трансформатора.

III. МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є визначення гармонійного складу струмів неробочого ходу силового трансформатора із застосуванням просторових польових моделей, що враховують конструктивну будову активної частини трансформатора, гістерезис нелінійних магнітних властивостей електротехнічної сталі, електричну асиметрію струмів у фазних обмотках.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРІАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Пропонується схемна модель дослідного режиму НХ, що сполучається із 3D геометричною моделлю активної частини на прикладі трифазного силового трансформатора із повітряним природним охолодженням потужністю 10 кВА із напругами 380В/220 В (рис. 1). Фазні обмотки дослідного трансформатора «Ф_А», «Ф_В», «Ф_С» з'єднуються за схемою «Y» і через перехідні опори «Z_A», «Z_B», «Z_C» підключаються до випробувального трифазного трансформатора із схемою обмоток «Y/D» і вихідними лінійними напругами на стороні «D» [24]:

$$\begin{cases} U_{AB} = U_{AB(\max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{AB}), \\ U_{BC} = U_{BC(\max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{BC}), \\ U_{CA} = U_{CA(\max)} \times \sin(\omega\tau + \alpha_{CA}), \end{cases} \quad (1)$$

Перехідні опори схемної моделі приймаються однаковими та значно меншими за опір НХ досліджуваного трансформатора «Z_{Id}»:

$$|Z_A| = |Z_B| = |Z_C| \ll |Z_{Id}|$$

До 3D геометричної моделі активної частини (рис. 1) входять фазні обмотки «Ф_А», «Ф_В», «Ф_С» і

шихтована магнітна система з підобластями стрижнів ступінчатої форми – «СТ_А», «СТ_В», «СТ_С», прямокутних ярем–«Я», Т-подібних «КТ» і Г-подібних «КГ» кутів з прямими стиками.

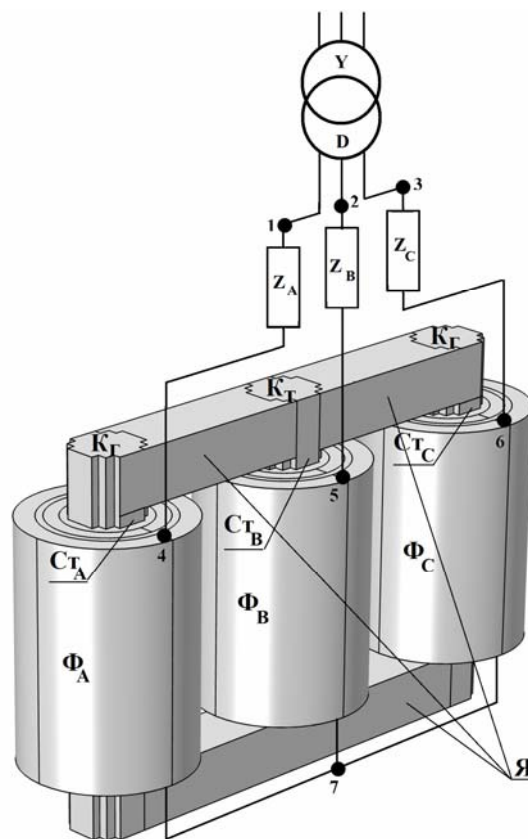


Рисунок 1. Схемна і 3D геометрична моделі активної частини трифазного силового трансформатора у режимі дослідного НХ

Математична модель магнітного поля силового трансформатора відображається нелінійною системою [25]:

$$\begin{cases} \sigma(\theta) \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial \tau} + \text{grad}(\mathbf{U}) \right) + \text{rot} \left[\frac{1}{\mu_0 \mu(\mathbf{H})} \text{rot}(\mathbf{A}) \right] = \mathbf{J}_e \Big|_j, \\ \mathbf{B}(\mathbf{H}) = \mu_0 \mu(\mathbf{H}) \cdot \mathbf{H}, \\ j \in \left\{ \Phi_A, \Phi_B, \Phi_C, \text{CT}_A, \text{CT}_B, \right. \\ \left. \text{CT}_C, \text{KG}_1, \text{KG}_2, \text{KT}_1, \dots, \text{KT}_4 \right\}, \end{cases} \quad (2)$$

де $\mathbf{B}(\mathbf{H})$ – гістерезисна характеристика намагнічування; \mathbf{B} , \mathbf{H} – індукція та напруженість магнітного поля; μ , μ_0 – відносна магнітна проникність і магнітна проникність вакууму; \mathbf{U} , \mathbf{A} – електричний і векторний магнітний потенціали; \mathbf{J}_e – щільність стороннього струму; θ – температура; σ – питома електропровідність.

