

УДК 621.3

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.К. СЛОЄВ

СКІНЧЕНОЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПОСУДУ, ЩО НАГРІВАЄТЬСЯ НА ІНДУКЦІЙНІЙ КУХОННІЙ ПЛИТІ

З використанням пакета програм EleFAnT2D, розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія, виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів в побутових індукційних плитах і посуді, що нагрівається. Розрахунок нестационарного температурного поля виконується у двовимірній постановці методом скінчених елементів з урахуванням процесу конвективного теплообміну з оточуючим середовищем.

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

С использованием пакета программ EleFAnT2D, разработанного в Институте основ и теории электротехники Технического университета г. Грац, Австрия, выполнено компьютерное моделирование тепловых процессов в бытовых индукционных плитах и нагреваемой посуде. Расчет нестационарного температурного поля выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов с учетом процесса конвективного теплообмена с окружающей средой.

Ключевые слова: индукционная кухонная плита, тепловое поле, компьютерное моделирование, метод конечных элементов.

Using EleFAnT2D code developed at the Institute for Fundamentals and Theory in Electrical Engineering, Graz University of Technology, Graz, Austria computer modeling of thermal processes in induction cookers and heated dishes is carried out. Transient temperature field calculation is carried out in 2D formulation by the Finite Element Method taking into account convective heat transfer with the environment.

Index terms: induction cooker, thermal field, computer simulation, the Finite Element Method

Вступ. В роботі [1] розроблено методику комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів розподілу у просторі та часі теплового поля індукційних кухонних плит і посуду, що нагрівається. Розрахунки доцільно виконувати з використанням програмних продуктів, що призначені для моделювання нестационарних теплових полів у двовимірній постановці. Чисельні дослідження теплових процесів в індукційних кухонних плитах і посуді розпочато під час переддипломної практики студентів кафедри «Електричні апарати» Електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ" в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія з використанням пакета програм EleFAnT2D [2], розробленого у зазначеному Інституті. Виконання розрахунків продовжується на кафедрі «Електричні апарати» Національного технічного університету «ХПІ» за допомогою вказаного програмного забезпечення, люб'язно наданого розробниками. В даній роботі описано та проаналізовано отримані попередні результати комп'ютерного моделювання, що демонструють область використання розробленої методики.

Мета роботи – апробація розробленої методики комп'ютерного моделювання методом скінчених елементів теплових процесів в індукційних кухонних плитах, попередній аналіз отриманих чисельних результатів.

Математична модель теплових процесів в індукційних плитах і посуді детально описана в [1]. Чисельний аналіз розподілу теплового поля індукційної кухонної плити виконується у двовимірній постановці (значно більш складна тривимірна постановка та відповідне програмне забезпечення можуть бути використані пізніше для уточнення отриманих результатів) у декартовій системі координат. Рівняння, що підлягає розв'язанню, записується наступним чином [1]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q, \quad (1)$$

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. Розподіл у просторі та у часі щільності теплових втрат (потужності внутрішніх джерел тепла) $Q(x,y,t)$ у електропровідних елементах конструкції вважається відомим за результатами розрахунку розподілу електромагнітного поля та щільності вихрових струмів $J_e(x,y,t)$ [3]:

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

де γ – питома електрична провідність матеріалу.

Нестационарне рівняння у часткових похідних (1) розв'язується за наступними початковими умовами [1]:

$$T(x,y,0) = T_0, \quad (3)$$

де T_0 – початкове значення температури (при дослідженні нагріву посуду на індукційній кухонній плиті – кімнатна температура 20°C , постійна по всьому перетину конструктивних елементів, що розглядаються).

Розподіл електромагнітного поля індукційної кухонної плити визначається [3, 4] стосовно її індукторної системи, що складається з наступних електропровідних та неелектропровідних елементів (рис. 1): тривитковий мідний індуктор; посуд, що нагрівається (алюмінієва сковорода з феромагнітним шаром); магнітопровід; діелектрик (повітря) Комп'ютерне моделювання теплового стану доцільно виконувати [1] 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. Це дозволяє суттєво зменшити обчислювальні витрати, необхідні для комп'ютерного розв'язання задачі. Як і при розрахунках електромаг-

нітних процесів, доцільно врахувати умови геометричної симетрії конструкції, а також симетричного розподілу теплового поля в ній: віссю симетрії є вертикальна вісь ординат Oy (див. рис. 1), отже розрахунок виконується лише для половини кожного з конструктивних елементів, що розглядаються. Це теж дозволяє значно заощадити потрібні обчислювальні ресурси.

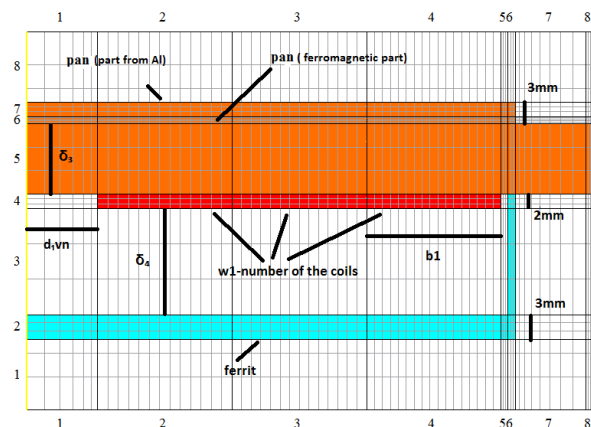


Рис. 1 – Розрахункова модель індукторної системи побутової індукційної плити

В даній роботі досліджувалось теплове поле саме посуду, що нагрівається. При цьому, рівняння (1) розв'язувалось з наступними граничними умовами:

• на вертикальній вісі ординат Oy : так звані природні граничні умови симетрії [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad (4)$$

де n – зовнішня нормаль до вісі ординат Oy , отже умови (4) приймають вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0. \quad (5)$$

• на усіх інших границях посуду: граничні умови третього роду [1], що описують конвективний теплообмін електропровідної поверхні з оточуючим простором:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_{\infty}), \quad (6)$$

де λ – теплопровідність матеріалу відповідної електропровідної поверхні;

n – зовнішня нормаль до поверхні, що розглядається;

α – коефіцієнт теплообміну з зовнішнім середовищем (у вихідних даних задавалось $\alpha = 20 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$ – природній конвективний теплообмін із нерухомим повітрям навколо посуду);

T_{∞} – температура зовнішнього середовища (приймалась рівною 20°C для нерухомого повітря).

У зв'язку з відносно невеликою температурою посуду, що нагрівається (не вище 280°C), залежності теплофізичних властивостей матеріалів λ , ρ та c_p не враховувались.

Результати розрахунків і їх попередній аналіз.

Розрахунки виконувались за допомогою програмного комплексу EleFAnT2D [2], розробленого в Інституті основ та теорії електротехніки Технічного університету м. Грац, Австрія. Отримані чисельні результати проілюструємо на прикладі сталого у часі розподілу

температури сковороди (рис. 2), що нагрівається на індукційній плиті з параметрами (див. рис. 1) $w_1=3$, $d_{1vn}=2$ мм, $b_1=16$ мм, $\delta_3=2$ мм, $\delta_4=2$ мм. Частота струму в індукторі – 20 кГц.

Як свідчить рис. 2, просторовий розподіл температури у перетині сковороди, що нагрівається, носить достатньо рівномірний характер, що свідчить про вдалий вибір режиму роботи індукційної кухонної плити. Подальші висновки щодо впливу частоти струму в індукторі та геометричних параметрів індукторної системи на процес нагріву посуду можуть бути зроблені за результатами багатоваріантних розрахунків розподілу електромагнітного та теплового полів.

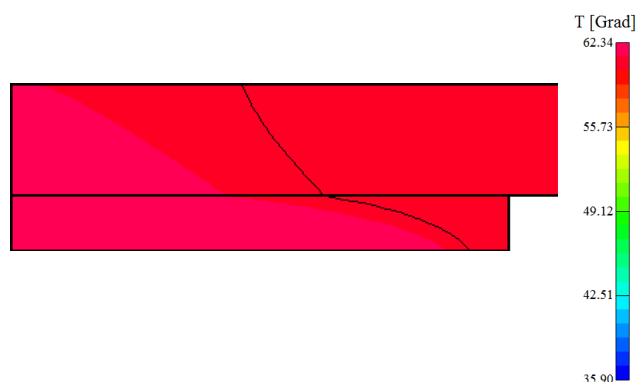


Рис. 2 – Просторовий розподіл температури нагрітого посуду

Висновки. З використанням розробленої раніше методики виконано комп'ютерне моделювання теплових процесів у посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті. Детальний аналіз отриманих чисельних результатів буде виконаний у наступних роботах.

Список літератури

1. Пантелет М.Г., Трофімов А.В. Методика скінченоелементного аналізу теплового стану індукційної кухонної плити та посуду, що нагрівається // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2015. – № 13 (1122). – С. 36-44.
2. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
3. Пантелет 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. – Х.: НТУ "ХПІ", 2014. – № 41 (1084). – С. 16-24.
4. Пантелет М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоелементний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х.: НТУ "ХПІ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36.

References (transliterated)

1. Pantelet M.G., Trofimov A.V. Finite Element Analysis of the Heat Condition of an Induction Cooker and Heated Cookware. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2015. – No 13 (1122). – С. 36-44.
2. <http://www.igte.tugraz.at/de/elefant/elefant.html>.
3. Pantelet M.G., Gurentsov Yu.V. Method of computer simulation by the finite element distribution of the electromotor field of an induction cooker. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2014. – No 41 (1084). – С. 16-24.
4. Pantelet M.G., Gurentsov Yu.V. Finite element analysis of the distribution of the electromagnetic field of the induction cooker. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «HP», 2016. – No 32 (1204). – С. 32-36.

Надійшла до редколегії 02.10.17

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Скінченоелементний аналіз розподілу температурного поля посуду, що нагрівається на індукційній кухонній плиті / М.Г. Пантелят, А.К. Єлоєв // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26–28. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.

Конечноэлементный анализ распределения температурного поля посуды, нагреваемой на индукционной кухонной плите / М.Г. Пантелят, А.К. Елоев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. – Х. : НТУ "ХПІ", 2017. – № 34 (1256). – С. 26–28. – Библиогр.: 16 назв. – ISSN 2079-3944.

FE analysis of the temperature field distribution of dishes heated on the induction cooker / M.G. Pantelyat, A.K. Yeloyev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2017. – No. 34 (1256). – P. 26–28. – Bibliography: 16. – ISSN 2079-3944.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Пантелят Михайло Гаррійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", м. Харків; e-mail: m150462@yahoo.com.

Пантелят Михаил Гарриевич – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электрические аппараты, Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", м. Харьков; e-mail: m150462@yahoo.com.

Pantelyat Michael Garrievich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, PhD in electrical equipment, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; e-mail: m150462@yahoo.com.

Єлоєв Алан Казбекович – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"; м. Харків.

Елоев Алан Казбекович – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", г. Харьков.

Yeloyev Alan Kazbekovich – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov.