

СЕКЦІЯ “ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ”

УДК621.318.1

Яримбаш Д.С.¹, Яримбаш С.Т.²

¹ д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ГАРМОНІЙНОГО СКЛАДУ СТРУМІВ НАМАГНІЧУВАННЯ НА ВИЗНАЧЕННЯ ГІСТЕРЕЗИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СТАЛЕЙ

На сучасному етапі для розрахунку проектних параметрів і характеристик силових трансформаторів широко застосовується польове моделювання процесів електромагнітного перетворення енергії у дослідних і експлуатаційних режимах роботи. Відомо, що достовірність і точність даних моделювання силових трансформаторів значною мірою визначається, точністю завдання властивостей феромагнітних матеріалів. Тому значна увага має приділятися точності математичних описів їх гістерезисних властивостей. Проте застосування відомих поширених моделей гістерезису [1, 2] для визначення характеристик намагнічування сучасних марок електротехнічних сталей призводить до істотних похибок, значення яких для напруженості магнітного поля може перевищувати 25-30%. Тому задача підвищення точності математичних описів гістерезисних властивостей сучасних марок електротехнічних сталей є актуальною для удосконалення теорії і практики проектування силових трансформаторів.

Математичні моделі Джилса-Аттертона або Чана [1, 2], що описують ефекти гістерезису, потребують розв'язання нелінійних алгебраїчних і диференціальних рівнянь на кожному часовому кроці моделювання. Це збільшує похибки і час розрахунків, особливо для токів намагнічування несинусоїдної часової форми.

Метою роботи є побудова узагальненої математичної моделі, що із високою точністю і обчислювальною ефективністю описує гістерезисні властивості сучасних марок електротехнічних сталей на основі даних експериментальних досліджень.

Експериментальні дослідження магнітних характеристик електротехнічної сталі марки 3408 проводилися на апараті Епштейна, завантаженому сталевими пластинами товщиною 0,27 мм, які шихтувалися у рамку із прямими стиками у кутах. Загальна маса завантаження електротехнічної сталі склала 1,032 кг. Апарат Епштейна було обладнано обмотками збудження і вимірювання, кількість витків яких склала 300 і 100 витків відповідно. Обмотка збудження була підключена до джерела живлення змінного струму з регульованою напругою синусоїдної часової форми. За допомогою багатоканального цифрового осцилографу синхронізовано у часі здійснювалася реєст-

рація струмів обмотки збудження і напруги вимірювальної обмотки. Також визначався їх гармонійних склад, а саме: амплітуди і фази гармонійних складових.

На основі гармонійного аналізу цифрованих експериментальних даних було встановлено, що напруга вимірювальної обмотки була синусоїдною у часі, а на струм збудження найбільший вплив мали непарні гармоніки: 1-а (63.21%), 3-я (30.61%), 5-а (4.77%) і 7-а (1.91%). Шляхом інтегрування синусоїдної напруги вимірювальної обмотки із врахуванням числа її витків та активної площі поперечного перерізу зразків електротехнічної сталі була визначена часова функція магнітної індукції. Часова функція напруженості магнітного поля визначалася для числа витків обмотки збудження і сумарної довжини осьових ліній прямокутного контуру зразків електротехнічної сталі.

Це дозволило визначити математичний опис гістерезисних нелінійних характеристик намагнічування електротехнічної сталі у параметричній гармонійній формі:

$$\begin{cases} B(\tau) = B[H(\tau)], & B(\tau) = B_{m,1} \cdot \cos(2\pi f\tau + \varphi_B), \\ H(\tau) = \sum_{i=1}^4 H_{m,2i-1} \cdot \sin[2(2i-1)\pi f\tau + \varphi_{H,2i-1}] \end{cases} \quad (1)$$

де поточний час τ є параметром, перший індекс m позначає амплітуди гармонік індукції B і напруженості H , а другий індекс – номер гармоніки.

Верифікація розрахункових характеристик намагнічування і експериментальних даних дозволила встановити, що для 1-ї гармоніки напруженості максимальне значення відносної похибки розрахунків гістерезисної характеристики намагнічування складає 37%, для 1-ї і 3-ї гармонік це значення зменшується до 4%, для 1-ї, 3-ї та 5-ї гармонік – до 1,56%, а додавання 7-ї гармоніки дозволяє обмежити похибку на рівні 0,64%.

Обчислення гістерезисної характеристики у параметричній гармонійній формі виключає додаткові процедури числового інтегрування. Так для миттєвого значення B достатньо визначити параметр часу $\tau_\delta = \{\arccos(B/B_m) - \varphi_B\} / (2\pi f)$ і відповідне йому значення напруженості магнітного поля $H = H(\tau_p)$. З урахуванням 1,3,5, і 7-ї гармонійних складових точність такого визначення не буде перевищувати 1%, що повністю задовольняє практичним потребам точності проектування силових трансформаторів із застосуванням спеціалізованим програм 3D польового моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Modeling Hysteresis Effects. – 13 p. – режим доступу <https://www.comsol.ru/forum/thread/attachment/64177/hysteresisloss-comsol3.5a-10327.pdf>
2. Bastos, J. P. Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods [Text]/J. P. Bastos, A.N. Sadowski// Boca Raton: CRC Press, 2003. ISBN 9780203911174. DOI: [10.1201/9780203911174](https://doi.org/10.1201/9780203911174)
3. Iványi, A. Hysteresis Models in Electromagnetic Computation [Text]/A. Iványi, Akademia Kiadó, Budapest, 1997.

УДК 621.316.71

Коцур І.М.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРОБКА ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ В ПАКЕТИ MATLAB SIMULINK

Вітрові електростанції (ВЕС) за популярністю займають друге місце (після сонячних електростанцій) в генерації електроенергії з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). На вересень 2019 року їх загальна потужність склала 860 МВт. Лише в 2019 році введено 326 МВт нової потужності. В січні-вересні 2019 року ВЕС виробили більше 1 млрд кВт-год електроенергії. Це на 300 млн кВт-год більше обсягу спожитої електроенергії всіма будівельними компаніями України за той же період. Найближчими роками встановлена потужність ВЕС в Україні може зрости в шість разів.

Наразі готуються до будівництва, або вже будується, десятки нових вітропарків, загальною встановленою потужністю 6,4 тис. МВт [1].

Коефіцієнт використання встановленої потужності для ВЕС в Україні складає приблизно 30%. Це пов'язано з тим, що виробництво електроенергії з ВДЕ прив'язано до погодних умов. Тому розробка імітаційної моделі вітрового потоку для підвищення ефективності використання вітрового потенціалу є актуальною задачею.

Моделювання швидкості вітру являє собою досить складну задачу, тому що дане джерело енергії постійно змінюється в часі і просторі. В результаті досліджень було виділено чотири основних моделі швидкості вітру: детермінована, ймовірна, спектральна і нечітка. Кожна з них знаходить свою область застосування. Так, з енергетичної точки зору, на рівні техніко-економічних розробок найбільш застосовна імовірнісна модель або розподіл Вейбулла. Детермінована модель дозволяє визначити потужність, яку вироблено вітроенергетичними установками (ВЕУ) при заданій середній швидкості вітру. В дослідженнях, де необхідний облік поривів і різких змін вітру, звертаються

до спектральної моделі. Нечітка ж модель вітру зручна і найбільш актуальна при моделюванні процесів керування ВЕУ, так як дозволяє сформулювати досить гнучку систему керування.

В рамках даної роботи була розроблена імітаційна модель вітрового потоку в пакеті Matlab Simulink яка близька до спектральної моделі і може бути використана для рішення задач керування ВЕУ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бізнес Цензор. Енергетика [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://biz.censor.net.ua/r3157247>.

УДК 621.527.2

Куланіна Є.В.

канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ НЕРОБОЧОГО ХОДУ В ОДНОФАЗНОМУ ТРАНСФОРМАТОРІ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Трансформатори малої потужності (ТМП) широко використовуються в різних електротехнічних установках, різноманітних пристроях для передачі і переробки інформації, в різних системах автоматики. До малопотужним трансформаторів належать трансформатори, номінальна потужність яких знаходиться в межах від одиниць, десятків вольт-ампер до 1000 ВА. Найбільше застосування серед ТМП мають силові трансформатори. Силові трансформатори малої потужності зазвичай виконуються однофазними і мають повітряне охолодження.

Фізичний процес роботи ТМП по суті такий же, як в трансформаторах середньої і великої потужності, але деякі параметри і величини, що пов'язані з потужністю трансформатора, є значно відмінними. До них відноситься струм неробочого ходу, який є важливим фактором ТМП і може сягати 50% значення первинного робочого струму трансформатора. Відрізняється і величина номінальної напруги короткого замикання і його структура (тобто співвідношення активної і реактивної складових) - в ТМП відносно більше падіння напруги в обмотках. Основними електричними параметрами силового трансформатора, що характеризують економічність його роботи, є втрати неробочого ходу і короткого замикання.

Проводиться дослідження режиму неробочого ходу однофазного трансформатора за допомогою програмного засобу Femm. В ході роботи в декілька ітерацій розраховано струми, що необхідні для створення напруг на клеммах

при розімкнутій вторинній обмотці. Ітераційний розрахунок використовується за рахунок скрипту в Octave.

Математичне моделювання та дослідження параметрів неробочого ходу проводиться на прикладі однофазного трансформатора ТБС2-0.1. Зазначений вище підхід до розрахунку доцільно та актуально використовувати для дослідження трифазних силових трансформаторів.

УДК 621.313

Літвінов Д.О.

старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

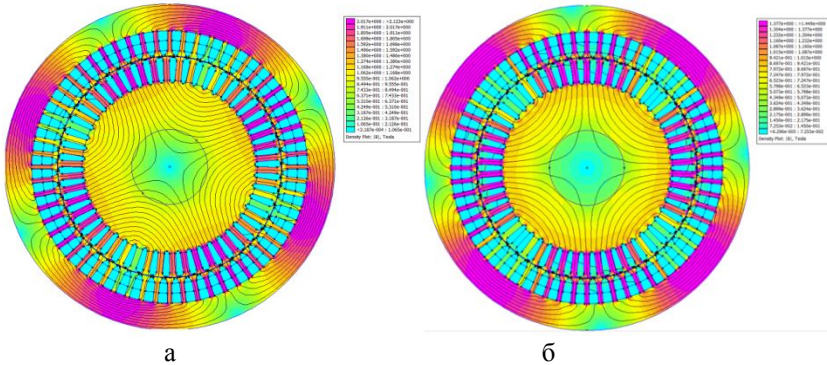
ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПОВОРІТІ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПОТУЖНІСТЮ 75 КВТ

В процесі дослідження динаміки було проведено математичний аналіз електромагнітних явищ, що відбуваються в асинхронному двигуні потужністю 75 кВт із використанням загальновідомих припущень, а також математичне моделювання двигуна з урахуванням втрат в осерді. Проаналізовано метод просторового вектора, який дозволяє спростити систему рівнянь для потокозчеплення статора та ротора. Виконано аналітичний розрахунок параметрів Г-подібної схеми заміщення для подальшого схемно-польового моделювання електромеханічних процесів. Приведено моделювання електромагнітних полів у двигуні із врахуванням повороту ротора відносно напрямку осі основної МРС. Проведено порівняльний аналіз аналітичного розрахунку та моделювання двигуна на базі математичної моделі засобами ФЕММ.

В результаті схемно-польового моделювання засобами ФЕММ було визначено, що у номінальному режимі при $t = 0$ магнітне поле локалізується у магнітній системі, найбільшого значення воно приймає в зубцях статора й ротора біля фази В та у спинці статора біля фази А та С.

У зубцях статора індукція магнітного поля лежить в інтервалах 1.465 Тл...2.123 Тл; у зубцях ротора 1.38 Тл...1.98 Тл; у спинці статора 0.9 Тл...1.7 Тл. (рис. 1а). При заданому повороті ротора на кут $\alpha = 90^\circ$ у зубцях статора індукція магнітного поля лежить в інтервалах 0.85 Тл...1.43 Тл; у зубцях ротора 0.68 Тл...1.28 Тл; у спинці статора 0.4 Тл...1.12 Тл. (рис. 1б).

Порівняльний аналіз кривих фазного струму показує, що в перехідних процесах похибка не перевищує 2,2%, а у сталому режимі - 0,35%. Аналіз кривих миттєвої споживаної потужності показує, що найбільші відхилення кривих спостерігаються при переході від початкового етапу пуску до сталого режиму й не перевищують 1,6%; 1,1% і 0,55% відповідно. Після переходу в усталений режим значення похибок не перевищують сотих часток відсотка.



а – при номінальному режимі ($t = 0$); б – при куті повороту ротора $\alpha = 90^\circ$.

Рисунок 1– Картина розподілу модуля магнітної індукції магнітного поля у структурі засобів FEMM.

Результати порівняльного аналізу робочих характеристик показали, що при використанні схемно-польового моделювання та дослідження динаміки електромагнітних процесів (поворот ротора) максимальна відносна похибка за струмом статора, коефіцієнту корисної дії не перевищує 1,76%, по споживаній активній потужності та коефіцієнту потужності не перевищує 1.15%.

Таким чином, застосування схемно-польового моделювання та дослідження динаміки електромагнітних процесів при повороті ротора, дозволило істотно підвищити точність моделювання електромагнітних процесів у трифазному АД.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов [Текст] /И. П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев – М: Изд. Юрайт, 2011. – 767 с.
2. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] /И. П. Копылов – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
3. Макаров, В.Г. Применение теории обобщенной электрической машины к трехфазному асинхронному двигателю [Текст]/ В.Г. Макаров// Известия вузов: Проблемы энергетики, 2009.– № 11-12. – С. 84-97.
4. Ярымбаш, Д.С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания [Текст] /Д.С.Ярымбаш, М.И. Коцур, С.Т. Ярымбаш, И.М. Коцур // Электротехника и электроэнергетика: ЗНТУ – 2017. – №1– С.24 – 30.

УДК 621.313

Солодовнікова Т.П.

старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Асинхронні машини є одними з самих розповсюджених електротехнічних пристроїв. MATLAB разом з Simulink і Power System Blockset дозволяють досліджувати процеси й параметри електричних машин, які найчастіше недоступні в реальних об'єктах. Набори віртуальних елементів у бібліотеках цих пакетів дозволяють змоделювати й досліджувати електричні кола будь-якої складності.

Для розробки навчальних програм на алгоритмічних мовах високого рівня необхідні фахівці-багатофункціонали, що однаково розбираються як у програмуванні, так і в електромеханіці. Зважаючи на це в навчальному процесі доцільно застосовувати такі математичні програми як MATHCAD, MAPLE, MATLAB.

За допомогою програми SIMULINK була створена універсальна віртуальна модель асинхронної машини (АМ) з можливістю перемикання між конструктивними виконаннями з фазним і короткозамкненим роторами. У ході розрахунку параметрів схеми заміщення було прийнято ряд допущень у зв'язку з тим, що АМ є, по суті, системою з розподіленими параметрами та нелінійністю рівнянь руху.

Для серії АД за допомогою дослідів були визначені параметри схем заміщення, отримані природні й штучні механічні та робочі характеристики в режимах двигуна й генератора та в режимі скалярного керування швидкістю, визначено сімейство залежностей ККД двигуна з фазним ротором від навантаження при різних величинах опорів ланцюга ротора. Визначено величину додаткового опору ланцюга ротора двигуна, що забезпечує діапазон регулювання швидкості його обертання.

Отримані осцилограми перехідних процесів по струмах, моментах, швидкостях обертання та ін. дозволяють візуально спостерігати досліджувані процеси в динаміці та передавати результати спостережень у програми з більшими можливостями щодо оформлення результатів та подальших розрахунків.

Віртуальні лабораторні роботи дуже зручно, швидко й наочно виконувати в середовищі пакета MATLAB. Це дозволяє підвищити інформативність навчального процесу і якість сприйняття інформації.

За допомогою програми SIMULINK була створена універсальна віртуальна модель асинхронної машини з можливістю перемикання між конструктивними виконаннями з фазним і короткозамкненим роторами.

Отримані осцилограми перехідних процесів по струмах, моментах, швидкостях обертання та ін. дозволяють візуально спостерігати досліджувані процеси в динаміці та передавати результати спостережень у програми з більшими можливостями щодо оформлення результатів та подальших розрахунків.

Віртуальні лабораторні роботи дуже зручно, швидко й наочно виконувати в середовищі пакета MATLAB. Це дозволяє підвищити інформативність навчального процесу і якість сприйняття інформації.

Практична цінність наукової роботи полягає в тому, що завдяки можливості відтворення, моделювання складних перехідних процесів в комп'ютерних програмах є можливість порівняння результатів дослідів з реальними в рамках одного предмету.

УДК 621.313

Дівчук Т.С.¹, Савельєв В.Г.²

¹ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

² доц. НУ «Запорізька політехніка»

ЗМЕНШЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗМІРНОСТІ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

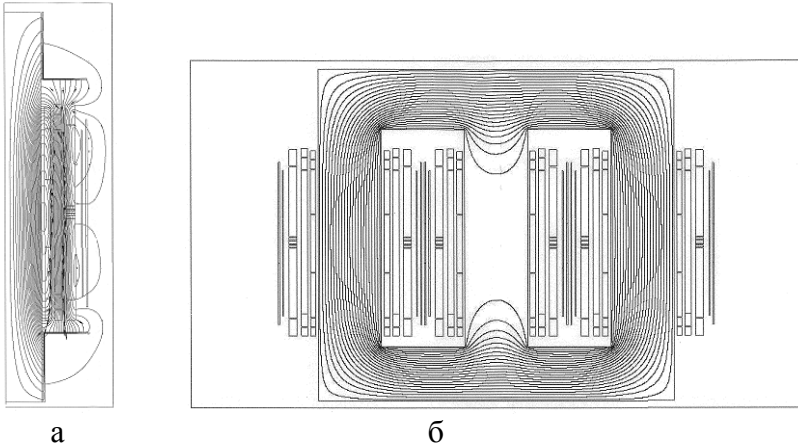
Електромагнітні процеси в активній частині силового трансформатора можна визначити шляхом розв'язання рівнянь диференціальної моделі Максвелла у частотному формулюванні відносно векторного магнітного потенціалу [1-3]

$$\begin{cases} \nabla \times \left[(\mu_0 \mu_{ej}) [B_j]^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j \right] + \\ + j\omega \sigma_j(\theta_j) (\mathbf{A}_j + V_j) = \mathbf{J}_{ej}, \end{cases} \quad (1)$$

де \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал; V – електричний потенціал; $\sigma(\theta)$ – питома електропровідність; $B_j = \nabla \times \mathbf{A}_j$ – індукція магнітного поля; μ_e – ефективна відносна магнітна проникність; θ – температура; ω – кутова частота; J_e – густина стороннього джерела струму; індекс j відповідає розрахунковій підобласті.

Чисельну реалізацію математичної моделі (1) з умовами калібрування Кулона, спряження та граничними умовами було здійснено методом скінчених елементів для силового трансформатора типу ТДТН-40000/110-У1. Зменшення просторової розмірності моделі електромагнітного поля (1) є її реалізація методом скінчених елементів для вісесиметричних і плоскопаралельних

полів. Таке моделювання здійснюється в поперечних перерізах активної частини силового трансформатора вертикальною площиною, що проходить через осі стрижнів магнітної системи (рис. 1б) для режиму неробочого ходу, а для режиму короткого замикання – вертикальною площиною, що проходить через вісь фази трансформатора перпендикулярно до площині його магнітної системи (рис. 1а).



а – вісесиметрична модель активної частини трансформатора у режимі КЗ; б – плоскопаралельна модель активної частини трансформатора у режимі НХ.

Рисунок 2 – Еквіпотенціальні лінії модуля векторного магнітного потенціалу.

Для завдання властивостей усіх провідникових, феромагнітних і електроізоляційних середовищ, а також граничних умов і побудови сітки скінчених елементів виконуються розрахунки і здійснюється візуалізація картини поля для вісесиметричної та плоскопаралельної задачі (рис. 1).

