

Т. 2, № 1, 2020

УДК 629.313

**О. В. Макаrchук**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
oleksandr.v.makarchuk @ lpnu.ua

**Б. І. Крохмальний**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
krohbg@gmail.com

**В. Г. Гайдук**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
profcompl@ukr.net

## **ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ІНДУКЦІЙНОГО ВОДОНАГРІВАЧА**

<https://doi.org/10.23939/sepes2020.01.043>

© Макаrchук О. В., Крохмальний Б. І., Гайдук В. Г., 2020

Розглянуто принцип дії, конструкцію та особливості процесу проектування електронагрівача рідини індукційного типу, що відрізняється від існуючих пристроїв аналогічного призначення високими рівнями надійності та захисту від ураження електричним струмом, добрими техніко-економічними показниками.

Метою дослідження обрано розроблення методики проектування індукційного водонагрівача оригінальної конструкції та перевірка достовірності цієї методики. Методи дослідження, які застосовуються для досягнення поставленої мети, поєднують переваги аналітичних підходів та числового симуляційного моделювання. Так, проектний розрахунок та аналіз технічних показників здійснено на підставі класичної електро-техніки та теорії електричних машин змінного струму, а уточнення проектних рішень, пов’язаних із перебігом електромагнітних процесів – за методом скінченних елементів.

Розроблений алгоритм проектування містить етап синтезу конструкції та математичну модель для розрахунку динамічних електромагнітних процесів у нагрівачі. Вона враховує двовимірний просторовий розподіл магнітного поля, насичення магніто-проводу та втрати від вихрових струмів у ньому, ефект витіснення струму в нагрівальному елементі. Ця модель ґрунтується на рівняннях Максвелла у квазістаціонарному наближенні, а також містить низку співвідношень, що пов’язують між собою колові (інтегральні) та польові (розподілені) показники. Її можна віднести до класу колопольових або комбінованих моделей.

Стаття містить опис конструкції та приклад розрахунку індукційного водонагрівача потужністю 4,8 кВт, коефіцієнт віддачі якого перевищує 95%. Порівняно результати розрахунку номінальних показників цього нагрівача, отримані з використанням аналітичних методів та FEM-аналізу.

Проведенні дослідження дають право стверджувати, що застосування пропонуваної методики проектування гарантує відповідність проекту вимогам технічного завдання й не потребуватиме виконання дорогівартісних етапів виготовлення фізичних макетів та проведення їх експериментальних випробувань.

**Ключові слова:** індукційний водонагрівач, електронагрівач рідини, трансформатор з короткозамкненим витком, поверхневий ефект, вихрові струми, FEM-аналіз.

### Вступ

Нагрівання рідин, передусім води – процес, який поширений у промисловості та житлово-комунальному господарстві. Виконання його з використанням електронагрівальних пристроїв у багатьох випадках має беззаперечні вигоди [1]. Це підтверджується даними [2], які також свідчать, що в різних країнах світу від 10 % до 40 % споживаної електроенергії в непромисловому секторі витрачається саме на нагрівання води, а з погляду охорони довкілля та екологічної безпеки цей спосіб поза конкуренцією.

### Аналіз останніх досліджень

Серед всієї гами електронагрівальних пристроїв індукційні водонагрівачі (ІВН) мають низку переваг порівняно з традиційними, наприклад, трубчастими електронагрівачами або ТЕН-ами [3], а саме:

- високий рівень захисту від ураження електричним струмом;
- перевищення температури нагрівального елемента температури рідини є порівняно незначним ( $< 20\text{--}30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) [4], що практично виключає можливість виникнення пожежі;
- невибагливість до виду теплоносія (вода, антифриз, олива та ін.);
- порівняно менша схильність до утворення накипу;
- високі техніко-економічні показники (коефіцієнт потужності  $>0,97$ ; коефіцієнт корисної дії  $>0,98$ ) [5];

Вищезазначені властивості та переваги ІВН зумовлюють актуальність досліджень в напрямках пошуку нових та удосконалення існуючих конструкцій таких нагрівачів, створення нових методів їх проектування.

Сьогодні найпоширенішою є конструкція ІВН трансформаторного типу, в якому вторинна обмотка представляє собою доволі складну систему труб, виготовлених з електропровідного матеріалу, в середині яких знаходиться теплоносій (рис. 1).

Такий тип ІВН, на нашу думку, має низку недоліків, зокрема потреба у зварних сполученнях, через які проходить струм значної величини. Ці з'єднання повинні забезпечувати герметичність системи, до того ж є постійно навантаженими як в механічному, так і в тепловому аспектах. Дотримання вимог до якості цих з'єднань потребує використання відповідного обладнання, матеріалів та кваліфікованого персоналу.

Нагрівач, запропонований у [7], крім конструкційних особливостей, таких як наявність нагрівальних елементів двох типів, один з яких керамічний, засобів для формування турбулентності потоку теплоносія тощо, потребує застосування спеціальних матеріалів, наприклад, струмопровідної кераміки, фторомістких пластиків. Всі ці обставини, беззаперечно, не сприятимуть здешевленню його виготовлення.

### Методи дослідження

Методи дослідження, які застосовують для розв'язання задач синтезу та аналізу подібних пристроїв, вважають традиційними для електромеханіки. Аналітичні підходи використовують для розроблення конструкції ІВН та аналізу її технічних показників [4], FEM-аналіз – для уточнення

проектних рішень, пов'язаних з перебігом електромагнітних та теплових процесів [8], і, нарешті, фізичні, експериментальні дослідження застосовують для остаточної верифікації використаних методик та перевірки працездатності проекту загалом [9].

#### Особливості методики проектування

Запропонована конструкція ІВН відрізняється своєю простотою і надійністю. Процес перетворення енергії відбувається в трансформаторі, в якому первинна обмотка підключена до джерела напруги промислової частоти, а вторинна є короткозамкненою (к.з.). Ця обмотка являє собою порожнистий виток, виготовлений з матеріалу з підвищеним значенням питомого електричного опору. Електричні втрати, які виділяються в такому к.з. витку, безпосередньо нагрівають рідину, що циркулює в його внутрішньому об'ємі.

Пустоти між осердям трансформатора, витками первинної обмотки та к.з. витком заповнені теплопровідним компаундом, що зменшуватиме теплоперепад між активними частинами нагрівача. Зовні весь пристрій теплоізолюваний від довкілля.

Загальний вигляд та внутрішню будову ІВН зображено на рис. 2.

**Метою** пропонованого дослідження є:

- розроблення методики проектування ІВН запропонованої конструкції;
- перевірка достовірності цієї методики.

Процес проектування ІВН, переважно, повторює проектування трансформатора, однак має низку особливостей, зумовлених його конструкцією та режимом роботи. Мета проектування полягатиме у створенні трансформатора, який передбачає довготривалу роботу в режимі к.з. та матиме прийнятні техніко-економічні показники з урахуванням практично повної його теплоізоляції з довкіллям. Ці вимоги вносять зміни у підходи до вибору електромагнітних навантажень та матеріалів, до визначення розмірів вторинної обмотки та її індуктивного опору розсіювання, до способу розрахунку втрат у вторинному колі.

Так, на початку етапу визначення розмірів осердя магнітопроводу пропонуємо допустиму величину магнітної індукції в ньому знизити принаймні вдвічі порівняно з традиційними рекомендаціями та вибрати його з діапазону 0,55÷0,75 Тл.

Вторинну обмотку такого ІВН рекомендуємо виконувати з електропровідного матеріалу з підвищеним питомим електричним опором.

Для наближеного оцінювання величини активного опору вторинної обмотки, що забезпечуватиме заданий рівень втрат енергії в ній, пропонуємо використати вираз

$$R_2 \approx \frac{U_1^2}{P_2 w_1^2}, \quad (1)$$

де  $U_1$ ,  $w_1$  – напруга живлення та кількість витків первинної обмотки трансформатора;  $P_2$  – активна потужність електричних втрат у вторинній обмотці (є заданою величиною).



Рис. 1. Індукційний водонагрівач трансформаторного типу (запозичене з [6])

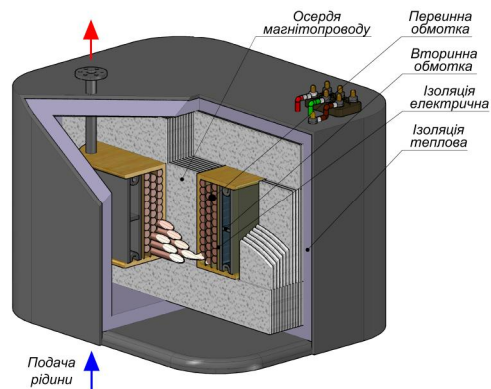


Рис. 2. Загальний вигляд водонагрівача

Після визначення  $R_2$ , задаючись товщиною стінки порожнистого витка вторинної обмотки  $t_s$  та його висотою  $h_2$  (з конструкційних міркувань), можна легко знайти середню довжину витка  $l_{w2}$ , площу повного поперечного перерізу  $q_2$  та ширину  $c_2$  витка за такою сукупністю співвідношень

$$\begin{aligned} l_{w2} &= 2(a + b + \pi(\delta_{w1} + c_1 + \delta_{w12} + 0,5c_2)); \\ q_2 &= 2(c_2 + h_2 - 2t_s)t_s; \quad c_2 = \rho_{m2} \frac{w_2 l_{w2}}{2R_2 t_s} - h_2 + 2t_s, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $a, b$  – розміри центрального стрижня трансформатора (рис. 3);  $w_2$  – кількість витків вторинної обмотки ( $w_2 = 1$ );  $\rho_{m2}$  – питомий електричний опір матеріалу вторинної обмотки;  $\delta_{w1}, \delta_{w12}, c_1$  – розміри, зрозумілі з (рис. 3)

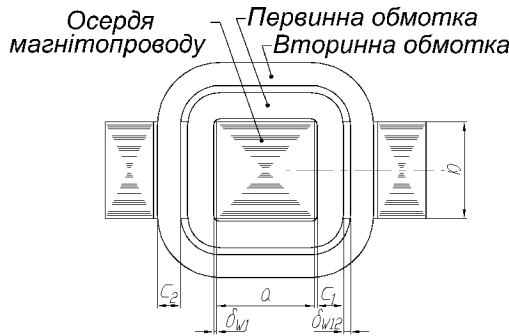


Рис. 3. До визначення розмірів вторинної обмотки

Для розрахунку індуктивного опору короткого замикання такого трансформатора пропонуємо використати формулу

$$X_z = \frac{4 \cdot 10^{-6} f \cdot \delta_{s12} U_1 (w_1 l_{w1} I_1 + w_2 l_{w2} I_2)}{e_w l_\sigma I_1}, \quad (3)$$

де  $e_w$  – ЕРС, що припадає на один виток трансформатора;  $f$  – частота напруги живлення;  $I_1, I_2$  – струми первинної та вторинної обмоток, відповідно;  $l_{w1}, l_{w2}, l_\sigma$  – середні довжини витка первинної та вторинної обмоток й силової лінії поля розсіювання в стрижні та ярмі

трансформатора, відповідно;  $\delta_{s12} = \delta_{w1} + \frac{c_1 + c_2}{3}$  – зведена величина проміжку між обмотками для потоку розсіювання.

Розрахунок параметрів заступної схеми з послідовним контуром намагнічування дозволить визначити решту режимних величин трансформатора. Позначимо повні опори трансформатора традиційно  $\dot{Z}_1 = R_1 + jX_{\sigma 1}$ ;  $\dot{Z}_m = R_m + jX_m$ ;  $\dot{Z}_2' = R_2' + jX_{\sigma 2}'$ , де  $X_{\sigma 1} = X_{\sigma 2}' = 0,5X_z$ . Тоді споживана і корисна потужність трансформатора та його коефіцієнт корисної дії визначатиметься як

$$P_1 = |\dot{I}_1|^2 \operatorname{Re} \left( \dot{Z}_1 + \frac{\dot{Z}_m \dot{Z}_2'}{\dot{Z}_m + \dot{Z}_2'} \right); \quad P_2 = |\dot{I}_2'|^2 R_2'; \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (4)$$

де

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 (\dot{Z}_m + \dot{Z}_2')}{\dot{Z}_1 \dot{Z}_m + \dot{Z}_1 \dot{Z}_2' + \dot{Z}_m \dot{Z}_2'}; \quad \dot{I}_2' = \frac{\dot{U}_1 - \dot{Z}_1 \dot{I}_1}{\dot{Z}_2'} - \text{струми первинної і зведеної вторинної обмоток.}$$

### ФЕМ-модель нагрівача та порівняння результатів

З метою перевірки запропонованої методики первинного проектування ІВН та для уточнення його проектних параметрів побудовано математичну модель для розрахунку динамічних режимів трансформатора з к.з витком. Модель враховує двовимірний просторовий розподіл магнітного поля, насичення магнітопроводу, втрати від вихрових струмів в осерді, ефект витіснення струму у

вторинному колі. Ця модель ґрунтується на рівняннях Максвелла у квазістаціонарному наближенні, а також містить низку співвідношень, що пов'язують між собою колові (інтегральні) та польові (розподілені) показники. Її можна віднести до класу колопольових або комбінованих моделей.

Визначальним рівнянням цієї моделі є

$$\nabla^2 \bar{A} = \sigma \nabla U + \sigma \frac{\partial \bar{A}}{\partial t}, \quad (5)$$

де  $\nabla$  – диференціальний оператор Гамільтона, для декартової системи координат він набуває виду  $\nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z}$ ;  $\bar{A}$  – векторний магнітний потенціал;  $U$  – скалярний електричний потенціал;

$\sigma$  – матриця питомої електричної провідності середовища.

Поле вектора густини струму визначається за формулою

$$\bar{J} = \sigma \left( -\nabla U - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \right). \quad (6)$$

Рівняння електричної рівноваги фігурують у коловому вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\psi_1}{dt} + R_1 i_1 - u_1 &= 0; & \frac{d\psi_2}{dt} + R_2 i_2 &= 0; \\ \psi_1 &= f_1[i_1, i_2]; & \psi_2 &= f_2[i_1, i_2], \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\psi_1, \psi_2$  – повні потокозчеплення первинної та вторинної обмоток, відповідно. Вони знаходяться безпосереднім інтегруванням поля індукції або векторного потенціалу, обмеженого площею перетину відповідної обмотки,

$$\psi_{1(2)} = \sum_{j=1}^J w_{1(2)j} \Phi_j = b \sum_{j=1}^J w_{1(2)j} \int_l \bar{B} \bar{n} d\bar{l} = b \sum_{j=1}^J w_{1(2)j} \sum_{m=1}^M (B_{xm} \cos \alpha_m + B_{ym} \sin \alpha_m) \Delta l_m, \quad (8)$$

де  $\bar{B}, \bar{n}$  – вектор магнітної індукції та одиничний вектор (орт) нормалі до елементарної ділянки  $d\bar{l}$ , відповідно;  $w_{1(2)j}, \Phi_j$  – кількість витків відповідної обмотки, що належить області інтегрування та магнітний потік, що зчеплюється з цією областю;  $j = \overline{1, J}$  – кількість областей інтегрування;  $B_{xm}, B_{ym}$  – проекції вектора  $\bar{B}$  на осі координатної системи в околі ділянки інтегрування  $\Delta l_m$ ;  $\alpha_m$  – кут нахилу нормалі  $\bar{n}$  до додатного напрямку осі  $X$  системи координат;  $m = \overline{1, M}$  – кількість ділянок інтегрування;

Потокозчеплення вважають додатним, якщо знак скалярного добутку  $\bar{B} \bar{n}$  додатний і напрям нормалі  $\bar{n}$  збігається з додатним напрямом магнітного потоку.

Зв'язок між струмами  $i_1, i_2$  та відповідними векторами густин струмів встановлено формулою

$$i_{1(2)} = \int_S \bar{J} dS = \iint_S J_z[x, y] dx dy = \sum_{e=1}^E \frac{S^{[e]}}{K} \sum_{k=1}^K J_{zk}^{[e]}, \quad (9)$$

де  $e = \overline{1, E}$  – поточний номер скінченного елемента (СЕ);  $k = \overline{1, K}$  – поточний номер вузла СЕ;  $S^{[e]}$  – площа СЕ з номером  $[e]$ ;  $J_{zk}^{[e]}$  – вузлове значення  $z$ -проекції вектора густини струму.

Маючи поле вектора густини струму, втрати потужності в струмопровідних областях трансформатора знаходимо як

$$P_{ec} = \sigma^{-1} b \int_S |\vec{J}|^2 dS = \sigma^{-1} \sum_{e=1}^E \left( \frac{S^{[e]} b}{K} \sum_{k=1}^K |J_k|^2 \right), \quad (10)$$

де  $dS$  – площа елементарної області;  $S^{[e]} b$  – об'єм  $e$ -го СЕ площею  $S^{[e]}$  та довжиною  $b$ .

Розроблену модель застосовано для розрахунку номінального режиму трансформатора ІВН. Розміри його осердя  $280 \times 175 \times 85$  мм. Осердя виготовлено з електротехнічної сталі марки типу 2411 ГОСТ 21427.2-83. Первинна обмотка виконана з мідного провідника розмірами  $1,6 \times 5,0$  мм і має 180 витків, вторинна — з нержавійної сталі AISI 304.

Рівень дискретизації розрахункової області зображено на рис. 4.

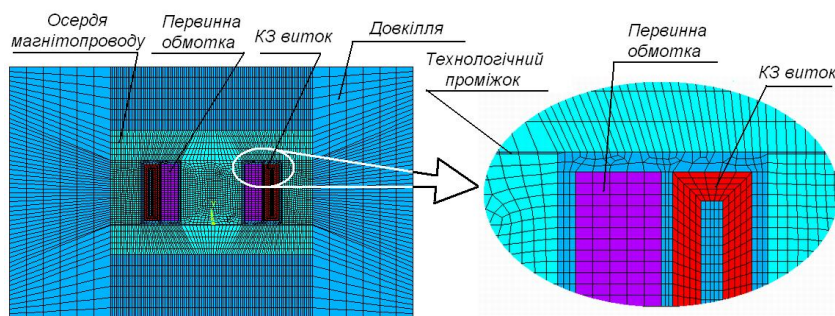
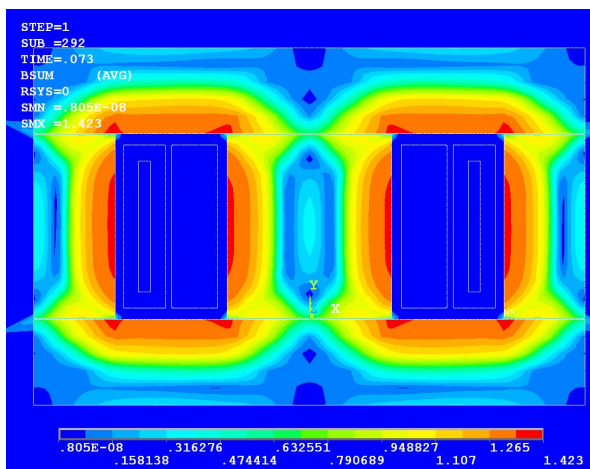


Рис. 1. Розрахункова область

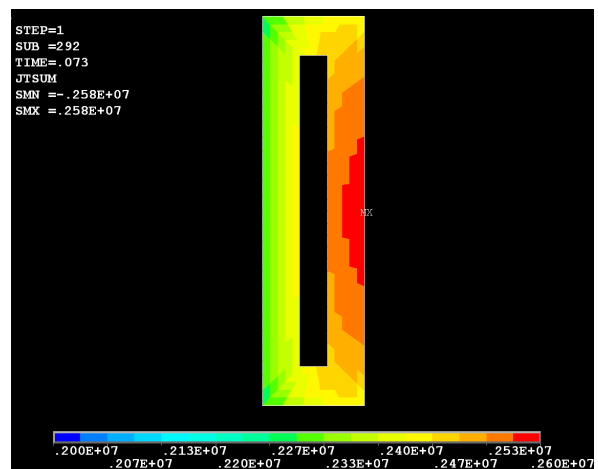
Результати обчислень у вигляді растрових зображень поля вектора магнітної індукції для моменту часу  $t = 0.073$  с, від початку перехідного процесу, показано на рис. 2, а, а розподіл модуля вектора густини струму – на рис. 2, б.

У таблиці порівняно розрахункові значення номінальних показників ІВН, отриманих на підставі розробленої методики первинного проектування та з використанням вищезгаданої математичної моделі.

Часові залежності напруги, струмів та потужностей показано на рис. 3.



а



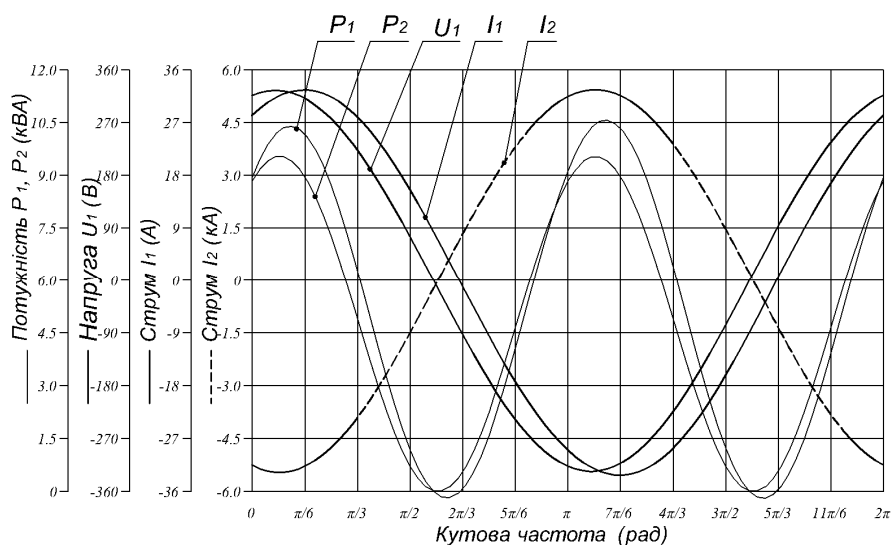
б

Рис. 2. Просторовий розподіл миттєвих значень:

а – модуля вектора магнітної індукції; б – модуля вектора густини струму

## Порівняння номінальних показників ІВН

Назва показника	Аналітична методика	FEM-аналіз	Розбіжність, %
напруга живлення, В	230		
частота напруги, Гц	50		
повна споживана потужність, ВА	4946	5261	5,9
коефіцієнт потужності	0,988	0,972	1,6
струм первинної обмотки, А	21,50	23,23	7,4
струм вторинної обмотки, А	3847	3852	0,13
корисна активна потужність, Вт	4759	4884	2,6
коефіцієнт корисної дії	0,974	0,955	2,0

Рис. 3. Залежності від  $\omega t$  напруги живлення, струмів та потужностей

## Висновки

Застосовуючи принцип безпосереднього нагрівання рідини втратами потужності у вторинній обмотці трансформатора, вдалося створити високонадійний ІВН. Можливість його автономної роботи, практично повна відсутність потреби у періодичному технічному обслуговуванні та невисока вартість виготовлення робить такий нагрівач конкурентноспроможним для застосування в складі систем опалення та гарячого водопостачання.

Запропоновані способи розрахунку параметрів заступної схеми дали змогу створити адекватну методику первинного проектування запропонованого ІВН.

Створена польова модель цього нагрівача враховує найважливіші чинники, що визначально впливають на перебіг процесів у ІВН у взаємозв'язку, а саме: двовимірний просторовий розподіл магнітного поля, насичення магнітопроводу, ефект витіснення струму у вторинному колі та втрати в осерді трансформатора.

Застосування розробленої методики проектування ІВН гарантує відповідність проекту вимогам технічного завдання й не потребуватиме виконання дороговартісних етапів виготовлення фізичних макетів та проведення їх експериментальних випробувань.

## Список літератури

1. Gustafson, M. W., Baylor J. S., Epstein G.: Direct water heater load control – estimating program effectiveness using an engineering model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1), 1993, pp. 137–143.
2. Goh C. H. K., Apt J. Consumer strategies for controlling electric water heaters under dynamic pricing. *Carnegie Mellon Electricity Industry Center, Pittsburgh, PA, Working Paper CEIC-04-02*, 2004, pp. 1–8.

3. Левишин Г. Е., Левишин А. Г. Индукционный электромагнитный нагреватель жидкостей. *Ползуновский вестник*, № 1, 2015, с. 26–30.
4. Хмелев В. Н., Барсуков Р. В., Ильченко, Е. В. Особенности проектирования водонагревателя индукционного типа. *Южно-Сибирский научный вестник*, № 2, 2014, с. 82–85.
5. Оболенский Н. В., Миронов Е.Б, Красиков С. Б. Результаты исследований по выявлению наиболее энергосберегающей конструкции электрического нагревателя воды // *Вестник ФГОУВПО “Московский государственный агроинженерный университет им. ВП Горячкина”*. 3(54), 2012, с. 27–29.
6. Кувалдин А. Б., Абдрашитов В. М. Разработка и опыт эксплуатации индукционных нагревателей жидкостей трансформаторного типа. *Промышленный электрообогрев и электроотопление*, № 1, 2012, с. 56–59.
7. US Pat. 4,563,571. Electric water heating device with decreased mineral scale. Koga R.; Takahashi Y. Matsushita Electric Industrial Company, Limited, Japan. 07.01.1986.
8. Boadi A., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10), 2005, pp. 4048–4050.
9. Healy W. M., Lutz J. D., Lekov A. B. Variability in Energy Factor Test Results for Residential Electric Water Heaters. *HVAC&R Research*, 9(4), 2003, pp. 435–449.

### References

1. Gustafson, M. W., Baylor J. S., Epstein G. Direct water heater load control – estimating program effectiveness using an engineering model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1), 1993, pp. 137–143.
2. Goh C. H. K., Apt J. Consumer strategies for controlling electric water heaters under dynamic pricing. *Carnegie Mellon Electricity Industry Center*, Pittsburgh, PA, Working Paper CEIC-04-02, 2004, pp. 1–8.
3. Levshin G. E., Levshin A. G. Indukcionnyj jelectromagnitnyj nagrevatel' zhidkostej. *Polzunovskij vestnik*, #1, 2015, s. 26–30.
4. Hmelev V. N., Barsukov R. V., Il'chenko, E. V. Osobennosti proektirovanija vodonagrevatelja indukcionnogo tipa. *Juzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*, #2, 2014, s. 82–85.
5. Obolenskij N. V., Mironov E. B., Krasikov S. B. Rezul'taty issledovanij po vyjaveniju naibolee jenergosberegajushhej konstrukcii jelektricheskogo nagrevatelja vody. *Vestnik FGOUVPO “Moskovskij gosudarstvennyj agroinzhenernyj universitet im. VP Gorjachkina”*. 3(54), 2012, s. 27–29.
6. Kuvaldin A. B., Abdrashitov V. M. Razrabotka i opyt jekspluatacii indukcionnyh nagrevatelej zhidkostej transformatornogo tipa. *Promyshlennyy jelektroobogrev i jelektrootoplenie*, #1, 2012, s. 56–59.
7. US Pat. 4,563,571. Electric water heating device with decreased mineral scale. Koga R.; Takahashi Y. Matsushita Electric Industrial Company, Limited, Japan. 07.01.1986.
8. Boadi A., Tsuchida Y., Todaka T., Enokizono M. Designing of suitable construction of high-frequency induction heating coil by using finite-element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 41(10), 2005, pp. 4048–4050.
9. Healy W. M., Lutz J. D., Lekov A. B. Variability in Energy Factor Test Results for Residential Electric Water Heaters. *HVAC&R Research*, 9(4), 2003, pp. 435–449.



**O. Makarchuk**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems  
oleksandr.v.makarchuk @ lpnu.ua

**B. Krokhmalnyi**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems  
krohbg@gmail.com

**V. Haiduk**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechatronics and Computerized Electromechanical Systems  
profcomlp@ukr.net

## **SPECIFICS DESIGNING INDUCTION WATER HEATER**

© Makarchuk O., Krokhmalnyi B., Haiduk V., 2020

The principle of action is being considered, design and features of the design process of the electric heater of the induction type fluid, which differs from the existing devices of similar purpose with high levels of reliability and protection against electric shock, good technical and economic indicators are considered.

The research methodology has developed a technique for designing an induction water heater of the original design and to check the accuracy of these methods. The research methods used to achieve this goal combine the advantages of analytical approaches and numerical simulation. Therefore, the design calculation and analysis of technical indicators are based on classical electrical engineering and theory of electric machines AC, and the refinement of design decisions related to the course of electromagnetic processes - using the finite element method.

The design algorithm developed includes a design synthesis step and a mathematical model for the calculation of dynamic electromagnetic processes in a heater. It takes into account the two-dimensional spatial distribution of the magnetic field, the saturation of the magnetic circuit and the loss from eddy currents in it, the effect of displacement of current in the heating element. This model is based on the Maxwell equations in a quasi-stationary approximation, and also contains a series of correlations that relate circular (integral) and field (distributed) indices. It can be attributed to the class of circle-field or combined models.

The article describes the design and an example of calculating an induction water heater with a power of 4.8 kW, the efficiency of which exceeds 95 %. The results of the calculation of the nominal values of this heater obtained using analytical methods and FEM analysis are compared.

The conducted researches give the right to state that the application of the proposed design methodology guarantees the compliance of the project with the requirements of the technical specification and will not require the implementation of costly stages of the manufacture of physical models and their experimental testing.

*Keywords: induction water heater, fluid heater, transformer with short circuit, surface effect, eddy currents, FEM analysis.*