Для обраного трансформатора в інтервалі зміни випробувальних напруг однофазних дослідів НХ ($0,7U_{ном} \leq U_{нх} \leq 1,1U_{ном}$) програмою обробки даних багатоканального цифрового осцилографа формуються вектори миттєвих значень часу $\{\tau_k\}$, фазних струмів $\{i_{A,k}\}$, $\{i_{B,k}\}$, $\{i_{C,k}\}$ і напруг $\{u_{A,k}\}$, $\{u_{B,k}\}$, $\{u_{C,k}\}$. Потім розраховуються відповідні масиви даних для ефективних характеристик намагнічування електротехнічної сталі $\{H_k, B_k\}$. Гістерезисні характеристики намагнічування електротехнічної сталі охоплюються ефективними характеристиками, що обумовлюється питомими втратами від вихрових струмів і додатковими питомими втратами від технологічних факторів: розкרוю пакетів магнітної системи, шихтування і пресування магнітної системи тощо [7]. Для опису ефективних характеристик намагнічування (рис. 2) застосовується JA-модель [26], яка дозволяє врахувати оборотну і необоротну складові намагніченості. Для однофазних дослідів НХ застосовується запропонована у роботі [27] методика визначення п'яти компонентного вектора емпіричних коефіцієнтів JA-моделі.

На внутрішніх границях задаються умови сполучення тангенціальних складових напруженості магнітного поля [24]. Приймаються однорідні граничні умови на сферичній зовнішній границі розрахункової області (рис. 1). Для забезпечення точності моделювання її діаметр обирається у тричі більшим за розмір діагоналі магнітної системи [18].

Математичні моделі 3D магнітного поля (2) із умовами сполучення, однорідними умовами на зовнішніх границях і умовами калібрування Кулона реалізуються методом встановлення для однорідних початкових умов [24]. У загальному випадку початкові умови Коши мають відповідати першому закону комутації у момент підключення до випробувального трансформатора «Y/D» схеми НХ (рис. 1), що комутується засобами Comsol Multiphysics [24].

Авторами [24] доводиться, що геометрична симетрія розрахункової області відносно площини xOz , передбачає симетрію магнітних процесів у режимі НХ. Тому для числової реалізації 3D моделі магнітного поля (1) розглядається тільки половина розрахункової сферичної області, що відокремлюється площиною, яка паралельна площини xOz та проходить через осі стрижнів магнітної системи. На границі цієї площини задаються граничні умови симетрії [24]. Завдяки скороченню об'єму 3D геометричної області у 2 рази забезпечується пропорційне зменшення часових і обчислювальних ресурсів, необхідних для числової реалізації методу скінчених елементів.

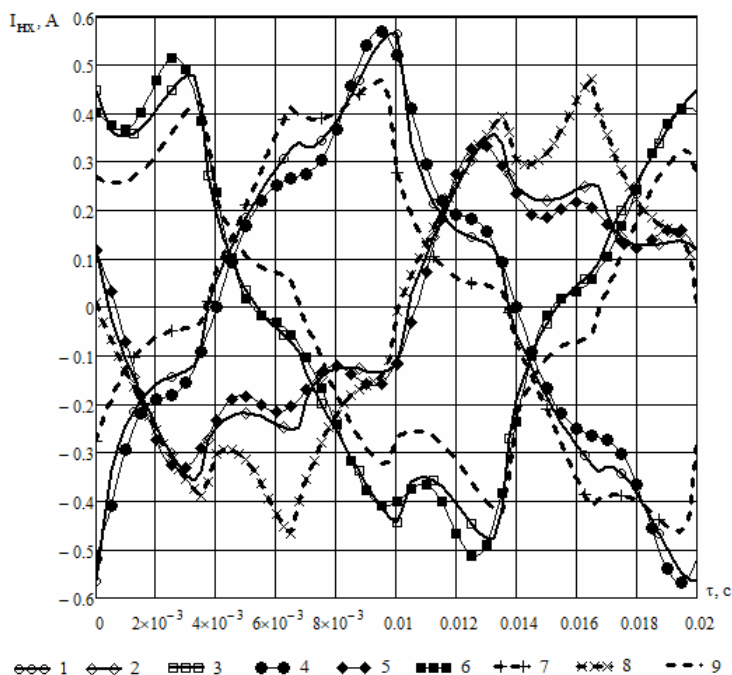
Струмові похибки НХ визначаються у порівнянні з експериментом шляхом валідації даних моделювання. Для узагальнення візуалізації даних моделювання і дослідів НХ наводяться часові зміни унормованих фазних струмів, які визначаються відношення-

ми їх миттєвих значень до амплітуди дослідного струму НХ трансформатора (рис. 2).