Реалізація математичної моделі просторового електромагнітного перетворення енергії змінного струму в активній частині силового трансформатора методом скінчених елементів для її взаємоперпендикулярних перерізів дозволяє істотно зменшити вимоги до програмного забезпечення і обмежити дослідження моделями вісесиметричного і плоскопаралельного поля у відповідності до дослідного режиму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yarymbash, D. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Subbotin, A. Oliinyk // IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, Slovakia. 2017 – Catalog Number CFP17CDT-USB – pp. 452-457. doi: **10.1109/DT.2017.8024332**
2. Yarymbash, D. The features of magnetic flux distribution of the idling mode of the power transformers [Text]/ D.Yarymbash, S. Yarymbash, T. Divchuk,, I. Kylymnik // Electrical Engineering And Power Engineering, 2016. Issue 2, pp. 5-12. doi: **10.15588/1607-6761-2016-2-1**
3. Yarymbash, D. Determination features of the power transformer short circuit parameters through field modeling [Text]/ D.Yarymbash, S. Yarymbash, T. Divchuk,, I. Kylymnik // Electrical Engineering And Power Engineering,, 2016, Issue 1, pp.12-17. doi: **10.15588/1607-6761-2016-1-2**

УДК 621.313

Боровіков А.К.¹, Гуразда А.В.¹, Шестов Л.Є.¹, Коцура І.М.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВНУТРІШНЬОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Основні причини важких ушкоджень силових трансформаторів в експлуатації пов'язані в першу чергу з ушкодженнями обмоток, високовольних вводів, пристроїв РПН як через розвиток дефектів під впливом експлуатаційних факторів, так і через помилкові або недостатні дії при монтажі, ремонті та експлуатації. Слід також відзначити проблему старіння ізоляції обмоток, пов'язану із загальною проблемою старіння парку силових трансформаторів.

Аналіз застосування діючих нормативно-технічних документів, рекомендацій та МЕК виявили необхідність проведення значного комплексу досліджень, розробок нових методів і критеріїв та вдосконалення існуючих для оцінки технічного стану силових трансформаторів, причому у першу чергу, з тривалими термінами експлуатації, в тому числі, для забезпечення оцінки їх граничного стану, обґрунтування продовження їх терміну експлуатації та забезпечення надійності роботи.

У зв'язку з цим важливо провести аналіз наявних традиційних і нових методів випробувань ізоляції і на цій основі зробити вибір раціональної системи контролю технічного стану внутрішньої ізоляції силових трансформаторів, що дозволяє підвищити ефективність оцінки технічного стану трансформаторів і автотрансформаторів.

Розроблена класифікація випробувань внутрішньої ізоляції силового трансформатора при різних режимах роботи. Для вибору раціональної системи випробувань ізоляції важливо виявити ефективні методи контролю, стосовно до кожного з режимів експлуатації силового трансформатора.

Складено перелік випробувань і вимірювань, що проводяться при різних режимах трансформатора.

Трансформатор відключено і розшиновано:

- відбір проб масла з бака трансформатора, бака контактора РПН і введів для фізико-хімічних і хроматографічних аналізів;
- вимірювання струму і втрат неробочого ходу при зниженій напрузі;
- вимірювання $\text{tg}\delta$, R і C ізоляції обмоток;
- вимірювання опору короткого замикання (Zк);
- вимірювання опору обмоток постійному струму;
- розрахункова оцінка вологовмісту та залишкового ресурсу твердої ізоляції;
- вимірювання коефіцієнта трансформації (при необхідності, наприклад, після проведення ремонтних робіт);
- контроль РПН у відповідності з інструкціями заводу-виробника.

Трансформатор під робочою напругою, неробочий хід:

- тепловізійне обстеження бака та інших вузлів трансформатора;
- вібраційне обстеження бака трансформатора;
- вимірювання параметрів ЧР і інших розрядів електричним методом;
- акустичне обстеження і локація електричних розрядів акустичним методом;
- вимірювання $\text{tg}\delta$ і C ізоляції введів (при наявності можливості).

Трансформатор під робочою напругою навантаження:

- тепловізійне обстеження бака та інших вузлів трансформатора;
- вібраційне обстеження бака трансформатора;
- вимірювання параметрів ЧР та інших розрядів електричним методом;
- акустичне обстеження і локація електричних розрядів акустичним методом.

При подальшому розвитку даної роботи планується проаналізувати методи випробувань ізоляції трансформаторів при різних режимах його роботи, виявити найбільш інформативні методи з урахуванням нових розробок в цій області.

УДК 621.313

Воложанін С.О.¹, Волощук О.С.¹, Гаврилова М.В.¹, Коцур І.М.²

¹ студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ДІАГНОСТУВАННЯ ПОШКОДЖЕНЬ ОБМОТОК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Асинхронні двигуни(АД) часто працюють при підвищеній температурі, вологості, запиленості та загазованості робочого середовища, комутаційних перенапруженнях та технологічних перевантаженнях, що знижує ресурс їх роботи. У переважній більшості випадків відмови АД відбуваються через пошкодження обмоток статора і ротора. Тому своєчасне виявлення місця та ступеню пошкоджень дозволить уникнути їх розвитку, зменшити час відновлення, скоротити витрати на обслуговування, уникнути простоїв обладнання, підвищити ефективність роботи двигунів та виробничих механізмів.

На сьогоднішній день відомі наступні методи діагностики АД:

- метод безперервного контролю стану обмоток статора і ротора АД за даними вимірювань фазних струмів і напруги. Для оцінки технічного стану АД використовуються симетричні складові струмів і напруги статора, а також споживана активна потужність і кут нахилу механічної характеристики електродвигуна в області робочих ковзань. Метод дозволяє уникнути похибки діагностування за наявності пульсацій та гармонійних складових в напрузі живлення. Недолік: результати вимірювання оцінюються за комплексним критерієм діагностування, що не дозволяє проводити локалізацію пошкодження;

- метод передбачає вимірювання фазних значень струму і напруги обмоток статора, і за величиною пульсацій третьої гармоніки робиться висновок про ступінь пошкодження обмоток. Для реалізації методу необхідне вимірювання значень струмів і напруги нульової послідовності, що можливо лише при підключенні обмоток у схему "зірка", яка не використовується у потужних АД;

- метод заснований на аналізі пускового струму в статорі в одній з фаз двигуна. В процесі діагностики відбувається порівняння кожного попереднього амплітудного значення струму фази з подальшим, і за отриманою різницею можна судити про наявність дефектів обмотки. Недоліки: реалізується лише в пусковому режимі;

- метод з вимірюванням миттєвих значень двох фазних струмів в сталому режимі роботи під навантаженням. Наявність пошкодження визначається за виглядом фазних миттєвих значень, що визначає залежність між миттєвими значеннями фазних струмів АД. Недолік: діагностика проводиться під навантаженням, не вказані чіткі критерії визначення пошкодження обмоток ротора;

- метод на основі аналізу зовнішнього магнітного поля (ЗМП) полягає у аналізі зміни магнітної індукції ЗМП АД, яке представляє собою сумарне магнітне поле, що створюється різними частотами магнітного поля двигуна та еcranу. Наявність пошкоджень обмотки ротора викликає появу у ЗМП просторової гармоніки, порядок якої нижче порядку основної, та яка значною мірою визначає рівень ЗМП АД. Недолік: складність дослідження та низька точність результатів дослідження;

- згідно методу, до випробовуваного стрижня підводиться електро- магніт змінного струму, що має обмотку намагнічування і вимірювальну обмотку. Діагностичною ознакою стану стрижня виступає величина МРС при постійній напрузі живлення. Недолік: необхідність виводу АД з технологічного процесу і його розбирання для встановлення вимірювальної апаратури;

- метод, заснований на тепловій дії електричного струму та підводі до кілець ротора напруги, при якій значення струму в стрижнях перевищує номінальне. В якості спостерігача за тепловим станом стрижнів ротора використовується тепловізор. Про стан стрижнів ротора судять по температурі нагріву під час протікання по ним струму: неушкоджені стрижні нагріваються сильніше обірваних. Недоліки: необхідність підведення струмів великих значень, необхідність розбирання двигуна;

- метод на основі аналізу спектру електромагнітного моменту. Метод передбачає вимірювання фазних струмів статора в режимі холостого ходу АД, визначення електромагнітного обертового моменту та порівняння значного числа гармонік спектру, які змінюються для певного діапазону частот. Недолік: необхідність врахування втрат у сталі двигуна для обчислень, що обумовлює складність розрахунку електромагнітного моменту.

Аналіз методів діагностики пошкоджень обмоток АД показав, що кожен з методів має як переваги, так і недоліки. Неefективними можна вважати методи, які потребують встановлення спеціального обладнання, виведення об'єкту діагностики з технологічного процесу, розбирання двигуна та неодноразової перевірки результатів діагностики кількома методами обробки діагностичних сигналів.

УДК 621.313

Слободян А.С.¹, Солодов В.Ю.¹, Тихоновський О.С.¹, Куланіна Є.В.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В життєвому циклі трансформатора можна виділити найбільш відповідальні моменти функціонування – це періоди, що пов'язані зі зміною режиму роботи, так звані перехідні процеси. Для контролю стану пристроїв та зниження ризику виходу з ладу створюються математичні моделі об'єктів в відповідних станах, методики розрахунку перехідних процесів та комплекси для діагностики.

В умовах експлуатації коротке замикання зазвичай виникає раптово в результаті різних несправностей (погіршення або руйнування ізоляції, несправність захисних пристроїв та інше). При цьому в трансформаторі виникає різкий перехідний процес, що супроводжується великими струмами, які можуть призвести до несправностей трансформатора. Тому дослідження та розрахунок динамічних режимів при короткому замиканні є актуальною темою.

