

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, канд. фіз.-мат. наук, ст. викладач, НТУ "ХПІ"

Ю.В. ГУРЕНЦОВ, студент, НТУ "ХПІ"

А.В. ТРОФІМОВ, студент, НТУ "ХПІ"

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ІНДУКТОРІВ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ

В статті запропонована методика розрахунку індуктора – основного конструктивного елемента індукційної кухонної плити. Представлена в роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів промислових індукційних нагрівачів з урахуванням особливостей та режимів роботи індукційних кухонних плит. Виконано розрахунки індукторів стосовно до ряду режимів нагрівання посуду різних геометричних розмірів. Проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: індукційна кухонна плита, індуктор, розрахунок.

Вступ. Індукційні плити являють собою відносно новий клас сучасної електропобутової техніки – кухонні електричні плити, які розігрівають металевий посуд вихровими струмами, які створюються електромагнітним полем частотою 20-100 кГц [1-4]. Останнім часом такі плити отримують все більш широке використання. Конструкції сучасних індукційних плит різних виробників наведені на рис. 1. Представляє значний інтерес дослідження електромагнітних і теплових процесів, що протікають в індукційних плитах в процесі їх експлуатації, а також розробка методик розрахунку і проектування їх конструктивних елементів. Розроблена методика та отримані результати мають бути розраховані на використання в практиці конструювання побутових індукційних плит, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з відповідного напрямку.



Рис. 1 – Сучасні індукційні кухонні плити:
а – одноконфорочная; б – двухконфорочная.

Основним вузлом індукційної кухонної плити є індуктор – пласка одновиткова або багатовиткова котушка, при протіканні по якій

© М.Г. Пантелят, Ю.В. Гуренцов, А.В. Трофімов, 2014

змінного струму створюється електромагнітне поле, яке індуктує в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається.

Конструкція індуктора індукційної плити представлена на рис. 2.

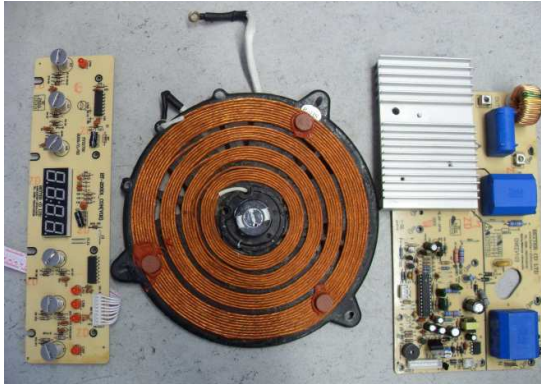


Рис. 2 – Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити.

Мета роботи – розробка інженерної методики розрахунку індукторів індукційних кухонних плит.

Методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит. Представлена в даній роботі методика розроблена на основі інженерних методів розрахунку плоских індукторів промислових індукційних нагрівачів [5] з урахуванням конструктивних особливостей та режимів роботи індукційних кухонних плит.

Вихідні дані для виконання розрахунків:

- геометрія (діаметр днища, товщина стінки) посуду, що нагрівається (сковорода, каструлі);
- електрофізичні властивості матеріалу посуду (питомий електричний опір, магнітні властивості) та їх залежність від температури;
- частота електромагнітного поля і напруга на індукторі;
- потужність, що виділяється в посуді, і температура нагріву;

Порядок розрахунку:

- вибір основних конструктивних рішень індуктора (зовнішній і внутрішній діаметри індуктора, зазор між індуктором і посудом, товщина індуктора);
- розрахунок електричних та енергетичних величин (питома поверхнева потужність в посуді, напруженість магнітного поля на поверхні індуктора і посуду, коефіцієнт зв'язку, активна і реактивна потуж-

ність в індукторі та в зазорі, повна потужність системи "індуктор – посуд", електричний ККД, коефіцієнт потужності, сила струму в індукторі, коефіцієнт заповнення та i_n ;

- визначення числа витків індуктора, розрахунок ширини витка та вибір індукуючого дроту;

Ескіз системи "індуктор-посуд, що нагрівається" наведений на рис. 3.