Дані математичного моделювання із високою точністю збігаються із даними експериментальних досліджень (рис. 2). Результати 3D моделювання і експериментальні дані є якісно подібними один до одного як за фазовими зсувами, так і за характером змін у часі (рис. 3). Для діючих значень струму НХ струмові похибки для математичної моделі не перевищують 1,41% у порівнянні з експериментом. Проте струмова похибка розрахунків за відомою інженерною методикою [1] наближається до 8,5%. У порівнянні з дослідними даними для втрат НХ визначено відносна похибка склала 1,2% – для 3D моделі, та 9,2% – для інженерної методики [7]. Часові зміни фазних струмів НХ характеризуються нерівномірним розподілом по фазах, несиметричними фазовими зсувами, а також значними впливами непарних вищих гармонійних складових, амплітуди яких складають 24% для третьої гармоніки, 21% – для п'ятої гармоніки і 4% – для сьомої гармоніки включно (рис. 3)

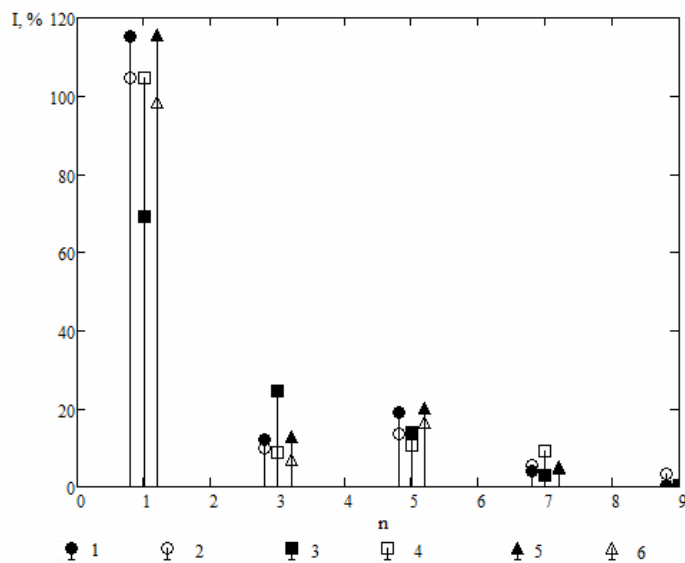
Низька точність інженерних методик розрахунку проектних параметрів НХ обумовлена, насамперед, припущеннями електричної симетрії та синусоїдної часової зміни фазних струмів НХ. Тому їх модифікації на основі векторів коригуючих емпіричних коефіцієнтів мають локалізовану область застосування до окремих типів трансформаторів.

Для дослідного трансформатора діючі значення фазних струмів у фазах А, В і С складають 113,2%, 72,4%, 112,9% від діючого значення струму НХ трансформатора (рис. 3). Слід відзначити істотний вплив третіх гармонійних складових фазних струмів, які існують навіть за умови рівності нулю їх суми. Це обумовлюється несиметричним струмовим навантаженням фазних обмоток внаслідок істотних відмінностей у фазних магнітних опорах. Найбільші значення третьої гармоніки наближаються до 30% від першої для фази В і є майже у двічі меншими для фаз А і С. Такі ж самі фактори обумовлюють збільшення до 27,91% діючого значення першої гармонійної складової струму НХ зворотної послідовності фаз. Кутова асиметрія складає 26 – 28 електричних градусів (рис. 2). Оскільки жодна із названих причин не враховується інженерними методиками, то вектором коригуючих коефіцієнтів не можна врахувати їх вплив на зниження точності проектних розрахунків, а також застосувати зазначені методики для обґрунтування ефективних конструкторських рішень, спрямованих на покращення параметрів НХ. Валідація даних моделювання підтвердила високу точність удосконаленого схемно-польового підходу для визначення паспортних параметрів режиму НХ у порівнянні з інженерною методикою [7].