Робота присвячена дослідженню трьохфазного короткого замикання силового трансформатора. У середовищі програмного пакета MatLab побудовано модель для реалізації короткого замикання трьохфазного силового трансформатора, що складається з джерела трьохфазного струму, блоку трансформатора з параметрами та блоку реалізації короткого замикання. Визначено параметри обмоток трансформатора та намагнічуючої гілки. Отриманні осцилограми перехідного процесу та визначенню діючих значень синусоїдальних напруг і струмів в сталому режимі методом математичного моделювання в пакеті MatLab.

УДК 621.313

Гарьковенко В.С.¹, Лавринєць А.В.¹, Павленко А.О.¹, Куланіна Є.В.²

¹ студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

² канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ НЕРОБОЧОГО ХОДУ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НИЗЬКИХ ЧАСТОТАХ

Робота трансформатора при напругах і частотах, що перевищують номінальні значення, може призвести до збільшення щільності магнітного потоку та втрати потужності в осерді. Таких режимів слід уникати. Однак є випадки,

коли така робота необхідна, особливо для малих трансформаторів в лабораторіях під час конкретних експериментів. Цікавим є випадок роботи трансформатора на частотах, нижчих від номінальної. Утримання напруги на номінальному рівні та зменшення частоти призведе до збільшення густини магнітного потоку в осерді. Це може призвести до насичення осердя та значного збільшення втрат. Однак у відповідній науковій літературі немає істотних повідомлень про цей ефект. Найпростіший спосіб спостереження за насиченням осердя - проведення випробування без навантаження трансформатора і вимірювання струму без навантаження та втрати потужності. Такий дослід описаний у міжнародному стандарті і коротко обговорено в літературі. Зазвичай це частина комплексних досліджень силових трансформаторів. Наскільки відомо, в даний немає достовірних результатів такого тесту на частотах, нижчих від номінальних.

Тому доцільно провести дослід неробочого ходу однофазного трансформатора на низьких частотах за допомогою комп'ютерного моделювання. Під час проведення дослідів необхідно отримати значення струму та втрат без навантаження.

УДК 621.313

Доля Б.О.¹, Сердюк Д.О.², Теремінова О.М.², Шовкопляс В.Є.², Літвінов Д.О.³

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПОТУЖНІСТЮ 55 КВТ ПРИ НАСИЧЕНОСТІ ЗУБЦІВ ОСЕРДЯ РОТОРА

Потреби господарства задовольняються головним чином двигунами основного виконання єдиних серій загального використання для привода механізмів, які не висувають особі вимоги до пускових характеристик, ковзання, енергетичним показникам, шуму. Міняючи частоту напруги, підведеної до статора, або змінюючи вид з'єднання обмоток статора можна міняти швидкість обертання й величину моменту на валу двигуна.

При проектуванні необхідно враховувати існуючі недоліки асинхронних двигунів, зокрема їх малий пусковий момент на валу й великий пусковий струм, який в 4.5-7 разів перевищує робочий; низький ККД у режимі часткових навантажень; неможливість контролю швидкості без втрат потужності; зменшення моменту обертання двигуна при його перевантаженнях. Отже, створення високоефективних та надійних асинхронних двигунів є одним з найважливіших господарських завдань країни, а правильний вибір двигунів,

їх експлуатація та високоякісний ремонт відіграють першочергову роль в економії матеріалів й трудових ресурсів.

Для визначення значень пускового струму та пускового моменту (або їх кратностей) було проведено дослідження електромагнітних процесів в асинхронному двигуні з короткозамкненим ротором типу 4A225M4У3 потужністю 55 кВт на базі схемно-польового моделювання. Прийняті та розраховані головні розміри дослідного двигуна, його обмоткові параметри. Розраховані параметри Г-подібної схеми заміщення двигуна. Проаналізовано змінення електромагнітного моменту при зміні активного опору обмотки ротора та частоти живлення мережі. Приведено моделювання електромагнітних полів у двигуні з урахуванням насичення зубців статора та ротора.

Обчислення струмів статора і ротора в момент часу $t = 0$ (момент пуску асинхронного двигуна), а також обчислення та збір необхідних результатів електромагнітного розрахунку проводилися за допомогою роботи програми FEMM автоматично із використанням спеціально написаного скрипта на мові Lua, вбудованому у програму FEMM.

В результаті розрахунку пускових параметрів асинхронного двигуна було визначено (табл.1) номінальний момент 350.17 Н·м, максимальний момент 770.4 Н·м при критичному ковзанні 0.109, пусковий момент 420.2 Н·м (або кратність 1.2), пусковий струм 688.55 А (або кратність 6.11).

Таблиця 1 – Значення механічного моменту

№	s	M, Н·м
1	0	0
2	0.5 \square sh	159
3	sh	350.17
4	1.5 \square sh	525
5	скр	770.4
6	0.6	423.7
7	0.8	413.2
8	1.0	420.2

У відповідності із отриманими значеннями індукцій в результаті схемно-польового моделювання асинхронного двигуна, надалі був проведений розрахунок параметрів магнітного ланцюга, для режиму неробочого ходу асинхронного двигуна потужністю 55 кВт, при якому для нього характерно відносно сильне насичення сталі зубців статора та ротора.

Насичення зубцевої зони приводить до сплюснення кривої поля у повітряному зазорі. При визначенні магнітної напруги ділянок магнітного ланцюга з нелінійними магнітними характеристиками вплив сплюснення був врахований спеціальними кривими намагнічування для зубців і ярем асинхронних

двигунів (сталь 2013), побудованими по основній кривій намагнічування з урахуванням вказаних залежностей.

За допомогою електромагнітного моделювання отримані значення моментів та уточнені параметри Г-подібної схеми заміщення надали змогу більш детально та точніше визначити параметри індукцій у зубцях ротора, при визначенні його геометричних параметрів, й відповідно точніше визначити пускові параметри двигуна ($M_{п}/M_{ном}$, $I_{п}/I_{ном}$) потужністю 55 кВт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Копылов, И.П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов [Текст] /И. П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев – М. : Изд. Юрайт, 2011. – 767 с.

2. Васьковский, Ю.Н. Определение интегральных характеристик электрических машин методами теории электромагнитного поля [Текст] /Ю.Н.Васьковский, Ю.А.Гайденко, С.С.Цывинский // Електротехніка і електромеханіка. –2006. –№ 1. – С. 28–32.

УДК 621.313

Горовий А.О.¹, Зубков І.В.¹, Колесник Б.О.¹, Савенко М.В.¹, Літвінов Д.О.²

¹ студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

² старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ВИЗНАЧЕННЯ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДІЕЛЕКТРИКА У МАСЛОНАПОВНЕНОМУ ТРАНСФОРМАТОРНОМУ УВОДІ 110 КВ

Будь-яка ізоляція нагрівається у разі прикладення до неї напруги. Причиною нагрівання є: наскрізні струми через ізоляцію, нагрів за рахунок уповільнених видів поляризації, іонізація газових включень в твердій ізоляції та неоднорідність структури ізоляції. Діелектричними втратами називають потужність нагріву ізоляції за рахунок прикладеної до неї напруги. Тангенс кута діелектричних втрат $[\operatorname{tg}(\delta)]$ – це характеристика ізоляційних властивостей діелектриків та конденсаторів, яка визначається як співвідношення між активною потужністю нагріву ізоляції та реактивною ємнісною потужністю в ізоляції. Кутом діелектричних втрат (δ) називають кут, що доповнює до 90° кут зсуву фази між напругою на ізоляції та струмом через ізоляцію.

Для визначеності ємності реальних конденсаторів або ізоляції використовують схеми заміщення. Найчастіше використовують дві найпростіші схеми заміщення, що складаються із ємнісного та резистивного елементів: послідовну та паралельну.

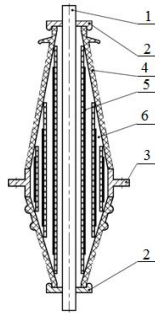
Для визначення кута діелектричних втрат та ємності ізоляції (багатошарової з алюмінієвих обкладинок) трансформаторного уводу конденсаторного

типу на 110 кВ була застосована пряма схема вимірювання за допомогою моста змінного струму Шерінга. Зовнішньою ізоляцією є фарфорова покривка. Внутрішня – це ділянки ізоляції (обкладинки із алюмінієвої фольги та технічне масло) у тілі уводу. Масло-бар'єрні уводи (110÷150 кВ) конденсаторного типу (рис. 1) застосовуються для підвищення пробивної напруги ($U_{пр}$), й отже для збільшення електричної міцності, а й також для зменшення нагріву. У конструктивному плані увід конденсаторного типу:

- розбивають внутрішній ізоляційний проміжок на n малих проміжків бар'єрами 5;

- вирівнюють поле металевими прокладками (фольга, що накладається на бар'єри).

В результаті $U_{пр}$ підвищується в $\sim 2,5$ рази.



1 – струмопровід (стрижень); 2 – високовольтний фланець; 3 – заземлений фланець; 4 – фарфорове тіло; 5 – бар'єри із обкладинками, 6 – технічне масло

Рисунок 1 – Трансформаторний увід конденсаторного типу на 110 кВ.

Обкладки вирівнюють поле у радіальному та аксіальному напрямках. Найбільш важливо вирівняти поле в аксіальному напрямку для зменшення довжини уводу, для цього уступи роблять однаковими. На рис. 2 наведені епюри розподілу напруженостей електричного поля у радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках масло-бар'єрного уводу.

Струмоведучий стрижень обмотується декількома шарами паперу. Основну електричну міцність ізоляції уводу забезпечує масло, що знаходиться усередині фарфорової покривки.

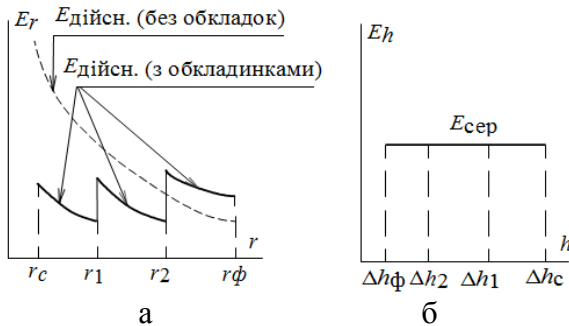


Рисунок 2 – Розподіл напруженості електричного поля у радіальному (а) та аксіальному (б) напрямках уводу.

