

ТРИВИМІРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРА ІНДУКЦІЙНОГО ТИПУ. РЕЖИМ НАПРУГИ

А. В. Жильцов, доктор технічних наук, професор

Інститут електродинаміки НАН України

А. О. Березюк, кандидат технічних наук, доцент

С. М. Усенко, кандидат технічних наук, доцент

Б. В. Ярмоленко, аспірант

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: azhilt@gmail.com

Анотація. Теплогенератори індукційного типу знаходять широке застосування у технологіях сушіння матеріалів природного та штучного походження. Це дозволяє з використанням безконтактної дії на теплоносії на відміну від традиційних теплогенераторів, де у якості сушильного агента виступає повітря, що нагріте продуктами згоряння мінерального палива, виключити вплив на кінцевий продукт канцерогенів, за відсутності відкритого вогню забезпечити пожежобезпечність, не забруднює навколишнє середовище продуктами горіння в силу їх відсутності. Незважаючи на досить широке промислове впровадження цих технологій питання створення нових та вдосконалення відомих систем індукційного нагріву для технологій сушіння природного та штучного походження залишаються актуальними, а методи їх проєктування потребують подальшого розвитку та узагальнення. Метою даної роботи є розробка за допомогою методу вторинних джерел математичної моделі для аналізу тривимірного магнітного поля в трифазному теплогенераторі індукційного типу з урахуванням симетрії його геометрії, що живиться від трифазного джерела напруги. На основі методу вторинних джерел розроблено тривимірну математичну модель теплогенератора індукційного типу при його живленні від джерела трифазної напруги з навантаженням у вигляді незв'язаних феромагнітних електропровідних трубок/стрижнів з урахуванням симетричності розподілу густини вторинних джерел електромагнітного поля, що дозволяє раціонально використовувати обчислювальні ресурси, проводити аналіз впливу геометричних, електрофізичних, режимних параметрів теплогенератора індукційного типу на теплові втрати в навантаженні, що є джерелами тепла для нагріву теплоносія.

Ключові слова: *теплогенератор, індукційне нагрівання, моделювання, метод вторинних джерел, метод інтегральних рівнянь*

Актуальність. Застосування індукційних теплогенераторів у технологіях сушіння матеріалів природного та штучного походження обумовлено можливістю

безконтактного впливу на теплоносії, що має переваги перед традиційними теплогенераторами, де сушильним агентом є повітря, нагріте продуктами згоряння мінерального палива, що призводить до забруднення продукту канцерогенами, погіршення екології, створює небезпеку пожежі через можливі відкладення пилу та сміття на камерах згоряння палива, які можуть спалахнути. Також у технологічних процесах переробки біомаси рослинного походження часто виникає необхідність її підігрівання [1], наприклад, у виробництві гранульованого або брикетованого біопалива. Термічну обробку також можна застосовувати при підготовці насіння, приготуванні різноманітних кормів, сушінні сільськогосподарської продукції, рідин тощо [2–4].

Незважаючи на досить широке промислове впровадження цих технологій [1, 2] питання створення нових та вдосконалення відомих систем індукційного нагріву для технологій сушіння природного та штучного походження залишаються актуальними, а методи їх проєктування потребують подальшого розвитку та узагальнення. Важливе значення має пошук загальних підходів до аналізу та розробки математичних моделей електромагнітних процесів і процесів тепломасопереносу в розглянутому класі електротехнічних пристроїв на єдиній теоретичній основі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Математичне моделювання впливу технологічних процесів і конструктивних параметрів на ефективність сушіння потребує вирішення в загальному випадку тривимірних крайових задач для системи рівнянь Максвелла в необмеженій області, що містить геометрично складні феромагнітні та електропровідні тіла, рівняння тепломасопереносу [5–7].

У деяких випадках розв'язування такої задачі допустимо в плоскопаралельному або вісесиметричному наближенні.

Аналітичні методи вирішення можливі лише в найпростіших випадках [1, 8, 2]. При використанні цих методів шукана функція подається у вигляді явної залежності від вихідних даних. Деякі з цих методів набули широкого застосування при розв'язуванні крайових задач і стали класичними. Серед їхніх переваг слід виділити простоту похідного виразу і можливість отримання точного значення результату в

будь-якій точці розрахункової області. До недоліків можна віднести: громіздкість аналітичних перетворень (і, відповідно, високу ймовірність помилки) і вузьку сферу застосування.

У більш складних випадках використовуються чисельні методи, які значно розширюють клас розв'язуваних задач і легко реалізуються на ЕОМ. Але ці методи, як правило, вимагають багато часу обчислень і на виході мають дискретний спектр значень, сукупність яких називається наближеним розв'язком задачі.

