

**М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЄЛОЄВ**

### **РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ МАГНІТОПРОВОДУ ІНДУКЦІЙНИХ КУХОННИХ ПЛИТ**

Все більш широке використання індукційних кухонних плит у сучасному побуті та у ресторанному виробництві робить актуальними задачу розробки методів розрахунку і проектування основних конструктивних елементів зазначеного представника сучасної електропобутової техніки. Окрім індуктора (плоскої котушки, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке наводить в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті), одним з найважливіших елементів конструкції сучасної побутової індукційної кухонної плити є магнітопровід, виконаний з феромагнітного матеріалу та призначений для екранування електромагнітного поля, створеного індуктором, з метою зменшення розсіяння поля та, таким чином, підвищення коефіцієнта корисної дії плити. Представляє науковий та практичний інтерес розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити з метою вибору матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також втрат у ньому в процесі експлуатації плити. Представлена в даній статті й апробована методика інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити (матеріал для виготовлення магнітопроводу – MnZn-ферит нової марки PC95 виробництва TDK Corporation) відповідає поставленій задачі. З огляду на масогабаритні показники та низький рівень втрат, розраховані у роботі магнітопроводи можна використати у конструкціях індукційних побутових плит. Розроблена методика може бути використана в процесі перспективних науково-дослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в навчальному процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

**Ключові слова:** індукційна кухонна плита, магнітопровід, розрахунок, проектування.

**М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, А.А. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЄЛОЄВ**

### **РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАГНИТОПРОВОДА ИНДУКЦИОННЫХ КУХОННЫХ ПЛИТ**

Все более широкое использование индукционных кухонных плит в современном быту и в ресторанном производстве делает актуальными задачу разработки методов расчета и проектирования основных конструктивных элементов указанного представителя современной электробытовой техники. Кроме индуктора (плоской катушки, при протекании по которой переменного тока создается электромагнитное поле, которое в свою очередь наводит вихревые токи в посуде, нагреваемой на индукционной кухонной плите), одним из важнейших элементов конструкции современной бытовой индукционной кухонной плиты является магнітопровід, выполненный из ферромагнитного материала и предназначенный для экранирования электромагнитного поля, созданного индуктором, с целью уменьшения рассеяния поля и, таким образом, повышения коэффициента полезного действия плиты. Представляет научный и практический интерес разработка методики инженерного расчета и проектирования магнітопроводу индукционной кухонной плиты с целью выбора материала для его изготовления, определения геометрических и массогабаритных параметров магнітопроводу, а также потерь в нем в процессе эксплуатации плиты. Представленная в данной статье и апробированная методика инженерного расчета и проектирования магнітопроводу индукционной кухонной плиты (материал для изготовления магнітопроводу – MnZn-феррит новой марки PC95 производства TDK Corporation) соответствует поставленной задаче. Учитывая массогабаритные показатели и низкий уровень потерь, рассчитанные в работе магнітопроводи можно использовать в конструкциях индукционных бытовых плит. Разработанная методика может быть использована в процессе перспективных научно-исследовательских и конструкторских работ по разработке индукционных кухонных плит, а также в учебном процессе для подготовки бакалавров и магистров по соответствующим учебным программам.

