

Яримбаш Д.С.¹, Яримбаш С.Т.², Дівчук Т.Є.³, Килимник І. М.⁴¹ Д-р техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна, e-mail: Yarymbash@gmail.com^{2, 4} Канд. техн. наук, доцент, Запорізький національний технічний університет, Україна³Старш. викладач, Запорізький національний технічний університет, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ ЗАСОБАМИ ПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Представлено застосування методу кінцевих елементів для визначення параметрів короткого замикання силового трансформатора в структурі засобів FEMM. Здійснено врахування особливостей конструктивної будови активної частини трансформатора, розподілу електрорушійних сил обмоток, впливів нелінійних електрофізичних властивостей магнітних систем, баку трансформатора, пресуючих кілець і балок обмоток на енергію магнітного поля. Розрахунок параметрів короткого замикання трансформатора проведено на основі математичної моделі електромагнітного поля в формулюваннях векторного магнітного потенціалу для синусоїдальних струмів в обмотках і фазових зсувів. Підвищення точності визначення енергії магнітного поля, поточкозчеплень і індуктивностей обмоток забезпечено розрахунками дискретних масивів просторового розподілу індукції магнітного поля у визначений момент часу. Адекватність моделі, достовірність і точність розрахунків доведено порівнянням із даними класичної методики і експериментальними даними випробування в режимі короткого замикання. Показано, що застосування засобів польового моделювання дозволило зменшити похибку розрахунків майже в 2–3 рази.

Ключові слова: Електричний струм, електрична напруга, омичні втрати, індукція магнітного поля, напруженість магнітного поля, електромагнітні сили, електромагнітний момент, комплексний опір, індуктивність.

ВСТУП

Робочий режим трансформатора обумовлений параметрами короткого замикання (КЗ) та неробочого ходу (НХ), але більш значущими є саме параметри КЗ оскільки в електричних мережах трансформатор, як правило, визначається індуктивним опором КЗ [1]. Крім того саме параметрами КЗ обумовлені втрати, динамічна стійкість, порівнювальні струми при паралельній роботі трансформаторів. На цей час основним методом розрахунку параметрів КЗ являється схематичне моделювання. Однак параметри схем отримують на основі спрощених моделей [2, 3, 4], що призводить до додаткових похибок.

Для більш точного визначення параметрів короткого замикання існує ряд методів на основі теорії електричних кіл, яка потребує визначення емпіричних залежностей для опорів короткого замикання. Аналітичні методики розрахування мають істотні переваги, оскільки можна проводити числові розрахунки для будь яких значень конструктивних параметрів трансформаторів різних схем конструктивного виконання. Але ці переваги нівелюються відсутністю можливості врахування нелінійних властивостей електротехнічних сталей магнітних систем і конструкційних сталей баку трансформатора, пресуючих кілець та балок обмоток. Крім того, припущення і спрощення математичних формулювань і геометрії активної частини трансформатора істотно збільшують похибки розрахунків. Найбільш досконалими є чисельні методи, серед яких широкое розповсюдження отримав метод скінчених елементів, який реалізовано у ПЗ Elcut [2], Comsol Multiphysics, Ansys, Maxwell, Edmag 3D, FEMM.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою роботи є підвищення точності розрахунку параметрів короткого замикання силового трансформатора шляхом визначення енергії магнітного поля на основі даних математичного моделювання в структурі FEMM, співставлення даних математичного моделювання із розрахунками параметрів короткого замикання за класичною методикою та експериментальними випробуваннями.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

У відповідність частотній моделі електромагнітного поля змінного струму ставимо сукупність магнітостатичних моделей для визначених моментів часу із врахуванням фазових зсувів у трифазній симетричній системі струмів та рівноваги електрорушійних сил для обмоток сторін НН і ВН для кожної фази силового трансформатора. Розрахунок параметрів короткого замикання трансформатора проводимо на основі визначення поточкозчеплень обмоток для кожного стрижня магнітної системи трансформатора.

