

УДК 621.314+692:64

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.040719.99.469

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ РОЗШИРЕННЯ СФЕРИ ЗАСТОСУВАННЯ ІНДУКЦІЙНИХ ТЕПЛОАГРІВАЧІВ ДЛЯ ОПАЛЕННЯ ЖИТЛОВИХ І ЦИВІЛЬНИХ БУДІВЕЛЬ

ЧУПРИНА В. Л.¹, *інж.*,

КОТОВ Н. А.^{2*}, *к. т. н., доц.*,

ЗЕЗЮКОВ Д. М.³, *к. т. н., доц.*,

МАХІНЬКО М. М.⁴, *к. т. н., доц.*

¹ Кафедра автоматики і електротехніки, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна

^{2*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: kotokoto@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0233-0663

³ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: denis.zezjukov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

⁴ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: kolia2785@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5541-8672

Анотація. Постановка проблеми. Головний недолік використання газу в нашій країні – постійне зростання цін на нього, і будь-яких змін у бік зменшення вартості в ситуації, що склалася, не передбачається. Також до об'єктивних недоліків можна віднести високу вартість підключення до газової мережі, зменшення тиску газу за температур через його стиснення, низьку його якість і, як наслідок, низьку теплотвірну здатність. Альтернативою газу може виступати електричне опалення. Це один з найбільш екологічних і безпечних, а також зручних способів опалення приміщення. Наразі існує значна різноманітність пристроїв і устаткування: електричні котли різних типів; електроконвектори; електричні тепловентилятори; масляні радіатори. Всі вони поєднані загальним принципом нагрівання. На тепловидільний елемент, найчастіше це ТЕН, безпосередньо подається електричний струм, в результаті чого відбувається його розігрів. ТЕН (трубчастий електронагрівач) являє собою нагрівальний елемент у вигляді спіралі, яка поміщається в закриту трубку з жаростійкого матеріалу. Робоча температура оболонки ТЕН у середньому може досягати 450...500 °С. Істотний недолік такого способу отримання тепла – значні витрати електроенергії на нагрів ТЕНа. Інший, набагато ефективніший спосіб – це індукційне нагрівання – полягає в нагріванні струмопровідних тіл (тонкостінних труб) за рахунок збудження в них електричних струмів змінним електромагнітним полем. **Мета статті** – обґрунтування доцільності розширення сфери застосування індукційних нагрівачів для опалення житлових та громадських будівель.

Ключові слова: індукційне нагрівання; первинна обмотка; короткозамкнений виток; закон трансформації; тепло, що виділяється

ОБОСНОВАНИЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ РАСШИРЕНИЯ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКЦИОННЫХ ТЕПЛОАГРЕВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ И ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

ЧУПРИНА В. Л.¹, *инж.*,

КОТОВ Н. А.^{2*}, *к. т. н., доц.*,

ЗЕЗЮКОВ Д. М.³, *к. т. н., доц.*,

МАХИНЬКО М. М.⁴, *к. т. н., доц.*

¹ Кафедра автоматики и электротехники, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина

^{2*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепро, Украина, e-mail: kotokoto@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0233-0663

³ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: denis.zezjukov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

⁴ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского 24-а, 49600, Днепро, Украина, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: kolia2785@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5541-8672

Аннотация. Постановка проблемы. Главным недостатком использования газа в нашей стране является постоянный рост цен на него, и какого-либо изменения в сторону уменьшения стоимости в сложившейся ситуации не предвидится. Также к уже объективным недостаткам можно отнести высокую стоимость подключения к газовой сети, уменьшение давления газа при отрицательных температурах в силу его сжатия, низкое его качество и, как следствие, низкую теплопроводную способность. Альтернативой газу может выступать электрическое отопление. Оно является одним из самых экологичных и безопасных, а также удобных способов обогрева помещения. В настоящее время имеется значительное разнообразие устройств и оборудования: электрические котлы разных типов; электроконвекторы; электрические тепловентиляторы; масляные радиаторы. Все имеют общий принцип нагрева. На тепловыделяющий элемент, чаще всего это ТЭН, непосредственно подается электрический ток, в результате чего происходит его разогрев. ТЭН (трубчатый электронагреватель) представляет собой нагревательный элемент в виде спирали, которая помещается в закрытую трубку из жаростойкого материала. Рабочая температура оболочки в среднем может достигать 450...500 °С. Существенным недостатком такого способа получения тепла является значительные затраты электроэнергии на нагрев ТЭНа, но при этом контакт с теплоносителем имеет только малая площадь его поверхности. Другим намного более эффективным способом является индукционный нагрев. Он заключается в нагреве токопроводящих тел (тонкостенных труб) за счёт возбуждения в них электрических токов переменным электромагнитным полем. **Цель статьи** – обоснование целесообразности расширения области применения индукционных нагревателей для отопления жилых и общественных зданий.

