

УДК 621.3

М. Г. ПАНТЕЛЯТ, А. В. ТРОФІМОВ

МЕТОДИКА МУЛЬТИФІЗИЧНОГО АНАЛІЗУ ЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ І ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КУХОННІЙ ПЛИТІ ТА ПОСУДІ, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ

У роботі запропоновано методику мультифізичного чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромагнітного та теплового полів індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається, у двовимірній постановці методом скінчених елементів. Враховуються залежності від температури електрофізичних і теплофізичних властивостей матеріалів конструкцій, що розглядаються, а також магнітні властивості магнітом'яких матеріалів.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, електромагнітне поле, теплове поле, мультифізика, комп'ютерне моделювання, метод скінчених елементів

Вступ. В основу принципу дії індукційних кухонних плит покладено розігрів металевого посуду вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц. В роботах [1-3] запропоновано інженерну методику розрахунку побутових індукційних кухонних плит, а також математичні моделі та методик комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного та теплового поля плити та посуду, що нагрівається. Наступним етапом у комплексному дослідженні цього іновативного класу електропобутової техніки є чисельний аналіз зв'язаних (мультифізичних) електромагнітних та теплових явищ, що мають місце в процесі роботи індукційних кухонних плит, з урахуванням їх взаємного впливу одне на інше, що дозволить отримати найбільш достовірні результати розрахунків.

Мета роботи – розробка методики мультифізичного чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромагнітного та теплового полів індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається. Отримані результати комп'ютерного моделювання будуть проаналізовані в наступних роботах.

Огляд літературних джерел та аналіз стану проблеми. У вітчизняній науково-технічній літературі наразі не знайдено робіт, присвячених розробці та реалізації інженерних та чисельних методик розрахунку та проектування індукційних кухонних плит, за винятком [1-3]. У закордонних виданнях відповідних публікацій теж небагато. Розглянемо найбільш цікаві з них.

У роботах [4-6] запропоновано методику спільного чисельного аналізу процесів в електронних схемах генераторів високої частоти та розподілу електромагнітного поля в індукторній системі індукційної кухонної плити, що дозволило авторам запропонувати, розрахувати та експериментально перевірити цікаву новітню конструкцію індуктора плити. Комп'ютерне моделювання розподілу електромагнітного поля виконується методом скінчених елементів у двовимірній [4, 5] та тривимірній [6] постановках. Недоліком робіт є відсутність аналізу теплових процесів у конструкції, що розглядається.

У роботі [7] здійснено спробу оптимізації та виконано скінченоелементний аналіз у двовимірній постановці електромагнітних процесів (розподіл

електромагнітного поля та електромагнітних сил) в індукційній кухонній плиті. Суттєвими недоліками використаної методики є розв'язання рівнянь електромагнітного поля у магнітостатичному наближенні (тобто знехтування вихровими струмами в першу чергу у посуді, що нагрівається), а також знехтування реальними магнітними властивостями матеріалів плити та посуду (всі матеріали вважаються немагнітними). Це не дозволяє отримати уяву про реальні процеси, що мають місце в процесі експлуатації індукційної кухонної плити. Крім того, при використанні вказаної постановки не може йти й мови про наступний аналіз теплових процесів у конструкції, що розглядається.

Автори роботи [8] розв'язали аналогічну задачу з використанням більш сучасного формулювання, аналогічного запропонованому в [2], що дозволило з використанням метода скінчених елементів отримати детальний двовимірний розподіл амплітудних значень щільності вихрових струмів у запропонованій конструкції індукційної кухонної плити. Крім того, виконано розрахунок теплових втрат у плоскому індукторі плити, але не зроблено наступний крок – комп'ютерне моделювання теплового стану індуктора та посуду, що нагрівається.

Робота [9] присвячена розв'язанню задачі електромагнітної сумісності стосовно сучасного побутового обладнання, у тому числі побутових індукційних плит. Отже, виконується розрахунок електромагнітного поля у просторі, що оточує побутовий пристрій. При цьому використовується метод еквівалентного електромагнітного дипольного моменту. Таким чином, запропонована розрахункова методика не дозволяє отримати детальний розподіл електромагнітного та, тим більше, температурного поля в конструктивних елементах побутових плит та посуду, що нагрівається.