Вказані особливості математичного моделювання успішно застосовано в обертових електричних машинах для розрахунку магнітних полів [3], що збуджуються синусоїдально змінними у часі струмами, а також для розрахунку струмів, індуктованих змінним магнітним полем в провідниковій середі (вихрєвих струмів). При розрахунках обертових електричних машин динамічну модель представлено як сукупність сукупністю статичних процесів [4] у відповідні моменти часу. Приймаючи до уваги подібність електромагнітних процесів у транс-

форматорах і в обертових електричних машинах із загальмованим ротором, вказані припущення і методики можна застосувати для електромагнітних процесів в силовому трансформаторі, як об'єктів дослідження.

Було взято до уваги, що зазвичай для розрахунку магнітного поля змінного струму потребують визначення фазові і лінійні струми та електричні напруги різних фаз, активні втрати, індукція і напруженість магнітного поля, активна та індуктивна складові комплексних опорів [4]. Аналіз магнітного поля змінних струмів для кожної з фаз трансформатора потребує врахування в розрахунках електромагнітного поля, яке збуджене прикладеними (синусоїдально змінними у часі) струмами або зовнішнім змінним полем інших фаз. 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 для визначеного математичного опису рівнянь електромагнітного поля та граничних умов. Відповідно до результатів попередніх досліджень [3] застосовано двовірну геометричну модель активної частини у перерізі її вертикальною площиною, яка проходить через вісі стрижнів магнітної системи трансформатора.

Це дозволило обмежити математичне моделювання розглядом рівнянь у часткових похідних відносно векторного магнітного потенціалу A ($V = \text{rot } A$, V – вектор магнітної індукції) та врахувати, що електричний струм, який створює магнітне поле, спрямовано перпендикулярно перерізу активної частини площиною по вертикальних осях стрижнів трансформатора. Тому достатньо дослідити лише компоненти j_z і A_z та сформулювати математичну модель у вигляді рівнянь

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_y} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_x} \frac{\partial A}{\partial y} \right) - j \omega g A = -j 0 \quad (1)$$

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.

Чисельний розрахунок магнітного поля проводився методом кінцевих елементів (МКЕ) в структурі засобів ПЗ FEMM [5]. Енергетичний функціонал потрібний для знаходження енергії магнітного поля має вигляд

$$I(A) = \frac{1}{2} \cdot \int \int_D \left[\left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy -$$

$$- 2\mu \int \int_D^j J_{CT} A dx dy \quad (2)$$

Для алгебраїчної системи рівнянь відносно потенціалів вузлів, яку також можна отримати засобами МКЕ

$$\sum_1^N \int \int_D^j \beta_e \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} - \mu J_{ZCT} \right) dx dy = 0 \quad (3)$$

Розрахунок параметрів короткого замикання в трансформаторі чисельними методами дозволяє детально дослідити їх в окремих елементах магнітного ланцюга. Технологія визначення даних моделювання потребує сумісного застосування декількох програмних засобів, як графічних, так і розрахункових, а саме: Компас, FEMM, MathCAD.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Як приклад для розрахунку та побудови геометрії магнітної системи трансформатора було обрано силовий масляний трансформатор типу ТМН-2500/35 з номінальними параметрами $S = 2500$ кВА, $m=3$, $f=50$ Гц, $U_2 = 20 \pm 6 \times 1,5 \%$ кВ, $U_1 = 0,69$ кВ, схема та група з'єднання обмоток Д/У-11, $U_x = 6,5 \%$, $P_x = 5,1$ кВт, $i_0 = 1,1 \%$

За наведеними даними було побудовано геометричну модель, наведена на рис. 1.

Кістяк трансформатора збирається з пластин холоднокатаної текстурованої сталі марки 3405 товщиною листа 0,3 мм [6, 7], властивості якої задано кривою намагнічування (рис 2).

Магнітна індукція за основною кривою намагнічування матеріала магнітної системи для середніх по площині «к» – перерізів значень

$$B = \mu(H_k) \mu_0 H_k \quad (4)$$

Оскільки в трансформаторі застосовується маслобар'єрна ізоляція, необхідно враховувати властивості трансформаторного масла та електроізоляційного картону із відносною магнітною проникністю, що дорівнює одиниці.