**Ключевые слова:** индукционная кухонная плита, магнітопровід, расчет, проектирование.

**М.Г. ПАНТЕЛЯТ, Ю.С. ГРИЩУК, О.О. ЧЕПЕЛЮК, А.К. ЄЛОЄВ**

### **CALCULATION AND DESIGN OF MAGNETIC CORES OF HOUSEHOLD INDUCTION COOKERS**

The increasing use of induction cookers in modern everyday life and in restaurant production makes it urgent to develop methods for calculating and designing the main structural elements of this representative of modern household appliances. In addition to the inductor (a flat coil alternating current in which creates an electromagnetic field which in turn induces eddy currents in the dishes heated on the induction cooker), one of the most important structural elements of a modern household induction cooker is a magnetic core made of ferromagnetic material and designed to shield the electromagnetic field created by the inductor, in order to reduce the scattering of the field and, thus, increase the efficiency of the cooker. It is of scientific and practical interest to develop a methodology for the engineering calculation and design of the magnetic core of an induction cooker in order to select the material for its manufacture, determine the geometric and mass-dimensional parameters of the magnetic core, as well as losses in it during operation of the core. The methodology for the calculation and design of the magnetic core of an induction cooker presented in this paper (the material for manufacturing of the magnetic core is MnZn ferrite of the new PC95 brand manufactured by TDK Corporation) corresponds to this task. Taking into account the overall dimensions, mass and the low level of losses, the calculated magnetic cores can be used in the designs of induction cookers. The developed methodology can be used in the process of promising research and development work on the development of induction cookers, as well as in the educational process for the preparation of Bachelors and Masters in relevant educational programs.

**Keywords:** household induction cookers, magnetic core, calculation, design.

**Вступ.** Все більш широке використання індукційних кухонних плит у сучасному побуті та у ресторанному виробництві робить актуальними задачу розробки методів розрахунку і проектування основних конструктивних елементів зазначеного представника сучасної електропобутової техніки.

В роботі [1] запропонована інженерна методика розрахунку і проектування індуктора – плоскої котушки, при протіканні по якій змінного струму створюється електромагнітне поле, яке наводить в свою чергу вихрові струми в посуді, що нагрівається на індукційній кухонній плиті. З використанням розробленої методики виконано розрахунки індукторів стосовно ряду режимів нагрівання посуду різних геометричних розмірів. Це дозволило розробити ескізні проекти 2-виткового та 12-виткового індукторів, а також одноконфорочної індукційної кухонної плити з їх використанням [1].

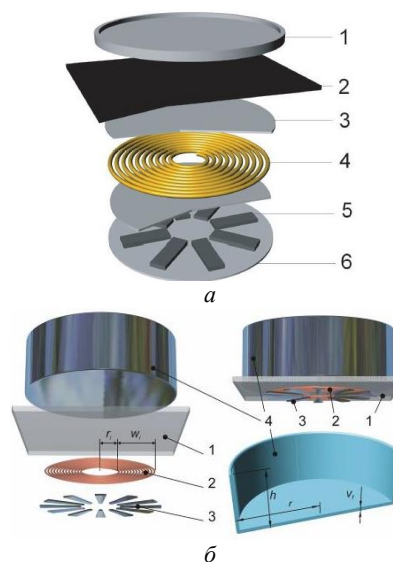
Окрім індуктора, одним з найважливіших елементів конструкції сучасної побутової індукційної кухонної плити є магнітопровід, виконаний з феромагнітного матеріалу та призначений для екранування електромагнітного поля, створеного індуктором, з метою зменшення розсіяння поля та, таким чином, підвищення коефіцієнта корисної дії плити.

Представляє науковий та практичний інтерес розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити з метою вибору матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також втрат у ньому в процесі експлуатації плити. Розроблена методика може бути використана в процесі перспективних науководослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в учбовому процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

**Мета роботи** – розробка методики інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити та її використання при розробці конструкцій плит для нагрівання посуду різних геометричних розмірів.

**Магнітопроводи індукційних кухонних плит. Матеріали для виготовлення магнітопроводів.** Найбільш поширеним різновидом магнітопроводу індукційних кухонних плит є система стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором плити та виконаних з сучасного феромагнітного матеріалу – фериту відповідної марки з потрібними електрофізичними властивостями [2-5]. Відповідні конструктивні елементи індукційної кухонної плити наведені на рис. 1 [2-4].

На рис. 1,а наведено феритовий магнітопровід у вигляді восьми стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором [2, 3]. Застосовується також інша кількість стрижнів (як правило, парна від 6 до 12, рис. 1,б) [4, 5].



