

УДК 621.3.013.1(6)

Літвінов Д. О.¹, Шлянін О. О.², Бондарчук Т. В.³, Стремідловська О. В.⁴, Матар Ріхам⁵^{1, 2}Старший викладач кафедри електричних машин, Запорізький національний технічний університет, Україна,
e-mail: dmalit71@gmail.com³⁻⁵Магістр кафедри електричних машин, Запорізький національний технічний університет, Україна

СХЕМНО-ПОЛЬОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ

Мета: Розробка нового підходу для підвищення точності теплових розрахунків шляхом поєднання польового і схемного моделювання при визначенні ефективних теплових провідностей деталей і вузлів асинхронного двигуна.

Методи досліджень: Методи теорії теплопровідності, теплопередачі, теплових схем заміщення, теплових потенціалів, польового моделювання, кінцевих елементів.

Основні результати: Розроблено інтегральний метод для перетворення даних польового моделювання в параметри теплової схемної моделі, який істотно зменшує вплив кількості вузлів теплової схеми на точність визначення її параметрів завдяки інваріантності матриці геометричних провідностей до температурних змін значень теплопровідності конструкційних і активних матеріалів асинхронного двигуна. За даним методом для дискретизації просторової моделі асинхронного двигуна на окремі складові можна заздалегідь визначити компоненти матриці провідностей та запобігати виродженню цієї матриці у схемній моделі. Таким чином забезпечується істотне підвищення точності визначення вузлових температур і перевищення температур у теплових розрахунках асинхронних двигунів у сталих та змінних режимах навантаження.

Наукова новизна: Розроблено новий метод перетворення схемної моделі із застосуванням інтегрального теплового потенціалу, який дозволяє перейти від температурних опорів, як параметрів теплової схеми заміщення, до геометричних провідностей даної схеми. Доведено, що шляхом оброблення масивів даних польового моделювання для визначення геометричних провідностей теплової схеми заміщення можна запобігти виродженню матриці провідностей для стаціонарного теплового режиму асинхронного двигуна у режимі короткого замикання, забезпечивши зменшення кількості вузлів схеми та підвищення обчислювальної ефективності та точності.

Практична значимість: Інтегральний метод перетворення даних польового моделювання асинхронного двигуна у параметри теплової моделі дозволяє при збільшенні числа вузлів теплової схеми від одного до десяти зменшити середньозважене значення відносної похибки від 9,2% до 2,42%, що повністю задовольняє вимогам при проектуванні асинхронних двигунів і для імітаційного моделювання динаміки теплових процесів у змінних режимах роботи.

Ключові слова: асинхронний двигун, тепла схема заміщення, теплопровідність, тепловий опір, інтегральний метод, метод кінцевих елементів.

ВСТУП

На сьогоднішній день питання енергоефективності та надійності є ключовими для розвитку вітчизняної промисловості. Приблизно 60% електроенергії країни споживається електротехнічними комплексами, основним елементом яких є асинхронні двигуни [1]. Від надійності та ефективності їх роботи залежать показники надійності та ефективності роботи комплексів у цілому. На параметри асинхронних двигунів істотний вплив мають особливості конструкції та режими роботи, що обумовлюють їх температурний стан. Температурний стан асинхронного двигуна, який визначається дуже широким переліком факторів, має значний вплив на надійність його роботи [2]. Тому підвищення надійності роботи асинхронних двигунів потребує детального дослідження та аналізу теплових процесів, що відбуваються під час експлуатації у виробничих умовах із визначенням факторів, що на них впливають.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Тепловий розрахунок асинхронних двигунів (АД) дає можливість отримати наближену до реальної картину розподілу температури для стаціонарних і нестационарних режимів роботи [3]. Серед інженерних підходів для аналізу теплових процесів в асинхронному двигуні найбільш розповсюдженими є методи теплових схем заміщення [4]. У даних схемах теплова потужність, що виділяється в активних елементах двигуна, визначається активними втратами та є подібною до джерела струму в електричних схемах заміщення, а різниці вузлових температур – до падінь напруги.

Рядом авторів визначається, що збільшення числа вузлів теплової схеми заміщення або кількості, так званих однорідних тіл, призводить до істотного зменшення похибок теплових розрахунків [5–9]. Але збільшення кількості вузлів теплової схеми заміщення призводить

також до істотних труднощів під час розв'язання систем звичайних диференціальних рівнянь великої розмірності, оскільки матриця теплових провідностей при наближенні до сталого теплового режиму може набувати ознак виродженої матриці. Крім того, іншими авторами теоретично і практично доводиться, що навіть за наявності одного - двох вузлів (двох «мас») можна розрахувати перевищення температур і температурний стан АД у сталих і змінних навантаженнях із достатньою для практичного застосування точністю [10, 11].