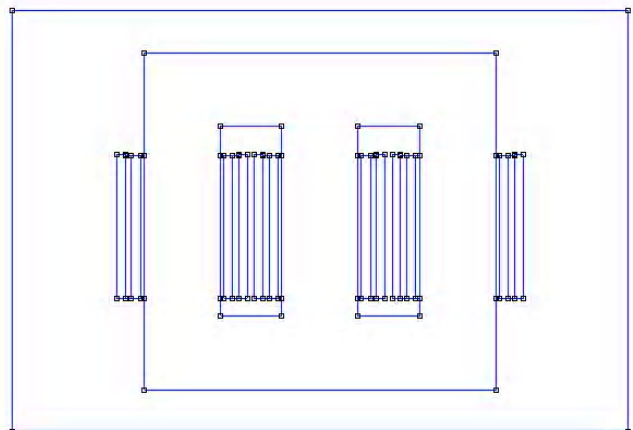


Рисунок 1 – Модель активної частини, побудована в програмі FEMM

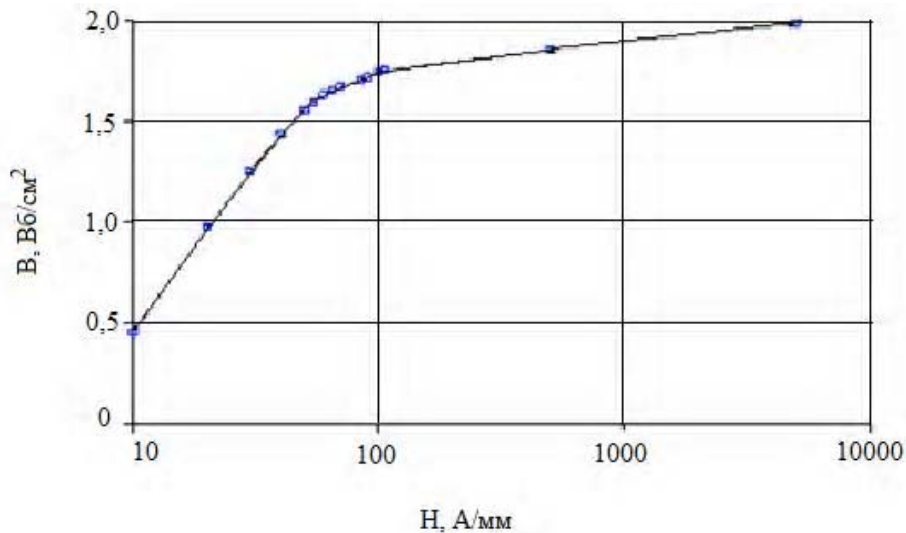


Рисунок 2 – Крива намагнічування для сталі марки 3405 [6, 7]