У статті [10] запропоновано використати метод скінчених елементів для розв'язання зв'язаних двовимірних задач розрахунку нестационарного електромагнітного поля у комплексній формі та стационарного теплового поля посуду, що нагрівається. Недоліками роботи [10] є:

- розв'язання саме стационарного рівняння теплопровідності, в той час як температура посуду в процесі нагрівання суттєво змінюється не лише у

© М. Г. Пантелят, А. В. Трофімов, 2015

просторі, а також у часі

- запропонована методика не використовується для розрахунку теплового стану конструктивних елементів індукційної кухонної плити (індуктора та магнітопроводу); наявність магнітопроводу в конструкції плити навіть не враховується

- автори роботи не враховують залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нехтують суттєво нелінійними магнітними властивостями феромагнітних матеріалів посуду та магнітопроводу

В роботі [11] метод скінчених елементів використовується для комп'ютерного моделювання розподілу тривимірного електромагнітного поля запропонованої конструкції індукційної кухонної плити, виконана експериментальна перевірка отриманих чисельних результатів. Теплове поле конструкції не досліджується.

У найбільш досконалій статті [12] метод скінчених елементів використано для комп'ютерного аналізу зв'язаних двовимірних електромагнітного та нестационарного теплового полів у запропонованій авторами конструкції індукційної кухонної плити. Враховано залежності теплофізичних властивостей матеріалів від температури. Отримано цікаві результати стосовно зміни температури посуду у просторі та часі. Недоліки роботи:

- не враховано залежності електрофізичних властивостей матеріалів від температури, а також суттєво нелінійні магнітні властивостями феромагнітних матеріалів

- не розглядається феромагнітний магнітопровід індукційної плити

Вибір напрямку досліджень. Для досягнення мети роботи доцільно розвинути методику, викладену в роботі [12], а саме застосувати метод скінчених елементів для комп'ютерного аналізу зв'язаних електромагнітного та нестационарного теплового полів у посуді, що нагрівається, а також в індукторі та магнітопроводі індукційної кухонної плити, враховуючи залежності електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури, а також нелінійні магнітні властивості (основні криві намагніченості) феромагнітних матеріалів. Математичне моделювання розподілу зв'язаних полів доцільно розпочати у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів).

Основні фізичні процеси в індукційних кухонних плитах та посуді, що нагрівається, та їх взаємний зв'язок. Основним вузлом індукційної кухонної плити є індуктор [1] – плоска одновиткова або багатовиткова котушка, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається. Конструкція індуктора індукційної плити представлена на рис. 1. Крім того, протікання вихрових струмів та обумовлена цим зміна теплового стану мають місце в самому індукторі, а також у феритовому магнітопроводі плити.



Рис. 1 – Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити

У роботах [13, 14] здійснено спробу комплексного аналізу та узагальнення мультифізичних процесів, що мають місце у різноманітному сучасному електротехнічному обладнанні (електричні машини, промислові індукційні нагрівачі, новітні конструкції актуаторів та ін.). Оскільки фізичні явища в промислових установках індукційного нагрівання та побутових індукційних плитах є тотожні, доцільно розповсюдити аналіз, виконаний у [13, 14], на процеси, що мають місце при нагріванні посуду на індукційній плиті. В процесі функціонування індукційної кухонної плити найбільшу роль відіграють загальновідомі явища, які визначають електромагнітний та тепловий стан посуду, індуктора та магнітопроводу. Розглянемо вказані процеси та явища більш детально.