Слід також зазначити, що жоден з наведених підходів не отримав широкого практичного розповсюдження, оскільки відкритими залишаються питання щодо коректності визначення теплового опору або провідності кожної області АД. Це пов'язано із температурними залежностями коефіцієнтів теплопровідності та із складністю визначення ефективних коефіцієнтів для багатошарових багатокомпонентних середовищ. Тому наведені підходи потребують значного обсягу практичних досліджень теплового стану АД із використанням складних експериментальних методів [12].

На теперішній час розширюється застосування польового моделювання температурного стану [13, 14] за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення (Elcut, Ansys, FEMM). Але таке моделювання, як доведено для подібних класів задач, має забезпечуватися одночасним моделюванням електромагнітних процесів та просторових електромагнітних полів [15–19]. Це істотно ускладнює чисельну реалізацію і потребує значних обчислювальних ресурсів, часових і матеріальних витрат.

Тому слід вважати актуальною задачу розробки нового підходу із поєднанням переваг польового і схемного моделювання при визначенні ефективних теплових провідностей деталей і вузлів АД для зменшення залежності точності теплових розрахунків від кількості вузлів теплової схеми заміщення.

МЕТА РОБОТИ

Метою роботи є розробка нового підходу для підвищення точності теплових розрахунків шляхом поєднання польового і схемного моделювання при визначенні ефективних теплових провідностей деталей і вузлів асинхронного двигуна.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Дослідження виконуються на прикладі асинхронного двигуна (АД) типу 4А200L8У3 для дослідного режиму короткого замикання.

Для моделювання теплових процесів у поперечному перерізі АД будується геометрична модель (рис. 1), що включає області осердя статора 1 ($j = 1$), обмотки статора 2 ($j = 2$), їх ізоляцію 3 ($j = 3$), осердя ротора 4 ($j = 4$), стрижні обмотки ротора 5 ($j = 5$), вал 6 ($j = 6$), повітряні зазори між статором і ротором та статором і корпусом 7

($j = 7$), корпус АД 8 ($j = 8$). Для кожної області визначаються належні теплопровідності та питомі тепловиділення, що є пропорційними до відповідних електричних витрат.

При формулюванні задачі теплового поля (ТП) використовується диференціальні рівняння теплопровідності у загальній формі [20]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(c\rho T) = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v, \quad (1)$$

які для процесів стаціонарної теплопровідності мають вигляд [20]:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + q_v = 0, \quad (2)$$

де $q_v(x, y, z, \tau)$ або $q_v(x, y, z)$ – функція об'ємної густини тепловиділення.

Визначення об'ємної густини тепловиділення для стаціонарного режиму короткого замикання АД здійснюється шляхом розв'язання методом кінцевих елементів рівнянь Максвелла у частотному формулюванні відносно векторного магнітного потенціалу [21–23]:

$$\begin{cases} \nabla \times \left[\mu_0 \mu_{\theta j} \left[B_{\theta j} \right]^{-1} \nabla \times \mathbf{A}_j \right] + \\ + j\omega \sigma_j(\theta_j) (\mathbf{A}_j + V_j) = \mathbf{J}_{ej}, \end{cases} \quad (3)$$

де \mathbf{A} – векторний магнітний потенціал; V – електричний потенціал; $\sigma(\theta)$ – питома електропровідність; B – індукція магнітного поля; μ_{θ} – ефективна відносна магнітна проникність; θ – температура; ω – кутова частота; \mathbf{J}_e – щільність стороннього джерела струму; індекси j – відповідають областям геометричної моделі (рис. 1). Розв'язання диференціальних рівнянь теплопровідності (1) також здійснюється методом кінцевих елементів.