Ключевые слова: индукционный нагрев; первичная обмотка; короткозамкнутый виток; закон трансформации; выделяемое тепло

SUBSTANTIATION OF REASONABILITY OF THE EXTENSION OF THE SCOPE OF APPLICATION OF THE INDUCTIVE HEATERS FOR HEATING THE RESIDENTIAL AND CIVIL BUILDINGS

CHUPRYNA V.L.¹, *Eng.*,

KOTOV M.A.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,

ZEZIUKOV D.M.³, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,

MAKHINKO M.M.⁴, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*

¹ Department of Automation and Electrical Engineering, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine

^{2*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: kotokoto@i.ua, ORCID ID: 0000-0003-0233-0663

³ Department of Reinforced Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., Dnipro, 49600, Ukraine, +38 (0562) 47-03-19, e-mail: denis.zeziukov@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0001-7451-992X

⁴ Department of Reinforced Concrete and Masonry Constructions, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-A, Chernyshevskoho St., 49600, Dnipro, Ukraine+38 (0562) 47-03-19, e-mail: kolia2785@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-5541-8672

Abstract. Problem statement. When referencing heating, most people immediately imagine bulky boilers, a significant amount of complex bound pipes, massive radiators and so on, which is typical for a heating system that runs directly on fossil fuels. The main disadvantage of using gas in our country is the constant price increase for it, and in the current situation, any changes towards the reduction of cost are not expected. It is also possible to include the high cost of gas network connection to the objective disadvantages, reducing the gas pressure at negative temperatures due to its compression, its low quality and, as a consequence, low heating value. Electric heating can be used as an alternative to gas. It is one of the most environmentally friendly as well as convenient ways to heat the space. Currently, there is a significant variety of devices and equipment such as electric boilers of various types; electric convector heaters; electric fan heaters; oil coolers. All of them are combined by the common principle of heating. An electric current is directly sent to a fuel element, most often it is a tubular electric heater, as a result of which it is heated. ТЕН (tubular electric heater) is a heating element in the form of a heating coil, which is placed in a closed tube of a heat-resistant material. The operating temperature of a tubular electric heater cover on average can reach 450...500 °С. An essential disadvantage of such a method of obtaining heat is the considerable expenses of the electric power spent for heating the tubular electric heater, but at the same time only the small surface area of tubular electric heater has contact with the heat carrier. Another much more effective way of electric heating is induction heating. It consists in heating conductive

bodies (fine pipes) due to the excitation of electric currents in them by an alternating electromagnetic field. *The purpose* of the article is to substantiate the extension of the scope of the application of the inductive heaters for heating residential and civil buildings.

Keywords: induction heating; primary winding; short-circuited coil; transformation law; released heat

Індукційне нагрівання – це безконтактне нагрівання електропровідних матеріалів енергією змінного магнітного поля, індукує електричні струми. Принципи роботи індукційного нагрівання були сформульовані в 1831 році з відкриттям електромагнітної індукції.

Теплова дія індукційного струму була успішно впроваджена в 1900 році на підприємстві «Benedicks Bulttabrik» (Швеція) в індукційній печі для виплавки сталі. Піч живилась від однофазного трансформатора, вторинною обмоткою якого є тигель, який являє собою короткозамкнене кільце.

Такий спосіб виплавки сталі застосовується донині в деяких виробництвах для печей великої ємкості [1–3].

В основу індукційного нагрівання покладено принцип взаємної індукції, який ефективно використовується в роботі трансформатора.

Розглянемо конструкцію для нагрівання теплоносія, яка являє собою класичний трансформатор (рис. 1). Первинна обмотка має N_1 витків та тепловий реактор (вторинна обмотка, яка має N_2 короткозамкнених витків), розташований на замкненому осерді [5; 6].