а): 1 – посуд, що нагрівається (сковорода); 2 – варильна поверхня; 3 – електрична ізоляція (слода); 4 – індуктор; 5 – феритовий магнітопровід; 6 – алюмінієва плита [2, 3]  
б): 1 – склокерамічна варильна поверхня; 2 – індуктор; 3 – феритовий магнітопровід; 4 – посуд, що нагрівається (кастрюля) [4]

Рис. 1. Основні конструктивні елементи індукційної кухонної плити

Магнітопроводи побутових індукційних плит виготовляють з сучасних магнітних матеріалів – феритів [2-5]. В науково-технічній літературі відсутня інформація стосовно марок феритів, які застосовуються для виробництва стрижнів магнітопроводів побутових індукційних плит. Аналіз інформації, наведеної на сайтах постачальників відповідної продукції [6], дозволяє зробити висновок, що стрижні магнітопроводів побутових індукційних плит виготовляються з MnZn-феритів. Властивості зазначених феритів різних марок наведені у [7, 8].

**Методика розрахунку і проектування магнітопроводів індукційних кухонних плит.** Як було зазначено вище, метою розрахунку і проектування магнітопроводу є вибір матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також втрат у ньому в процесі експлуатації плити. Пропонується наступна послідовність розв'язання поставленої задачі.

1) Вибір матеріалу для виготовлення стрижнів магнітопроводу.

Як зазначено вище, стрижні магнітопроводів побутових індукційних плит виготовляються з MnZn-феритів. У [7] наведені основні властивості (початкова магнітна проникність, індукція насичення, питома потужність втрат при вказаних у [7] умовах її визначення, рекомендований діапазон робочих частот, температура Кюрі, питомий електричний опір) зазначених феритів різних виробників. Виходячи з наведеної інформації, можна виконати попередній вибір марки MnZn-фериту, орієнтуючись в першу чергу на діапазон робочих частот (частота струму в індукторі індукційної кухонної плити – 20-100 кГц) і за можливості на малу величину питомої потужності втрат. Отже, серед феритів для низьких і середніх частот (10-300

кГц) можна обрати, наприклад, новий матеріал PC95 виробництва TDK Corporation, який відповідає зазначеним вимогам.

Детальний опис, характеристики та властивості MnZn-феритів виробництва TDK Corporation наведені самим виробником у [8]. Цей документ підтверджує, що обрані ферити можуть використовуватися в різноманітних електронних і електротехнічних пристроях, у тому числі в приладах для електронагріву. Окрім величин, наведених у [7], документ [8] надає максимально детальну інформацію щодо властивостей відповідних матеріалів: додатково наведені щільність, коерцитивна сила, залишкова намагніченість, а також у графічній формі основні криві намагніченості  $B(H)$  при різних температурах, залежності магнітної проникності від температури та частоти, залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$ , температури та частоти. Зазначена детальна інформація використовується на подальших етапах розрахунку магнітопроводу індукційної плити.

2) Вибір геометричних розмірів феритових стрижнів, розрахунок маси магнітопроводу.

В процесі проектування магнітопроводів у вигляді феритових стрижнів прямокутного перерізу, розташованих під індуктором [2-5], при виборі геометрії феритових стрижнів магнітопроводів індукційних кухонних плит слід орієнтуватись на номенклатуру відповідної продукції, що присутня на ринку. Згідно з каталогом [6], існує можливість придбання феритових стрижнів з перерізом  $h \times b = 5 \text{ мм} \times 15 \text{ мм} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \times 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ , де  $h, b$  – висота та товщина стрижня, відповідно. Довжина стрижня  $l$  визначається за формулою

$$l = 0,5(d_{12} - d_{11}), \quad (1)$$

де  $d_{12}, d_{11}$  – зовнішній і внутрішній діаметри індуктора плити, відповідно.

Маса магнітопроводу  $m$  розраховується як:

$$m = \rho V N, \quad (2)$$

де  $\rho$  – щільність матеріалу стрижнів;  $N$  – кількість стрижнів магнітопроводу плити;  $V$  – об'єм одного стрижня:

$$V = hbl; \quad (3)$$

Формула (3) може бути застосована, коли в магнітопроводі індукційної кухонної плити використовуються стрижні «традиційної» геометрії, зображені на рис. 1,а [2, 3]. При використанні стрижнів, звужених у напрямку внутрішнього діаметра індуктора (з метою отримати своєрідні концентратори електромагнітного поля [4, 5], див. рис. 1,б), об'єм стрижня розраховується відповідним чином.

3) Розрахунок потужності втрат у магнітопроводі.