Для моделювання електромагнітних процесів можна використовувати один із методів: метод скінченних різниць, метод скінченних елементів, метод інтегральних рівнянь (метод вторинних джерел), комбіновані методи тощо. Кожен зі зазначених методів має свої переваги та недоліки. Однак, аналіз літературних джерел показує, що нині ресурси для вдосконалення методу скінченних елементів і скінченних різниць практично вичерпані. Це підкреслює актуальність розробки нових більш ефективних чисельних методів, які дозволяють більш економно використовувати обчислювальні ресурси ЕОМ і гарантують ефективне розв'язання багатовимірних задач аналізу та проектування електрообладнання.

Одним із найбільш перспективних у цьому плані є метод інтегральних рівнянь або метод вторинних джерел [10]. Це пов'язано з тим, що в розглянутому класі електротехнічних пристроїв зазвичай присутні сильні магнітні поля розсіювання. Метод інтегральних рівнянь у цьому випадку більш ефективний завдяки тому, що шукані величини розподіляються лише в об'ємі електропровідних тіл (вихрові струми), на їх границях (електричні заряди) та на границях феромагнітних тіл (струми намагнічування, чи інші типи вторинних джерел). Таким чином, область пошуку розв'язку значно менша, ніж у методах скінченних різниць і скінченних елементів, коли необхідно шукати розв'язок у всій, взагалі кажучи, необмеженій області.

Незважаючи на досягнуті результати в області моделювання електромагнітних процесів [11 – 21], розробка ефективних методів і засобів математичного та комп'ютерного моделювання систем індукційного нагрівання є актуальною науково-прикладною задачею.

В роботі [1] проведено дослідження чисельно-аналітичних математичних моделей для розрахунку електромагнітних і теплових полів індукційних електронагрівачів та розроблено аналітичний метод розрахунку енергетичних характеристик циліндричного індуктора з навантаженням у вигляді пучка труб або стрижнів. Встановлено взаємозв'язок процесів, що відбуваються при сушінні, з режимами роботи теплогенератора. Проведені дослідження виявили можливість підвищення енергоефективності процесу сушіння матеріалів природного та штучного походження за рахунок інтенсифікації режимів сушіння, а також удосконалення математичних моделей з використанням методу редукції крайових задач для рівнянь електромагнітного поля та рівнянь тепломасопереносу до систем інтегро-диференціальних рівнянь для розрахунку характеристик електромагнітного та теплового полів в теплогенераторі індукційного типу з урахуванням тривимірності складної геометрії та нелінійних властивостей масивних феромагнітних елементів.

У роботах [22, 24] методом вторинних джерел розроблено тривимірну математичну модель трифазного теплогенератора індукційного типу, що живиться від симетричного джерела струму, яка враховує симетрію магнітної системи. Це дозволило зменшити область пошуку для густин вихрових струмів до об'ємів феромагнітних електропровідних труб, простого шару струмів намагнічування та простого шару електричних зарядів, що визначають групи труб з однаковими густинами розподілу вторинних джерел. Розроблена математична модель реалізована у вигляді відповідного алгоритму та програми чисельного розв'язку систем інтегральних рівнянь для густин вторинних джерел мовою *Fortran*.

Мета дослідження – розробка за допомогою методу вторинних джерел математичної моделі для аналізу тривимірного магнітного поля в трифазному теплогенераторі індукційного типу з урахуванням симетрії його геометрії, що живиться від трифазного джерела напруги.

Матеріали та методи дослідження.

Крайова задача та інтегральні рівняння для густин вторинних джерел.

Задачу будемо розв'язувати, припускаючи, що трифазна обмотка індукційного теплогенератора живиться від симетричної системи трифазних напруг:

$$u_A(t) = U_{\max} \sin(\omega t), \quad u_B(t) = U_{\max} \sin(\omega t + 2\pi/3), \quad u_C(t) = U_{\max} \sin(\omega t - 2\pi/3), \quad (1)$$

де $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ – миттєві значення напруги на обмотках фаз A, B, C; $U_{\max}$ – амплітудне значення напруги; ω – частота напруги; t – час.

