

*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.

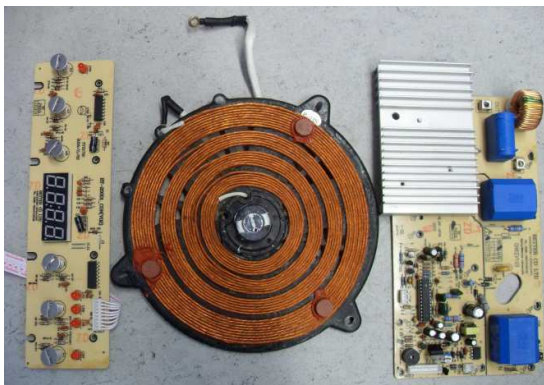


Рис. 2 – Плоский багатовитковий індуктор індукційної плити.

**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 (сковороди, 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 ін);

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

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

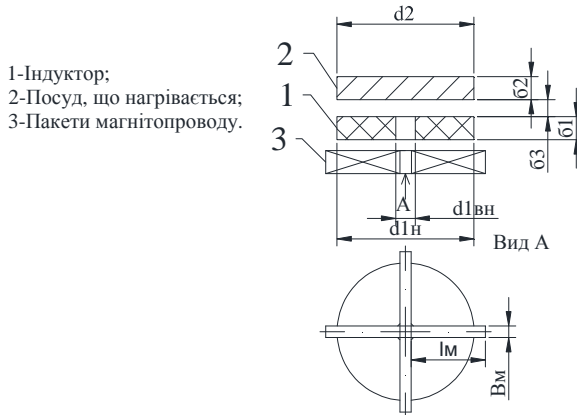


Рис. 3 – Ескіз системи "індуктор – посуд, що нагрівається".

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  $\delta_3$  приймається мінімальним, виходячи з наявності теплової та електричної ізоляції та з урахуванням технологічних вимог. Товщина індуктора  $\delta_1$  вибирається з умови мінімізації втрат

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

де  $\Delta_1$  – 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  $\rho_1$  – питомий електричний опір матеріалу індуктора;  $\mu$  – 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  $\rho_2$  – питомий електричний опір сталі посуду при заданій максимальній температурі її нагрівання  $t_2$ ;  $\mu_p$  – розрахункове значення відносної магнітної проникності при зазначеній температурі, що визначається за формулами та графіками, що наведені в [5];  $F_\Phi$  – 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 міжвіткової 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  $G_1$ ,  $G_{\Phi}$ ,  $F_1$ ,  $F_{\Phi}$  – 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  $P_{\Sigma}$  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  $\eta_{\Sigma}$  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 $\delta_2$ , м	0,003	0,004
Питомий електричний опір сталі посуду при 20 °С $\rho$ , 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 $\rho_2$ , 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 двохконфорочній 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 $\delta_3$ , м	0,01	0,01
Товщина індуктора $\delta_1$ , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Питома поверхнева потужність в посуді $p_{02}$ , кВт/м <sup>2</sup>	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" $P_{\Sigma}$ , 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 $\eta_{\Sigma}$	0,493	0,688
Коефіцієнт потужності $\cos\phi$	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.

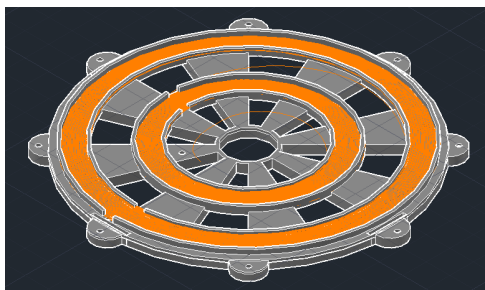


Рис. 4 – Розрахований двухвитковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 1).

