

ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.35.035

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.66.090>

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВТРАТИ В МЕТАЛЕВИХ КАРКАСАХ ІНДУКЦІЙНИХ КАНАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ

Ю.М. Гориславець*, докт. техн. наук, **О.І. Глухенький****, канд. техн. наук,**В.І. Залозний**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна

e-mail: ugoris@ied.org.ua

На основі математичного моделювання електромагнітних процесів визначено електричні втрати в металевих каркасах двоіндукторної індукційної каналної печі в широкому діапазоні питомої електропровідності немагнітного матеріалу каркасів. Дослідження проводилися для двох варіантів секціонування нижнього каркасу печі (вертикального й горизонтального) та двох значень фазового кута між напругами на індукторах (0 і 180 ел. град.). Для цих випадків розраховано також втрати в каркасах печі, виготовлених із феромагнітного матеріалу (конструкційної вуглецевої сталі та магнітної нержавійної сталі). Представлено рекомендації щодо вибору матеріалу каркасів, варіанту секціонування та фазового кута між напругами, які забезпечують мінімальні електричні втрати. Бібл. 13, рис. 4.

Ключові слова: індукційна канална піч, металеві каркаси, математичне моделювання, електричні втрати.

Вступ. Індукційні каналні печі зазвичай мають високий ККД використання електроенергії і тому набули широкого застосування в металургії та ливарному виробництві. Особливо це стосується кольорової металургії, де вони зазвичай використовуються для плавлення міді й приготування сплавів на її основі (латуней, бронз та ін.) [1]. Відомо роботи, які спрямовані на подальше підвищення ефективності таких печей як завдяки інтенсифікації процесів тепло- й масообміну в них [2 – 4], так і зменшенню втрат енергії в окремих їхніх елементах. До числа останніх можна віднести роботу [5], в якій зроблено спробу зменшення втрат електричної енергії в металевих каркасах (кожухах) печі. У цій роботі описано конструктивну будову й принцип дії індукційної каналної печі, сформульовано математичну модель для дослідження електромагнітних процесів у ній з урахуванням зазначених каркасів, виготовлених із немагнітного матеріалу. Модель реалізовано в програмному середовищі COMSOL Multiphysics [6] для двофазної (двоіндукторної) печі типу ІЛК-1,2, яка широко використовується на підприємствах обробки кольорових металів країн колишнього Радянського Союзу.

Конструктивно така піч складається з двох частин – з облицьованої жароміцною цеглою ванни, в якій знаходиться основна маса розплаву, та індукційного каналного блока (індукційної одиниці), що знаходиться під ванною. Індукційний блок цієї печі має у своєму складі два індуктори із замкнутими феромагнітними осердями (магнітопроводами), які живляться в загальному випадку різними за фазами напругами, та два індукційні канали з рідким металом, в яких наводиться електричний струм, що гріє метал.

Індукційний каналний блок і ванна печі футеруються теплоізоляційними жаротривкими матеріалами, які знаходяться в металевих каркасах. Оскільки ці каркаси, насамперед каркас індукційного блока (нижній каркас печі), знаходяться в зоні дії магнітного поля розсіювання індукторів, у них наводяться вихрові струми, які призводять до виникнення додаткових втрат, що знижують ККД печі. Для зменшення цих струмів у каркасі індукційного блока роблять «розрізи», складаючи його з декількох електрично ізольованих один від одного секцій. Зазвичай у каркасі індукційного блока двоіндукторної печі роблять один горизон-



тальний «розріз», що проходить через осі обох індукторів, або два вертикальних «розрізи», які проходять через осі кожного індуктора (рис. 1). На рис. 1 зазначені «розрізи» позначено червоним кольором. Таким чином, у першому випадку нижній каркас печі складається з двох ізолюваних секцій, у другому – з трьох. Верхній і нижній каркаси здебільшого з'єднуються між собою болтами без електричної ізоляції.

Слід зазначити, що в печах типу ІЛК, які можуть бути одноіндукторними (однофазними), двоіндукторними (двофазними) і триіндукторними (трифазними), індукційні блоки мають здебільшого вертикальні «розрізи» (рис. 1 б), а в печах західного виробництва [7] блоки зазвичай виконуються з горизонтальними «розрізами» (рис. 1 а). Прикладом останнього виконання є плавильно-роздавальні печі, які використовуються в технології безперервного вертикального лиття (витягування вверх) мідної заготовки (катанки) для отримання надалі з неї провідників (дроту) для кабельної продукції [8].