Втрати  $P_C$  в феритових стрижнях магнітопроводу розраховуються за формулою

$$P_C = p_{cv}^* V N, \quad (4)$$

де  $p_{cv}^*$  – питома потужність втрат, яку доцільно визначати за допомогою графіків (залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$ , частоти та температури) для відповідної марки феритів у відповідних умовах експлуатації (конкретні значення амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$ , частоти та температури). Потрібна графічна

інформація наведена, наприклад, у [8]. При відсутності зазначеної детальної інформації можливо використання величин  $p_{cv}$ , наведених у [7] для «фіксованих» умов (наприклад, амплітуда індукції магнітного поля 100 мТл, частота 100 кГц, температура 100 °С), але це може привести до виникнення погрешності в розрахунках потужності втрат у магнітопроводі.

**Приклади виконаних розрахунків. Аналіз отриманих результатів.** Розрахунки феритових магнітопроводів виконано на прикладах двох варіантів індукторів і ескізних проектів конструкцій індукційних кухонних плит, розрахованих і розроблених в [1]. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 1 [1]. Посуд (сковорода різного діаметра та з різною товщиною стінки) нагрівається до зазначених у табл. 1 температур при різних частотах струму в індукторі індукційної кухонної плити.

Таблиця 1 – Вихідні дані для виконання розрахунків [1]

Номер варіанту	1	2
Діаметр днища посуду $d_2$ , м	0,12	0,24
Товщина стінки посуду $\delta_2$ , м	0,003	0,004
Температура нагріву посуду $t_2$ , °С	100	280
Частота електромагнітного поля $f$ , кГц	100	20
Напруга на індукторі $U_1$ , В	220	220
Потужність, яка виділяється в посуді $P_2$ , Вт	$2,0 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$

В табл. 2 наведено деякі результати розрахунку і проектування індукторів індукційних кухонних плит для обох розглянутих варіантів [1]. На рис. 2 наведені розроблені конструкції 2-виткового та 12-виткового індукторів (для 1-го та 2-го варіантів вихідних даних, відповідно), а на рис. 3 – ескізний проект плити з 2-витковим індуктором [1].

Таблиця 2 – Індуктори індукційних кухонних плит [1]

Номер варіанту	1	2
Зовнішній діаметр індуктора $d_{12}$ , м	0,12	0,24
Внутрішній діаметр індуктора $d_{11}$ , м	0,04	0,04
Зазор між індуктором та посудом $\delta_3$ , м	0,01	0,01
Товщина індуктора $\delta_1$ , м	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Активна потужність системи «індуктор–посуд» $P_{\Sigma}$ , ВА	$4,058 \cdot 10^3$	$4,79 \cdot 10^3$
Електричний ККД $\eta$	0,493	0,689
Число витків індуктора $w_1$	2	12
Ширина витка з ізоляцією $b_1$ , м	0,02	0,0083

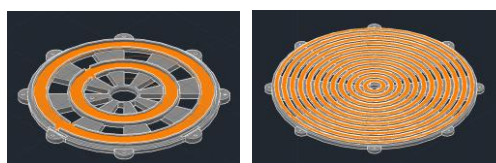


Рис. 2. Конструкції 2-виткового та 12-виткового індукторів [1]

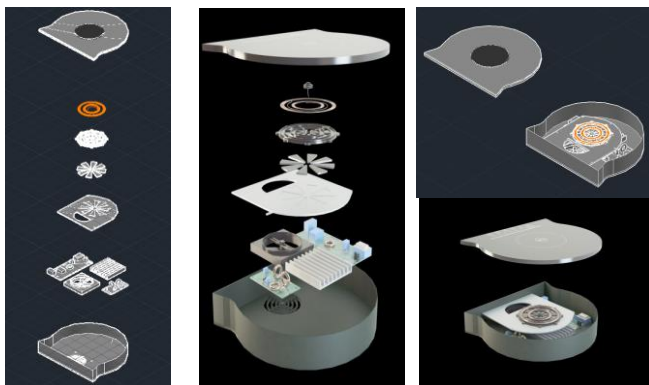


Рис. 3. Ескізний проект індукційної кухонної плити з 2-витковим індуктором [1]

У розроблених конструкціях плит передбачається використання магнітопроводів у вигляді 8-ми феритових стрижнів відповідних геометричних розмірів. Матеріал стрижнів – MnZn-ферит нової марки PC95 виробництва TDK Corporation, детальні властивості якого наведені у [8]. Переріз стрижнів обрано у відповідності до каталогу продукції [6].