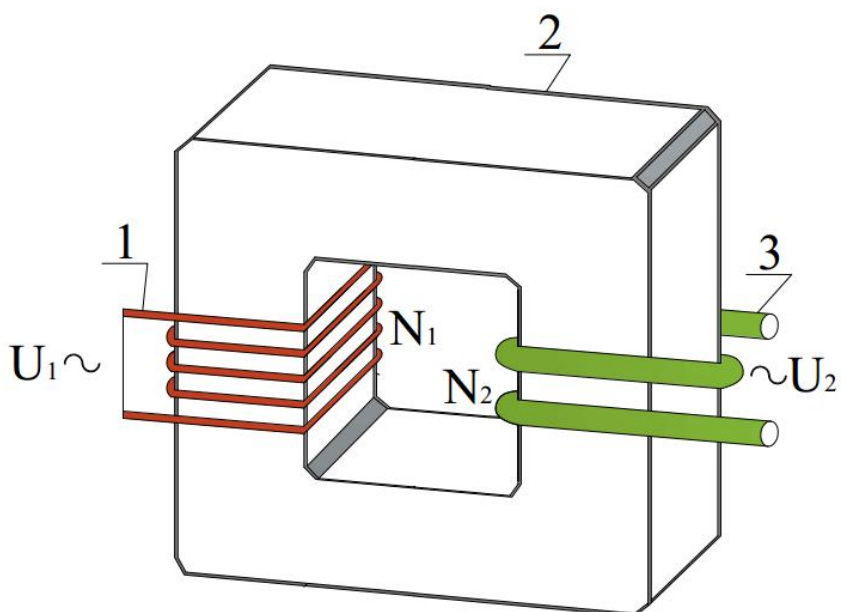


Рис. 2. Загальний принцип пристрою реактора, де: 1 – первинна обмотка; 2 – магнітопровід; 3 – вторинна обмотка (тонкостінний металевий елемент) / Fig. 2. General principle of reactor device, where: 1 – primary winding; 2 – magnetron; 3 – secondary winding (thin-walled metallic element)

Оскільки кінці первинної обмотки підключені до джерела змінної напруги з ЕДС E_1 , в ній виникає змінний струм I_1 , який створює в осерді трансформатора змінний магнітний потік Φ_1 , котрий повністю пронизує короткозамкнений виток реактора. Зміна цього потоку у короткозамкненому витку викликає ЕДС взаємної

індукції, а в первинній обмотці – ЕДС самоіндукції.

Для первинної обмотки згідно з другим правилом Кірхгофа та законом Ома випливає:

$$E_1 - \frac{d}{dt}(N_1 \Phi) = I_1 R_1,$$

де R_1 – опір первинної обмотки.

Зниження напруги $I_1 \cdot R_1$ на опорі R_1 незначне, тому:

$$E_1 \approx N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Із цього випливає, що витрати енергії для створення магнітного поля досить незначні. ЕДС взаємної індукції, де виникає в короткозамкненому витку реактора, описується залежністю:

$$E_2 = - \frac{d(N_2\Phi)}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt}$$

Знак мінус показує, що ЕДС у первинній обмотці та короткозамкненому витку протилежні за фазою. При цьому в короткозамкненому витку індукується ЕДС $E_{кз}$ і виникає струм $I_{кз}$, зсунутий відносно $E_{кз}$ на кут $\varphi = 0$, що визначається досить незначною індуктивністю витка. Струм $I_{кз}$ збуджує магнітний потік Φ_2 , який охоплює короткозамкнутий виток і зсуває в часі відносно до основного магнітного потоку, при цьому дещо зменшується вплив взаємоіндукції в часі (рис. 2).

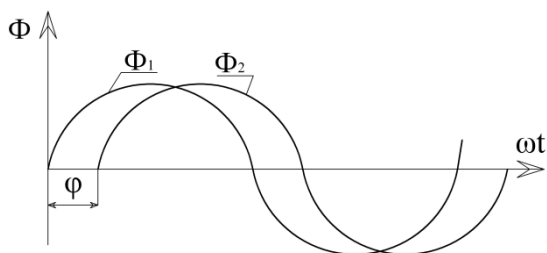


Рис. 2. Принцип дії короткозамкненого витка в електромагнітних системах змінного струму / Fig. 2. The principle of work of short-circuited circle in electromagnetic systems of an alternating current

За законом трансформатора, відношення числа витків N_2/N_1 має назву «коефіцієнт трансформації», потужність струму в обох обмотках практично однакова:

$$E_2 I_2 \approx E_1 I_1$$

Звідкі випливає:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1};$$

$$I_2^{кз} = \frac{I_1 \cdot N_1}{1} = I_1 \cdot N_1$$

Тоді із закону Джоуля–Ленца теплотворність струму можна розглядати як:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t,$$

де I – струм короткозамкненого витка; R – опір коротко замкненого витка.

Короткозамкнений виток реактора виконаний з електропровідного матеріалу і має спеціальну геометричну форму, що забезпечує оптимальну величину опору.