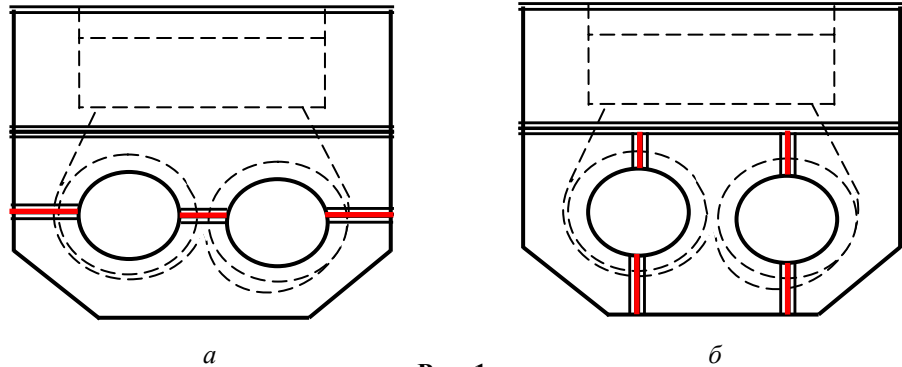


Рис. 1

У роботі [5] для кожного варіанта секціонування розраховано електричні втрати в металевих каркасах печі, виготовлених із нержавійної немагнітної сталі типу Х18Н10Т для чотирьох значень фазового кута між напругами, що живлять індуктори печі, а саме $\psi = 0, 60, 120$ і 180 ел. град. Визначено вплив цього кута на розподіл питомих та інтегральних втрат у каркасах. Показано, що для печей, які живляться від системи напруги з малими фазовими кутами між напругами на індукторах (у межах $\psi = 0 \dots 60$ ел. град.), каркас індукційного блока слід виконувати з двома вертикальними «розрізами», що проходять через осі індукторів (рис. 1 б).

Крім нержавійної немагнітної сталі металеві каркаси печі можуть виготовлятися також із інших матеріалів. Найбільш поширеним матеріалом є конструкційна вуглецева сталь, відомі випадки виготовлення каркасів із бронзи. Діапазон електрофізичних властивостей (питомої електропровідності та відносної магнітної проникності) всіх цих матеріалів достатньо широкий. Тож видається доцільним з'ясувати як ці властивості впливають на електричні втрати в каркасах печі.

Метою цієї роботи є визначення електричних втрат у металевих каркасах індукційної каналної печі залежно від матеріалу каркасів.

Постановка задачі дослідження. Вирішення цієї задачі здійснювалося шляхом чисельного моделювання електромагнітних процесів в індукційній каналній печі на основі математичної моделі, представленій в роботі [5], яка враховує металеві каркаси печі, виготовлені з немагнітного матеріалу. У випадку каркасів із феромагнітного матеріалу необхідно враховувати його нелінійні магнітні властивості. Відомо численні наукові праці з цього приводу, наприклад [9, 10], в яких розглянуто підходи до моделювання таких матеріалів.

У зазначеній математичній моделі в розрахунковій області каркасів для цього випадку рівняння для векторного магнітного потенціалу $\vec{A}$ може бути представлено як

$$j\omega\sigma_{Fr}\vec{A} + \nabla \times ((\mu_0\mu_{eff}(H))^{-1} \nabla \times \vec{A}) = 0,$$

де σ_{Fr} – питома електропровідність матеріалу каркасів печі, $\mu_{eff}(H)$ – залежна від напруженості магнітного поля відносна ефективна магнітна проникність феромагнітного матеріалу. Ця залежність у розрахунках представлялась нелінійною кривою намагніченості $B_{eff}(H)$, яка зі свого боку відповідно до усередненого енергетичного методу ("Average energy method" [11]) є апроксимацією основної залежності $B(H)$ феромагнітного матеріалу. Використання ефективної кривої намагніченості дає змогу, не вдаючись до розрахунків нестационарних

процесів, які необхідні для врахування нелінійності матеріалу та потребують великих технічних ресурсів, з достатньою точністю обчислювати електромагнітне поле для систем з нелінійним феромагнітним матеріалом у частотній області.