1 – струм у фазі А (3D моделювання без КО); 2 – струм у фазі В (3D моделювання без КО); 3 – струм у фазі С (3D моделювання без КО); 4 – струм у фазі А (експеримент без КО); 5 – струм у фазі В (експеримент без КО); 6 – струм у фазі С (експеримент без КО); 7 – струм у фазі А (3D моделювання з КО); 8 – струм у фазі В (3D моделювання з КО); 9 – струм у фазі С (3D моделювання з КО)

Рисунок 2. Часові зміни фазних струмів дослідного НХ трансформатора



1 – струм у фазі А без КО; 2 – струм у фазі А з КО; 3 – струм у фазі В без КО; 4 – струм у фазі В з КО; 5 – струм у фазі С без КО; 6 – струм у фазі С з КО

Рисунок 3. Гармонійний склад фазних струмів НХ

Для компенсації негативного впливу конструктивних особливостей трифазних тристрижневих магнітних систем і нелінійних магнітних властивостей анізотропних електротехнічних сталей на параметри НХ пропонується на стрижнях магнітної системи розподільчих силових трансформаторів розташовувати систему компенсуючих обмоток (КО). Обмотки КО

з'єднують у «Y» і приєднують до фазних регульовальних обмоток у зворотній послідовності фаз із фазовим зсувом 120 електричних градусів.

За даними 3D моделювання (рис. 2) додаткова система КО забезпечує вирівнювання розподілу струмового навантаження НХ по фазах трансформатора, коли відхилення фазних струмів НХ не перевищують

3% – 6% від значення струму НХ. Діюче значення першої гармоніки струму НХ зворотної послідовності фаз скорочується до 5%, діюче значення першої гармоніки струму НХ прямої послідовності фаз наближається до 98% струму НХ, а відхилення кутів фазових зсувів для струмів скорочується до 2% у порівнянні із симетричним режимом НХ. Майже у 2 – 2,5 рази скорочуються амплітуди третіх гармонійних складових фазових струмів НХ. Отже зазначений комплекс факторів, обумовлених застосуванням системи КО, дозволяє забезпечити симетричне струмове завантаження фаз і зменшити амплітуди фазних струмів НХ і діюче значення струму НХ на 15 – 20 % та втрати НХ – на 14 – 16%.

V. ВИСНОВКИ

Запропоновано удосконалений підхід до моделювання магнітного поля у силовому трансформаторі, який дозволяє врахувати особливості схеми дослідного режиму НХ, конструктивну будову активних частин і вплив гістерезисних явищ та вихрових струмів на нелінійні властивості магнітних матеріалів та параметри НХ.

Поєднання схемного і польового моделювання, дослідне визначення магнітних характеристик електротехнічної сталі із врахуванням особливостей конструкції магнітної системи і технології її виготовлення забезпечує високу точність розрахунків паспортних параметрів НХ. У порівнянні результатів моделювання із даними дослідів НХ струмова похибка і відносна похибка для втрат НХ складають 1,41% і 1,2% для дослідного трифазного трансформатора.

Додаткова система КО збільшити діюче значення першої гармоніки струму НХ прямої послідовності фаз до 98% струму НХ, скоротити відхилення кутів зсувів фазових струмів до 2% у порівнянні із симетричним режимом НХ, зменшити у 2 – 2,5 рази амплітуди третіх гармонійних складових фазових струмів НХ.