При протіканні по індуктору змінного струму частотою 20-100 кГц створюється електромагнітне поле, яке індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається, а також у магнітопроводі та самому індукторі. У відповідності до закону Джоуля [3, 10, 12], виникають внутрішні джерела тепла (теплові втрати), що призводять до зміни у просторі та у часі теплового стану посуду та зазначених конструктивних елементів плити. У свою чергу, зміна розподілу теплового поля впливає «зворотним чином» на електромагнітні процеси в плиті, оскільки електрофізичні властивості матеріалів (питома електрична провідність та, в загальному випадку, магнітна проникність) залежать від температури [13, 14]. Відразу зазначимо, що температура нагріву посуду та конструктивних елементів плити є значно нижчою точки Кюрі (орієнтовно 760 °С для конструкційних сталей) відповідних матеріалів, отже температурна залежність магнітної проникності майже відсутня і може не враховуватись. Окрім того, теплофізичні властивості матеріалів (теплопровідність, теплоємність та щільність) посуду та плити теж залежать від температури [3, 12-14]. Звісно, магнітні властивості (магнітна проникність) феромагнітних матеріалів залежить від напруженості магнітного поля [2, 15, 16].

Таким чином, методика мультифізичного чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромаг-

нітного та теплового полів індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається, має враховувати наступні взаємозв'язані фізичні процеси та явища:

1) Наведення змінним струмом індуктора вихрових струмів в посуді, що нагрівається, а також у магнітопроводі та самому індукторі.

2) Виникнення внутрішніх джерел тепла (теплових втрат), що призводять до зміни у просторі та у часі теплового стану посуду та зазначених конструктивних елементів плити.

3) Залежність електрофізичних та теплофізичних властивостей матеріалів від температури.

4) Залежність магнітних властивостей феромагнітних матеріалів від напруженості магнітного поля.

На наступному етапі досліджень доцільно буде розглянути зміну напружено-деформівного стану посуду та конструктивних елементів плити під впливом градієнтів температури, а також сил електромагнітного походження [13, 14].

Методика мультифізичного чисельного аналізу процесів в індукційній кухонній плиті та посуді, що нагрівається. Розглянемо послідовно методику комп'ютерного моделювання мультифізичних (зв'язаних) електромагнітних та теплових процесів в індукційних кухонних плитах та посуді, що нагрівається. При цьому, розподіл електромагнітного та теплового поля індукційної кухонної плити визначається [2, 3] стосовно її індукторної системи, що складається з наступних електропровідних та неелектропровідних елементів (рис. 2): індуктор; посуд, що нагрівається; магнітопровід; діелектрик (повітря).

1) Розрахунок розпочинається з чисельного аналізу методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля в індукторній системі, зображений на рис. 2. При цьому розв'язується диференційне рівняння у часткових похідних у комплексній формі з відповідними граничними умовами [2]:

$$j\omega\gamma\dot{A} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \dot{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial \dot{A}}{\partial y} \right) + \dot{J}_0, \quad (1)$$

- де A – векторний магнітний потенціал;
 γ – питома електрична провідність матеріалу;
 μ – магнітна проникність матеріалу;
 j – уявна одиниця;
 $\omega = 2\pi f$ – кругова частота;
 f – частота струму в індукторі індукційної плити;
 J_0 – щільність струму в індукторі плити.

Величина магнітної проникності матеріалу індуктора (див. рис. 2), який, як правило, виготовляється з міді (іноді з інших немагнітних матеріалів), дорівнює магнітній проникності вакууму: $\mu = \mu_0$. Величина магнітної проникності феромагнітних матеріалів, з яких виготовляють посуд та магнітопровід, суттєво нелінійно залежить від напруженості магнітного поля H [2, 15, 16]. Оскільки посуд, що нагрівається, а також магнітопровід, що застосовуються в індукційних плитах, виготовляються з магнітом'яких матеріалів, явище магнітного

гістерезису при виконанні розрахунків не враховуємо. Для кожного феромагнітного матеріалу у вихідних даних потрібно задати нелінійну основну криву намагнічування $B(H)$ або безпосередньо залежність магнітної проникності від напруженості магнітного поля $\mu(H)$. Використовуються сучасні ефективні ітераційні алгоритми розв'язання нелінійних задач з урахуванням залежності магнітної проникності від напруженості магнітного поля $\mu(H)$, наведені та детально проаналізовані в [15, 16]. Для виконання попередніх «оціночних» розрахунків можливо розв'язання лінійної задачі з постійним (осередненим за кривою намагнічування) значенням магнітної проникності $\mu = \mu_a = \text{const}$ для кожного магнітом'якого матеріалу. Залежність магнітної проникності матеріалів від температури не враховується. Величини питомої електричної проникності матеріалів на початку процесу розрахунків задаються при початковій температурі (як правило, 20 °C).