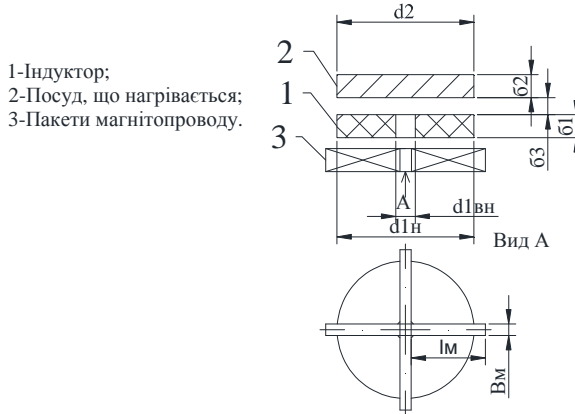


Рис. 3 – Ескіз системи "індуктор – посуд, що нагрівається".

Розглянемо основні етапи розрахунку.

1) Вибираються геометричні розміри індуктора (рис. 3). Зовнішній діаметр індуктора $d_{1н}$ приймається рівним діаметру поверхні, що нагрівається, тобто діаметру днища посуду d_2 :

$$d_{1н} \approx d_2. \quad (1)$$

Внутрішній діаметр індуктора $d_{1вн}$ вибирається за співвідношенням

$$d_{1вн} \approx (2-4)\delta_3. \quad (2)$$

При цьому, як і при проектуванні індукторів промислових пристроїв індукційного нагріву, зазор δ_3 приймається мінімальним, виходячи з наявності теплової та електричної ізоляції та з урахуванням технологічних вимог. Товщина індуктора δ_1 вибирається з умови мінімізації втрат

$$\delta_1 \geq 1,3\Delta_1, \quad (3)$$

де Δ_1 – глибина проникнення електромагнітного поля (товщина скін-слою) в матеріал індуктора, що розраховується за відомою формулою [5],

$$\Delta_1 = \sqrt{\frac{2\rho_1}{\omega\mu}}, \quad (4)$$

де ρ_1 – питомий електричний опір матеріалу індуктора; μ – магнітна проникність матеріалу (для немагнітного матеріалу – індуктор, як правило, виконується з міді – $\mu = \mu_0$ – магнітна проникність вакуума); $\omega = 2\pi f$; f – частота електромагнітних коливань.

2) Розраховуються основні електричні та енергетичні параметри індуктора та системи "індуктор – посуд, що нагрівається". Питома поверхнева потужність в посуді p_{02} визначається за формулою:

$$p_{02} = \frac{4P_2}{\pi(d_{1H}^2 - d_{1BH}^2)}, \quad (5)$$

де P_2 – задана потужність, що виділяється в посуді.

Напруженість магнітного поля H_{02} на поверхні посуду, що нагрівається, розраховується за формулою [5]

$$H_{02} = \sqrt{\frac{p_{02} \cdot 10^6}{\rho_2 \mu f F_\Phi}}, \quad (6)$$

де ρ_2 – питомий електричний опір сталі посуду при заданій максимальній температурі її нагрівання t_2 ; μ_p – розрахункове значення відносної магнітної проникності при зазначеній температурі, що визначається за формулами та графіками, що наведені в [5]; F_Φ – поправочний коефіцієнт, значення якого визначається за графіками, наведеними в [5].

Потім визначається коефіцієнт зв'язку $k_{св}$, який фактично представляє собою коефіцієнт трансформації в припущенні, що індуктор і нагрівальний посуд є обмотками повітряного трансформатора [5]. Розрахунок коефіцієнта зв'язку виконується з використанням відповідного виразу, наведеного в [5].

Напруженість магнітного поля на поверхні індуктора H_{01} визначається за виразом

$$H_{01} = \frac{H_{02}}{k_{св}}. \quad (7)$$

Далі розраховується активна потужність в індукторі P_1 :

$$P_1 = \pi \cdot 10^{-6} \cdot H_{01}^2 \frac{d_{1H}^2 - d_{1BH}^2}{4} \sqrt{\rho_1 f F_{пл1}} \frac{1}{k_{зап}}, \quad (8)$$

де $k_{зап}$ – коефіцієнт заповнення індуктора, що враховує наявність міжвиткової ізоляції, який вибирається попередньо (зазвичай

$k_{\text{зап}} = 0,85-0,95$ [5]); $F_{\text{пл1}}$ – поправочний коефіцієнт, значення якого визначається за графіками, наведеними в [5].