У результаті проведеної експериментально-дослідної роботи з трансформаторним уводом конденсаторного типу на 110 кВ (який вже був в експлуатації) було визначено його основні ізоляційні характеристики: $C_x = 235.2$ мкФ (відповідає паспортному значенню 235 мкФ) тобто можна зробити висновок про неушкодженість алюмінієвих обкладінок внаслідок теплових та механічних навантажень та $\text{tg}(\delta) = 0.05$, що характеризує достатню електричну міцність ізоляції та можливість подальшої експлуатації даного уводу.

УДК 621.313

Левенкова О.І.¹, Оніпко А.Д.², Панченко Н.С.², Солодовнікова Т.П.³

¹ студ. гр. Е-227сп НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

РОЗПОДІЛ ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНИХ ЗУСИЛЬ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД РОЗМІЩЕННЯ РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ВИТКІВ ВЗДОВЖ ОБМОТКИ

Потреба у збільшенні потужності енергоблоків призвела трансформаторобудівників к більш складним завданням, бо зі збільшенням потужності трансформаторів збільшуються, як струми обмоток (i , відповідно, зростає інтенсивність полів розсіяння), так і потужності та геометричні розміри охолоджуючих пристроїв.

Збільшення струмів обмоток зумовлює виникнення значних вихрових струмів у всіх провідних елементах та додаткових втрат енергії – підвищення нагрівання.

У декотрих, спроектованих раніше, трансформаторах електродинамічні зусилля, які виникають в обмотках при коротких замиканнях можна суттєво

зменшити при більш раціональній конструкції обмоток та розміщенню регулювальних витків. Ці зусилля водночас приводять і до локальних порушень температурних режимів у конструктивних елементах.

На базі розрахунку трифазного триобмоткового трансформатора було проведено дослідження розподілу індукції та електродинамічних сил при роботі трансформатора при трьох різних розміщеннях регулювальних витків в обмотці високої напруги. Всі регулювальні витки при досліді ввімкнено, тобто трансформатор працює на максимальну напругу. Достатньо значна різниця в висотах обмоток додала несприятливі умови для розподілу індукції та сил, діючих на обмотки.

Графіки залежності індукції обмотки ВН в радіальному напрямку показують що пікові значення індукції спостерігаються при розміщенні регулювальних витків в середині обмотки ВН.

Максимальні зусилля стискування або розтягування в концентраторах при дослідженнях пар обмоток, однією з яких є обмотка ВН, спостерігаються при розташуванні регулювальних витків на $\frac{1}{4}$ та $\frac{3}{4}$ висоти обмотки ВН.

Максимальний тиск в прокладках та реакції на верхній та нижній опорах приймають найбільші значення при розташуванні регулювальних витків на $\frac{1}{4}$ та $\frac{3}{4}$ висоти обмотки ВН.

Проведені дослідження дозволяють зробити наступні висновки. За рахунок того, що обмотки НН та СН мають меншу висоту ніж обмотка ВН у верхній частині графіка електродинамічні сили обмотки ВН змінюють напрявлення, що є недоліком. Для уникнення такого неврівноваженого розподілу електрорушійних сил бажано передбачити при конструюванні обмоток НН та СН таке виконання при якому обмотки будуть мати висоти рівні висоті обмотки ВН:

- для обмотки НН за рахунок виконання більшої кількості транспозицій, або виконання обмотки двоходовою;
- для обмотки СН за рахунок збільшення кількості котушок та вибору іншого дроту.

УДК 621.313

Губарев В.І.¹, Левченко А.І.², Маслій В.К.², Солодовнікова Т.П.³

¹ студ. гр. Е-227сп НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

ЗАЛЕЖНІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІД СХЕМИ ЖИВЛЕННЯ ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ

Синхронні генератори є одними з самих розповсюджених електротехнічних пристроїв. Їх проектування, як правило, здійснюється на основі апробо-

ваних класичних інженерних методик. Але, завдяки великій кількості спрощень, які лише частково враховують процеси і явища, що відбуваються у синхронних генераторах, вони мають суттєві недоліки, що зменшують точність розрахунків та не потребують подальшої розробки вже існуючих конструкцій.

Сучасним програмним забезпеченням можливо вирішити ці проблеми та провести розрахунки на більш високому рівні без урахування деяких спрощень та додаючи нові граничні обмеження.

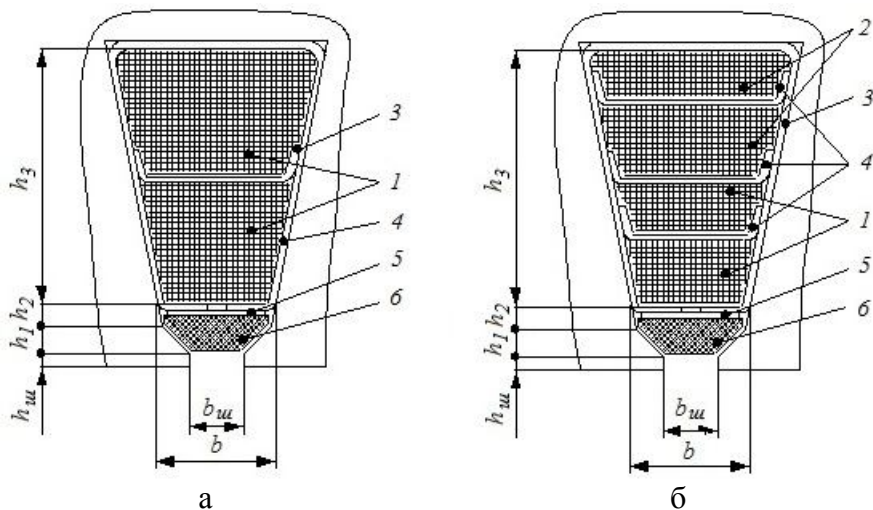
При проектуванні синхронних генераторів з самозбудженням з однаковими вихідними даними та конструкцією, але з різними способами живлення обмотки збудження були побудовані характеристики холостого ходу, векторні діаграми для номінального навантаження і часткові характеристики намагнічування. Було проведено оцінку масогабаритних характеристик спроектованих машин, втрат потужності та ККД, розраховано та побудовано основні характеристики синхронних генераторів.

У проєктованому синхронному генераторі за рахунок застосування додаткової (рис. 1) обмотки статора для живлення обмотки збудження вдалося зменшити витрати активних матеріалів, в порівнянні з генератором з живленням обмотки збудження від однієї загальної обмотки статора.

Критерієм оптимізації було прийнято сумарні витрати активних матеріалів. У витрати активних матеріалів увійшли: маса електротехнічної сталі статора, ротора та полюсних наконечників; маса міді обмоток статора, обмотки збудження, стрижнів демпферної обмотки з короткозамкненими.

На базі виконаних розрахунків було отримано результати, які дозволяють зробити висновок, що синхронний генератор із живленням обмотки збудження від незалежної обмотки статора має кращі техніко-економічні характеристики, такі як:

- більше значення ККД;
- меншу вагу активних матеріалів;
- живлення обмотки збудження від незалежної обмотки статора дозволяє зменшити та відокремити безпосередній вплив загальної обмотки на струм живлення блока керування збудження, тому такий генератор більш стабільним під час його роботи в перехідних режимах.



а – генератор 1; б – генератор 2;

1 – дріт загальної обмотки ПЕТВ; 2 – дріт додаткової обмотки ПЕТВ; 3, 4 – плівкопласт (ізофлекс); 5 – плівкосинтокартон; 6 – клин.

Рисунок 1– Розміщення всипної обмотки в пазу генератора.

Характеристики обох видів генератора можна покращити використавши нові марки електротехнічної сталі з кращими магнітними характеристиками та меншими питомими втратами на перемагнічування. Це дозволить зменшити магнітну насиченість статорів, що в свою чергу дозволить зменшити габарити та вагу генераторів. Використання нових видів діелектриків дозволить зменшити товщину ізоляції провідників та пазів. Це буде сприяти кращому відводу тепла із пазів.

УДК 621.313

Дубров Є.П.¹, Петров З.Г.¹, Верхолапов С.Д.¹, Семивол В.В.², Дівчук Т.Є.³

¹ студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ СХЕМНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ СИЛОВИХ ТАНСФОРМАТОРІВ

При дослідженні силових трифазних трансформаторів в режимах неробочого ходу та дослідного короткого замикання їх параметри можуть бути представлені у вигляді схем заміщення [1-4]. Найбільш поширеними є Т-подібна, П-подібна та Г-подібна схеми заміщення трансформатора [1]. Як правило, П-подібна схема заміщення використовується у випадках, коли ярма насичуються сильніше ніж стрижні [1], Т-подібна схема заміщення може бути корисною для дослідження трансформаторів з магнітними шунтами, для автотрансформаторів з розташуванням послідовної обмотки ближче до стрижня. Г-подібна схема заміщення є найбільш наближеною до умов дослідних режимів неробочого ходу та короткого замикання, але саме П-подібна схема заміщення є необхідною для визначення похибки розрахунків за спрощеною Г-подібною схемою [1].

Для покращення точності, достовірності і адекватності розрахунків параметрів трансформаторів на етапі конструкторської підготовки виробництва силових трансформаторів вибір більш ефективної схеми за ознаками обчислювальної ефективності і точності потребує детального аналізу.

Для визначення електричних параметрів застосовуються відомі співвідношення для Т – подібної схеми заміщення [1] та вирази для П-подібної схеми заміщення [1].

Якщо електричні параметри неробочого ходу і короткого замикання вважати взаємозалежними і знехтувати падінням напруги на опорі первинної обмотки від струму намагнічування, то П – подібну схему можна перетворити у Г – подібну схему. Це може привести до похибки, обумовленою даною схемною моделлю, тому що не враховано струм намагнічування у колі первинної обмотки. Але струм неробочого ходу силових трансформаторів добігає 1% від номінального струму трансформатора тому таке спрощення може бути допустимим. Опори первинної обмотки послідовно вмикаються з приведеними опорами вторинної обмотки, а при їх додаванні визначаються опори дослідного режиму КЗ трансформатора R_k і X_k [1, 2].