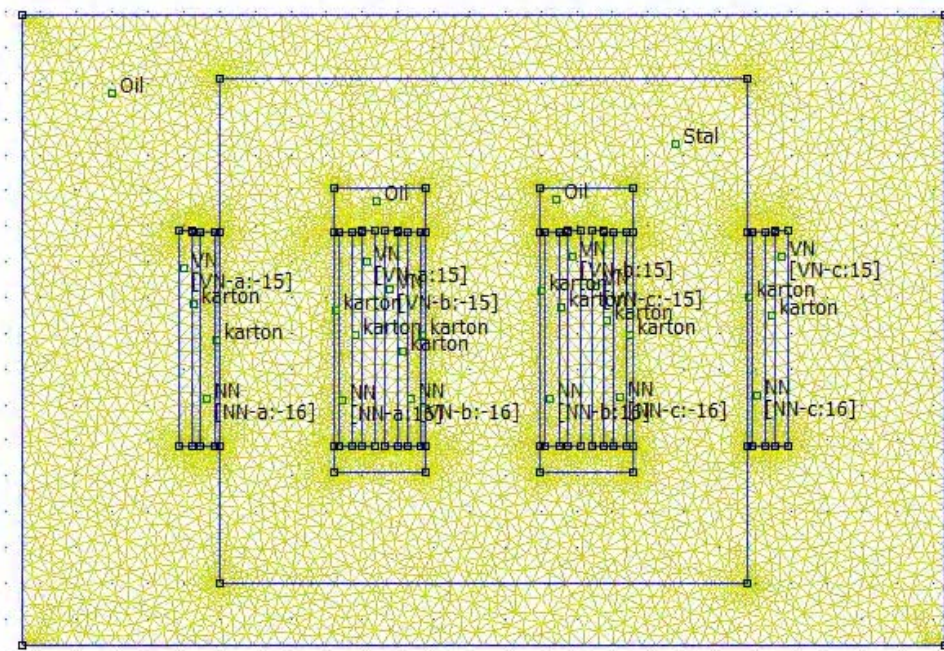


Рисунок 3 – Сітка кінцевих елементів для розрахунку у FEMM

Обмотки ВН позначено міткою блока «VN», НН – «NN» та задано миттєві значення струмів: «+» – вказує що струми обмотки течуть у напрямку осьової координати (координати Z – яка перпендикулярна площині нашої моделі). «-» – струми течуть у зворотному напрямку. Також необхідно задати розміри дроту та властивості матеріалу, з якого виготовлено обмотки. В даному випадку – це мідь, її питома електропровідність дорівнює 57,143 См/м [8].

Розрахункова область обмежена баком трансформатора, на якому задано однорідні граничні умови першого роду, тобто величина векторного потенціалу дорівнює нульовим значенням. Це визначає, що поле не виходить за межі зовнішньої поверхні бака.

Вагомим фактором для зменшення похибки розрахунку є відповідне наближення щільності розподілу кінцевих елементів конфігурації електромагнітного поля, а саме її збільшення біля торцевих зон обмоток, як це відображено на рис 3.

Побудова геометричної моделі, визначення характеристик її елементів дозволяє забезпечити реалізацію ітераційних розрахункових і графічну візуалізацію розподілу магнітного поля (рис. 4).

Для обробки даних та інформації, отриманих під час подальшого визначення електричних параметрів схеми заміщення трансформатора в режимі короткого замикання застосовано програму MathCAD. Для цього засо-