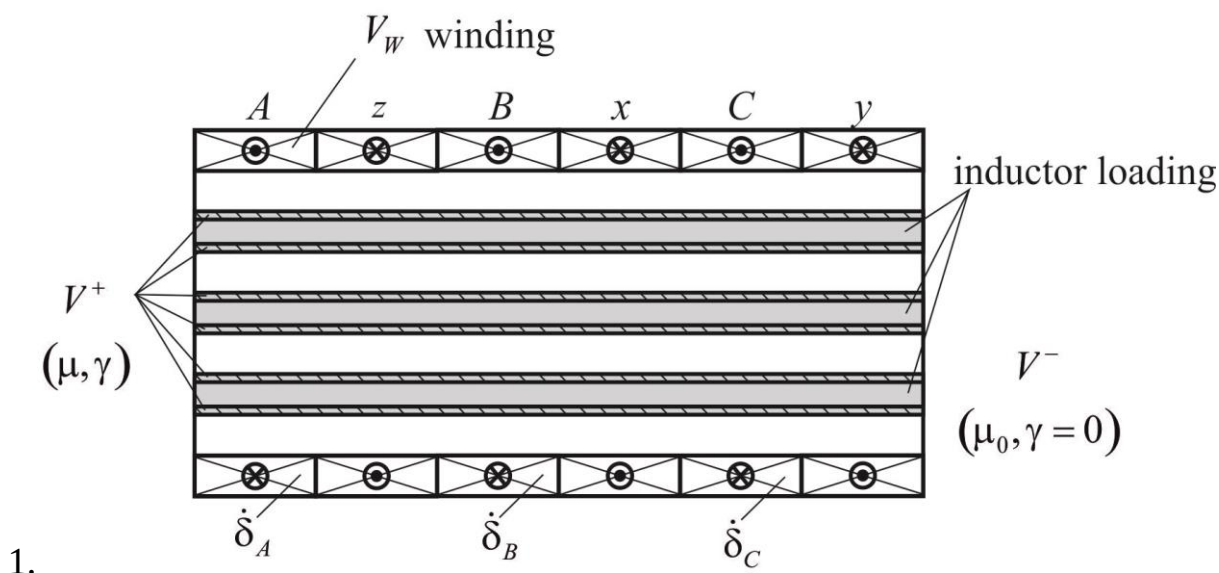


Рис.1. Ескіз трифазного теплогенератора індукційного типу

Будемо вважати, що обмотка кожної фази являє собою коаксіальні кільці, а завантаження індуктору – феромагнітні електропровідні труби.

Результати досліджень та їх обговорення. Розглянемо задачу розрахунку електромагнітного поля у теплогенераторі індукційного типу у *припущенні постійної магнітної проникності, питомої електропровідності* труб в квазістаціонарному наближенні.

У загальному випадку розв'язок задачі потребує розв'язання тримірної крайової задачі для системи рівнянь Максвелла в необмеженій області, яка для синусоїдо змінних струмів має наступний вигляд [10]:

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{\delta}} + j\omega\varepsilon\dot{\vec{E}} + \dot{\vec{\delta}}_w, \quad (2)$$

$$\operatorname{div} \dot{\vec{B}} = 0, \quad (3)$$

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -j\omega\dot{\vec{B}}; \quad (4)$$

$$\operatorname{div} \dot{\vec{D}} = \dot{\rho}, \quad (5)$$

де $\dot{\vec{H}}$ – комплексна амплітуда напруженості магнітного поля, А/м; $\dot{\vec{\delta}}$ – комплексна амплітуда густини вихрових струмів у трубах, А/м³; ω – частота, с⁻¹; ε – абсолютна діелектрична проникність середовища, Ф/м; $\dot{\vec{E}}$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля, В/м; $\dot{\vec{\delta}}_w$ – комплексна амплітуда густини струму в обмотках індуктора, (поза обмотки індуктора необхідно припустити, що $\dot{\vec{\delta}}_w = 0$); $\dot{\vec{B}}$ – комплексна амплітуда індукції магнітного поля, Тл; $\dot{\vec{D}}$ – комплексна амплітуда електричного зміщення, Кл/м²; $\dot{\rho}$ – комплексна амплітуда вільних зарядів, Кл/м³.

Система рівнянь (2) – (5), доповнена матеріальними рівняннями

$$\dot{\vec{B}} = \mu\dot{\vec{H}}, \quad \dot{\vec{D}} = \varepsilon\dot{\vec{E}}, \quad \dot{\vec{\delta}} = \gamma\dot{\vec{E}}, \quad (6)$$

та граничними умовами, формулює крайову задачу, до розв'язання якої зводиться розрахунок характеристик електромагнітного процесу. Тут μ – абсолютна магнітна проникність середовища, Гн/м; γ – питома провідність середовища, См/м.

Приймаючи до уваги те, що на обмотки індуктора подаються синусоїдальної форми фазні напруги малої частоти ($f = 50$ Гц), можемо знехтувати струмами зміщення, тобто покласти $j\omega\varepsilon\dot{\vec{E}} = 0$. Також можемо покласти комплексну амплітуду вільних зарядів $\dot{\rho}$ рівною нулю.