Параметри Г- подібної схеми заміщення можуть бути достовірно виміряні та розраховані у дослідних режимах неробочого ходу і короткого замикання під час випробувань силових трансформаторів, що потребуватиме додаткових ресурсів.

Сучасним аналогом дослідних випробувань є сучасні програмні засоби, в основі яких лежить метод польового моделювання. Тому аналіз роботи трифазних силових трансформаторів з плоскою магнітною системою на етапі конструкторської підготовки потребує обґрунтування обчислювальної сумісності та ефективності польового моделювання з різними видами схем заміщення в режимах неробочого ходу та короткого замикання. Це забезпечить вимоги підвищення точності ідентифікації параметрів схем заміщення засобами математичного моделювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Лейтес, Л. В. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов [Текст] / Л. В. Лейтес, А. М. Пинцов. М.: Энергия, 1974, 192 с.
2. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов [Текст] / П. М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. –528 с.
3. Пентегов, И.В. Связь между параметрами электромагнитных, принципиальных схем и схем замещения двухобмоточных трансформаторов [Текст]/ И.В. Пентегов, С.В. Рымар, И.В. Волков // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 3. – С. 67-79.
4. Яримбаш, Д.С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання [Текст] / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. 2016. № 1, С.12-17. doi: 10.15588/1607-6761-2016-1-2.

УДК 621.313

Петров К.В.¹, Савін Р.В.¹, Подус О.Р.², Дівчук Т.Є.³

¹ студ. гр. Е-219м НУ «Запорізька політехніка»

² студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

³ старш. викл. НУ «Запорізька політехніка»

УДОСКОНАЛЕННЯ КЛАСИЧНОЇ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ FEMM

Однією з основних задач проектування силового трансформатора є вибір конструктивної схеми магнітної системи. При її розрахунку в першу чергу повинні бути передбачені можливості зменшення втрат та струмів неробочого ходу, мінімальні витрати електротехнічної сталі. Для плоскої шихтованої магнітної системи визначають: план шихтування пластин, кількість ступенів в перерізі стрижнів та яра, розміри пакетів – ширина пластин та тов-

щина пакетів, розташування та розміри охолоджуючих каналів, повні та активні перерізи стрижня та ярма, висота стрижня, відстань між вісями стрижнів. Геометричні розміри магнітної системи обираються у відповідності з попереднім розрахунком, спираючись на оптимальний варіант співвідношення параметрів неробочого ходу та розмірів її конструктивних елементів, та, як наслідок, витрат активних матеріалів, що є актуальним питанням сьогодення.

Класичні методи розрахунку конструкції трансформатора базуються на спрощеннях та припущеннях. Визначення вихідних даних супроводжується розрахунком основних коефіцієнтів за допомогою яких розраховуються величини втрат та струмів неробочого ходу, густина струмів, переріз проводів, геометричні розміри активної частини, маси матеріалів та мінімальна вартість. Розміри цих величин зазвичай суттєво відрізняються від кінцевого результату проектування та їх розрахунок займає багато часу.

Існуюча конкуренція на ринку виготовлення трансформаторів та електропромислових виробів взагалі вимагає модернізації та швидкого реагування на вимоги споживачів електротехнічної продукції. Тому існує необхідність уточнення методів розрахунку та скорочення витрат часу на них.

Класична методика розрахунку трансформатора крім попереднього вибору кількох можливих марок сталей магнітної системи та відповідних їм питомих втрат та намагнічуючих потужностей передбачає розрахунок десятків допоміжних коефіцієнтів, що в результаті зводиться до отримання коефіцієнту β , який відповідає мінімальній вартості активних матеріалів. Потім, опираючись на цей коефіцієнт розраховуються кілька варіантів можливих конструкційних рішень трансформатора, що значно збільшує витрати часу при розрахунку трансформатора. Але в цій же класичній методиці існує ряд нормалізованих діаметрів стрижня магнітної системи, які напряму залежать від коефіцієнту β при якому загальна вартість активної частини трансформатора не перевищує 1% від мінімальної вартості попередньо розрахованої.

Для обраного, як приклад, трифазного трансформатора типу ТМ-1000/35-У1 значення діаметру стрижня магнітної системи може бути обраним від 0,22 до 0,27 м. Відповідно обраним значенням можливих нормалізованих діаметрів стрижнів трифазного трансформатора типу ТМ-1000/35-У1 робимо розрахунок основних параметрів, яке зводиться до розрахунку геометричних розмірів магнітної системи, та значення електрорушійної сили.

Для оптимального вибору конструкції магнітної системи трансформатора типу ТМ-1000/35-У1 проводимо розрахунок в середовищі програмного засобу FEMM методом скінчених елементів. Реалізація розрахунків проводиться для геометричних розмірів трьох магнітних систем, значення діаметрів яких лежать в межах $1,92 < \beta < 3,96$.

З отриманих картин магнітних полів геометричних моделей активної частини трансформатора з різними діаметрами стрижнів магнітної системи за допомогою ПЗ FEMM отримані значення енергії магнітного поля та індукцій в стрижнях магнітної системи, що дає змогу розрахувати параметри неробочого ходу (табл. 1).

Таблиця 1 – Параметри неробочого ходу трансформатора типу ТМ-1000/35-У1 визначені засобами ПЗ FEMM

Діаметр стрижня, d_c , м	Енергія поля, Дж	Загальний опір, Ом	Індуктивність, Гн	Індуктивний опір в режимі неробочого ходу	Активний опір в режимі неробочого ходу	Втрати неробочого ходу, кВт
0,22	21,9	22047,24	96,55	21782,5	3406,42	2317,86
0,24	23,52	22047,24	103,69	21710,8	3836,94	2610,82
0,27	18,26	22047,24	80,51	21783,2	3398,1	2312,21

З таблиці видно, що втрати неробочого ходу для магнітної системи з діаметром стрижня 0,24 м зменшені в порівнянні з задами при діаметрі стрижня 0,22 м та 0,27 м для обраної марки сталі. При її змінненні можливий перерахунок за існуючими моделями магнітної системи побудованими в ПЗ FEMM. Похибка розрахунку втрат неробочого ходу складає 9,16% для діаметра стрижня 0,22 м; 9,05% для діаметра стрижня 0,24 м; 9,158% для діаметра стрижня 0,27 м.

Удосконалення існуючого методу дозволило скоротити попередній розрахунок до визначення вартісного коефіцієнту, при визначенні параметрів неробочого ходу не використовувати наступні коефіцієнти: k_{np} – коефіцієнт, який враховує збільшення втрат при розкрою сталі, $k_{тв}$ – коефіцієнт, який враховує видалення задилок на сталі, $k_{фв}$ – коефіцієнт, який залежить від форми перерізу ярма, $k_{пш}$ – коефіцієнт, який залежить від способу пресування ярма та стрижня, $k_{пч}$ – коефіцієнт, який залежить від марки сталі, форми стиків та індукції, а перейти для дослідження реальних активних частин силового трансформатора.

Використання методу польового моделювання засобами ПЗ FEMM дозволило дослідити режим неробочого ходу та отримати характерні для нього картини поля. Визначення втрат неробочого ходу за результатами моделювання дало можливість обрання дійсної магнітної системи та прискорити розрахунок конструкції силового трансформатора.

УДК 621.313

Хацаревич М.В.¹, Яримбаш Д.С.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКТОРІ КАЛІБРУ МУНДШТУКА ПРЕСУ

Розвиток сучасної промисловості України неможливий без зменшення рівня енерговитрат при одночасному поліпшенні рівня якості продукції. Це також відноситься і до графітового виробництва, для кожного його технологічного процесу. Унікальною продукцією українського графітового виробництва є подові блоки для алюмінієвих електролізерів та доменні блоки що використовуються для футеровки доменних печей, які мають значний попит на світових ринках. Для виготовлення заготовок цих вугільно-графітових блоків використовуються потужні преси з масними мундштуками, що обладнані системами індукційного нагріву з автоматичним регулюванням [1]. Сучасні системи автоматичного регулювання індукційного нагріву, дозволяють забезпечити температурних режими нагріву, рівномірний розподіл температур по робочій поверхні мундштука преса, високі коефіцієнти корисної дії та потужності при роботі на токах промислової частоти [1].

Підвищення точності і ефективності керування електротехнічним комплексом індукційного нагріву залежить від адекватності опису математичної моделі об'єкту. Розробка і запровадження нових енергоефективних конструктивних рішень систем індукційного нагріву мундштука пресу потребує чіткої ідентифікації їх параметрів для забезпечення точності і ефективності керування. Експериментальні дослідження на діючому обладнанні мають значні технологічні і фінансові обмеження. Тому актуальним є розробка нових конструктивних рішень на основі використання сучасних методів математичного моделювання електромагнітних і електротеплових процесів в індукторах пресу з масивним осердям. Такі моделі повинні з високою точністю описувати процеси у тривимірних геометричних областях об'єкту із врахуванням його конструктивних особливостей і електрофізичних та магнітних властивостей матеріалів, для точної ідентифікації їх параметрів під час технологічного процесу.

Метою роботи було дослідження нестационарних електромагнітних і теплових процесів індукційного нагріву при виготовленні заготовок подових і доменних блоків із врахуванням конструктивних особливостей, нелінійності властивостей активних та конструкційних матеріалів, а також застосування ефективних методів її реалізації, що забезпечують високу точність і адекватність визначення параметрів індукторів мундштука преса для запровадження нових енергоефективних конструктивних рішень.

Зазвичай індуктори мундштука преса мають конструктивне виконання з масивним сердечником, в пазах якого розміщуються ізольовані мідні стрижні обмотки. Сердечник індуктора охоплюється сталевим кожухом. В роботі також досліджувалось нове конструктивне рішення індуктору «оберненої» конструкції, коли роль масивного осердя виконував мундштук пресу, що дає змогу забезпечити його прямий нагрів.