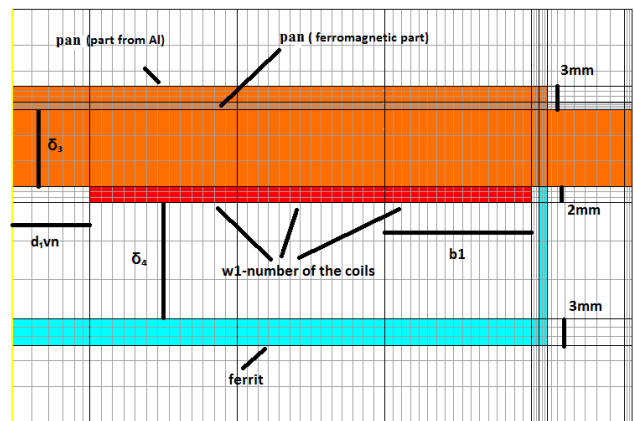


Рис. 2 – Приклад розрахункової моделі індукторної системи плити (програмний комплекс EleFAnT2D [17], Інститут основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія)

2) Результати, отримані стосовно розподілу векторного магнітного потенціалу, дозволяють розрахувати просторовий розподіл модуля щільності вихрового струму в посуді, що нагрівається, а також в індукторі та магнітопроводі [2]:

$$\dot{J}_e = -j\omega\gamma\dot{A}. \quad (2)$$

З використанням обчисленого розподілу модуля щільності вихрового струму розраховується щільність теплових втрат (потужність внутрішніх джерел тепла) в посуді, що нагрівається, та в магнітопроводі [2, 3]

$$Q = \frac{|j_e|^2}{\gamma}, \quad (3)$$

отриманий просторовий розподіл якої в подальшому використовується в якості вихідної інформації для комп'ютерного аналізу теплового стану посуду та магнітопроводу в процесі роботи індукційної плити.

3) Виконується комп'ютерне моделювання методом скінчених елементів розподілу у просторі та у часі теплового поля посуду, що нагрівається, а також індуктора та магнітопроводу індукційної кухонної плити. При цьому розв'язується нестационарне

рівняння теплопровідності у часткових похідних [3]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q, \quad (4)$$

де T – температура, що змінюється у просторі та у часі;

λ – теплопровідність матеріалу;

ρ – щільність матеріалу;

c_p – теплоємність матеріалу;

Q – потужність внутрішніх джерел тепла. У загальному випадку, величини λ , ρ та c_p (теплофізичні властивості матеріалів) залежать від температури.

Рівняння (4) розв'язується з відповідними граничними умовами [3], що описують в першу чергу конвективний теплообмін електропровідних поверхонь з навколишнім середовищем:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_\infty), \quad (5)$$

де λ – теплопровідність матеріалу відповідної електропровідної поверхні;

n – зовнішня нормаль до поверхні, що розглядається;

α – коефіцієнт теплообміну з зовнішнім середовищем, що суттєво залежить від виду та швидкості охолоджувача [3];

T_∞ – температура зовнішнього середовища (охолоджувача). Величини α та T_∞ задаються у вихідних даних окремо для кожної з границь, що беруться до уваги в процесі виконання розрахунків.

Для чисельного розв'язання рівняння (4) потрібно задати у вихідних даних наступні теплофізичні властивості матеріалів посуду, магнітопроводу та індуктора (див. рис. 2) та їх залежності від температури: λ – теплопровідність матеріалу; ρ – щільність матеріалу; c_p – теплоємність матеріалу. При розв'язанні рівняння (4) в якості правої частини задається розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) $Q(x, y, t)$ у електропровідних елементах конструкції (3), отриманий за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів. Комп'ютерне моделювання теплового стану виконується [3] у рамках єдиної обчислювальної процедури лише стосовно окремо кожного з електропровідних конструктивних елементів, а саме посуду та магнітопроводу, виключаючи з розгляду суттєві за об'ємом діелектричні підобласті.