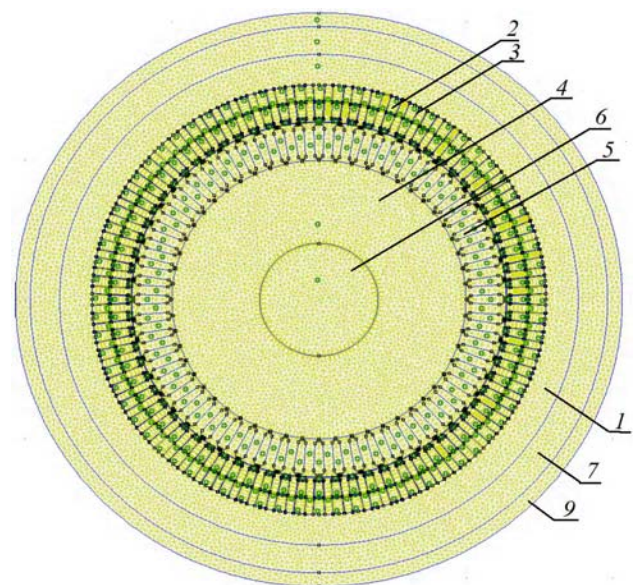


Рисунок 1 – Геометрична модель АД

Для інженерних методик обробка великих масивів чисельних даних розподілу температурних полів за рівняннями (1), (2) є досить складною та істотно обтяжує відповідні розрахунки. Тому у відповідність конструктивній будові АД (рис. 1) ставлять сукупність його окремих елементів (зон), а теплові потоки через їх поверхню визначають сталими. Сукупність даних елементів об'єднується у теплову схему заміщення (ТСЗ), а тепловий розрахунок АД зводиться до рішення системи рівнянь на основі методів, які є подібними методам теорії електричних ланцюгів, наприклад, методу вузлових (температурних) потенціалів [20].

За припущеннями, що у стаціонарному режимі короткого замикання через зазор проходить та ж кількість тепла, що й при рухомому роторі, визначають теплопередачу від статора до ротора за допомогою ефективної теплопровідності у повітряному зазорі [24].

У пазу статора містяться шари багатьох круглих провідників (у даному випадку 32), що мають ізоляцію один від одного. Тому двошарова обмотка статора може моделюватися еквівалентним однорідним середовищем, яке характеризується еквівалентною (ефективною) теплопровідністю. Еквівалентна теплопровідність, що залежить від співвідношення між діаметрами голого та ізольованого дроту, може бути розрахована за методиками, які запропоновано у [25, 26]:

$$\lambda_{Cu-iz} = F \cdot \lambda_{iz}, \quad (4)$$

де λ_{iz} – теплопровідність ізоляційного шару лакової ізоляції,

$$F = 37,5x^2 - 43,75x + 14, \quad (5)$$

F – функція аргументу x , що обирається у залежності від діаметру та марки обмотувального проводу [26]. Значення такої теплопровідності у 4–5 разів більше ніж у ізоляції, але на декілька порядків менше ніж у провідникових матеріалів.

Втрати, що виділяються в АД, відображаються в активних областях геометричної моделі (рис. 1) питомими значеннями тепловиділення, розмірність яких визначається у Вт/м³. Надалі розраховуються питомі втрати в області пазів (як відношення активних втрат в пазовій частині обмотки статора до об'єму пазів статора з урахуванням їх довжини); питомі втрати в осерді статорі (як відношення втрат у сталі статора до її об'єму з урахуванням розподілення між зонами ярма та зубців) тощо.

Щоб визначити однорідні початкові $T_{от.сер} = 0^{\circ}\text{C}$ при змінних навантаженнях при розв'язанні рівнянь (1) здійснюється перехід до перевищення температур в АД над температурою навколишнього середовища.

Для короткого замикання АД на зовнішній поверхні корпусу приймається режим природної повітряної конвекція. Врахування поверхні тепловіддачі ребр охолодження, які не деталізуються у моделі (рис. 1), здійснюється відповідним збільшенням значень коефіцієнту тепло-

обміну, що дозволяє застосовати відомий закон Ньютона для граничних умов на зовнішній поверхні корпусу АД [27].

Математичну модель теплопередачі у поперечному перерізі АД здійснено у структурі засобів ПЗ FEMM, яке має відкриту ліцензію і не потребує додаткових витрат на придбання іншого спеціалізованого ПЗ. Результати реалізації польової моделі АД у сталому режимі короткого замикання відображаються у структурі засобів FEMM (рис. 2). За допомогою кольорової шкали для нормованих перевищень температур реалізовано аналіз теплового стану АД. Більші значення перевищення температур у режимі короткого замикання визначаються у пазах статора і ротора двигуна (до 0,95–0,98 в.о.). Область ярма осердя статора характеризується більш рівномірним розподілом температур (інтервал 0,741–0,743 в.о.). Найбільші температурні перепади на границі між зовнішньою поверхнею статора і корпусом двигуна дорівнюють 0,27–0,29 в.о., що обумовлено низькими значеннями теплопровідності повітряного проміжку між статором і корпусом АД. Даний тепловий аналіз здійснено для умов, коли враховуються лише Джоулеві втрати.

Застосування теплових схем заміщення дає можливість поставити у відповідність перевищенням середніх температур елементів конструкції електричної машини температурні потенціали вузлів схеми, до яких приєднуються гілки із різними ефективними температурними провідностями.

