РЕФЕРАТ

на наукову роботу:

«Енергоефективні технічні засоби для теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ на базі пристроїв індукційного нагріву»

(автори Крищук Р.С., Малахатка Д.О., Березюк А.О., Комарчук Д.С.)

(2018)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні на теплову обробку матеріалів різного призначення витрачається велика кількість енергогосіїв, що виробляється чи імпортується в державі. В різних галузях промисловості і сільського господарства існує широке різноманіття технічних засобів для теплової обробки, серед яких можна виділити електричний нагріву.

Найбільш безпечним та екологічним способом електричного нагріву є індукційний нагрів, який є безпечним до навколишнього середовища і легко керованим. Крім звичайного нагріву струмопровідних середовищ системи індукційного нагріву можуть бути використані як елементи проміжного нагріву, наприклад для термічної обробки чи сушки зерна, попереднього нагріву при вичавлюванні з насіння рапсу масла, в будівництві для попереднього нагріву дисперсних матеріалів (піску, щебнів, тощо). Застосування електромагнітних технічних засобів в процесах сушки зерна виключає застосування органічного палива (мазуту, газу, соломи, пелетів тощо), а також значно підвищує безпечність процесу нагріву теплоносія. З іншого боку пристрої індукційного нагріву можуть широко використовуватись в металообробці чи машинобудуванні, а також при розробці новітніх методів впливу на біологічні об’єкти, наприклад для лікування онкологічних захворювань.

Процеси теплової обробки потребують попереднього розрахунку електромагнітної системи, до складу якої входить електромагнітний індуктор, джерело живлення та система керування технологічним процесом. В задачу дослідження перш за все входить встановлення взаємозв’язків характеристик джерел живлення електромагнітних індукторів з якістю та інтенсивністю електромагнітних процесів. Зазначена проблема вирішується шляхом сумісного вирішення задач розповсюдження електромагнітного поля і вибору ефективної стратегії керування джерелом живлення. Енергоефективність при цьому забезпечується за рахунок використання оптимальних стратегій керування і конфігурації пристроїв, що забезпечують збудження електромагнітного поля з доцільним його розподілом. Таким чином підвищення енергоефективності технічних засобів при термічній обробці електропровідних та неелектропровідних середовищ є актуальною науково-прикладною проблемою, яка вирішується в представленій науковій роботі.

Мета, об’єкт та предмет дослідження. *Мета роботи* – встановлення взаємозв’язків між параметрами пристроїв індукційного нагріву та характеристиками джерел живлення для підвищення енергоефективних технічних засобів теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ.

Об’єктом дослідження є електротехнічні комплекси теплової обробки електропровідних та неелектропровідних середовищ.

Предмет дослідження – закономірності між конструктивними, режимними параметрами та параметрами джерела живлення з інтенсивністю та якістю електротехнологічних процесів.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні положення, які визначають новизну наукових результатів полягають у наступному.

1. Розроблено новий аналітичний метод розрахунку поперечного електромагнітного поля в лінійних індукторах, який включає математичну модель, котра враховує товщинний, поперечний та повздовжній крайові ефекти та метод розрахунку електромагнітного поля, який дає змогу врахувати неоднорідність швидкості руху вторинного тіла;
2. Вперше встановлено залежності частоти живлення індукторів з електромагнітними силами, які діють на вторинний елемент, що дає змогу динамічного урівноваження конструкції електромагнітної системи;
3. Розвинуто метод розрахунку повздовжнього електромагнітного поля циліндричних індукторів скінченної довжини, що мають складну геометрію завантаження, що дає змогу обчислити енергетичні характеристики індуктора за результатами попереднього розрахунку електромагнітного поля індуктора із завантаженням вісесиметричної канонічної форми;
4. Розроблено детерміновані математичні моделі теплових процесів в шнековому пресі і роторному проточному нагрівачі з індукційним підведенням енергії, які враховують теплофізичні властивості матеріалу, швидкість видалення вологи і конструктивні параметри робочих органів.
5. Встановлені нові співвідношення для еквівалентування циліндричних індукторів некругової форми, які дають змогу використовувати спрощені розв’язки електромагнітної задачі для визначення енергетичних характеристик багатовиткових індукторів;
6. Розроблено новий клас напівпровідникових перетворювачів для індукційного нагріву, які враховують динаміку нагрівання і дозволяє визначити оптимальну частоту струму в індукторах за умови вимог технологічного процесу;
7. Розвинуто синтез кіл накопичувачів електричної енергії в схемах напівпровідникових перетворювачів для індукційного нагріву з активним вхідним опором, що дає змогу забезпечити електромагнітну сумісність електротермічних навантажень.