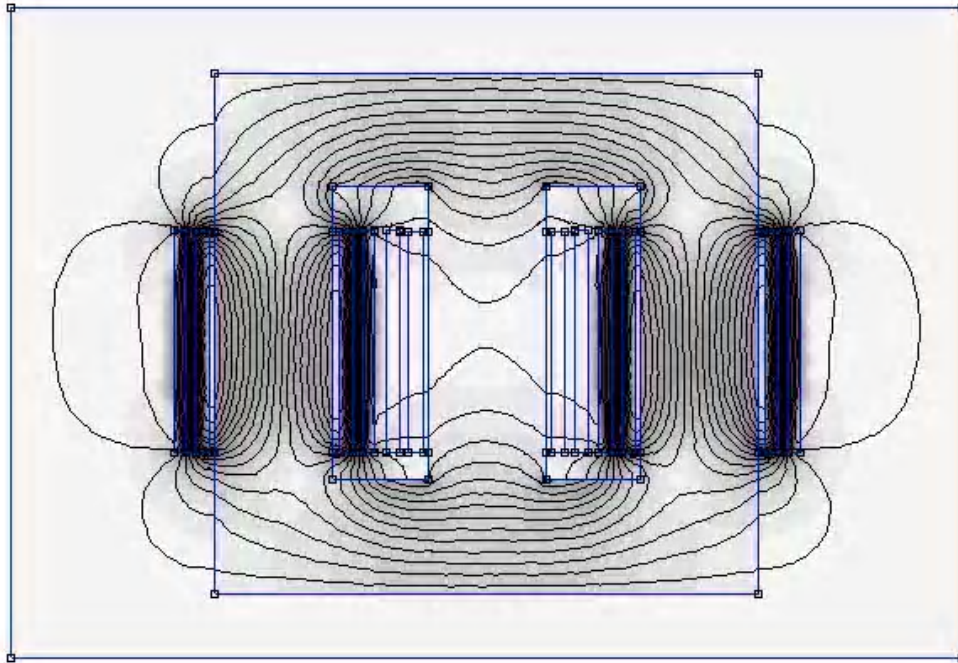


Рисунок 4 – Магнітне поле в активній частині трансформатора, що визначена засобами FEMM

бами FEMM експортуються фізичні величини, що необхідні для розрахунку параметрів короткого замикання, а саме значення енергії магнітного поля і потокозчеплень обмоток для кожної фази трансформатора для кожного миттєвого моменту часу у проміжку одного періоду зміни струмів.

Із застосуванням інтерфейсів програми FEMM, спеціальних меню відповідних вікон цієї програми на основі дискретних даних моделювання режиму короткого замикання було визначено параметри короткого замикання трансформатора ТМН-2500/35-У1, в тому числі їх потокозчеплення, енергія магнітного поля, індуктивність та активна і індуктивна складові фазних опорів обмоток.

Для визначення точності розрахунків на основі математичного моделювання, були порівняні дані математичного моделювання і розрахунків за класичної методикою, визначено похибку розрахунку параметрів короткого замикання відносно даних експериментальних випробувань трансформатора (табл. 1).

Відповідно до часових розподілів перших гармонійних складових нормованих фазних потокозчеплень, що визначаються у вигляді

$$\Psi = \frac{1}{I} \cdot \int \Phi di \quad (5)$$

$$L = \frac{\Psi}{I} \quad (6)$$

встановлюють кутові похибки для відповідних фаз. За даними розрахунків інтервал їх змін складає: для фази А – 0,38 %, В – 0,34 %, С – 0,36 %. Похибка розрахунку напруги КЗ за класичною методикою складає 6,7%, а за даними польового моделювання її зменшено до 1,06 %, тобто практично у 6 разів.

Порівняльний аналіз розрахункових даних параметрів КЗ, визначених за класичною методикою наведено у табл. 1.

Таким чином, запропонований метод розрахунку параметрів короткого замикання силового трансформатора на основі математичного моделювання в структурі засобів ПЗ FEMM дозволяє істотно поліпшити їх точність розрахунків, яка певним чином впливає і на раціональне проектування активної частини і дозволяє зменшити як масу так і втрати в обмотках.

Таблиця 1 – Аналіз результатів розрахунку параметрів короткого замикання трансформатора ТМН-2500/35-У1

Параметри	Відносна похибка, %	
	за класичною методикою розрахунку	за методикою розрахунку у структурі ПЗ FEMM
X_k , Ом	6,68	1,02
Z_k , Ом	6,7	1,04
u_k , %	6,7	1,06