Таким чином складній моделі температурного поля (1), (2) ставиться у відповідність матрична система рівнянь, що побудована за методом вузлових потенціалів у вигляді:

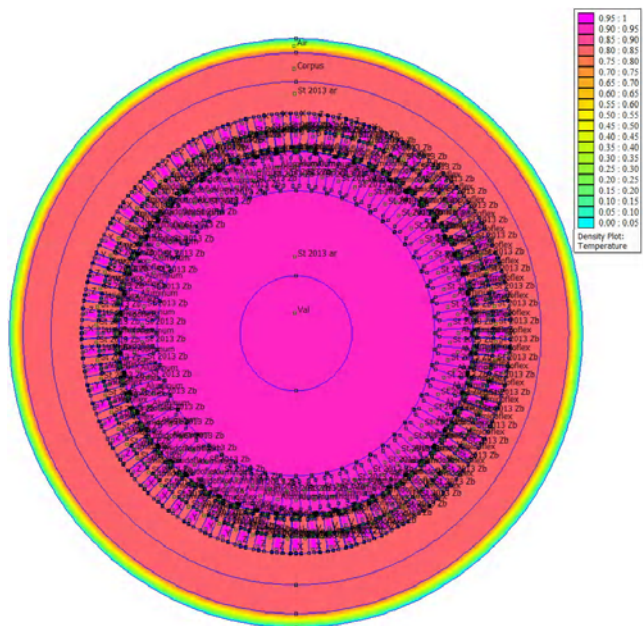


Рисунок 2 – Розподіл відносних температур у розрахунковій області АД

$$\begin{bmatrix} Y_{1,1} & Y_{1,2} & \dots & Y_{1,(m-1)} \\ Y_{2,1} & Y_{2,2} & \dots & Y_{2,(m-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{(m-1),1} & Y_{(m-1),2} & \dots & Y_{(m-1),(m-1)} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \vdots \\ \Delta\theta_{(m-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{(m-1)} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де $Y_{k,k}$ – визначають суму ефективних геометричних провідностей, що приєднані до k - го вузла, а $Y_{k,m}$ – визначають суму взятих із зворотнім знаком ефективних геометричних провідностей, що з’єднані з вузлами k і m теплової схеми; $\Delta\theta_k, P_k$ – вузлові температурні потенціали і питомі джерела теплоти.

Вузлові температурні потенціали розраховуються за відомими інтегральними співвідношеннями [20]. Це дозволяє, з однієї сторони, врахувати температурні залежності теплопровідностей для провідникових, феромагнітних, конструкційних та ізоляційних матеріалів АД, а з другої сторони, – застосувати для розрахунку ефективних провідностей лише геометричні фактори поверхонь теплопередачі.

Для перетворення даних польового моделювання у параметри схемної моделі (6) використовувалися інтегральні співвідношення, що були апробовані для широкого класу задач стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності [17, 20, 28]:

$$\begin{cases} \theta_i = \int_{\theta_0}^{\theta_{ni}} [\lambda_i(\Theta) \cdot \Theta] d\Theta; \\ P_i = \Delta z \cdot \iint_{F_i} p_i \cdot dx dy, \theta_{ni} = \frac{1}{F_i} \iint_{F_i} \Theta_i(x, y) \cdot dx dy \\ Y_i = \left(\int_{n_{en}}^{n_{ex}} \frac{dn}{S_i(n)} \right)^{-1}, S_i(n) = L_i(n) \cdot \Delta z, \end{cases} \quad (7)$$

$S_i(n)$ – поверхня контуру $L_i(n)$ i -го конструктивного елемента АД довжиною Δz ; n_{en}, n_{ex} – значення нормалі на внутрішній і зовнішній границях i -го конструктивного елемента АД; θ_{ni} – температура i -го конструктивного елемента АД; P_i – потужність тепловиділення в i -му конструктивному елементі АД; θ_i – температурний потенціал i -го конструктивного елемента АД; Y_i – геометрична провідність i -го конструктивного елемента.

Умови нерозривності теплових потоків і температур мають виконуватися як для температурних вузлів, так і для вузлів температурних потенціалів (7).

Точність інтегрального методу перетворення даних польового моделювання у параметри теплової моделі (7) залежить від кількості кінцевих елементів в i -м конструктивному елементі АД. Вона оцінюється за відхиленнями нормованих значень вузлових температур теплової схеми заміщення від їх середніх нормованих значень для відповідного конструктивного елемента АД. Нижньою граничною межею такого об’єднання елементів є одночасна модель АД для визначення середнього перевищення температури АД у сталому довготривалому режимі дослідного короткого замикання. Для оцінки верхньої границі похибки середня температура у поперечному перерізі АД, що визначена за даними польового моделювання (рис. 2), порівнюється із результатами розрахунку одночасної моделі АД, значення похибки для якої складає 9,2%.

