

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. Унікальної 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 преса 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 преса 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.

Нестационарні 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

$$p_{i,j} = \sigma_{i,j} \cdot \mathbf{j}^2,$$

де $\mathbf{j}$ – 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 енергоефективності 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°C , 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 /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 / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Электротехника и электроэнергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69.