Застосування системи КО дозволяє забезпечити симетричне струмове завантаження фаз, зменшити діюче значення струму НХ на 15 – 20 % і втрати НХ – на 14 – 16%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Kulkarni, S. V. Transformer Engineering: Design and Practice [Text] / S. V. Kulkarni, S. A. Khaparde. – New York: Marcel Dekker, 2004. – 478 p
- [2] Бики, М. А. Проектирование силовых трансформаторов. Расчет основных параметров [Текст] / М. А. Бики. - М.: Знак, 2013. – 612 с.
- [3] Новаш, В. И. Расчет параметров модели трехфазного трансформатора из библиотеки matlab-simulink с учетом насыщения магнитопровода [Текст] / В. И. Новаш, Ю. В. Румянцев // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2015. – № 1. – С. 12–24.
- [4] Schiop, A. Pspice simulation of power electronics circuit and induction motor drives [Text] / A. Schiop, V. Popescu // Revue Roumaine des Sciences Techniques – Serie Electrotechnique et Energetique. – V. 52. – N. 1. – 2007. – P. 33–42.
- [5] Лулье, А. И. Процесс включения силового трансформатора на холостой ход и короткое замыкание [Текст] / А. И. Лурье // – Электротехника. – 2008. – № 2. – С. 2–18.
- [6] Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов [Текст] / Л. В. Лейтес. – М.: Энергия, 1981. – 365 с.
- [7] Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- [8] Jamali, M. Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions [Text] / M. Jamali, M. Mirzaie, S. Asghar-Gholamian // Elektronika and Elektrotechnika. – 2011. – V. 109. – N. 3. – P. 17–20. DOI: 10.5755/j01.eee.109.3.162.
- [9] Федоров, В. Л. Критерий определения числа гармоник рядов Фурье, аппроксимирующих напряжения и токи трансформатора [Текст] / В. Л. Федоров // Омский научный вестник. - 2018. - № 5 (161). - С. 82–89. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-82-89.
- [10] Singh, A. K. Mitigation of Inrush Current For Single Phase Transformer by Control Switching Method [Text] / A. K. Singh, S. Patel // International Journal of Electronics, Electrical and Computational System. – 2015. – V. 4. – P. 146–150.
- [11] Taghikhani, M. A. Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform [Text] / M.A. Taghikhani, A. Sheikholeslami, Z. Taghikhani // IJEEE. – 2015. – Vol. 11. – №. 2. – P. 174–183 URL: <http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf>.
- [12] Chiesa, N. Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity Analysis [Text] / N. Chiesa, B. A. Mork, H. K. Hoidalén // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2010. – Vol. 25. – № 4. – P. 2599–2608. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2045518.
- [13] Khederzadeh, M. Mitigation of the impact of transformer inrush current on voltage sag by TCSC [Text] / M. Khederzadeh // Electric Power Systems Research. – 2010. – V 80. – N. 9. – P. 1049–1055. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.01.011.
- [14] Тиховод, С. М. Моделирование переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения [Текст] / С. М. Тиховод // Электротехніка та електроенергетика. – 2014. – №2. – С. 59–68. DOI:

10.15588/1607-6761-2014-2-8.

[15] Лазарев, Н. С. Токи включения силовых трансформаторов [Текст] / Н.С. Лазарев, Р. Н. Шульга, А. Р. Шульга // Электротехника. – 2010. – № 11. – С. 11–17.

[16] Majumder, R. Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model [Text] / R. Majumder, S. Ghosh, R. Mukherjee // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. – 2016. – V. 5. – N. 3. P. 3300 – 3306. DOI: 10.15680/IJRSET.2016.0503107.

[17] Yarymbash, D. S. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method [Text] / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov // Radio Electronics, Computer Science, Control. - 2018. – N. 1. – P. 65 – 74. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-8.

[18] Yarymbash, D. Influence of the electrodes blanks location on the electric heating power distribution in the Acheson furnaces core [Text] / D. Yarymbash // Electrical Engineering And Power Engineering. - 2014. – №1. – С.5–11. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-1

[19] Yarymbash, D. Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kotsur // Electrical Engineering And Power Engineering. - 2016. - №2. – С. 43-50. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5.

[20] Yarymbash, D. Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kotsur // Electrical Engineering And Power Engineering. - 2017. - №1. – С. 24-30. doi:http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4.

[21] Остренко, М. В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа [Текст] / М. В. Остренко, С. М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2016. – №2. – С. 33–42.

DOI: 10.15588/1607-6761-2016-2-4

[22] Пайков, И. А. Анализ моделей для электромагнитного расчета силовых трансформаторов [Текст] / И. А. Пайков, А. И. Тихонов // Вестник ИГЭУ. – 2015. – №3. – С. 38–43.

[23] Подольцев, А. Д. Численный расчет электрических токов, магнитного поля и электродинамических сил в силовом трансформаторе в аварийных режимах с использованием MATLAB/SIMULINK и COMSOL [Текст] / А. Д. Подольцев, Л. Н. Конторович // Технічна електродинаміка. – 2011. – № 6. – С. 3–10.

[24] Divchuk, T. Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems [Text] / T. Divchuk, D. Yarymbash, S. Kylymnyk, I. Kotsur, Y. Bezverkhnia // Electrical Engineering And Power Engineering. - 2018. - №2. – С. 56-66. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-2-6.

[25] Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // 14th International Conference: Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv–Slavske, Ukraine, 2018 – P. 308–313. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336209.

[26] Cundeva, S. A Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis [Text] / S. Cundeva // Serbian Journal of Electrical engineering. – 2008. – V. 5, N. 1. – P. 21–30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C.