Задачу аналізу електромагнітного поля в теплогенераторі індукційного типу можна сформулювати в такий спосіб [10]: знайти комплексну амплітуду густини вихрових струмів в області V^+ (рис.1) за умови, що вектори $\dot{\vec{H}}$ та $\dot{\vec{E}}$ задовольняють рівнянням

в області V_w , що займають котушки зі густиною струму $\dot{\vec{\delta}}_w(Q)$, –

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{\delta}}_w, \operatorname{div} \dot{\vec{B}} = 0, \quad (7)$$

в області V^- зовнішній по відношенню до магнітної системи теплогенератора індукційного типу –

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = 0, \operatorname{div} \dot{\vec{B}} = 0, \operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -j\omega \dot{\vec{B}}, \operatorname{div} \dot{\vec{E}} = 0; \quad (8)$$

в області V^+ , що займають феромагнітні труби, –

$$\operatorname{rot} \dot{\vec{H}} = \dot{\vec{\delta}}, \operatorname{div} \dot{\vec{B}} = 0, \operatorname{rot} \dot{\vec{E}} = -j\omega \dot{\vec{B}}, \operatorname{div} \dot{\vec{E}} = 0, \quad (9)$$

$$\dot{\vec{\delta}} = \gamma \dot{\vec{E}}; \quad (10)$$

крайові умови на поверхні S феромагнітних труб:

$$\vec{n}_Q \times (\dot{\vec{E}}^+ - \dot{\vec{E}}^-) = 0; \quad (11)$$

$$\vec{n}_Q \times (\dot{\vec{H}}^+ - \dot{\vec{H}}^-) = 0; \quad (12)$$

$$\oint_S \dot{\vec{E}}^- d\vec{S} = 0, \quad (13)$$

де $\vec{n}_Q$ – зовнішня по відношенню до масивного феромагнітного провідника нормаль у точці Q їх границі; $\dot{\vec{E}}^+$, $\dot{\vec{E}}^-$ – граничні значення комплексних амплітуд напруженості електричного поля в точці Q при прагненні до неї відповідно з внутрішньої та зовнішньої сторони труб; $\dot{\vec{H}}^+$, $\dot{\vec{H}}^-$ – те саме для комплексній амплітуди напруженості магнітного поля.

Система рівнянь (7) – (9) спільно з крайовими умовами (11) – (13) є повною, тобто крайова задача (7) – (13) може мати тільки єдиний розв'язок [6].

Записана крайова задача може бути переформульована з використанням електродинамічних потенціалів, та зведена до системи інтегральних рівнянь [10]:

$$\begin{aligned} \dot{\delta}(Q) + \frac{j\omega\mu\gamma}{4\pi} \int_{V^+} \frac{\dot{\delta}(M)}{r_{MQ}} dV_M + \frac{j\omega\mu_0\gamma}{4\pi} \oint_S \frac{\dot{i}(M)}{r_{MQ}} dS_M + \frac{\gamma}{4\pi\epsilon_0} \oint_S \dot{\sigma}(M) \frac{\vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} dS_M = \\ = -\frac{j\omega\mu_0\gamma}{4\pi} \sum_{k=1}^{N_w} \int_{V_{wk}} \frac{\dot{\delta}_w(M)}{r_{MQ}} dV_M, \quad Q \in V^+, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{i}(Q) + \frac{\lambda}{2\pi} \oint_S \frac{\vec{n}_Q \times \dot{i}(M) \times \vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} dS_M + \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\mu}{\mu_0} \int_{V^+} \frac{\vec{n}_Q \times \dot{\delta}(M) \times \vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} dV_M = \\ = -\frac{\lambda}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_w} \int_{V_{wk}} \frac{\vec{n}_Q \times \dot{\delta}_w(M) \times \vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} dV_M, \quad Q \in S, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}(Q) - \frac{1}{2\pi} \oint_S \dot{\sigma}(M) \left[\frac{\vec{n}_Q \vec{r}_{MQ}}{r_{MQ}^3} - \frac{2\pi}{S} \right] dS_M + \frac{j\omega\epsilon_0\mu}{2\pi} \int_{V^+} \frac{\vec{n}_Q \dot{\delta}(M)}{r_{MQ}} dV_M + \\ + \frac{j\omega\epsilon_0\mu_0}{2\pi} \int_S \frac{\vec{n}_Q \dot{i}(M)}{r_{MQ}} dS_M = -\frac{j\omega\epsilon_0\mu_0}{2\pi} \sum_{k=1}^{N_w} \int_{V_{wk}} \frac{\vec{n}_Q \dot{\delta}_w(M)}{r_{MQ}} dV_M, \quad Q \in S, \end{aligned} \quad (16)$$

де $\dot{\delta}(Q)$ – комплексна амплітуда густини вихрових струмів у точці Q труб V^+ ; $\dot{\delta}(M)$ – те саме у точці M ; $\dot{i}(Q)$ – комплексна амплітуда поверхневої густини простого шару струмів у точці Q на границі S труб; $\dot{i}(M)$ – те саме у точці M ; $\dot{\sigma}(Q)$ – комплексна амплітуда густини простого шару електричних зарядів у точці Q на границі S труб; $\dot{\sigma}(M)$ – те саме у точці M ; $j = \sqrt{-1}$; $\omega = 2\pi f$, f – частота електричних струмів (напруги) в обмотках індуктора; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – магнітна та діелектрична постійні; $\vec{r}_{MQ}$ – радіус-вектор, що спрямований з точці інтегрування M у точку спостереження Q ; $\dot{\delta}_w(M)$ – комплексна амплітуда густини струмів у обмотках індуктора V_{wk} , $k = 1, 2, \dots, N_w$, N_w – число обмоток індуктора; $\vec{n}_Q$ – зовнішня нормаль к границі S труб; $\lambda = (\mu - \mu_0)/(\mu + \mu_0)$ – параметр інтегрального рівняння (15).