За даним підходом при заміні одних матеріалів на інші з відмінними теплопровідностями можна не змінювати значення компонентів матриці ефективних геометричних провідностей у першому множнику лівої частини системи рівнянь (6), а отже запобігти виродженню цієї матриці та забезпечити точність розв’язання задачі схемного моделювання

Важливість переваг застосування інтегральних співвідношень (9) впливає з того, що для дискретизації просторової моделі АД на окремі складові можна заздалегідь визначати компоненти матриці провідностей і запобігати створенню областей з найменшими їх значеннями та виродженню даної матриці у сталому режимі короткого замикання. Слід також відзначити, що за умови розташування вузлів схеми заміщення (6) у вузлах сітки кінцевих елементів на рис. 1 система рівнянь схемного моделювання буде повністю співпадати із системою рівнянь методу кінцевих елементів.

Таким чином, перетворення даних польового моделювання (рис. 2) за допомогою інтегральних співвідношень (7) дозволяють об’єднувати сукупності скінчених елементів в області та вузли і визначати їх ефективні температурні потенціали. Якщо температурні потенціали двох суміжних сукупностей елементів відрізняються один від одного менш ніж на 5%, то таке укрупнення необхідно продовжити для запобігання виродженню матриці провідностей у системі рівнянь (6). При збільшенні числа вузлів теплової схеми від одного до десяти середньозважене значення відхилення знижується від 9,2% до 2,42%, що повністю задовольняє вимогам точності для імітаційного моделювання динаміки теплових процесів у змінних режимах роботи.

ВИСНОВКИ

Доведено взаємозв’язок між польовим і схемним моделюванням. Кількість елементів дискретизації можна визначати за похибкою обрахунку температури для

визначених вузлів схемної моделі і середньої температури відповідних областей АД за даними польового моделювання.

Запропонована декомпозиція АД на окремі елементи – вузли схемної моделі за умови, що середні температурні потенціали визначених елементів для сталого або квазістаціонарного розподілу температур відрізняються не менше ніж на 5%. У такому випадку виключається вплив виродження матриці коефіцієнтів у системі лінійних алгебраїчних рівнянь (6).

Для досягнення прийнятого рівня відносної похибки вузлових та середніх температур відповідних областей АД забезпечується ідентичний перехід від стаціонарної польової моделі теплового стану АД до динамічної схемної моделі його теплового стану у перехідних режимах роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Петренко А. Н. Исследование температурного поля и тепловых потоков частотно-управляемого асинхронного двигателя [Текст] / А. Н. Петренко, В. Е. Тяньянский, Н. Я. Петренко // Вісник НТУ «ХП». 2012. № 49 (955). С. 61–65.
- Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М. И. Коцур // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. – № 1. – С. 32–36. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-5>.
- Филиппов И. Ф. Теплообмен в электрических машинах [Текст] – Л.: Энергоатомиздат, 1986. 256 с.
- Сипайлов Г. А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах [Текст] / Г. А. Сипайлов, Д. И. Санников, В. А. Жадан. – М.: Высш. шк., 1989. – 239 с.
- Зализный Д. И. Адаптивная математическая модель тепловых процессов асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [Текст] / Д. И. Зализный, О. Г. Широков, В. В. Попичев // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. 2015. – № 1. – С. 30–43.
- Wallmark, O. Analysis of Electrical Machines [Text] / O. Wallmark. – Royal Institute of Technology Stockholm. – Sweden. – 2012.
- Осташевский Н. А. Математическая модель теплового состояния частотно-управляемого асинхронного двигателя в нестационарных режимах [Текст] / Н. А. Осташевский, В. П. Шайда // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2010. – № 75. – С. 46–51.
- Петрушин В. С. Особенности тепловых расчетов неустановившихся режимов работы регулируемых асинхронных двигателей [Текст] / В. С. Петрушин, А. М. Якимец // Электромашиностроение и электрооборудование. – 2008. – № 71. – С. 47–51.
- Широков О. Г. Тепловые схемы замещения электроэнергетических устройств [Текст] / О. Г. Широков, Д. И. Зализный // Наукоемкие технологии. – 2008. – № 2. – С. 63–67.
- Анучин А. С. Двухмассовая тепловая модель асинхронного двигателя / А. С. Анучин, К. Г. Федорова // Електротехніка. – 2014. – № 2. – С. 21–25.
- Малафеев С. И. Моделирование тепловых переходных процессов в вентильно-индукторном двигателе [Текст] / С. И. Малафеев, А. В. Захаров, С. В. Кудряшов // Электричество : Теорет. и науч.-практ. журн. – 2009. – № 3. – С. 54–57.
- Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance [Text] // IEC Revision of Publication 60034. – draft 1. – 2004. – 137 p.
- Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models [Text] / D. Staton, A. Cavagnino // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – Vol. 55. – № 10. – October 2008. – P. 3509–3516.
- Thermal Modeling as a Tool to Determine the Overload Capability of Electrical Machines [Text] / S. Mahdavi and all / International Conference on Electrical Machines and Systems. – Oct. 26–29. – 2013. – Busan. – Korea. – P. 454–458.
- Андриенко П. Д. Применение методов математического моделирования для определения параметров индуктора [Текст] / П. Д. Андриенко, И. М. Коцур, Д. С. Ярымбаш // Вестник СевНТУ – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С. 117–120.
- Андриенко П. Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Ярымбаш // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163–167.
- Андриенко П. Д. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Ярымбаш // Электромашиностроения та електрообладнання – Одесса, 2006. – № 66. – С. 291–293.
- Килимник И. М. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука пресса [Текст] / И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – Кременчук: КДПУ, 2007. – № 4(45). – Ч. 1. – С. 53–55.
- Ярымбаш Д. С. Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при пресовании заготовок подовых блоков [Текст] / Д. С. Ярымбаш, А. В. Тютюнник, О. Л. Загрунный / Електротехніка та електроенергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2006. – № 2. – С. 56–60.
- Беляев Н. М. Методы теории теплопроводности [Текст] / Н. М. Беляев, А. А. Рядно, в 2-х частях – М.: Высш. школа, 1982. – 302 с.
- Ярымбаш Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока [Текст] / Ярым-