[27] Bastos, J. P. A. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods [Text] / J. P. A. Bastos, N. Sadowski // Boca Raton: CRC Press, 2003. – 510 p. ISBN 9780203911174. DOI: 10.1201/9780203911174

Стаття надійшла до редакції 15.01.2019

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКОВ ХОЛОСТОГО ХОДА СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

ДИВЧУК Т.Е.

старший преподаватель кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: DIV2009@i.ua;

ЯРЫМБАШ Д.С.

д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: yarymbash@gmail.com;

КОЦУР М.И.

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических и электронных аппаратов Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kotsur8@gmail.com;

ЯРЫМБАШ С.Т. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электрических машин Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: kstj06@gmail.com;

Цель работы. Целью работы является определение гармонического состава токов холостого хода силового трансформатора с применением пространственных полевых моделей, учитывающих конструктивное устройство активной части трансформатора, гистерезис нелинейных магнитных свойств электротехнической стали, электрическую асимметрию токов в фазных обмотках.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием методов гармонического анализа, теории магнитных полей, теории электрических цепей, теории силовых трансформаторов, методов конечных элементов, симметричных составляющих.

Полученные результаты. На основе численной реализации 3D моделей магнитного поля в силовом трехфазном трансформаторе с соединением первичных обмоток по схеме «Y» определено гармонический состав фазных токов холостого хода. Применен усовершенствованный подход для повышения эффективности полевого моделирования исследовательского режима холостого хода путем задания условий симметрии магнитного поля на плоскости с осями стержней магнитной системы. Это позволило сократить объем 3D геометрической области в 2 раза и обеспечить пропорциональное уменьшение временных и вычислительных ресурсов, необходимых для числовой реализации математической модели методом конечных элементов. Определены особенности несинусоидальных изменений во времени мгновенных значений токов холостого хода и произведена оценка их неравномерного распределения по фазам трансформатора, который характеризуется увеличением действующих токов до 113,2%, 112,9% в фазах А и С и их уменьшением до 72,4% в фазе В. Показано, что амплитуда основной гармоники уменьшается для прямой последовательности фаз на 5,08% от амплитуды тока холостого хода трансформатора и увеличивается до 27,91% для обратной последовательности фаз. Установлено преобладающее влияние нечетных высших гармонических составляющих фазных токов ХХ, амплитуды которых составляют 24, 21% и 4% от амплитуды тока ХХ для его третьей, пятой и седьмой гармоники. Применение системы компенсирующих обмоток, которые присоединяются к регулировочным обмоткам в обратной последовательности фаз с фазовым сдвигом 120 градусов, позволяет сократить действующее значение тока ХХ обратной последовательности до 5%, приблизить действующее значение первой гармоники тока ХХ прямой последовательности фаз до 98% тока ХХ, а также уменьшить отклонение углов фазовых сдвигов по сравнению с симметричным режимом ХХ до 2%.

Научна новизна. На основе теоретических и экспериментальных исследований определены преобладающее влияние третьих гармонических составляющих на несинусоидальность фазных токов холостого хода в первичных обмотках, соединенных в «Y». Применение дополнительных граничных условий симметрии обеспечивает существенное повышение эффективности числовой реализации благодаря двукратному сокращению объема 3D области моделирования силового трансформатора в режиме холостого хода. Для схемы соединения обмоток трансформатора «Y» без нулевого провода путем учета взаимосвязанных воздействий свойств гистерезиса и вихревых токов на удельные потери и мощность намагничивания, благодаря высокой точности описания взаимосвязей между индукцией и напряженностью магнитного поля в ферромагнитных средах определено и экспериментально подтверждено новые особенности гармонического состава токов холостого хода с преимуществом третьей гармоники.

Практическая ценность. Предложенные в работе подходы и методики позволяют уменьшить токовую погрешность и относительную погрешность для потерь ХХ до 1,41% и 1,2% для 3D модели трехфазного силового трансформатора. Применение системы с компенсирующей обмоткой позволяет сократить в 2 - 2,5 раза амплитуды третьих гармонических составляющих фазовых токов ХХ и путем симметрирования токовой нагрузки фаз уменьшить амплитуды фазных токов ХХ и действующее значение тока ХХ на 15 - 20% и потери ХХ - на 14 - 16%.

Ключевые слова: полевая модель; трехфазный трансформатор; холостой ход, магнитное поле; метод конечных элементов; гармонический анализ; несинусоидальные и несимметричные токи.