4) Після чисельного розв'язання рівняння теплопровідності (4), тобто після отримання просторового розподілу теплового поля електропровідних елементів конструкції (посуду, індуктора та магнітопроводу), розраховуються нові значення їх питомої електричної проникності матеріалів з використанням відповідних залежностей від температури [2], що повинні бути задані у вихідних даних.

5) З використанням отриманих «нових» величин питомої електричної проникності матеріалів виконується повторне розв'язання рівняння (1), тобто

розрахунок розподілу електромагнітного поля, що відповідає отриманому тепловому полю конструкції.

6) «Циклічний» розрахунок за пунктами 1) – 5) повторюється до досягнення збіжності ітераційного процесу.

Зв'язані двовимірні задачі комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного та теплового поля посуду та конструкційних елементів побутових індукційних плит доцільно розв'язувати добре розвинутим методом скінчених елементів [2, 3]. Структура вихідних даних та результатів обчислень детально описана в [2, 3]. При виконанні комп'ютерного моделювання потрібно організувати автоматичну передачу розподілу щільності теплових втрат (3) з програмного забезпечення, призначеного для розрахунку електромагнітних процесів, до процедур скінченоелементного аналізу розподілу температурного поля. При цьому, величини щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) задаються у вузлах скінченоелементної сітки, яка повинна бути узгоджена для обох задач (моделювання електромагнітних та теплових процесів), що розв'язуються спільно. Необхідно також здійснити автоматичну «зворотну» передачу отриманого розподілу температури до програмного забезпечення, призначеного для скінченоелементного аналізу розподілу електромагнітного поля, з метою розв'язання зв'язаних задач з урахуванням залежностей електрофізичних властивостей матеріалів від температури.

Висновки. У роботі запропоновано методика мультифізичного чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромагнітного та теплового полів індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається, у двовимірній постановці методом скінчених елементів. Враховуються залежності від температури електрофізичних і теплофізичних властивостей матеріалів конструкцій, що розглядаються, а також магнітні властивості магнітом'яких матеріалів. Отримані результати розрахунків будуть проаналізовані в наступних роботах.

Список літератури: 1. Пантелят М.Г., Гуренцов Ю.В., Трофімов А.В. Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 20 (1063). – С. 13-24. 2. Пантелят М.Г., Гуренцов Ю.В. Методика комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24. 3. Пантелят М.Г., Трофімов А.В. Методика скінчено елементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44. 4. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R. Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation // Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). – 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. – 2011. – P. 1753-1758. 5. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers // Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). – 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. – 2011. – P. 2533-2538. 6. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M. Computational

modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2013. – v. 60, No. 8. – P. 3092-3105. **7. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G.** Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design // Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. – 18-21 October 2006, Busan, Korea. – 2006. – P. 4624-4627. **8. Hediehloo M., Akhbari M.** New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis // Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. – 2009. – P. 1100-1105. **9. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T.** Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – v. 46, No. 1. – P. 115-120. **10. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-SuceRoh, Song-yop Hahn.** Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances // IEEE Transactions on Magnetics. – 2000. – v. 36, No. 4. – P. 1390-1393. **11. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W.** Heating performance improvement and field study of the induction cooker // Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). – 20-22 May 2009, Hong Kong. – 2009. – P. 313-317. **12. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K.** Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern // Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). – 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. – 2012. – P. 1-5. **13. Pantelyat M.G.** Multiphysics in electromagnetic devices simulation and design: an attempt of generalization // Acta Technica. – 2012. – v. 57, No. 2. – P. 127-142. **14. Pantelyat M.G.** Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – № 3. – С. 29-35. **15. БірО., Preis K., Richter K.R.** Various FEM formulations for the calculation of transient 3d eddy currents in nonlinear media // IEEE Transactions on Magnetics. – 1995, v. 31, No. 3. – P. 1307-1312. **16. Pantelyat M.G.** Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1999, v. 10. – P. 185 – 192. **17.** <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.