Розрахунки виконувались за формулами (1)-(4). Окремо зупинимось на визначенні величини  $p_{cv}^*$  – питомої потужності втрат, яку знаходимо за допомогою графіків (залежності питомої потужності втрат від амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$ , частоти та температури) для відповідної марки фериту у відповідних умовах експлуатації (конкретні значення амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$ , частоти та температури) [8]. Використовуючи відповідні графіки, знаходимо величини  $p_{cv}^*$  для частот 100 кГц і 20 кГц (у відповідності до обох варіантів розрахунку), температури 60 °C (у припущенні, що магнітопровід в процесі експлуатації плити нагрівається орієнтовно до такої температури) та амплітуди індукції магнітного поля  $B_m$  на поверхні магнітопроводу. Щодо величини  $B_m$ , у відповідності з результатами виконаного раніше комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного поля плити [9] приймаємо її рівною орієнтовно 0,125 Тл.

Результати розрахунку магнітопроводів наведені в табл. 3.

З отриманих результатів розрахунків можна зробити висновок, що розраховані та спроектовані магнітопроводи доцільно використати у конструкціях індукційних побутових плит, оскільки:

1) Потужність втрат у стрижнях магнітопроводів несуттєва (одиниці Вт, див. табл. 3) у порівнянні з активною потужністю системи «індуктор-посуд» (див. табл. 2);

2) Маса магнітопроводу (до 300 г у розглянутих прикладах) достатньо мала у порівнянні з масою всієї конструкції (маса одноконфорочних індукційних плит, наявних у продажу – від 2,3 кг [10]).

Таблиця 3 – Результати розрахунку магнітопроводів індукційних кухонних плит

Номер варіанту	1	2
Кількість феритових стрижнів $N$	8	8
Переріз феритових стрижнів $h \times b$ , м [6]	$5 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3} \times 15 \cdot 10^{-3}$
Довжина одного стрижня $l$ , м	0,04	0,1
Об'єм одного стрижня, м <sup>3</sup>	$3 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
Щільність матеріалу стрижнів, кг/м <sup>3</sup> [8]	$4,9 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^3$
Маса магнітопроводу, кг	0,1176	0,294
Амплітуда індукції магнітного поля $B_m$ , Тл [9]	0,125	0,125
Питома потужність втрат $p_{cv}^*$ , Вт/м <sup>3</sup> [8]	$10^5$	$2 \cdot 10^4$
Потужність втрат у магнітопроводі, Вт	2,4	1,2

**Висновки.** Розроблена й апробована методика інженерного розрахунку та проектування магнітопроводу індукційної кухонної плити з метою вибору матеріалу для його виготовлення, визначення геометричних і масогабаритних параметрів магнітопроводу, а також потужності втрат у ньому в процесі експлуатації плити. З огляду на масогабаритні показники та низький рівень втрат, розраховані у роботі магнітопроводи можна використати у конструкціях індукційних побутових плит. Методика може бути використана в процесі перспективних науково-дослідних і конструкторських робіт з розробки індукційних кухонних плит, а також в навчальному процесі для підготовки бакалаврів і магістрів за відповідними освітніми програмами.