Реактивні потужності в індукторі P_{Q1} , в посуді P_{Q2} та в зазорі P_{Q3} визначаються за формулами [5]:

$$P_{Q1} = P_1 \frac{G_1}{F_1}; \quad (9)$$

$$P_{Q2} = 0,6P_2 \frac{G_{\Phi}}{F_{\Phi}}, \quad (10)$$

де G_1 , G_{Φ} , F_1 , F_{Φ} – поправочні коефіцієнти, значення яких визначаються за графіками, наведеними в [5];

$$P_{Q3} = \pi \cdot 10^{-9} H_{01}^2 f \delta_3 d_{1H}^2. \quad (11)$$

Потім визначаються активна P_{Σ} та реактивна потужності $P_{Q\Sigma}$ системи "індуктор – посуд, що нагрівається" як суми відповідних потужностей, а також повна потужність системи $P_{S\Sigma}$:

$$P_{S\Sigma} = \sqrt{P_{\Sigma}^2 + P_{Q\Sigma}^2}. \quad (12)$$

Далі виконується розрахунок електричного ККД η_{Σ} та коефіцієнта потужності $\cos \varphi$:

$$\eta_{\Sigma} = \frac{P_2}{P_{\Sigma}}; \quad (13)$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{\Sigma}}{P_{S\Sigma}}. \quad (14)$$

Розрахунок сили струму в індукторі I_1 виконується за формулою:

$$I_1 = \frac{P_{S\Sigma} \cdot 10^3}{U_1}, \quad (15)$$

де U_1 – задана напруга на індукторі.

3) Виконується визначення числа витків індуктора, розрахунок ширини витка і вибір індукуючого дроту. Число витків індуктора w_1 розраховується за формулою [5]

$$w_1 = \frac{H_{01} \cdot 0,5(d_{1H} - d_{1BH})}{\sqrt{2}I_1}, \quad (16)$$

а ширина витка з ізоляцією b_1 визначається наступним чином:

$$b_1 = \frac{d_{1H} - d_{1BH}}{2w_1}. \quad (17)$$

Питання вибору індукуючого дроту буде розглянуто в наступній статті.

У промислових пристроях індукційного нагріву застосовуються магнітопроводи з електротехнічної сталі різних марок [5]. У кухонних індукційних плитах, на відміну від промислових пристроїв індукційного нагріву, магнітопроводи виконуються з феритів [2, 6], що дозволяє істотно зменшити масу конструкції і при цьому забезпечити високий електричний ККД плити. Методика розрахунку і проектування феритових магнітопроводів індукційних плит (розрахунок магнітного потоку, вибір матеріалу магнітопроводу, розрахунок геометрії і маси магнітопроводу, розрахунок активної та реактивної потужності в магнітопроводі) також буде розглянута в наступних роботах.

Вихідні дані для виконання розрахунків. У роботі виконано розрахунки індукторів індукційних кухонних плит для двох варіантів вихідних даних, наведених у табл. 1. Передбачається, що посуд, що нагрівається, являє собою сковороду, виготовлену зі Сталі 45 [5].

Таблиця 1 – Вихідні дані для виконання розрахунків

Номер варіанту	1	2
Діаметр днища посуду d_2 , м	0,12	0,24
Товщина стінки посуду δ_2 , м	0,003	0,004
Питомий електричний опір сталі посуду при 20 °С ρ , Ом·м	$18,9 \cdot 10^{-8}$	$18,9 \cdot 10^{-8}$
Температура нагріву посуду t_2 , °С	100	280
Питомий електричний опір сталі посуду при заданій температурі нагріву посуду ρ_2 , Ом·м	$23,8 \cdot 10^{-8}$	$38,16 \cdot 10^{-8}$
Частота електромагнітного поля f , кГц	100	20
Напруга на індукторі U_1 , В	220	220
Потужність, яка виділяється в посуді P_2 , кВт	2,0	3,3

Розрахунки виконані стосовно до сковорідок великого і малого діаметра (24 см і 12 см, відповідно) для мінімальної (20 кГц) і максимальної (100 кГц) частот електромагнітного поля, що використовується в сучасних індукційних кухонних плитах [1]. Відповідно до технічних характеристик індукційних плит [1], варіюється також потужність, що виділяється в посуді (2,0 кВт і 3,3 кВт), а також температура нагріву посуду (100 °С і 280 °С). Таким чином, в роботі виконано розрахунок двох індукторів (великого і малого діаметру для нагріву відповідного посуду) для застосування або у відповідних од-

ноконфорочних індукційних плитах, або в одній двоконфорочній плиті з конфорками різного діаметру.

Результати розрахунків та їх аналіз. Результати розрахунку індукторів для обох варіантів вихідних даних за формулами (1)-(17) представлені в табл. 2. Проаналізуємо коротко отримані результати.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

Номер варіанту	1	2
Зовнішній діаметр індуктора $d_{1н}$, м	0,12	0,24
Внутрішній діаметр індуктора $d_{1вн}$, м	0,04	0,04
Зазор між індуктором та посудом δ_3 , м	0,01	0,01
Товщина індуктора δ_1 , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Питома поверхнева потужність в посуді p_{02} , кВт/м ²	199	75,1
Напруженість магнітного поля на поверхні посуду H_{02} , А/м	$1,55 \cdot 10^4$	$0,99 \cdot 10^4$
Коефіцієнт зв'язку $k_{св}$	0,235	0,253
Активна потужність в індукторі P_1 , кВт	2,058	1,49
Реактивна потужність в індукторі P_{Q1} , кВАр	2,058	1,49
Реактивна потужність в посуді P_{Q2} , кВАр	1,2	1,98
Реактивна потужність в зазорі P_{Q3} , кВАр	196,8	55,301
Активна потужність системи "індуктор-посуд" P_{Σ} , кВт	4,058	4,79
Реактивна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{Q\Sigma}$, кВАр	200	58,771
Повна потужність системи "індуктор-посуд" $P_{S\Sigma}$, кВА	200,04	58,96
Електричний ККД η_3	0,493	0,688
Коефіцієнт потужності $\cos\varphi$	0,02	0,08
Струм індуктора I_1 , А	909,27	268
Число витків індуктора w_1	2	12
Ширина витка з ізоляцією b_1 , м	0,02	0,0095

Розраховані основні геометричні розміри системи "індуктор-посуд, що нагрівається" (рис. 3). Зовнішній діаметр індуктора прийнятий рівним діаметру поверхні, що нагрівається (діаметру сковороди). Величина зазору між індуктором і посудом, що нагрівається, попередньо прийнята рівною 10 см та буде уточнюватися в процесі проектування індукційної кухонної плити, виходячи з наявності теплової та електричної ізоляції з урахуванням особливостей технологічного процесу складання плити. Наведені в табл. 2 значення товщини індуктора, розраховані за формулою (3) для обох варіантів вихідних даних, являють собою мінімальні величини, які також будуть уточнюватися в ході

проектування індуктора. Серед розрахованих електричних та енергетичних величин найбільший інтерес представляє електричний ККД індукційної плити. Відносно невисокий ККД (табл. 2) може бути підвищений завдяки застосуванню феритового магнітопроводу. Питання розрахунку і проектування магнітопроводів індукційних кухонних плит будуть розглянуті в наступних роботах авторів. Також в наступних статтях планується детально розглянути вибір індукуючого дроту (розраховані значення числа витків індуктора і ширини витка з ізоляцією для обох варіантів вихідних даних наведено в табл. 2)

Розраховані конструкції двухвиткового та 12-виткового індуктора (вихідні дані та одержані результати – табл. 1, 2, варіанти 1 і 2, відповідно) представлені на рис. 4, 5. На рис. 6 показані основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити з двухвитковим індуктором, розрахованим за розробленою авторами методикою. Розроблена конструкція одноконфорочної плити з двухвитковим індуктором представлена на рис. 7.

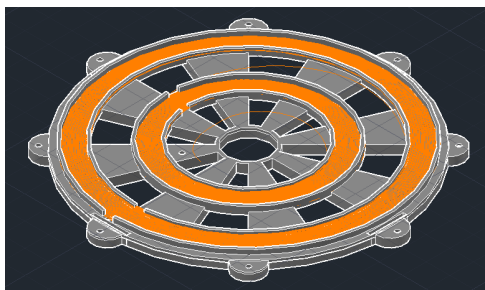


Рис. 4 – Розрахований двухвитковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 1).