Вихідні дані для моделювання печі приймалися такими, як і в попередній роботі [5]. Тобто розглядалася двофазна індукційна канална піч типу ІЛК-1,2. Рідкий метал у печі – розплавлена мідь з питомою електропровідністю $\sigma = 4,5 \cdot 10^6$ См/м. Поперечний переріз індукційних каналів на більшій їхній частині за довжиною складає (105×26) мм². Число витків кожного індуктора – $w = 45$, товщина стінок металевих каркасів – 10 мм. Моделювання електромагнітного поля печі проводилося за заданої напруги на індукторах $U_1 = U_2 = 500$ В (ефективне значення) частотою 50 Гц для двох значень фазового кута $\psi = 0$ і $\psi = 180$ ел.град. між ними.

Дослідження проводилося в широкому діапазоні значень питомої електропровідності немагнітного матеріалу каркасів (від нуля до $6 \cdot 10^7$ См/м, яка відповідає електропровідності міді), а також для феромагнітного матеріалу (вуглецевої конструкційної сталі й магнітної нержавійної сталі). У цей діапазон входять питомі електропровідності всіх відомих магнітних і немагнітних нержавійних сталей (від $0,07 \cdot 10^7$ См/м до $2,2 \cdot 10^7$ См/м), конструкційної вуглецевої сталі ($1,12 \cdot 10^7$ См/м) та бронз із різним хімічним складом (від $0,6 \cdot 10^7$ См/м до $5,4 \cdot 10^7$ См/м). Що стосується бронзи, то за даними [12] найменшу електропровідність (10 ... 15 % від електропровідності міді) мають олов'яна бронза з добавкою фосфору Бр.ОФ6,5-0,15 і берилієва бронза Бр.Б2, а найбільша електропровідність (~90 % від провідності міді) – у кадмієвої бронзи Бр.Кд1.

Ураховуючи геометричну симетрію печі відносно вертикальної площини, що проходить посередині печі перпендикулярно осям обох індукторів, а також геометричну й польову симетрію її відносно вертикальної площини, що проходить між двома індукторами у випадку живлення печі від системи напруг з фазовими кутами $\psi = 0$ і $\psi = 180$ ел. град., моделювання електромагнітних процесів у ній виконувалося для однієї четвертої частини печі. Вибір граничних умов у цих площинах симетрії проводився так.

У разі живлення печі напругами, що мають фазовий кут зсуву між собою $\psi = 0$, індукований у вторинній системі печі (у рідкому металі каналів та в металевому каркасі печі) струм охоплює обидва індуктори (див. рис. 2 а), а отже, в площині симетрії "а – а" виконується умова з густини індукovanого струму:

$$J_{1n} = J_{2n}, \quad \text{а} \quad J_{1\tau} = J_{2\tau} = 0.$$

Цю умову математично може забезпечити гранична умова $\mathbf{n} \times \mathbf{A} = 0$, яка отримала назву "Магнітна ізоляція" (Magnetic Insulation) [13]. Вона представляє дзеркальну площину симетрії для магнітного поля і передбачає, що магнітне поле на границі може мати тільки тангенціальну складову, а струм протікає лише в нормальному напрямку, тобто тангенціальний векторний потенціал і тангенціальне електричне поле на ній приймають нульове значення.