Основні науково-технічні результати. У порівнянні з відомими методами розрахунку індукторів поперечного магнітного поля, в представленій роботі враховується тривимірний розподіл індукції магнітного поля в зазорі між магнітопроводами та лінійна швидкість вторинного елементу, нерівномірність розподілу тривимірного магнітного поля та вихрових струмів у тривимірному просторі. Метод дозволяє розрахувати дестабілізуючі магнітні сили, задати схему виконання обмотки та комплексну напругу живлення для кожної обмотки окремо.

Розроблено новий аналітичний метод розрахунку енергетичних характеристик індукторів повздовжнього магнітного поля з завантаженням складної геометричної конфігурації для індукторів однофазного і трифазного виконання. Розроблено та виготовлено дослідний зразок напівпровідникового високочастотного перетворювача для пристроїв індукційного нагріву ЕТУ-250.

Порівняно з існуючими аналогами запропоновану розробку виконано на сучасній елементній базі – силових транзисторних *IGBT*-модулях та нових принципах побудови силової частини та системи керування, що дозволить забезпечити частоту вихідного струму в діапазоні від 0,5 кГц до 30кГц та потужність перетворювачів до 250 кВА, збільшити середню питому швидкість електротермічної обробки деталей агрегатів і вузлів транспортних засобів подвійного призначення в 2-3 рази, підвищити надійність роботи, стабілізувати режим роботи установки індукційного нагріву за рахунок рекуперації енергії з навантаження, а також забезпечити електромагнітну сумісність установки індукційного нагріву з трифазною мережею живлення за рахунок підвищення вхідного коефіцієнту потужності. Останнє дозволить зменшити негативний вплив установки індукційного нагріву на мережу, а у випадку використання живлення від автономного джерела забезпечить зниження необхідної встановленої вихідної потужності автономного генератора до значень, наближених до повної вхідної потужності установки індукційного нагріву.

Практична значимість. За результатами роботи по розробці лінійних однофазних індукторів розроблено проект лінійного індуктора для дослідження біологічних об’єктів в змінному магнітному полі, який передано для використання в Інституті експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. К.Є. Кавецького НАН України. За результатами роботи розроблено електротехнологічний комплекс для сушіння зерна на базі теплогенераторів індукційного типу, який впроваджено у відокремленому підрозділі Національного університету біоресурсів і природокористування України «Агрономічна дослідна станція». Розроблено та впроваджено установку індукційного нагріву та систему автоматичного керування до складу промислової лінії з переробки ріпаку в олію, яка використовується у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція». За час роботи удосконаленої лінії перероблено близько 2000 тон ріпакового зерна. Впроваджено 10 модифікацій проточних індукційних нагрівачів, призначених для систем опалювання житлових, комунально-побутових, суспільних і виробничих приміщень. За результатами роботи членами авторського колективу одержані патенти №65562, №72273 на корисні моделі.

Використання виготовленого дослідного зразку високочастотного перетворювача ЕТУ-250 дозволяє здійснювати ефективне проведення монтажу і ремонту деталей і вузлів ходової частини рейкового електротранспорту, а також виконувати електротермічну обробку деталей і вузлів важкої транспортної техніки та використовувати в технологіях

подвійного призначення, в яких потребується висока та контрольована швидкість нагріву масивних деталей: гарячої посадки стального обводу на алюмінієву основу опорного катка бронетанкової техніки на гусеничному ходу, гарячої посадки елементів трансмісії та ходової частини (торсіонної підвіски, підшипників коробки передач транспортних засобів військового та подвійного призначення тощо).

Досягнутий ефект. Розроблені методи розрахунку електромагнітних полів в індукторах повздовжнього та поперечного магнітного поля дозволили досягти ефективного використання електроенергії в системах індукційного нагріву з коефіцієнтом корисної дії не меншим 95%, що в свою чергу дозволило отримати економічний ефект від впровадження пристроїв попереднього нагріву зерна ріпаку 780 тис. грн, забезпечити підвищення безпечності та екологічності сушильних агрегатів, позбутися залежності від постачання мінерального палива (газу чи мазуту), розробити конкуренто спроможні проточні індукційні нагрівачі для опалювання приміщень, що підтверджено збутом 100 комплектів пристроїв опалювання.

Застосування високочастотного перетворювача в індукційних установках у порівнянні з існуючими приладами дозволяє істотно знизити витрати електроенергії на відповідних ремонтних підприємствах України (економія електроенергії складе до 40-45%), підвищити продуктивність електротермічної обробки деталей, агрегатів і вузлів у середньому на 30-50% за рахунок оптимізації процесу нагрівання, знизити в кілька разів витрати матеріальних ресурсів на виготовлення і ремонт індукторів, підвищити ефективність і якість ведення електротермічного процесу і знизити його трудомісткість, а також значно покращити екологічні умови на виробництві.

Кількість публікацій.

За темою роботи опубліковано 70 наукових праць, із них 48 статей у тому числі 5 статтей в базі Scopus, 17 тез доповідей та 5 патентів України.

КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі «*РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ІНДУКТОРІВ ПОПЕРЕЧНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ*» викладено основні положення, які складають основу методу для тривимірного аналітичного моделювання магнітних полів та електромагнітних процесів трифазних індукторів поперечного магнітного поля в рухомих електропровідних елементах (вторинні елементи) з урахуванням лінійної швидкості, що змінюється. В основу методу розрахунку покладено систему рівнянь Максвелла

$$rot\vec{H} = \vec{j}\,, \qquad rot\vec{E} = -\partial\vec{B}/\partial t\,, \qquad div\vec{B} = 0\,.$$

З урахуванням симетрії конструктивного виконання індукторів записано рівняння для поперечної складової індукції магнітного поля:

$$\Delta B_z = \mu\sigma\frac{\partial B_z}{\partial t} + \frac{\mu\sigma\omega C_s(1-s)}{p}\frac{\partial B_z}{\partial\varphi}\,.$$

Представлено два способи розв’язання рівняння. Один враховує усереднені параметри індуктора по висоті зазору між двома магнітопроводами, але не враховує магнітні вторинні елементи, а другий враховує неоднорідність параметрів по товщині (висоті) і його несиметричне положення відносно магнітопроводів. Рівняння магнітного поля розв’язані із застосуванням інтегральних перетворень в скінченних межах та перетворень Фур’є, а також усереднення параметрів.

Застосовуючи теорему Умова-Пойнтинга за знайденим розподілом магнітної індукції на поверхнях магнітопроводів, встановлено вирази для розрахунку повної потужності та електромагнітних параметрів – головних комплексних опорів власної та взаємної індуктивності. Для розрахунку магнітних сил, що діють на вторинний елемент, використаний тензор натягів Максвелла.

Також в першому розділі розглянуто магнітне поле однофазного лінійного індуктора поперечного магнітного поля для обробки магнітними полями неелектропровідних та немагнітних матеріалів. Розроблено метод розрахунку магнітного поля, в основу якого покладено розв’язок рівняння Лапласа та представлення обмотки індуктора у вигляді струмових шарів на поверхні ідеального магнітопроводу. В розробленому методі враховано вплив лобових частин обмоток, струмове навантаження яких представлено у вигляді струмового шару струму, лінійна густина якого змінюється від максимального значення біля магнітопроводу до нуля на краю обмотки.

В другому розділі «*РОЗРАХУНОК ІНДУКТОРІВ ПОВЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ*» розглянуто електромагнітне поле циліндричного індуктора із завантаженням у вигляді однієї, достатньо довгої феромагнітної труби. Причому, розглядався випадок, коли довжина індуктора a набагато більша ніж його діаметр d_1 $(a > 3d_1)$.

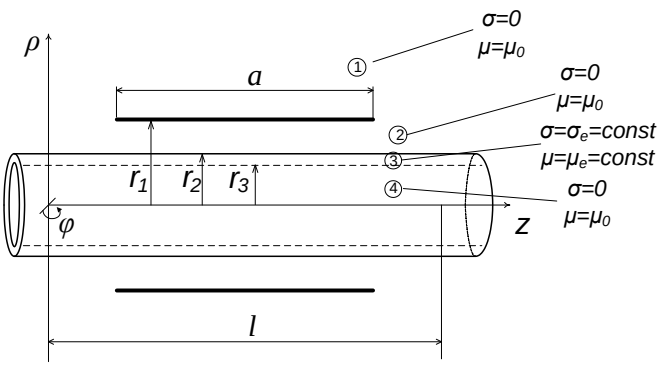

Рис. 1. Розрахункова модель циліндричного індуктора

Електромагнітне поле циліндричного індуктора може бути розраховане на підставі системи рівнянь Максвела. Розрахункова модель такого індуктора представлена на рис. 1. і поділена на чотири області, в яких векторний магнітний потенціал описується наступним диференційним рівнянням:

$$\frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2 A_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{\rho}\frac{\partial A_\rho}{\partial \varphi} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial A_\varphi}{\partial \rho} - \frac{1}{\rho^2}A_\varphi = \mu\sigma\frac{\partial A_\varphi}{\partial t} \ . \qquad (1)$$