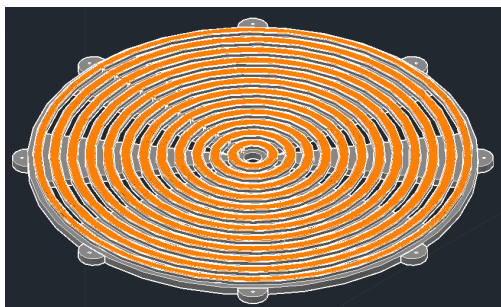


Рис. 5 – Розрахований 12-витковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 2).

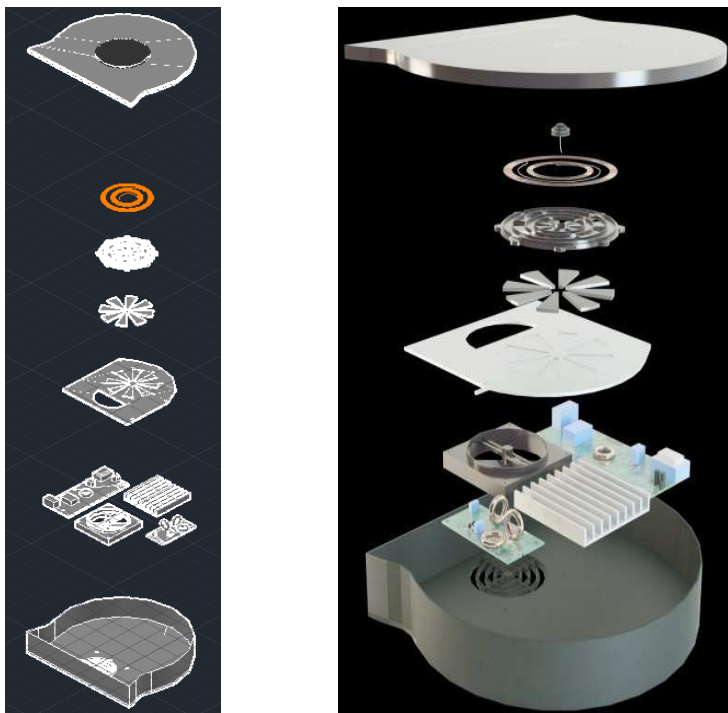


Рис. 6 – Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити з розрахованим двохвитковим індуктором: а – модель; б – 3d вид.

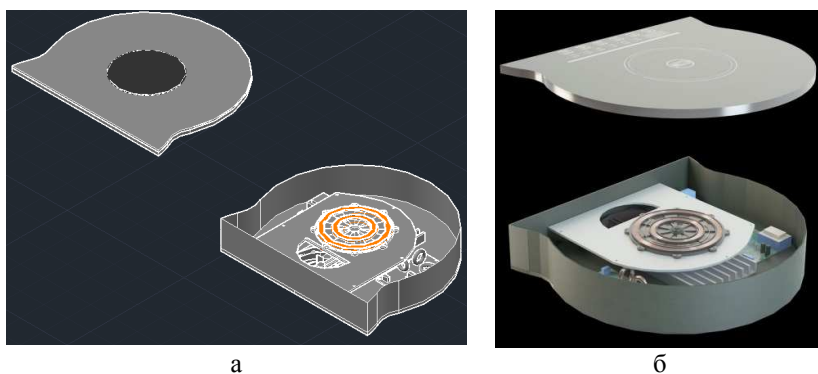


Рис. 7 – Проект одноконфорочної індукційної плити з двохвитковим індуктором: а – модель; б – 3d вид.

Висновки. У роботі запропонована інженерна методика розрахунку індукторів індукційних кухонних плит. Виконано розрахунок двох індукторів (великого і малого діаметра) для застосування у відповідних одноконфорочних індукційних плитах або в одній двоконфорочній плиті з конфорками різного діаметру. Розроблена методика розрахунку і отримані результати можуть бути використані в практиці конструювання індукційних плит, а також у навчальному процесі. Запропоновані конструкції індукторів можуть бути використані для комп'ютерного моделювання розподілів електромагнітних і теплових полів в індукційних плитах і посуді, що нагрівається.