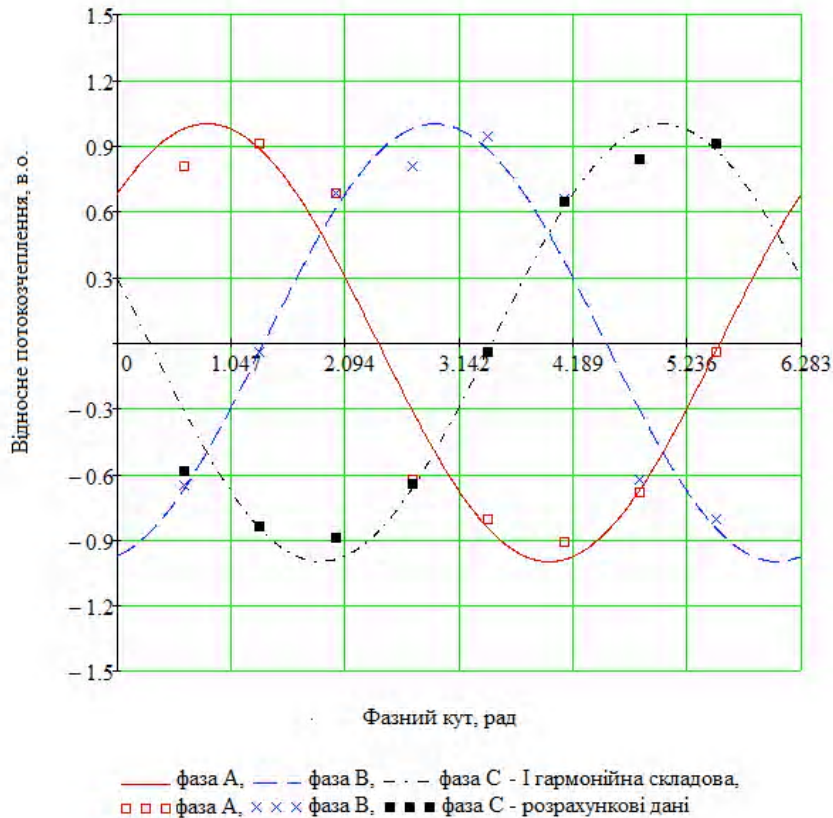


Рисунок 5 – Часові фазові графіки потокозчеплень

ВИСНОВКИ

Постановка і вирішення зазначених завдань дозволяє враховувати реальну геометрію магнітної системи, дійсне струмове розподілення обмоток НН і ВН, а також нелінійні властивості сталі, що використовується для виготовлення кістяка трансформатора, відповідно зменшити втрати КЗ, що дозволить скоротити витрати на його виробництво.

Згідно з отриманими даними приведеними в таблиці 1 можна виявити похибку, яка вказує на доцільність розрахунку у структурі програмного комплексу FEMM, який є більш точним та змістовним в порівнянні з класичними методиками розрахунку.

Поставлена задача потребує подальшого дослідження з урахуванням просторових розмірів магнітної системи, що дозволить отримати дійсні розрахунки параметрів короткого замикання. Отримання результатів може бути розширене також для трансформаторів інших габаритів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- 2 ELCUT: Моделирование двумерных полей методом конечных элементов / Руководство пользователя, - Санкт-Петербург, ООО «Тор» 2012. – 356 с.
- 3 Васьковський Ю.М., Польовий аналіз електричних машин: Навч. Посіб. - К.: НТУУ «КПІ», 2007. – 192 стр.
- 4 Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М. И. Коцур, // Электротехника та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32–36.
- 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 // Электротехника і електромеханіка -2013. – №2. – С. 5–13.
- 6 Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов / О.Б. Буль – М.: Академия, 2005. – 337 с.
- 7 Аншин В. Ш. Сборка трансформаторов / В. Ш. Аншин, З. И. Худяков. – М.: Высшая школа, 1991. – 289 с.
- 8 Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов / А.В.Сапожников- М.: Госэнергоиздат, 1986. – 360 с.
- 9 Антонов М. В. Технология производства электрических машин / М. В.Антонов, Герасимова Л. С. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.

Ярымбаш Д. С.¹, Ярымбаш С. Т.², Дивчук Т. Е.³, Килимник И. М.⁴

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

^{2,4} Канд. техн. наук, доцент, Запорожский национальный технический университет, Украина

³ Старш. преподаватель, Запорожский национальный технический университет, Украина

ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СРЕДСТВАМИ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Представлено использование метода конечных элементов для определения параметров короткого замыкания силового трансформатора в структуре FEMM. Осуществлен учет особенностей конструктивного строения активной части трансформатора, распределение электродвижущих сил обмоток, влияние нелинейных электрофизических свойств магнитных систем, бака трансформатора, прессующих колец и балок обмоток на энергию магнитного поля. Расчет параметров короткого замыкания трансформатора проведен на основе математической модели электромагнитного поля в формулировках векторного магнитного потенциала для синусоидальных токов в обмотках и фазовых сдвигах. Повышение точности определения энергии магнитного поля, потокосцеплений и индуктивностей обмоток обеспечено расчетом дискретных массивов пространственного распределения индукции магнитного поля в определенные моменты времени. Адекватность модели, достоверность и точность расчетов доказано сравнением с данными классической методике и экспериментальными данными испытания в режиме короткого замыкания. Показано, что применение средств полевого моделирования позволило уменьшить погрешность расчетов в 2–3 раза.