Розглядаючи окремий випадок на прикладі трансформатора потужністю 1 кВАр (кіловар – одиниця вимірювання реактивної потужності), можна виконати розрахунок отриманого тепла Q , виділеного за допомогою феромагнітного перетворювача струму. Повна потужність перетворювача – 1 кВАр. Активна потужність визначається за формулою:

$$P = S \cdot \cos\varphi = 1 \cdot 0,8 = 0,8 \text{ кВт},$$

де P – активна потужність, кВт; S – повна потужність, кВАр; $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

Із закону трансформації на теплообміннику реактора можливо отримати струм до 800 А, виходячи з того, що режим роботи первинної обмотки буде певним, потрібно виконати розрахунок геометричної форми короткозамкненого витка на 25 % менше, тобто струм дорівнює 600 А. За законом Джоуля–Ленца виконуємо розрахунок тепла, що виділяє короткозамкнений виток:

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t = 600^2 \cdot 0,02 \cdot 3600 = 26 \text{ МДж}$$

За незначних затрат, у первинній мережі 0,8 кВт з'являється можливість отримати більш значну кількість тепла, особливо порівняно із класичними активними нагрівальними елементами (ТЕН):

$$Q = U \cdot I \cdot t = 800 \cdot 3600 = 2,88 \text{ МДж}$$

Висновки. Застосування методу індукційного нагрівання в установках для опалення приміщень набагато більш економічне порівняно з іншими методами електричного опалення, а саме:

- 1) значно менші затрати електроенергії на нагрівання теплоносія;
- 2) значна швидкість нагрівання теплоносія, залежно від конфігурації реактора, час, витрачений на нагрівання складає від 4 до 8 секунд;
- 3) значно більший вихід тепла, різниця з традиційними методами складає 88,92 %;

4) компактність, екологічність та безпечність використання реактора.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Растворова И. И. Оптимальное проектирование индукционных нагревателей с использованием численных моделей / И. И. Растворова, В. Б. Демидович, Ф. В. Чмиленко, Е. Г. Григорьев // Индукционный нагрев. – 2011. – № 15. – С. 4–7.
2. Растворова И. И. Энергоэффективный индукционный нагрев алюминиевых заготовок перед прессованием / И. И. Растворова, В. С. Немков, В. Б. Демидович, Ф. В. Чмиленко, П. А. Ситько // Индукционный нагрев. – 2012. – № 21. – С. 4–10.
3. Batygin Yu. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals / Yu.V. Batygin, S. F. Golovashchenko, A. V. Gnatov // Journal of Materials Processing Technology / Elsevier. – 2014. – Vol. 214. – № 2. – Pp. 390–401.
4. Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України : монографія / [М. П. Ковалько, М. П. Денисюк]. – Київ : УЕЗ, 1998. – 506 с.
5. Білий Л. А. Нові напрямки конструювання трансформаторів / Л. А. Білий, Я. В. Ковівчак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – 2014. – № 785. – С. 106–113. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPEEC_2014_785_20
6. Пуйло Г. В. Энергоэффективные силовые трансформаторы / Г. В. Пуйло, Е. П. Насыпаная // Электротехнічні та комп'ютерні системи. – 2016. – № 22. – С. 144–149. – Режим доступу : http://nbuv.gov.ua/UJRN/etks_2016_22_27

REFERENCES

1. Rastvorova I.I., Demidovich V.B., Chmilenko F.V. and Grigorev E.G. *Optimalnoe proektirovanie indukcionnyh nagrevatelej s ispolzovaniem chislennyh modelej* [Optimal design of induction heaters using numerical models]. *Indukcionnyj nagrev* [Induction heating], 2011, no. 15, pp. 4–7. (in Russian).
2. Rastvorova I.I., Nemkov B.C., Demidovich V.B., Chmilenko F.V. and Sitko P.A. *Energoeffektivnyj indukcionnyj nagrev alyuminiemyh zagotovok pered pressovaniem* [Energy-efficient induction heating of aluminum blanks before compression]. *Indukcionnyj nagrev* [Induction heating]. 2012, no. 21, pp. 4–10. (in Russian).
3. Batygin Yu.V., Golovashchenko S.F. and Gnatov A.V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals // *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier. 2014, vol. 214, no. 2, pp. 390–401.
4. Kovalko M.P. and Denisyuk M.P. *Energozberzhennya – prioritetnij napryamok derzhavnoi politiki Ukraini* [Energy saving is a priority direction of the state policy of Ukraine]. Kyiv : UEZ, 1998, 506 p. (in Ukrainian).
5. Bilij L.A. and Kovivchak Ya. V. *Novi napryamki konstruyuvannya transformatoriv* [New directions for constructing transformers]. *Visnik Nacional'nogo universitetu "Lvivska politehnika". Elektroenergetichni ta elektromehanichni sistemi* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Electric power and electromechanical systems.]. 2014, no. 785, pp. 106–113. (in Ukrainian).
6. Pujlo G.V. and Nasypanaya E.P. *Energo effektivnye silovye transformatory* [Energy efficient power transformers]. *Elektrotehnichni ta kompyuterni sistemi* [Electrotechnical and computer systems]. 2016, no. 22, pp. 144–149. (in Russian).

Надійшла до редакції: 13.05.2019 р.