- баш Д.С. // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С.95–102.
22. Yarymbash D. S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads [Text] / D.S. Yarymbash, A.M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering, 2015, – Vol.86, – Issue 2, – pp. 86–92. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121>.
 23. Ярымбаш Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // Електротехніка та електроенергетика, 2016, – № 2, – С. 43–50. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
 24. Mademlis C. Magnetic and Thermal Performance of a Synchronous Motor under Loss Minimization Control [Text] / C. Mademlis, N. Margaris, and J. Xypteras // IEEE Trans. on Energy Conversion, 2000. – vol. 15, – no. 2, – pp. 135–142. DOI: 10.1109/60.866990
 25. Mellor P.Y., Roberts D., Turner D.R., Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design [Text] / P. Y. Mellor, D. Roberts, D. R. Turner // IEEE Proceedings B (Electric Power Applications), 1991. – 138(5). – pp. 205–218. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-b.1991.0025>.
 26. Шуйский В.П. Расчет электрических машин [Текст] / Шуйский В.П. – Л.: Энергия, 1968, 732 с.
 27. Лыков А.В. Теория теплопроводности [Текст]: учебное пособие / А.В. Лыков — М.: Высшая школа, 1967. — 600 с.
 28. Ярымбаш Д. С. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы–мундштук» на подготовительном этапе тура прессования [Текст] / Д. С. Ярымбаш, А. В. Тютюнник, О. Л. Загрудный // Електротехніка та електроенергетика. – 2006. – № 1. – С. 56–60.

Стаття надійшла до редакції 19.05.2017

Литвинов Д. А.¹, Шлянин А. А.², Бондарчук Т. В.³, Стремидловская О.В.⁴, Матар Рихам⁵

^{1,2}Старший преподаватель кафедры электрических машин, Запорожский национальный технический университет, Украина, e-mail: dmalit71@gmail.com

³⁻⁵Магистр кафедры электрических машин, Запорожский национальный технический университет, Украина

СХЕМНО-ПОЛЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Цель. Разработка нового подхода для повышения точности тепловых расчетов путем сочетания полевого и схемного моделирования для определения эффективных тепловых проводимостей деталей и узлов асинхронного двигателя.

Методы исследований. Методы теории теплопроводности, теплопередачи, тепловых схем замещения, тепловых потенциалов, полевого моделирования, конечных элементов.

Основные результаты. Разработан интегральный метод для преобразования данных полевого моделирования в параметры тепловой схемной модели, который существенно уменьшает влияние плотности распределения узлов тепловой схемы на точность определения ее параметров благодаря инвариантности матрицы геометрических проводимостей относительно температурных изменений значений теплопроводности конструкционных и активных материалов асинхронного двигателя. Данным методом при дискретизации пространственной модели асинхронного двигателя на отдельные составляющие, можно заранее определять компоненты матрицы проводимостей и предотвращать создание узлов с наименьшими их значениями и, как следствие, вырождение матрицы проводимостей в схемной модели. Таким образом, обеспечивается существенное повышение точности определения узловых температур и превышений температур в тепловых расчетах асинхронных двигателей в постоянных и переменных режимах нагрузок.

Научная новизна. Разработан новый метод преобразования схемной модели с применением интегрального теплового потенциала, который позволяет перейти от температурных сопротивлений, в качестве параметров тепловой схемы замещения, к геометрическим проводимостям данной схемы. Доказано, что путем обработки массивов данных полевого моделирования для определения геометрических проводимостей тепловой схемы замещения можно предотвратить вырождение матрицы проводимостей для стационарного теплового режима асинхронного двигателя, обеспечить уменьшение количества узлов схемы и повышение вычислительной эффективности и точности.