Ключевые слова: Электрический ток, электрическое напряжение, потери, индукция магнитного поля, напряженность магнитного поля, электромагнитные силы, электромагнитный момент, комплексное сопротивление, индуктивность.

Yarymbash D.S.¹, Yarymbash S. T.², Divchuk T.E.³, Kylymnyk I. M.⁴

¹ Doctor of Engineering Sciences, Associat. Prof., Zaporozhzhye National Technical University, Ukraine

^{2,4} Candidat of Engineering Sciences, Associat. Prof., Zaporozhzhye National Technical University, Ukraine

³ Senior lecturer, Zaporozhzhye National Technical University, Ukraine

DETERMINATION FEATURES OF THE POWER TRANSFORMER SHORT CIRCUIT PARAMETERS THROUGH FIELD MODELING

A method of final elements for defining the parameters of the power transformer short circuit in FEMM structure is introduced. The peculiarities of the structural construction of the transformer active part, distribution of winding electromotive force, the impact of non-linear electrophysical features in magnetic systems, transformer tank, pressing rings and winding beams on magnetic field energy were taken into account. Computation of transformer circuit parameters is realized on the basis of electromagnetic field mathematical model in the vector magnetic potential formulation for sinusoidal current in windings and phase shifts. Improving accuracy of magnetic field energy, interlinkage and winding inductance was provided by calculation of discrete arrays of dimensional distribution of the magnetic induction field in certain time moment. Model adequacy, computation reliability and accuracy are proved by comparison with classic techniques data and test experimental data in short-circuit conditions. It was proved that application of the field modeling tools allowed to reduce computation error nearly by 2–3 times.

Keywords: electric current, electric tension, losses, induction of the magnetic field, tension of the magnetic field, elektromagnitnye forces, elektromagnitnyy moment, complex resistance, inductance.

REFERENCES

- 1 Tihomirov P. M. Raschet transformatorov. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 528 p.
- 2 ELCUT: Modelirovanie dvumernykh poley metodom konechnykh elementov. Rukovodstvo polzovatelya, Sankt-Peterburg, OOO «Tor» 2012. 356 p.
- 3 Vaskovskiy Yu. M., Poloviy anallz elektrichnykh mashin: Navch. Poslb, Kiev, NTUU «KPI», 2007, 192 p.
- 4 Kotsur M. I. Osobennosti udarnogo teplovogo vozdeystviya na asinhronnyiy dvigatel s modifitsirovannoy sistemoy impulsnogo regulirovaniya v usloviyakh chastykh puskov. *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2014, No 1, pp. 32–36.
- 5 Milyih V. I. Analiz garmonicheskogo sostava peremennogo magnitnogo polya, svyazannogo s vraschayuschimsya rotorom turbogeneratora, v rezhimakh holostogo hoda i korotkogo zamyikaniya V. I. Milyih, N. V. Polyakov. *Elektrotehnika ta elektromehanika*. 2013, No 2, pp. 5–13.
- 6 Bul O. B., Metodyi rascheta magnitnykh sistem elektricheskikh apparatov. Moscow, Akademiya, 2005, 337 p.
- 7 Anshin, V. Sh., Hudyakov Z. I. Sbornik transformatorov. Moscow, Vysshaya shkola, 1991, 289 s.
- 8 Sapozhnikov A. V. Konstruirovaniye transformatorov. Moscow, Gosenergoizdat, 1986, 360 s.
- 9 Antonov M. V. Tehnologiya proizvodstva elektricheskikh mashin. Moscow, Energoizdat, 1982, 512 s.