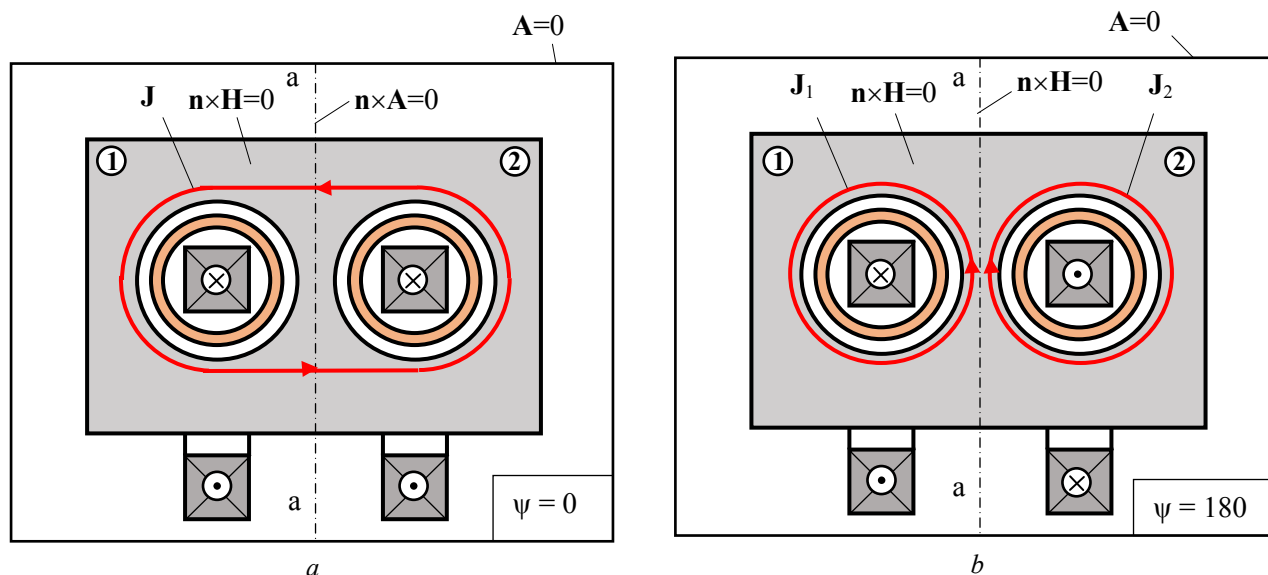


Рис. 2

У площині симетрії, що проходить посередині печі перпендикулярно осям обох індукторів, прийнята гранична умова "Ідеальний магнітний провідник" (Perfect Magnetic Conductor) $\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$ [13], яка представляє дзеркальну площину симетрії для струму. З математичного погляду її можна розглядати як протилежність граничної умови магнітної ізоляції. Вона передбачає, що магнітне поле на границі має тільки нормальну складову, а струм – тангенціальну.

У разі живлення печі напругами з кутом $\psi = 180$ ел. град. індуквані у вторинній системі печі струми охоплюють кожний свій індуктор (рис. 2 б), а отже в площині "а – а" виконується умова:

$$J_{1\tau} = J_{2\tau}, \quad \text{а} \quad J_{1n} = J_{2n} = 0.$$

Цю умову, як було зазначено вище, математично може забезпечити гранична умова $\mathbf{n} \times \mathbf{H} = 0$. Виходячи з цього, на обох внутрішніх границях печі у випадку такого живлення приймалася гранична умова ідеального магнітного провідника.

На всіх зовнішніх поверхнях розрахункової області в обох випадках живлення приймалася гранична умова $\mathbf{A} = 0$.

У разі значень фазового кута, відмінних від 0 і 180 ел. град., одна частина індукваного струму охоплює обидва індуктори, а інші – кожна свій індуктор. Співвідношення між цими частинами струму залежить від кута ψ . Звісно, у цих випадках польова симетрія у площині "а – а" відсутня.

На рис. 3 показано розрахункову сітку моделі печі. Її особливість – наявність загушення в області металевих каркасів, яка дає змогу коректно розрахувати поле за малих товщин скін-шару, властивих феромагнітному матеріалу та немагнітному матеріалу з високою електропровідністю. В області каркаса розрахункова сітка має вздовж стінок по чотири приграничні шари (boundary layers) товщиною 0,5 мм кожний, що приблизно дорівнює половині глибини проникнення електромагнітного поля для матеріалу з самим тонким скін-шаром (для феромагнітної вуглецевої сталі).

Результати моделювання. На рис. 4 наведено результати моделювання у вигляді відносних електричних втрат у металевих каркасах печі $P_{Fr}^* = P_{Fr}/P_m$ (P_{Fr} – втрати в каркасах, P_m – потужність тепловиділення в рідкому металі печі) залежно від питомої електропровідності матеріалу каркасів. На рис. 4 а і залежності показано в діапазоні питомої електропровідності від нуля до $\sigma_{Fr} = 6 \cdot 10^7$ См/м, а на рис. 4 б (для більшої наочності) вони наведені у вужчому діапазоні – від нуля до $\sigma_{Fr} = 2,2 \cdot 10^7$ См/м. На цих рисунках криві 1 відносяться до випадку вертикальних «розрізів» нижнього каркаса і фазового кута $\psi = 0$ (синій колір), криві 2 – для горизонтального «розрізу» і $\psi = 0$ (сірий колір), криві 3 – для вертикальних «розрізів» і $\psi = 180$ ел. град. (червоний колір) та криві 4 – для горизонтального «розрізу» і $\psi = 180$ ел. град. (жовтий колір). Усі зображені на цих рисунках криві отримано для немагнітного матеріалу, тобто за відносної магнітної проникності $\mu_{Fr} = 1$.