A IDLE CURRENTS HARMONIC COMPOSITION OF POWER TRANSFORMER

DIVCHUK T.E. Senior Lecturer, Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: DIV2009@i.ua;

YARYMBASH D.S. Dr. Tech. Sci., Professor, Head of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: yarymbash@gmail.com;

KOTSUR M.I.

Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical and Electronic Apparatuses, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kotsur8@gmail.com;

YARYMBASH S.T.

Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrical Machines, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kstj06@gmail.com;

Purpose. The aim of the work is to define the idle currents harmonic composition of the power transformer using spatial field models, that take into account the structural construction of the active part of the transformer, the hysteresis of nonlinear magnetic properties of the electrical steel, and the electrical asymmetry of the currents in phase windings.

Methodology. The research was carried out using harmonic analysis methods, the theory of magnetic fields, the theory of electrical circuits, the theory of power transformers, finite element methods, and symmetric components.

Findings. Based on the numerical implementation of 3D models of the magnetic field in a three-phase power transformer with the connection of the primary windings according to the "Y" scheme, the harmonic composition of the phase idle currents is determined. An improved approach has been applied to increase the efficiency of field simulation of the research idle mode by setting the conditions of symmetry of the magnetic field on a plane with the axes of the legs of the magnetic system. This made it possible to reduce the volume of the 3D geometric area by 2 times and to ensure a proportional decrease in the time and computational resources, required for the numerical implementation of the mathematical model by the finite element method. The features of non-sinusoidal changes in time of momentary values of idle currents are determined and their uneven distribution in the transformer phases is estimated. It is characterized by an increase in the effective currents to 113.2%, 112.9% in phases A and C and their decrease to 72.4% in phase B. It is shown that the amplitude of the main harmonic decreases for the positive phase-sequence by 5.08% of the amplitude of the transformer idling current and increases to 27.91% for the negative phase-sequence. The prevailing influence of the odd higher harmonic components of the idle phase currents, the amplitudes of which are 24, 21% and 4% of the amplitude of the idle current for its third, fifth and seventh harmonics is established. The use of a compensating winding system, which is connected to the adjusting windings in negative phase-sequence with a phase shift of 120 degrees, reduces the effective value of the idle current of the negative phase-sequence to 5%, approximates the effective value of the first harmonic of the idle current, and also reduce the deviation of the phase shift angles compared to the symmetric idle mode up to 2%.

Originality. Based on theoretical and experimental researches, the prevailing influence of the third harmonic components on the non-sinusoidal phase of the idle phase currents in the primary windings, connected in "Y" is determined. The use of additional symmetry boundary conditions provides a significant increase in the efficiency of numerical implementation due to a two-fold reduction in the volume of the 3D field modeling of a power transformer in idle mode. For the scheme of connecting the windings of the transformer "Y" without a neutral wire, taking into account the interrelated effects of hysteresis and eddy currents on specific losses and magnetization power, due to the high accuracy of describing the interrelation between magnetic flux density and magnetic field strength in ferromagnetic media, the new features of idle current harmonic composition with the advantage of the third harmonic was determined and experimentally confirmed.

Practical value. The proposed approaches and methods allow to reduce the current error and the relative error for idle losses up to 1.41% and 1.2% for a 3D model of a three-phase power transformer. The use of a system with a compensating winding allows to reduce the amplitude of the third harmonic components of idle phase currents up to 2 - 2.5 times and by balancing the current load of the phases reduce the amplitudes of phase idle currents and the effective value of idle current up to 15 - 16 %.

Keywords: field model; three phase transformer; idling; magnetic field; finite element method; harmonic analysis; non-sinusoidal and asymmetrical currents

REFERENCES

- [1] Kulkarni, S. (2004). Transformer Engineering: Design and Practice. New York: Marcel Dekker, 478.
- [2] Biki, MA (2013). Design of power transformers. Calculation of the main parameters. M.:Znak, 612.
- [3] Novash, V., Rumyantsev, Y. (2015). Calculation of the parameters of the model of a three-phase transformer from the matlab-simulink library taking into account the saturation of the magnetic. Energy. Proceedings of higher educational institutions and energy associations of the CIS, 1, 12–24.
- [4] Schiop, A., Popescu, V. (2007). Pspice simulation of power electronics circuit and induction motor drives Revue Roumaine des Sciences Techniques. Serie Electrotechnique and Energetique, 52, 1, 33–42.
- [5] Lurye, A. (2008). The process of switching power transformer to idle and short circuit. Electrical Engineering, 2, 2, 18.
- [6] Leites, L. (1981). Electromagnetic Calculations of