Система рівнянь (14) – (16) за відомим розподілом густини струмів $\dot{\delta}_w(M)$ дозволяє знайти розподіл комплексної густини амплітуди вихрових струмів у об'ємі труб, але якщо відомо напругу на обмотках індуктора, то записану систему рівнянь потрібно доповнити додатковими рівняннями, що записані з використанням другого закону Кірхгофа для кіл обмоток індуктора.

Тобто, у випадку розв'язання задачі, коли задається напруга на обмотках індуктора, записана система інтегральних рівнянь (14) – (16) доповнюється рівняннями:

$$\dot{I}_A R + j\omega \dot{\Psi}_A = \dot{U}_A, \quad \dot{I}_B R + j\omega \dot{\Psi}_B = \dot{U}_B, \quad \dot{I}_C R + j\omega \dot{\Psi}_C = \dot{U}_C, \quad (17)$$

де $\dot{I}_A = \dot{\delta}_{WA} S_{WA}$, $\dot{I}_B = \dot{\delta}_{WB} S_{WB}$, $\dot{I}_C = \dot{\delta}_{WC} S_{WC}$ – комплексні амплітуди струмів у фазах A , B , C обмоток індуктора (рис.1); $\dot{\delta}_{WA}$, $\dot{\delta}_{WB}$, $\dot{\delta}_{WC}$ – комплексні амплітуди густини струмів у тих самих обмотках індуктора, є шуканими величинами; S_{WA} , S_{WB} , S_{WC} – площі поперечного перерізу обмоток фаз A , B , C ; $\dot{\Psi}_A$, $\dot{\Psi}_B$, $\dot{\Psi}_C$ – комплексна амплітуда потокозчеплення з обмотками фаз A , B , C .

Розрахунок потокозчеплення реалізується наступним чином (на прикладі обмотки фази A):

$$\dot{\Psi}_A = \int_{S_A} \dot{\vec{B}} dS = \int_{S_A} \text{rot} \dot{\vec{A}} dS = \oint_{L_A} \dot{\vec{A}} d\vec{L}, \quad (18)$$

де $\dot{\vec{A}}$ – комплексна амплітуда векторного магнітного потенціалу, $\dot{\vec{B}} = \text{rot} \dot{\vec{A}}$; S_A – поверхня, що натягнута на контур L_A , який співпадає з центральною лінією кожного вітка обмотки фази A . Аналогічні вирази мають місце для потокозчеплення з обмотками фаз B та C .

Векторний потенціал від джерел магнітного поля знаходиться за виразом [10]

$$\dot{\vec{A}}(Q) = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum_{k=1}^{N_W} \oint_{V_{Wk}} \frac{\dot{\delta}_w(M)}{r_{MQ}} dV_M + \frac{\mu}{4\pi} \int_{V^+} \frac{\dot{\delta}(M)}{r_{MQ}} dV_M + \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_S \frac{\dot{i}(M)}{r_{MQ}} dS_M. \quad (19)$$

Записана система інтегральних рівнянь апроксимується системою лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) з урахуванням симетричного розташування феромагнітних провідних труб у завантаженні теплогенератора індукційного типу [22, 24]. Сформована СЛАР розв'язується модифікованим методом послідовних наближень [10].

Висновки і перспективи. З використанням методу вторинних джерел розроблено тривимірну математичну модель теплогенератора індукційного типу, що живиться від джерела трифазної напруги. Це дозволило раціонально

використовувати обчислювальні ресурси, оскільки інтегральні рівняння для вторинних джерел, по-перше, мають мінімальну розрахункову область та дозволяють врахувати симетрію магнітної системи; по-друге, вони точно враховують магнітні поля розсіювання в необмеженому просторі. Перевагою запропонованої математичної моделі індукційного теплогенератора є можливість прямого розрахунку густини вихрових струмів у трубах навантаження з різними способами включення чергування фаз в обмотці, знаючи розподіл яких можна розрахувати як потужність тепловтрат в цілому, так і рівномірність їх розподілу в завантаженні. У результаті усуваються зайві обчислення, які становлять важливу частину загального обсягу обчислень у разі використання моделей на основі методу скінченних різниць або методу скінченних елементів.

Список використаних джерел

1. Електротехнологічні комплекси для сушіння зерна на основі індукційних теплогенераторів / І. П. Кондратенко [та ін.]. Київ: Компрінт, 2018 – 386 с.
2. Conception of efficiency of heat electromechanical complex as hybrid system / M. Zablodskiy [at al.]// Electrical and Computer Engineering: IEEE First Ukraine Conference (UKRCON), Ukraine, 2017. P. 399 – 404.
3. Biomass Pyrolysis Using a Multifunctional Electromechanical Converter and a Magnetic Field / M. Zablodskiy [et al.]. Scientia agriculturae bohemia. 2020. 51(2). Pp. 65 – 73.
4. The use of electrotechnical equipment for food production wastewater treatment / N. Zaiets [at al.]. Przegląd elektrotechniczny. 2021. R. 97 NR 9/2021. P. 106 – 109. doi: 10.15199/48.2021.09.22.
5. Valchev, V. C. Considerations for components selection of inverter for induction heating / V. C. Valchev, D. J. Marev // Electronics: 2016 XXV International Scientific Conference (ET), Sozopol, Bulgaria, 2016. P. 1 – 4. doi: 10.1109/ET.2016.7753519.
6. Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders / T.A. Jankowski[at al.] // Applied Mathematical Modelling. 2016. Vol. 40. 2770. P. 2782. Doi: 10.1016/j.apm.2015.10.006.
7. A semi-analytical coupled simulation approach for induction heating / M. Areitioaurtena [at al.] // Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. 2021. No 8. 19 p. doi: 10.1186/s40323-021-00199-0.
8. Inverse Model for the Control of Induction Heat Treatments / Mohammad Zhian Asadzadeh [at al.]// Materials. 2019. 12.2826. 15 p. doi: 10.3390/ma12172826.
9. Березюк А. О. Електромагнітні та теплові процеси в системах індукційного нагріву теплоносіїв. Дисертація ... кандидата технічних наук: 05.09.03 / Березюк Андрій Олександрович; Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2013.

10. Тозони О. В. Расчет трехмерных электромагнитных полей: монография / О. В. Тозони, И. Д. Маергойз. К.: Техніка, 1974. 351 с.
11. Методика розрахунку електромагнітного поля спіральної індукційної системи для маніт імпульсної обробки немагнітних металевих смуг з ферромагнітним екраном / А. Ращепкін [та ін.] // Технічна електродинаміка. 2022. № 2. С. 43 – 51. doi: 10.15407/techned2022.02.043.
12. Determination of Massive Rotary Electric Machines Parameters in ANSYS RMxprt and ANSYS Maxwell / V. Pliuhin [at al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. 2023 International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering, STUE 2022, Kharkiv, 9 – 11 June 2022. 2022. V. 536 LNNS. P. 189 – 201.
13. Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer / M.M. Zablodskiy [at al.] // Electrical Engineering & Electromechanics. 2022. No. 1. P. 3 – 11. doi: 10.20998/2074-272X.2022.1.01.
14. Vortex currents and magnetic forces of non-magnetic plate in the process of magneto-pulse treatment on the ideal ferromagnetic platform / A. Bereziuk [at al.] // Przegląd elektrotechniczny. 2023. R. 99 NR 5/2023. – Pp. 8 – 12. doi:10.15199/48.2023.05.02.
15. The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyser for Poultry by-Products Processing / N. Zablodsky [at al.] // Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021.
16. Herasymenko P. Mathematical analysis of dual-frequency load current of two-inverter power supply for induction heating systems / P. Herasymenko // Przegląd Elektrotechniczny. 2021. 97(3). P. 69 – 74. doi: 10.15199/48.2021.03.13.
17. Improved method of calculation the electromagnetic generator for environmentally friendly method of forming coolant / A. Bereziuk [at al.] // 16th International Conference on Renewable Energy Sources, ICoRES 2019 [Krynica] 12-14 June 2019. E3S Web of Conferences. 2020. V. 154, 04002. 7 p. doi: 10.1051/e3sconf/202015404002.
18. Sorokin D. Simulation of a Magnetic System With a Ferromagnetic Shell / D. Sorokin, T. Knizhka // IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), [Kyiv], 10-14 October 2022. 2022. P. 409 – 413. doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927022.
19. Sorokin D.: Simulation of High-frequency Induction Heating / D. Sorokin // 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). [Deggendorf], 16-18 September 2020. 2020. P. 39 – 42. doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208997.
20. Sorokin D. Simulation of the Force Characteristic of the “Coil-Permanent Magnet” System in the Presence of Ferromagnetic Elements / D. Sorokin // IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electro-magnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED), [Tbilisi], 15-18 September 2020. 2020. P. 59 – 62. doi: 10.1109/DIPED49797.2020.9273405.
21. Zhiltsov A. The calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets / A. Zhiltsov, D. Sorokin // 16th International Conference

on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), [Lviv] 02 – 05 September 2015. 2015. P. 252 – 254. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333390.

22. Energy parameters of induction heat generator with branched heat exchanger for production of environmentally friendly coolant / A. Bereziuk [at al.]// Przegląd elektrotechniczny. 2021. R. 97 NR 7/2021. P. 48 – 51.