Практична значимость. Интегральный метод преобразования данных полевого моделирования асинхронного двигателя в параметры тепловой модели позволяет при увеличении числа узлов тепловой схемы от одного до десяти уменьшить средневзвешенное значение относительной погрешности от 18,76% до 2,427%, что полностью удовлетворяет требованиям точности как при проектировании асинхронных двигателей, так и при имитационном моделировании динамики тепловых процессов при переменных режимах работы.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тепловая схема замещения, теплопроводность, тепловое сопротивление, интегральный метод, метод конечных элементов.

Litvinov D. O.¹, Shlyanin O. O.², Bondarchuk T. V.³, Stremydlovska O. V.⁴, Matar Riham⁵

^{1,2}Senior Lecturer of the Electrical Machines Department, Zaporozhye National Technical University, Ukraine,

³⁻⁵Master of the Electrical Machines Department, Zaporozhye National Technical University, Ukraine

SCHEME-FIELD MODELING OF THERMAL PROCESSES IN INDUCTION MOTORS

Purpose. Development of a new approach for increasing thermal calculations accuracy by thermal field and scheme combining simulation in determining the effective heat conductivities in details and nodes of induction motor.

Research methods: the heat conductivity theory, heat transfer; thermal equivalent circuit, thermal potentials, thermal field simulation, finite elements methods.

The obtained results. The integrated method for conversion data of field modeling into thermal circuit model parameters is researched, which significantly reduces influence of nodes quantity of the thermal circuit on the accuracy of parameters determination by matrix invariancy of geometrical conductivities to temperature changes of heat conductivity values of induction motors constructional and active materials. By means of this method, for discretization induction motor spatial model on separate components, it is possible in advance to determine the components of matrix conductivities and to prevent the degeneration of this matrix in the scheme model.

Scientific novelty. A new method of scheme model conversion with the use of an integral thermal potential is researched, which allows to pass from heat resistances, as a parameters of thermal equivalent circuit, to geometric conductivities of this scheme. It has been proved that by processing the data arrays of field modeling for determination geometric conductivities of thermal equivalent circuit, it is possible to prevent degeneration of matrix conductivities for the stationary thermal mode of induction motor in short-circuit mode, having provided reduction of nodes quantity and increase in computing efficiency and accuracy.

Practical significance. The integrated method for converting data of induction motor field modeling into thermal model parameters allows at increase in the number of nodes in thermal scheme from one to ten to reduce the average value of a relative error from 9,2% to 2,42%, what completely meets requirements at designing of induction motors, and also for imitating modeling of thermal processes dynamics at the variable operating conditions.

Keywords:: induction motor; thermal equivalent circuit, heat conductivity, heat resistance, integrated method, finite element method.

REFERENCES

- Petrenko, A. N., Tanyanskiy, V. Ye., Petrenko, N. YA. (2012). Issledovaniye temperaturnogo polya i teplovykh potokov chastotno-upravlyayemogo asinkhronnogo dvigatelya. *Visnik NTU KHPI*, 49(955), 61–65.
- Kotsur, M. I. (2014). Osobennosti udarnogo teplovogo vozdeystviya na asinkhronnyy dvigatel' s modifitsirovannoy sistemoy impul'snogo regulirovaniya v usloviyakh chastykh puskov. *Elektrotehnika i elektroenergetika*, 1, 32–36. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2014-1-5>.
- Filippov I. F. *Teploobmen v elektricheskikh mashinakh*, Sankt Peterburg, Energoatomizdat, 256.
- Sipaylov, G. A., Sannikov, D. I., Zhadan, V. A. (1989). Teplovyye, gidravlicheskiye i aerodinamichesiye raschety v elektricheskikh mashinakh. Moscow, Vyssh. shk., 239.
- Zaliznyy, D. I., Shirokov, O. G., Popichev, V. V. (2015). Adaptivnaya matematicheskaya model' teplovykh protsessov asinkhronnogo dvigatelya s korotkozamknutym rotorom. *Vestnik GGTU im. P. O. Sukhogo*, 1, 30–43.
- Wallmark, O. (2012). *Analysis of Electrical Machines*. Royal Institute of Technology Stockholm. Sweden.
- Ostashevskiy, N. A., Shayda, V. P. (2010). Matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya chastotno-upravlyayemogo asinkhronnogo dvigatelya v nestatsionarnykh rezhimakh. *Elektromashinostroyeniye i elektrooborudovaniye*, 75, 46–51.
- Petrushin, V. S., Yakimets, A. M. (2008). Osobennosti teplovykh raschetov neustanovivshikhsya rezhimov raboty reguliruyemykh asinkhronnykh dvigateley. *Elektromashinostroyeniye i elektrooborudovaniye*, 71, 47–51.
- Shirokov, O. G., Zaliznyy, D. I. (2008). Teplovyye skhemy zameshcheniya elektroenergeticheskikh ustroystv. *Naukoyemkiye tekhnologii*, 2, 63–67.
- Anuchin A. S., Fedorova K. G. Dvukhmassovaya teplovaya model' asinkhronnogo dvigatelya. *Elektrotehnika*, 2014, 2, 21–25.
- Malafeyev, S. I., Zakharov, A. V., Kudryashov, S. V. (2009). Modelirovaniye teplovykh perekhodnykh protsessov v ventil'no-induktornom dvigatele. *Elektrichestvo*, 3, 54–57.
- Rotating electrical machines (2004) – Part 1: Rating and performance. IEC Revision of Publication 60034, 1, 137.
- Staton, D., Cavagnino, A. (2008). Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (10), 3509–3516.
- Mahdavi, S., and all. (2008). Thermal Modeling as a Tool to Determine the Overload Capability of Electrical Machines. *International Conference on Electrical Machines and Systems*. Busan. Korea, 454–458.
- Andriyenko, P. D., Kotsur, I. M., Yarymbash, D. S. (2008). Primeneniye metodov mate-maticheskogo modelirovaniya dlya opredeleniya parametrov induktora. *Vestnik SevNTU*. Sevastopol', 88, 117–120.
- Andriyenko, P. D., Yarymbash, D. S. (2008). Modelirovaniye elektromagnitnykh i teplovykh protsessov pri induktsionnom nagreve mundstuka pressa. *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy*. Krivoy Rog, 92, 163–167.