- Transformers and Reactors. M: Energy, 365.
- [7] Tikhomirov, P. (1986). Calculation of transformers. M.: Energoatomizdat, 528.
- [8] Jamali, M., Mirzaie, M., Asghar-Gholamian, S. (2011). Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating. *Elektronika and Elektrotehnika*, 109, 3, 17–20. DOI: 10.5755/j01.eee.109.3.162.
- [9] Fedorov, V. (2018). A criterion for determining the number of harmonics of Fourier series approximating voltages and currents of a transformer. *Omsk Scientific Herald*, 5 (161), 82–89. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-161-82-89.
- [10] Singh, A., Patel, S. (2015). Mitigation of Inrush Current For Single Phase Transformer by Control Switching Method. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System*, 4, 146–150.
- [11] Taghikhani, M., Sheikholeslami, A., Taghikhani, Z. (2015). Harmonic Modeling of Inrush Current in Core Type Power Transformers Using Hartley Transform. *IJEEE*, 11, 2, 174–183 URL: <http://ijeee.iust.ac.ir/article-1-741-en.pdf>.
- [12] Chiesa, N. B., Mork, A., Hoidalen, H. K. (2010). Transformer Model for Inrush Current Calculations: Simulations, Measurements and Sensitivity. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25, 4, 2599–2608. DOI: 10.1109/TPWRD.2010.2045518.
- [13] Khederzadeh, M. (2010). Mitigation of the impact of transformer inrush current on voltage sag by TCSC. *Electric Power Systems Research*, 80, 9, 1049–1055. DOI: 10.1016/j.epsr.2010.01.011.
- [14] Tihovod, S. (2014). Simulation of transients in transformers based on magnet-electric equivalent circuits. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 59–68. DOI: 10.15588/1607-6761-2014-2-8.
- [15] Lazarev, N. S., Shulga R.N., Shulga A.R. (2010). Current inclusion power transformers. *Electrical Engineering*, 11, 1–17.
- [16] Majumder, R. Ghosh S., Mukherjee R. (2016). Transient Analysis of Single Phase Transformer Using State Model. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 5, 3, 3300–3306. DOI: 10.15680/IJIRSET.2016.0503107.
- [17] Yarymbash, D. S., Yarymbash, S. T., Kotsur, M. I., Litvinov, D. O. (2018). Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 1, 65 – 74. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-8.
- [18] Yarymbash, D. (2014). Influence of the electrodes blanks location on the electric heating power distribution in the acheson furnaces core. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 5-11. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-1>
- [19] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kotsur, I. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43-50. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
- [20] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., & Kotsur, I. (2017). Features of parameter determination of the induction motor substitution circuit for short-circuit mode. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 1, 24-30. doi:<http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2017-1-4>.
- [21] Ostrenko, M.V., Tihovod, S.M., (2016). Calculation of losses in the design elements of power transformers and reactors using the finite element method with impedance type boundary conditions. *Electrical Engineering and Electric Power Engineering*, 2, 33–42. DOI: 10.15588 / 1607-6761-2016-2-4
- [22] Paikov, I. A., Tikhonov, A. I. (2015). Analysis of models for electromagnetic calculation of power transformers. *Vestnik ISEU*, 3, 38–43.
- [23] Podoltsev, A. D., Kontorovich, L.N. (2011). Numerical calculation of electric currents, magnetic field and electrodynamic forces in a power transformer in emergency conditions using MATLAB / SIMULINK and COMSOL. *Tekhnichna elektrodinamika*, 6, 3–10.
- [24] Divchuk, T., Yarymbash, D., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Kotsur, M., Bezverkhnia, Y. (2018). Approach to determination of no load current of three-phase power transformers with plane rods magnetic systems. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 56-66. DOI: 10.15588/1607-6761-2017-2-6.
- [25] Yarymbash, D., Kotsur, M., Yarymbash, S., Kylymnyk, I., Divchuk, T. (2018). An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers. 14th International Conference: Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), February 20-24, Lviv–Slavske, Ukraine, 308–313. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336209.
- [26] Cundeve, S. A. (2008). Transformer Model Based on the Jiles-Atherton Theory of Ferromagnetic Hysteresis. *Serbian Journal of Electrical engineering*, 5, 1, 21–30. DOI: 10.2298/SJEE0801021C.
- [27] Bastos, J. P., Sadowski, A. N. (2003). *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. Boca Raton: CRC Press, 510. ISBN 9780203911174. DOI: 10.1201/9780203911174