Нестаціонарні електромагнітні та теплові процеси індукційного нагріву мундштука пресу, можуть бути представлені системою рівнянь

$$\begin{cases} \sigma_i \mathbf{A} \tau_i + \nabla \times \left[(\mu_0 \cdot \mu_i)^{-1} \cdot \nabla \times \mathbf{A}_i \right] = 0; \\ c_i \rho_i t_{\tau_i} = \operatorname{div} \left(\lambda_i \cdot \overrightarrow{\operatorname{grad} t_i} \right) + p_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

σ – питома електрична провідність; μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ – відносна магнітна проникність; c – питома теплоємність; ρ – питома вага; λ – коефіцієнт теплопровідності; індекси $i=1,2,3$ відповідають феромагнітним (1), провідниковим (2) та ізоляційним (3) матеріалам індуктору.

Потужність питомих втрат в активних матеріалах індуктору визначається співвідношенням $p_{i,j} = \sigma_{i,j} \cdot j^2$, де j – густина струму.

Система (1) доповнювалась граничними умовами на поверхнях сполучення середовищ з різними електромагнітними властивостями, на зовнішніх поверхнях і поверхнях магнітної ізоляції, граничних поверхнях, обтічних електричним струмом, на поверхнях симетрії і електричної ізоляції [2] та умовами конвективного теплообміну з навколишнім середовищем на зовнішніх поверхнях (умови 3 роду) і кондуктивного теплообміну, на границях сполучення середовищ з різними теплофізичними властивостями [2].

Реалізація системи (1) з відповідними умовами виконувалась методом скінченних елементів [2].

За результатами моделювання визначався просторовий розподіл температур, складових векторного магнітного потенціалу, магнітної індукції і напруженості, густини вихрових струмів і питомих втрат в індукторі.

Для валідації запропонованої моделі виконувалось порівняння результатів розрахунку із експериментальними даними. Відносна похибка розрахункових значень повної потужності індукторів заходу і калібру становить 4,5...6,1%, активної потужності - 4,1...6,5%, коефіцієнта потужності - 5,4...7,1%. Це підтверджує адекватність математичної моделі та можливість виконання подальших досліджень на її основі для підвищення енергоефекти-

вності індукційного обігріву мундштука преса при виготовленні заготовок подових блоків.

Розрахунки активної потужності індукційного нагріву і коефіцієнту потужності виконувалися для інтервалу зміни напруги на обмотці індуктору калібру 90...140 В та потужності індукційного нагріву 40...65 кВт.

За результатами моделювання визначено, що ріст напруги призводить до збільшення магнітного потоку в осерді індуктору та сталевому кожусі, що в свою чергу обумовлює суттєве зниження магнітної проникності і зростання глибини проникнення магнітного поля та збільшення потужності тепловиділення від вихрових струмів. Це відображається на зміні коефіцієнту потужності індукційного нагріву. З ростом напруги на обмотці індуктора коефіцієнт потужності підвищується з 0,61 до 0,67. Інтенсивніше відбувається зміна коефіцієнту потужності в інтервалі напруги 90...110 В з подальшою його стабілізацією при напрузі понад 110 В на рівні 0,66...0,67. Аналогічним чином коефіцієнт потужності змінюється з ростом активної потужності, споживаної індуктором, досягаючи максимальних значень при потужності понад 40 кВт.

Підвищення температури індуктору має неоднозначний вплив. З одного боку, воно обумовлює зниження магнітної проникності і збільшення глибини проникнення магнітного поля, а з іншого – зниження електропровідності осердя, що призводить до зменшення питомої потужності тепловиділення від вихрових струмів. З ростом температури індуктора в інтервалі 180...270 С, при напрузі 110 В або активній потужності більше 40 кВт коефіцієнт потужності досягає максимуму 0,66...0,67, а потім, при температурах вище 270°С – знижується.

Таким чином, наведена математична модель для нестационарних електромагнітних і теплових процесів індукційного нагріву адекватно враховує конструктивні особливості та нелінійність властивостей матеріалів. Її реалізація методом скінченних елементів забезпечує високу обчислювальну ефективність і точність розрахункових результатів, що дозволяє отримати кількісні оцінки впливу на коефіцієнт потужності індукційного нагріву змін температурних завдань і діючих значень напруги на обмотці індуктору. Встановлено, що для підвищення енергоефективності індукційного нагріву мундштука преса, температурні завдання для точки під осердям індуктору не повинні перевищувати 270°С, а діючі значення напруги на обмотці індуктора мають бути не нижче 110 В. Це дозволить підтримувати значення коефіцієнту потужності для розглянутої конструкції індуктору на рівні близькому до максимальних значень 0,66...0,67.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кувалдин, А.Б. Исследование электрических и энергетических характеристик нагревательных систем со стержневыми индукторами [Текст]/А.Б. Кувалдин, А.И. Дианов //Вестник МЭИ. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 56-61.
2. Ярымбаш, Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока [Текст]/ Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Электротехника и энергоэлектроника. – 2011. – №1. – С. 64–69.

УДК 621.313.6

Олійник Є.С.¹, Ярымбаш Д.С.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БІЧНОГО ШИНОПАКЕТУ ПЕЧІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Технологічний процес виробництва карбіду кремнію є тривалим та енергоємним. Якість продукції суттєвим чином залежить від дотримання технологічних режимів. З урахуванням тенденції зростання цін на енергоносії і значної частки цих витрат в собівартості продукції, проблема підвищення енергоефективності електротехнічних комплексів виробництва карбіду кремнію є доволі актуальною.

Втрати в коротких мережах досягають 12% електричних втрат комплексу, що визначається особливостями конструкції шинних пакетів пічної петлі і взаємним розташуванням ядра, струмовідводів і бічних шинних пакетів. При оптимізації взаємного розташування ядра і бічних шинних пакетів потрібно досліджувати електромагнітні процеси в пічній петлі. З урахуванням виробничих умов і технологічних особливостей виробництва карбіду кремнію доцільно проводити такі дослідження на математичних моделях, апробованих раніше для подібних класів задач.

Метою дослідження була оптимізація розташування бічного шинного пакету короткої мережі відносно печі опору для виробництва карбіду кремнію для підвищення енергетичної ефективності.

Енергетичну ефективність технологічного процесу виробництва карбіду кремнію можна оцінювати як співвідношення активної потужності ядра при температурі карбідизації кремнію до потужності трансформатору живлення. Фіксуєючи параметри трансформатору живлення, пристрою компенсації реактивної потужності та шинного пакету у трансформаторній камері можна сформулювати локальний критерій енергоефективності для пічної петлі у вигляді відношення активної потужності ядра при температурі карбідизації

кремнію до повної потужності на відводах шинного пакету трансформаторної камери (ШПТК):

$$\max \frac{P_{\text{кern}}}{S_{\text{ШПТК}}} = \max \left(\operatorname{Re} \left[\left(\dot{U}_{\text{ШПТК}} - \sum_i \dot{U}_i \right) \cdot I \right] / \left| \dot{U}_{\text{ШПТК}} \cdot I \right| \right), \quad (1)$$

так як напруга на керна печі для виготовлення карбіду кремнію визначається напругою на відводах ШПТК – $U_{\text{ШПТК}}$ і падіннями напруги на елементах пічної петлі і струмопідводах печі – U_i .

Ці падіння напруги обумовлюються електромагнітними процесами в елементах короткої мережі, які описуються системою диференціальних рівнянь для амплітуд векторного магнітного потенціалу в комплексній формі, наведеної в [1] з відповідними граничними умовами.

Математична реалізація електромагнітної моделі [1] може бути істотно спрощена, якщо, з урахуванням співвідношення геометричних розмірів керну, струмопідводів печі для виготовлення карбіду кремнію і бічних шинних пакетів (БШП), перейти від просторової формулювання до плоскопаралельної постановки виду [1]:

$$\mathbf{A} = \bar{\mathbf{k}} \cdot A_z, \mathbf{B} = \mathbf{i} \cdot B_x + \mathbf{j} \cdot B_y, \mathbf{H} = \mathbf{i} \cdot H_x + \mathbf{j} \cdot H_y \quad (2)$$

Розв'язок математичної моделі виконувався за допомогою методу скінченних елементів у середовищі ПЗ COMSOL Multiphysics [1]. Розрахунки проводилися для існуючого дворядного виконання бічного шинного пакету з дванадцяти алюмінієвих шин з одного боку печі.

За результатами моделювання визначались комплексні значення амплітуд струмів в керні та шинах бічного шинного пакету.

Достовірність і точність результатів моделювання підтверджувалася порівнянням розрахункових даних з даними вимірювання у виробничих умовах при технологічному процесі виготовлення карбіду кремнію. Відносна похибка розрахунку діючих значень падінь напруги склала 4,5...7%.

Розподіл струмів обумовлено впливом зовнішнього поверхневого ефекту для шин бічного пакету та впливом ефекту близькості для керна і шин і залежить від їх взаємного розташування. Тому найбільше струмове навантаження несуть крайні шини пакету, розташовані ближче до керну печі. Кратність струмового навантаження між шинами бічного пакету досягає 6,5, а додаткові втрати в БШП становлять 28%.

За даними моделювання визначено оптимальне розташування керн і бічних пакетів шин при якому електромагнітне поле практично симетрично до поздовжньої осі печі в поперечному перерізі пічної петлі. Розподіл струмів в рядах шин бічних пакетів шин також наближається до симетричного, а нерівномірність їх навантаження знижується. Втрати у шинах бічного пакету зменшуються на 18%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярымбаш Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока [Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Электротехника и энергоэнергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69.

УДК 621.313.3

Василенко Д.С.¹, Ярымбаш Д.С.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОБОЧОМУ ПРОСТОРІ ПЕЧІ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КАРБІДУ КРЕМНІЮ

У вітчизняній абразивній промисловості для виготовлення карбіду кремнію використовуються електропечі опору змінного струму прямого нагріву. Енергоємність процесу карбідизації досягає 5...12 Мвт·годин на тону продукції. Характерною особливістю процесу карбідизації є необхідність дотримання чітких температурних режимів [1]. Це обумовлює як на якість продукції так і рівень енерговитрат.