23. Zhyltsov A.V. Three-dimensional mathematical model of three-phase heat generator of induction type based on the method of secondary sources / A.V. Zhyltsov, A.O. Bereziuk, T.V. Vishtak // Tekhnichna Electrodynamika. 2022.No 5. Pp. 3 – 10. doi: 10.15407/techned2022.05.008.

24. Eddy currents calculation in a three-phase induction-type heat generator using the secondary sources method. Current mode / A.V. Zhiltsov [at al.] // Tekhnichna Electrodynamika. 2023. No. 4. P. 3 – 10. doi: 10.15407/techned2023.04.003.

References

1. Kondratenko, I.P., Zhiltsov, A.V., Berezyuk, A.O., Kryshchuk, R.S. (2018). Elektrotehnologichni kompleksi dlya sushinnya zerna na osnovi indukciynih teplogeneratoriv [Electrotechnological complexes for grain drying based on induction heat generators]. Comprint, Kyiv, 386.

2. Zablodskiy, M, Zhiltsov, A, Kondratenko, I, Gritsyuk, V. (2017). Conception of efficiency of heat electromechanical complex as hybrid system. IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Ukraine, 2017. 399 – 404.

3. Zablodskiy, M, Zhiltsov, A, Nalyvaiko, V, et al. (2020) Biomass Pyrolysis Using a Multifunctional Electromechanical Converter and a Magnetic Field. Scientia agriculturae bohemia, 51(2), 65–73.

4. Zaiets, N., Shtepa, V., Kondratenko, I., Zhyltsov, A., Rohovik, A. (2021). The use of electrotechnical equipment for food production wastewater treatment. Przegląd elektrotechniczny, R. 97 NR 9/2021, 106 – 109. doi: 10.15199/48.2021.09.22.

5. Valchev, V. C., Mareva, D. J. (2016). Considerations for components selection of inverter for induction heating. 2016 XXV International Scientific Conference Electronics (ET), Sozopol, Bulgaria, 1 – 4. doi: 10.1109/ET.2016. 7753519.

6. Jankowski, T.A., Pawley, N.H., Gonzales, L.M., Ross, C.A., Journey, J.D. (2016). Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders. Applied Mathematical Modelling, vol. 40, 2770 – 2782. doi: 10.1016/j.apm.2015.10. 006.

7. Areitioaurtena, M., Segurajauregi, U., Akujärvi, V., Fisk, M., Urresti, I., Ukar, E. (2021). A semi-analytical coupled simulation approach for induction heating. Adv. Model. and Simul. in Eng. Sci. doi: 10.1186/s40323-021-00199-0.

8. Mohammad Zhian Asadzadeh, Peter Raninger, Petri Prevedel, Werner Ecker, Manfred Mücke. (2019) Inverse Model for the Control of Induction Heat Treatments. Materials, 12.2826. doi: 10.3390/ma12172826.

9. Berezyuk, A. O. (2013). Elektromagnitni ta teplovi procesi v sistemah indukciynogo nagrivu teplonosiyiv [Electromagnetic and thermal processes in systems of induction heating of coolants]. Kyiv.

10. Tozony, O.V., Maergoyz, I.D. (1974) Raschet trehmemyh elektromagnitnyh polej [Calculation of three-dimensional electromagnetic fields]. Kyiv: Technika. 351.