Подальші дослідження з розрахунку індукційних кухонних плит доцільно проводити у наступних напрямках:

- вибір дроту для виготовлення індуктору
- розробка та використання методики розрахунку феритового магнітопроводу з урахуванням магнітних властивостей відповідного матеріалу
- комп'ютерне моделювання зв'язаних (мультифізичних) електромагнітних та теплових процесів, які мають місце у посуді, що нагрівається, а також у інших конструктивних елементах (індукторі, магнітопроводі) індукційної кухонної плити в процесі її функціонування, з метою уточнення результатів, отриманих з використанням запропонованої авторами інженерної методики. Для чисельного аналізу розподілу зв'язаних електромагнітного та теплового полів у індукційних плитах доцільно використати методику комп'ютерного моделювання відповідних процесів у промислових індукційних нагрівачах, розроблену раніше [7].

Список літератури: 1. TechNOVO. Web. 15 апреля 2014 <<http://technovo.com.ua/shop/category/plity-indukcionnye-nastolnye/?gclid=CluHsNC3tbwCFdShtAodAG4Acw>>. 2. Ebay. Web. 15 апреля 2014. <<http://www.ebay.de/bhp/induktionskochfeld>>. 3. Clatronic. Web. 15 апреля 2014. <http://clatronic.com.ua/component/page,shop.browse?option=com_virtuemart/task/view/category_id,53/Itemid,61/>. 4. HotLine. Web. 15 апреля 2014. <<http://hotline.ua/bt/kuhonnye-plity-i-poverhnosti/759-3266-794/?o=1&gclid=CMjZ5My3tbwCFMPtAod4U8ALw>>. 5. Кувалдин А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 200 с. 6. Куневич А.В., Подольский А.В., Сидоров И.Н. Ферриты: Энциклопедический справочник. – т. 1: Магниты и магнитные системы. – СПб: ЛИК, 2004. – 358 с. 7. Pantelyat M.G., Féliachi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals // The European Physical Journal Applied Physics. – 2002. – v. 17. – P. 29-33.

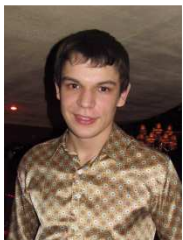
Bibliography (transliterated): 1. TechNOVO. Web. 15 April 2014 <<http://technovo.com.ua/shop/category/plity-indukcionnye-nastolnye/?gclid=>

CluHsNC3tbwCFdShtAodAG4Acw>. 2. Ebay. Web. 15 April 2014. <http://www.ebay.de/bhp/induktionskochfeld>. 3. Clatronic. Web. 15 апреля 2014. <http://clatronic.com.ua/component/page,shop.browse?option=com_virtuemart/task,view/category_id,53/Itemid,61/> 4. Hotline. Web. 15 апреля 2014. <<http://hotline.ua/bt/kuhonnnye-plity-i-poverhnosti/759-3266-794/?o=1&gclid=CMjZ5My3tbwCFtMPtAod4U8ALw>>. 5. Kuvaldin A.B. *Induction Heating of Ferromagnetic Steel*. Moscow: Energoatomizdat, 1988. Print. 6. Kunevich A.V., Podol'skij A.V., Sidorov I.N. *Ferrity: Jenciklopedicheskij spravocnik. Magnity i magnitnye sistemy*. – St. Petersburg: LIK, 2004. Print. 7. *Pantelyat M.G., Félichi M. Magneto-thermo-elastic-plastic simulation of inductive heating of metals. The European Physical Journal Applied Physics*. – 2002. – vol. 17. – P. 29-33. Print.

Надійшла (received) 17.04.14



Пантел'ят Михайло Гаррієвич, старший викладач кафедри "Електричні апарати" Національного технічного університету "ХПІ". В 1985 р. закінчив Харківський політехнічний інститут за спеціальністю "Інженерна електрофізика". Кандидат фізико-математичних наук (1991 р., спеціальність "Механіка деформівного твердого тіла). Основні наукові інтереси: комп'ютерне моделювання електромагнітних, теплових і механічних процесів в електромагнітних пристроях різного призначення.



Гуренцов Юрій Володимирович, студент електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ", група ЕМБ-20Б. Область інтересів – дослідження, розрахунок і проектування сучасної електропобутової техніки.



Трофімов Андрій Володимирович, студент електромашинобудівного факультету Національного технічного університету "ХПІ", група ЕМБ-20Б. Область інтересів – дослідження, розрахунок і проектування сучасної електропобутової техніки.