З урахуванням струмового шару

$$I_m = I_{0m} \cdot \frac{w}{a}, \qquad (2)$$

де w – кількість витків; a – довжина намотки індуктора.
рівняння (1) набуває наступного вигляду:

$$\frac{\partial^2 A_{\varphi m}}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2 A_{\varphi m}}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial A_{\varphi m}}{\partial \rho} - (\frac{1}{\rho^2} + i\mu\sigma\omega)A_\varphi = 0. \qquad (3)$$

Розв'язавши це рівняння з використанням інтегрального перетворень по повздовжній координаті знайдено розподіл векторного магнітного потенціалу в кожній з областей, на основі якого можна визначити і інші складові електромагнітного поля.

За результатами розрахунку циліндричного індуктора, що завантажений однією феромагнітною трубою, на основі аналізу магнітних потоків, що замикаються по феромагнітним елементам та немагнітному проміжку, встановлено залежність для розрахунку комплексного опору схеми заміщення індуктора без розв’язку задачі електромагнітного поля в системі з складною геометрією у вигляді пучка труб, а здійснювати такий розрахунок за результатами розв’язку польової вісесиметричної задачі для однієї труби:

$$z_{mn} = n \cdot z_{m1} - z_{xx} \cdot (n-1). \qquad (4)$$

Підставою для виводу формули (4) було припущення про рівномірний розподіл магнітного поля в поперечному перерізі індуктора. Експериментальна перевірка даного припущення проводилася в подальшому (розділ 3) при вивченні розподілу температури при індукційному нагріві такого завантаження. Доведено, що для індуктора, довжина якого втричі перевищує діаметр, магнітна індукція в поперечному перерізі є сталою.

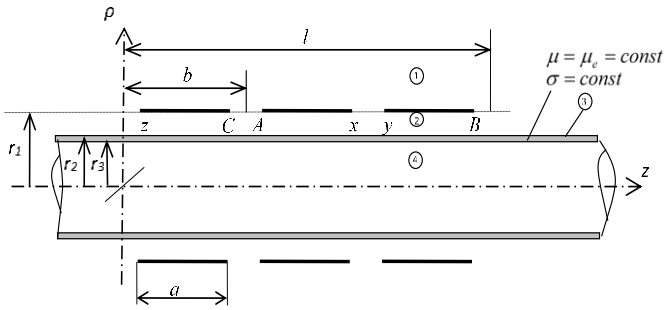

Рис. 2. Трифазний циліндричний індуктор

Розглянуто електромагнітне поле трифазного циліндричного індуктора (рис. 2). Як завантаження розглядалась нескінченно довга феромагнітна труба зовнішнім радіусом r_2 та внутрішнім – r_3. Тут наведено лише один кінцевий вираз для азимутальної складової векторного магнітного потенціалу в області 2 згідно рис. 2:

$$A_{\varphi 2} = \sum_{k=1}^{\infty} \overline{A}_2 \sin(p_k z) = -\frac{4\mu_0}{al}\sum_{k=1}^{\infty} r_1 K_1(p_k r_1), \qquad (5)$$

де L_k, T_k – алгебраїчні коефіцієнти.

На підставі розрахунку електромагнітного поля трифазного циліндричного індуктора було встановлено, що через взаємний вплив

індукторів різних фаз, пов'язаних через електромагнітне поле, струми в фазах будуть відрізнятися по модулю, що приводить до нерівномірного електричного навантаження фаз перетворювача чи трифазної системи.

Достовірність розробленого методу розрахунку циліндричного індуктора з феромагнітним розгалуженим завантаженням було підтверджено при дослідженні експериментальних зразків індукційної установки для нагріву теплоносіїв (повітря, води).

В третьому розділі *«ТЕПЛОВІ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПОЛЯ В ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА РІПАКА»* проведено аналіз сучасних методів інтенсифікації теплової обробки, засобів забезпечення заданих теплових режимів роботи промислового обладнання, способів передачі енергії теплообмінній поверхні, на основі якого було обґрунтовано доцільність застосування в якості поверхні теплообміну рівномірно розміщених в об'ємі каналу теплової обробки феромагнітних стрижнів, а для інтенсифікації процесу теплообміну феромагнітним стрижням надано обертального руху, при цьому дисперсний матеріал рухається самовільно під дією сили гравітації.