11. Rashchepkin, A., Kondratenko, I., Karlov, O. and Kryshchuk, R. (2022) Metodika rozrahunku elektromagnitnogo polya spiralnoyi indukciynoyi sistemi dlya manitoimpulsnoyi obrobki nemagnitnih metalevih smug z feromagnitnim ekranom [The method of calculating the electromagnetic field of the spiral induction system for manito-pulse processing of non-magnetic metal strips with a ferromagnetic screen]. Tekhnichna Electrodynamika, 2022, No 2, 43 – 51. doi: 10.15407/techned2022.02.043.
12. Pliuhin, V., Zablodskiy, M., Sukhonos, M., Tsegelnyk, Y., Piddubna, L. (2022). Determination of Massive Rotary Electric Machines Parameters in ANSYS RMxprt and ANSYS Maxwell. Lecture Notes in Networks and Systems. 2023 International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering, STUE 2022, Kharkiv, 9 – 11 June 2022, V. 536 LNNS, 189 – 201.
13. Zablodskiy, M.M., Pliuhin, V.E., Kovalchuk, S.I., Tietieriev, V.O. (2022). Indirect field-oriented control of twin-screw electromechanical hydrolyzer. Electrical Engineering & Electromechanics, 2022, No. 1, 3 – 11. doi: 10.20998/2074-272X.2022.1.01.
14. Bereziuk, A., Karlov, O., Kryshchuk, R., Garasymchuk, I., Potapskyi, P., Vusatyi, M. (2023). Vortex currents and magnetic forces of non-magnetic plate in the process of magneto-pulse treatment on the ideal ferromagnetic platform. Przegląd elektrotechniczny, R. 99 NR 5/2023, 8 – 12. doi:10.15199/48.2023.05.02.
15. Zablodsky, N., Kovalchuk, S., Bereziuk, A., Zhyltsov, A., Gritsyuk, V. (2021). The Numerical Analysis of Vibration Parameters in the Working Element of Twin-Screw Electromechanical Hydrolyser for Poultry by-Products Processing. Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2021.
16. Herasymenko, P. (2021). Mathematical analysis of dual-frequency load current of two-inverter power supply for induction heating systems. Przegląd Elektrotechniczny, 97(3), 69 – 74. doi: 10.15199/48.2021.03.13.
17. Bereziuk, A., Karlov, O., Kryshchuk, R., Mrachkovsky, A., Nalyvaiko, V. (2020). Improved method of calculation the electromagnetic generator for environmentally friendly method of forming coolant. 6th International Conference on Renewable Energy Sources, ICoRES 2019 Krynica12-14 June 2019. E3S Web of Conferences, V. 154, 04002, 7. doi: 10.1051/e3sconf/202015404002.
18. Sorokin, D., Knizhka, T. (2022). Simulation of a Magnetic System With a Ferromagnetic Shell. IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, Ukraine, 10-14 October 2022, 409 – 413. doi: 10.1109/ELNANO54667.2022.9927022.
19. Sorokin, D. (2020). Simulation of High-frequency Induction Heating. 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). Deggendorf, Germany, 16-18 September 2020, 39 – 42. doi: 10.1109/ACIT49673.2020.9208997.
20. Sorokin, D. (2020) Simulation of the Force Characteristic of the “Coil-Permanent Magnet” System in the Presence of Ferromagnetic Elements. IEEE XXVth International Seminar/Workshop Direct and Inverse Problems of Electro-magnetic and Acoustic Wave Theory (DIPED). Tbilisi, Georgia, 15-18 September 2020, 59 – 62. doi: 10.1109/DIPED49797.2020.9273405.

21. Zhiltsov, A., Sorokin, D. (2015). The calculation of the magnetic field in the working area of the linear motor with permanent magnets. 16th International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Lviv, Ukraine, 02 – 05 September 2015, 252 – 254. doi: 10.1109/CPEE.2015.7333390.

22. Bereziuk, A., Karlov, O., Kryshchuk, R., Garasymchuk, I., Potapskyi, P., Vusatyi, M. (2021) Energy parameters of induction heat generator with branched heat exchanger for production of environmentally friendly coolant. *Przegląd elektrotechniczny*, R. 97 NR 7/2021, 48 – 51.

23. Zhyltsov, A.V., Bereziuk, A.O., Vishtak, T.V. (2022). Three-dimensional mathematical model of three-phase heat generator of induction type based on the method of secondary sources. *Tekhnichna Electrodynamika*, No 5, 3 – 10. doi: 10.15407/techned2022.05.008.

24. Zhiltsov, A.V., Zaiets, N.A., Bereziuk, A.O., Gai, O.V., Lyktei, V.V. (2023). Eddy currents calculation in a three-phase induction-type heat generator using the secondary sources method. Current mode. *Tekhnichna Electrodynamika*, No. 4, 3 – 10. doi: 10.15407/techned2023.04.003.

THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL MODEL OF THE INDUCTION-TYPE HEAT GENERATOR. VOLTAGE MODE

A. Zhyltsov, A. Berezyuk, S. Usenko, B. Yarmolenko

Abstract. *Induction type heat generators are widely used in technologies for drying materials of natural and artificial origin. This allows using non-contact action on the heat carrier, unlike traditional heat generators, where air heated by the products of combustion of mineral fuel acts as a drying agent, to exclude the impact of carcinogens on the final product, to ensure fire safety in the absence of an open flame, does not pollute the environment with combustion products in due to their absence. Despite the fairly wide industrial implementation of these technologies, the issue of creating new and improving known induction heating systems for drying technologies of natural and artificial origin remains relevant, and their design methods require further development and generalization. The purpose of this work is to develop, using the method of secondary sources, a mathematical model for the analysis of the three-dimensional magnetic field in a three-phase heat generator of the induction type, taking into account the symmetry of its geometry, powered by a three-phase voltage source. On the basis of the method of secondary sources, a three-dimensional mathematical model of an induction-type heat generator was developed when it is powered by a three-phase voltage source with a load in the form of unbonded ferromagnetic conductive tubes/rods, taking into account the symmetry of the density distribution of secondary sources of the electromagnetic field, which allows rational use of computing resources, conducting analysis influence of the geometrical, electrophysical, mode parameters of the induction type heat generator on heat losses in the loaded, which are heat sources for heating the coolant.*

Key words: *heat generator, induction heating, modeling, method of secondary sources, method of integral equations*