17. Andriyenko, P. D., Yarymbash, D. S. (2006). Osobennosti modelirovaniya temperaturnogo sostoyaniya tekhnologicheskoy sistemy kak ob'yekta upravleniya. *Yeletromashinobuduvannya ta yeletkroobladnannya.*, Odessa, 66, 291–293.
18. Kilimnik, I. M., Yarymbash, D. S. (2007). Osobennosti modelirovaniya elektromagnitnykh protsessov v induktore kalibra mundshtuka pressa. *Visnyk Kremenchuts'kogo derzhavnogo polstekhnschnogo unsversytetu*, Kremenchuk: KDPU, 4(45), 53–55.
19. Yarymbash, D. S., Tyutyunnik, A. V., Zagrunnyy, O. L. (2006). Povysheniye effektivnosti upravleniya rezhimami elektricheskogo obogreva pri pressovanii zagotovok podovykh blokov. *Elektrotehnika i elektroenergetika*. Zaporozh'ye: ZNTU, 2, 56–60.
20. Belyayev, N. M., Ryadno, A. A. (1982). *Metody teorii teploprovodnosti*. Moscow, Vyssh. shkola, 302.
21. Yarymbash, D. S. (2015). The research of electromagnetic and thermoelectric processes in the AC and DC graphitization furnaces. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 3, 95–102.
22. Yarymbash, D. S., Oleinikov, A. M. (2015). On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads. *Russian Electrical Engineering*, 86(2), 86–92. DOI: <http://dx.doi.org/10.3103/S1068371215020121>.
23. Yarymbash, D. S., Kotsur, M. I., Yarymbash, S. T., Kotsur, I. M. (2016). Features of three-dimensional simulation of the electromagnetic fields of the asynchronous motors. *Electrical Engineering And Power Engineering*, 2, 43–50. doi: <http://dx.doi.org/10.15588/1607-6761-2016-2-5>.
24. Mademlis, C., Margaris, N., Xypteras, J. (2000). Magnetic and Thermal Performance of a Synchronous Motor under Loss Minimization Control. *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 15(2), 135–142. DOI: 10.1109/60.866990
25. Mellor, P. Y., Roberts, D., Turner, D. R. (1991). Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. *IEEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, 138(5), 205–218. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ip-b.1991.0025>.
26. Shuyskiy V. P. (1968). *Raschet elektricheskikh mashin*. Sankt Peterburg, Energiya, 732.
27. Lykov, A. V. (1967). *Teoriya teploprovodnosti: uchebnoye posobiye*. Moscow, Vysshaya shkola, 600.
28. Yarymbash, D. S., Tyutyunnik, A. V., Zagrunnyy, O. L. (2006). Modelirovaniye temperaturnykh zhimov elektrotekhnologicheskoy sistemy «induktory–mundshtuk» na podgotovitel'nom etape tura pressovaniya. *Elektrotehnika i elektroenergetika*. Zaporozh'ye, ZNTU, 1, 56–60.