#### 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. Topuz N.E., Dawood K., Kaya Ü, Odabaş G., Kömürçöz G. Electromagnetic and thermal analysis of induction cooker coil // Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – 25-27 September 2019, Elazığ, Turkey. – 5 p.
3. Cerri G., Kovyryalov A., Primiani V.M., Russo P. Rigorous electromagnetic analysis of domestic induction heating Appliances // PIERS Online. – 2009. – vol. 5, No. 5. – P. 491-495.
4. Koller I., Novák B. Improving the energy efficiency of induction cooking // Electrical Engineering. – 2009. – vol. 91. – P. 153-160.
5. Koller I., Novák B. Improving the energy efficiency of induction cooking 2 // Electrical Engineering. – 2017. – vol. 99. – P. 171-178.
6. <https://oceanindustryhz.en.made-in-china.com/product/IKSnPECyXTWV/China-5-15-60-Mm-Induction-Cooker-Ferrite-Core.html>
7. <http://coretech.com.ua/ferrites/mnzn-power>
8. [https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite\\_mnzn-material\\_characteristics\\_en.pdf](https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite_mnzn-material_characteristics_en.pdf)
9. Пантелят М.Г., Гуренцов Ю.В. Скінченоелементний аналіз розподілу електромагнітного поля індукційної кухонної плити // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і



практика. – Х.: НТУ "ХПИ", 2016. – № 32 (1204). – С. 32-36.

10. [https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip\\_plity\\_\\_indukcionnaja/](https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip_plity__indukcionnaja/)

#### References (transliterated)

1. *Pantelyat M.G., Gurenczov Yu.V., Trofimov A.V.* Metodyka rozrakhunku induktoriv indukciyn`x kuxonnyx ply`t. Visny`k NTU "XPI". Seriya: Problemy` udoskonalennya elektry`chny`x mashy`n i aparativ. Teoriya i prakty`ka. – Kh.: NTU "KhPI", 2014. – no 20 (1063). – P. 13-24.
2. *Topuz N.E., Dawood K., Kaya Ü, Odabaş G., Kömürgöz G.* Electromagnetic and thermal analysis of induction cooker coil. Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA). – 25-27 September 2019, Elazig, Turkey. – 5 p.
3. *Cerri G., Kovyryalov A., Primiani V.M., Russo P.* Rigorous electromagnetic analysis of domestic induction heating Appliances. PIERS Online. – 2009. – vol. 5, No. 5. – P. 491-495.
4. *Koller I., Novák B.* Improving the energy efficiency of induction cooking. Electrical Engineering. – 2009. – vol. 91. – P. 153-160.
5. *Koller I., Novák B.* Improving the energy efficiency of induction cooking 2. Electrical Engineering. – 2017. – vol. 99. – P. 171-178.
6. <https://oceanindustryhz.en.made-in-china.com/product/IKSnPECyXTWV/China-5-15-60-Mm-Induction-Cooker-Ferrite-Core.html>
7. <http://coretech.com.ua/ferrites/mnzn-power>
8. [https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite\\_mnzn-material\\_characteristics\\_en.pdf](https://product.tdk.com/info/en/catalog/datasheets/ferrite_mnzn-material_characteristics_en.pdf)
9. *Pantelyat M.G., Gurenczov Yu.V.* Skinchenoelementny`j analiz rozpodilu elektromagnitnogo polya indukciynoyi kuxonnoyi ply`ty`. Visny`k NTU "XPI". Seriya: Problemy` udoskonalennya elektry`chny`x mashy`n i aparativ. Teoriya i prakty`ka. – Kh.: NTU "KhPI", 2016. – no 32 (1204). – P. 32-36.
10. [https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip\\_plity\\_\\_indukcionnaja/](https://comfy.ua/harkov/astolnye-plity/tip_plity__indukcionnaja/)

Поступила (received) 15.05.20

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Пантелеят Михайло Гаррійович (Пантелеят Михаил Гарриевич, Panteliat Mikhail Garrievich)** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: [m150462@yahoo.com](mailto:m150462@yahoo.com).

**Гришук Юрій Степанович (Гришук Юрий Степанович, Hryshchuk Yurii Stepanovych)** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7427-5419>; e-mail: [grischukkpi@ukr.net](mailto:grischukkpi@ukr.net).

**Чеплюк Олександр Олександрович (Чеплюк Александр Александрович, Chepelyuk Oleksandr Oleksandrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4522-9821>; e-mail: [chep1@i.ua](mailto:chep1@i.ua)

**Слоєв Алан Казбекович (Елоев Алан Казбекович, Yeloiev Alan Kazbekovych)** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: [mauser98kar@gmail.com](mailto:mauser98kar@gmail.com).