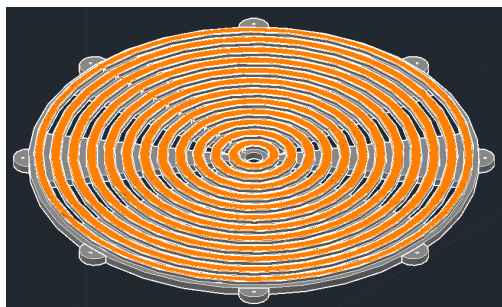


Рис. 5 – Розрахований 12-витковий індуктор індукційної кухонної плити (табл. 1, 2, варіант 2).



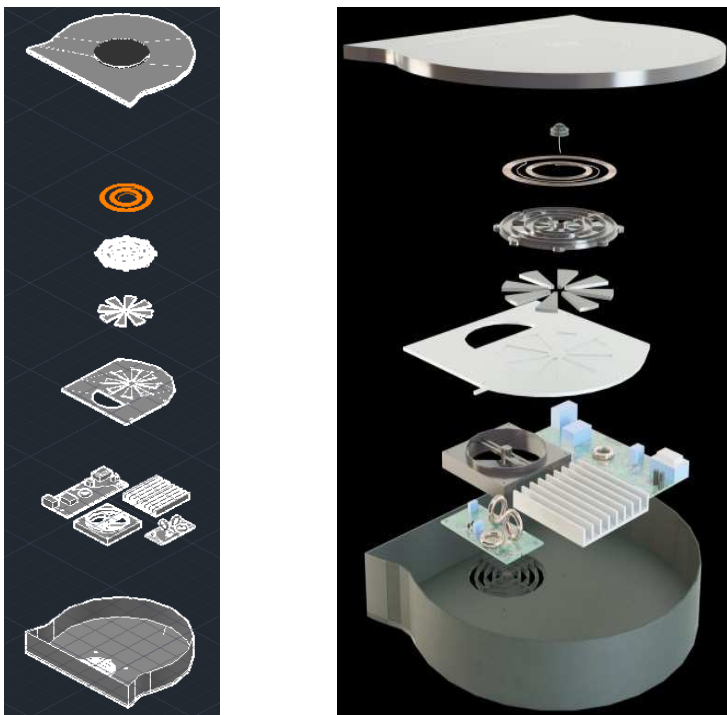


Рис. 6 – Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити з розрахованим двоохвитковий індуктором: а – модель; б – 3d вид.

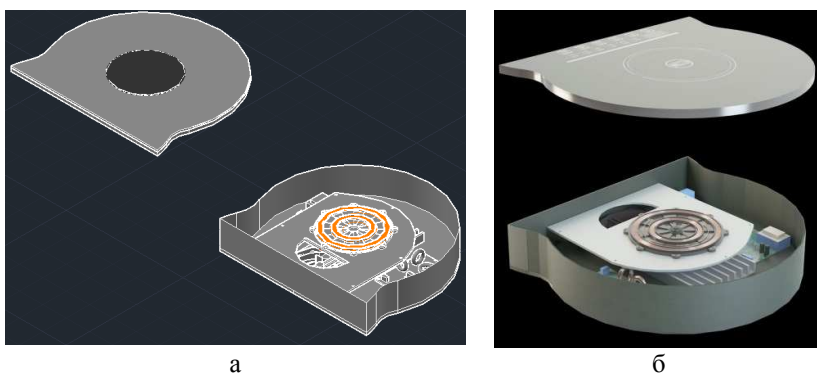


Рис. 7 – Проект одноконфорочної індукційної плити з двоохвитковим індуктором: а – модель; б – 3d вид.

**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 (індуктори, магнітопроводи) 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/](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.

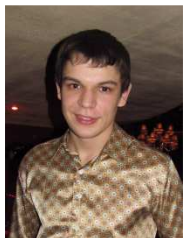
**Bibliography (transliterated):** 1. TechNOVO. Web. 15 April 2014 <<http://technovo.com.ua/shop/category/plity-indukcionnye-nastolnye/?gclid=>

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/](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=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., Féliachi 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 Гарр'йович**, 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 електрообутової техніки.



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