Bibliography (transliterated): **1. Pantelyat M.G., Gurencov Yu.V., Trofimov A.V.** Metodyka rozrakhunku induktoriv indukciynih kuhonnyh plyt. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2014. No 20 (1063). 13-24. Print. **2. Pantelyat M.G., Gurencov Yu.V.** Metodyka kompyuternogo modelyuvannya metodom skinchenykh elementiv rozpodilu elektromagnitnogo polya indukciynoi kuxonnoyi plyty. Visnyk NTU "XPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2014. No 41 (1084). 16-24. Print. **3. Pantelyat M.G., Trofimov A.V.** Metodyka skinchenoelementnoho analizu teplovoho stanu induktsiinoi kuxonnoi plyty ta posudu, shcho nahrivaetsia. Visnyk NTU "KhPI". Seriya: Problemy udoskonalennya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriya i

praktyka. Kharkov: NTU "KhPI", 2015. No 13 (1122). 36-44. Print. **4. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M., Alonso R.** Passive network equivalent of an induction system for domestic cookers application based on FEA tool simulation. Proceedings of the 26th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 6-11 March 2011, Fort Worth, Texas, USA. 2011. 1753-1758. Print. **5. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.** FEA tool based model of partly coupled coils used in domestic induction cookers. Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). 7-10 November 2011, Melbourne, Victoria, Australia. 2011. 2533-2538. Print. **6. Carretero C., Lucia O., Acero J., Bordio J.M.** Computational modeling of two partly coupled coils supplied by a double half-bridge resonant inverter for induction heating appliances. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2013. Vol. 60, No. 8. 3092-3105. Print. **7. Hosseini S.H., Kashtiban A.M., Alizadeh G.** Particle swarm optimization and finite-element based approach for induction heating cooker design. Proceedings of the SICE-ICASE International Joint Conference. 18-21 October 2006, Busan, Korea. 2006. 4624-4627. Print. **8. Hediehloo M., Akhbari M.** New approach in design of planar coil of induction cooker based on skin and proximity effect analysis. Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). 10-13 February 2009, Churchill, Victoria, Australia. 2009. 1100-1105. Print. **9. Yamazaki K., Kawamoto T., Fujinami H., Shigemitsu T.** Equivalent dipole moment method to characterize magnetic field generated by electric appliances: extension to intermediate frequencies of up to 100 kHz. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2004. Vol. 46, No. 1. 115-120. Print. **10. Jin-Kyu Byun, Kyung Choi, Hee-SuceRoh, Song-yop Hahn.** Optimal design procedure for a practical induction heating cooker appliances. IEEE Transactions on Magnetics. 2000. Vol. 36, No. 4. 1390-1393. Print. **11. Meng L.C., Cheng K.W.E., Chan K.W.** Heating performance improvement and field study of the induction cooker. Proceedings of the 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA). 20-22 May 2009, Hong Kong. 2009. 313-317. Print. **12. Meng L.C., Cheng K.W.E., Luk P.C.K.** Field analysis of an induction cooker with square 9-coil system by applying diverse exciting pattern. Proceedings of the 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). 27-29 March 2012, Bristol, United Kingdom. 2012. 1-5. Print. **13. Pantelyat M.G.** Multiphysics in electromagnetic devices simulation and design: an attempt of generalization. Acta Technica. 2012. Vol. 57. No. 2. 127-142. Print. **14. Pantelyat M.G.** Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization. Elektrotehnika i elektromekhanika. 2013. No 3. 29-35. Print. **15. БірО., Preis K., Richter K.R.** Various FEM formulations for the calculation of transient 3d eddy currents in nonlinear media. IEEE Transactions on Magnetics. 1995. Vol. 31, No 3. 1307-1312. Print. **16. Pantelyat M.G.** Numerical analysis of impulse electromagnetic fields in soft ferromagnetic materials. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 1999, Vol. 10. 185-192. Print. **17.** <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.

Надійшло (received) 16.09.2015



Пантелейт Михайло Гаррійович – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач кафедри «Електричні апарати», м. Харків, тел.: (057) 707-68-64; e-mail: m150462@yahoo.com.

Pantelyat Michael Harriyovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Lecturer at the Department of Electrical Apparatus, Kharkov, tel.: (057) 707-68-64; e-mail: m150462@yahoo.com.



Трофімов Андрій Володимирович – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», магістрант, м. Харків

Trofimov Andrey Vladimirovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student, Kharkov