Недостатнє вивчення механізмів розподілу активної потужності, особливостей нагріву робочого простору електропечі опору для виготовлення карбіду кремнію та формування температурного поля в залежності від властивостей матеріалів компонентів завантаження обмежують можливості подальшого підвищення якості продукції та енергоефективності технологічного процесу.

Впровадження нових технічних в електротехнічному комплексі та організаційних рішень в технологічному процесі виготовлення карбіду кремнію, що забезпечуватимуть підвищення рівня енергоефективності та якості продукції, обумовлюють актуальність створення нових високоточних математичних моделей електромагнітних, електротеплових та тепломасобмінних процесів із розширенням їх застосування для дослідження процесів виробництва карбіду кремнію.

Метою дослідження був аналіз впливу електрофізичних властивостей складових компонентів робочого простору електропечі опору на розподіл активної потужності та енергоефективність технологічного процесу виготовлення карбіду кремнію на основі моделювання електромагнітних та електро-теплових процесів із врахуванням особливостей конструкції та геометричних розмірів печі.

Для опису електромагнітних та електротеплових процесів у електропечі опору для виготовлення карбіду кремнію використовувалась математична модель, наведена у роботі [2]. Враховуючи, що довжина печі значно перевищує її поперечні розміри, використовувалось припущення, що розподіл векторного магнітного потенціалу та температури вздовж печі є постійним і розглядалися процеси у двовимірному наближенні [2]. Реалізація моделі виконувалась методом скінченних елементів у середовищі ПЗ FEMM [3].

Відносні похибки розрахунків падінь напруги та активної потужності не перевищували 1,2 % і 1,5 % при заданих значеннях струмового навантаження. Перевірка результатів моделювання за електричними параметрами виконувалась шляхом порівняння з даними вимірювань на діючому технологічному обладнанні.

В процесі роботи опір керну електропечі опору для виготовлення карбіду кремнію зменшується у 4...5 раз, що впливає на зміну коефіцієнту потужності на 10...15 %, що обумовлює необхідність компенсації реактивної потужності печі. Питомий електричний опір печі визначається співвідношенням питомих електричних опорів складових керна та теплоізоляції. Майже 90% потужності виділяється у «свічі». Для нормальних умов роботи основні втрати визначаються рівнем теплових втрат, які залежать від електрофізичних властивостей і якості формування робочого простору печі.

Неякісне формування керна печі може призводити до суттєвого погіршення показників енергоефективності через появу містків теплоти та струмів витoku, які можуть призводити до збільшення рівня втрат на 15...25 %. Це свою чергу може призводити до зменшення активної потужності печі її робочих температур та суттєвого погіршення якості продукції через недотримання технологічних режимів. Тому, доцільно при роботі електропечей виконувати автоматизований контроль її електричних параметрів зі сторони торців в місцях під'єднання до шинних пакетів.

Таким чином, запропоновані математичні моделі, адекватно відображають особливості електромагнітних, електротеплових і тепломасообмінних процесів в печі для виготовлення карбіду кремнію, враховують особливості її конструкції та робочого простору і температурні залежності електрофізичних і теплофізичних властивостей матеріалів. Відносні похибки розрахунків падінь напруги на бічних шинопроводах і активної потужності не перевищують 0,12 % і 1,5 % при порівнянні з даними реєстрації електричних режимів під

технологічного процесу на трансформаторі живлення. Встановлено, що рівень втрат суттєво залежить від якості виконання теплоізоляції печі і її властивостей. При порушеннях регламенту формування робочого простору електропечі опору для виготовлення карбіду кремнію можуть з'являтися струми витоку, що призведе до збільшення рівня втрат та суттєвого погіршення якості продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Производство абразивных материалов [Текст]/ А.С. Полубелова, В.Н. Крылов, В.В. Карлин, И.С. Ефимова. Л.: Машиностроение, 1968. 180 с.
2. Ярымбаш, Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока[Текст] / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Электротехника и энергоэнергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69.
3. FEMM 4.2 – режим доступу: <http://www.femm.info/wiki/Download>.

УДК 621.365.32

Мордзинський Р.Б.¹, Ярымбаш Д.С.²

¹ студ. гр. Е-919м НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ШИННИХ ПАКЕТАХ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ ОПОРУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КАРБІДУ КРЕМНІЮ

Технологічний процес виробництва карбіду кремнію характеризується високою енергоємністю (до 5...12 МВт·год на тонну продукції). Потужність електропечей опору для виробництва карбіду кремнію досягає 4...5 МВт а тривалість технологічної кампанії досягає 40 годин. Це обумовлює потребу у пошуку нових шляхів підвищення енергоефективності та відсотку якості продукції для її конкурентоспроможності на світових ринках.

Втрати активної потужності у короткій мережі електропечі опору можуть сягати 10...12% від повної активної потужності комплексу. Це обумовлює актуальність задачі раціонального конструювання шинних пакетів нових або модернізованих електропечей опору для виробництва карбіду кремнію великої потужності, які забезпечують підвищення енергоефективності технологічного процесу.

Як правило, при проектуванні коротких мереж електропечей змінного струму застосовуються методи теорії електричних кіл і середніх геометричних відстаней, які базуються на цілому ряді припущень і спрощень, що не дає змогу врахувати реальну картину електромагнітних полів. Це не дозволяє

достовірно враховувати особливості електромагнітного взаємодії струмоведучих елементів пічної петлі, струмопідводу і керну печі, призводить до збільшення похибок при розрахунку опорів, розподілі струмів, електричних втрат в шинних пакетах, і, як наслідок, температурних режимів їх роботи. Розвиток методик короткої мережі електропечі опору для виробництва карбіду кремнію повинен базуватись на аналізі просторових взаємопов'язаних електричних та магнітних полів в області пічної петлі на основі методів математичного моделювання і універсальних пакетів програм розрахунку.

Метою роботи була розробка універсальної методики енергоефективного вибору геометричних параметрів шинних пакетів електропечей опору змінного струму для виробництва карбіду кремнію на основі чисельного - польового аналізу електромагнітних і електротеплових моделей, що враховують температурні залежності електрофізичних і теплофізичних властивостей шин і струмопроводів та відображають особливості конструкції і просторового розташування елементів пічної петлі відносно один одного.

Для реалізації поставленої мети розглядалась розрахункова область короткої мережі печі наведена на рис. 1.

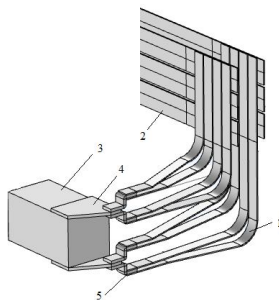


Рисунок 1 – Розрахункова область.

Мідні шини торцевих шинних пакетів 1, що під'єднані до алюмінієвих шин бічного шинного пакету 2, кріпляться до сталевих шин 5, які приварені до сталевих плит, що забезпечують електричний контакт з графітовим струмопідводом 3.

Процеси перетворення електричної енергії змінного струму в енергію електромагнітного поля і теплову в розрахунковій області описувались математичною моделлю, що наведена у [1].

За результатами моделювання визначались активні втрати в елементах короткої мережі і їх активний та реактивний опори.

Локалізація енергії магнітного поля проходить навколо шин торцевого пакету, струмопідводу і крайніх шин бічного пакету та визначає локалізацію питомих електричних втрат на ділянках короткої мережі.

Ці особливості магнітного поля зумовлюють нерівномірний розподіл електричних потенціалів і перерозподіл струмів в шинах пакету, які витісняються з внутрішніх шин. Це призводить до нерівномірного розподілу щільності струму і питомих електричних втрат в шинах. Сила струму в крайніх шинах торцевого пакету в 1,4 рази більше ніж в внутрішніх шинах, хоча зсув їх по фазі не перевищує 4,5 ел. град. Електричні втрати в зовнішніх шинах 2 рази перевищують відповідні втрати в внутрішніх шинах. Ці фактори повинні враховуватися при виборі енергоефективного конструктивного виконання торцевого пакету і розмірів його шин.

Розглядаються рівнонавантажені варіанти, які відповідають критеріям рівності щільності струму і питомої потужності тепловиділення в шинах ТШП

$$\{J_{ш,i} = J_{ек}; P_{ш,i} = P_{доп}, \quad (1)$$

де $J_{ек}$ – економічна щільність струму, $P_{доп}$ – гранично допустимі за умовами нагріву питомі втрати.

Ці критерії реалізуються за даними математичного моделювання за допомогою виразів:

$$\left\{ S_{ш,i} \Big|_{J_{ек}} = |I_{ш,i}| / J_{ек}; S_{ш,i} \Big|_{P_{доп}} = P_{ш,i} / P_{доп,i} \cdot l_{ш,i}; i = 1, \dots, N_{тшп}, \quad (2)$$

де $l_{ш,i}$ – довжина i -ї шини торцевого пакету.

Певні з цих співвідношень перетину шин можуть розглядатися як початкові наближення для вектору геометричних конструктивних параметрів. Диференціація розмірів шин ТШП здійснюється при допустимій точності ітерацій.

Результати моделювання та дані ітераційних розрахунків підтверджують можливість зниження маси провідникових матеріалів на 9...12% і втрат в на 7...15% в порівнянні з базовим варіантом.

Таким чином, сформульовано просторові моделі, що відображають особливості електромагнітних та електротеплових процесів в торцях печей змінного струму, конструктивного виконання елементів короткої мережі, що враховують температурні залежності електрофізичних і теплофізичних властивостей шин і струмопідводу.

Розроблено методику ідентифікації електричних параметрів елементів короткої мережі електропечі опору змінного струму на основі даних чисельно-польового аналізу, реалізованого методом скінченних елементів в тривимірній області торця печі.

Реалізація критеріїв рівної завантаженості шин за щільністю струму і питомими електричними втратами для вибору конструктивних параметрів шин торцевого пакету дозволяє знизити його масу на 9...12%, активні втрати на 7...15% щодо базового конструктивного виконання, поліпшити показники енергоефективності технологічного процесу виробництва карбіду кремнію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ярымбаш, Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока [Текст]/ Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Электротехника и электроэнергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69.