Розроблено детерміновані математичні моделі теплових процесів в шнековому пресі і роторному проточному нагрівачі з індукційним підведенням енергії, які враховують теплофізичні властивості матеріалу, швидкість видалення вологи і конструктивні параметри робочих органів. За результатами досліджень встановлені нові співвідношення для еквівалентування циліндричних індукторів некругової форми, які дають змогу використовувати спрощені розв'язки електромагнітної задачі для визначення енергетичних характеристик багатовиткових індукторів. Порівняння експериментальних і розрахункових результатів підтверджують високу достовірність розроблених математичних моделей процесів нагріву в індукційній установці дисперсних матеріалів та методики розрахунку енергетичних параметрів такої установки.

Результатом досліджень є вирішення актуального наукового завдання – підвищення технологічної і енергетичної ефективності електротехнічного комплексу, що полягає у встановленні взаємозв'язків між параметрами індукційної нагрівальної установки і інтенсивністю нагріву дисперсного матаріалу. Зазначене дозволило створити автоматичний електротехнічний комплекс у складі технологічної лінії виробництва олії та визначити, що застосування індукційного нагрівача дозволило більш ефективно використовувати робочий об'єм пресу для створення ізотермічного режиму, що забезпечило збільшення виходу олії на 2-3% . За результатами аналізу проведених багатофакторних експериментів встановлено межі раціональних значень конструктивних і режимних параметрів розробленої установки які забезпечують підвищення технологічних показників роботи нагрівача, а саме: продуктивність установки 130 кг/год; частота обертання ротора теплопередаючих елементів 6 об/хв; кількість феромагнітних стрижнів при

діаметрі d=6мм 80 шт; кінцева температура зерна ріпака 48 °С. Для забезпечення автоматичного управління розроблено алгоритм використання нечітких нейронних мереж для визначення енергоефективних режимів функціонування електротехнологічного комплексу теплової обробки зерна ріпака в лінії виробництва олії, створено поновлювальну базу знань режимів функціонування вдосконаленого обладнання.

За результатами виробничої перевірки і техніко-економічних розрахунків встановлено, що впровадження запропонованої установки для теплової обробки зерна ріпака у виробництво дозволив отримати річний економічний ефект 780 тис. грн. Розроблений електротехнічний комплекс температурної обробки зерна ріпака впроваджено у ВП НУБіП України «Агрономічна дослідна станція».

В четвертому розділі «*ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ УСТАНОВОК ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ*» наведені конструктивні і схемні рішення високочастотного напівпровідникового перетворювача, який використовує сучасну елементну базу та нові принципи оптимального управління і забезпечує можливість заміни високочастотних індукторів різних типорозмірів та конфігурацій при автоматичній підтримці на заданому рівні параметрів електротермічного процесу, а також параметричну стабілізацію її вихідної потужності для кожної конкретної деталі. Розглянуто специфіку нагріву елементів колісної пари транспортного засобу, а також електротермічну обробку траків гусениць та гарячу посадку елементів торсіонної підвіски ходової частини, тощо, за умови широкого діапазону ваги деталей, що нагріваються.

Визначено параметри і отримано характеристики складових системи рідинного охолодження діодних модулів трифазного випрямляча та IGBT-модулів інвертора і індукторів установки ЕТУ-250. Виготовлено, налагоджено і налаштовано вузли системи захисту, блокування та контролю установки ЕТУ-250.

Виготовлено елементи і вузли силової частини і системи управління дослідного зразка установки. Проведено комплекс експериментальних випробувань високочастотного перетворювача в робочих і аварійних режимах, який підтвердив високу ступінь універсальності, ефективності і готовності перетворювача при обробці різноманітних деталей і вузлів.

16

молодший науковий співробітник відділу
електромагнітних систем Інституту
електродинаміки НАН України, к.т.н. Крищук Р. С.

молодший науковий співробітник відділу
стабілізації параметрів електромагнітної енергії,
Інституту електродинаміки НАН України Малахатка Д. О.

старший викладач кафедри електричних
машин і експлуатації електрообладнання
Національного університету біоресурсів і
природокористування України, к.т.н. Березюк А. О.

доцент кафедри автоматики та робототехнічних
систем ім. акад. І. І. Мартиненка
Національного університету біоресурсів і
природокористування України. Комарчук Д. С.

Підпис Крищука Р.С. засвідчую.
Підпис Малахатки Д.О. засвідчую.
Підпис Березюка А.О. засвідчую.
Підпис Комарчука Д.С. засвідчую:

Начальник відділу кадрів
Інституту електродинаміки НАНУкраїни Кривопляс Л. В.

Національна Академія Наук України
Інститут електродинаміки
ідентифікаційний код № 05417236
м. Київ