Як випливає з цього рисунка, в усьому діапазоні питомої електропровідності матеріалу електричні втрати в металевих немагнітних каркасах печі в обох випадках секціонування суттєво менші за фазового кута $\psi = 180$ ел. град. Порівнюючи між собою варіанти секціонування, слід звернути увагу на те, що для обох значень кута ψ у діапазоні питомої електропровідності від нуля до $\sigma_{Fr} \cong 0,3 \cdot 10^7$ См/м менші втрати в каркасах виникають за вертикальних

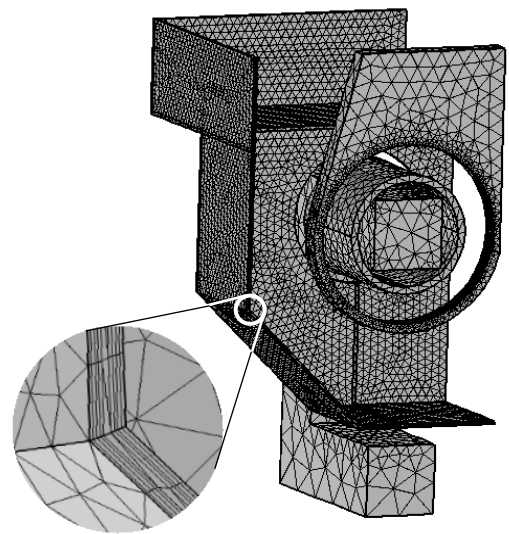


Рис. 3

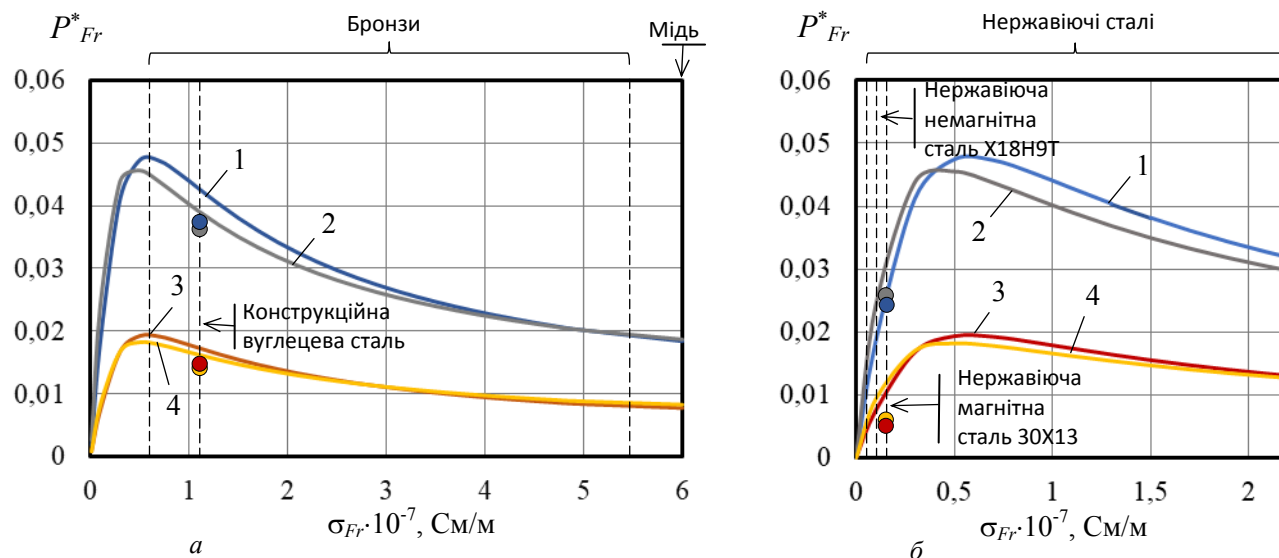


Рис. 4

«розрізів». Ці дані співпадають з тими, що отримані раніше в роботі [5] для моделювання каркасів печі, виготовлених із нержавійної немагнітної сталі. У діапазоні $\sigma_{Fr} = (0,3 \dots 4) \cdot 10^7$ См/м менші втрати забезпечує горизонтальний «розріз», а в разі подальшого збільшення електропровідності втрати в каркасах приблизно однакові для обох варіантів секціонування нижнього каркасу.

На рис. 4 точками відповідного розглянутим варіантам «розрізів» та фазових кутів колюру позначено також результати моделювання печі з каркасами, виготовленими з феромагнітного матеріалу: конструкційної вуглецевої сталі ($\sigma_{Fr} = 1,12 \cdot 10^7$ См/м) і нержавійної магнітної сталі 30X13 ($\sigma_{Fr} = 0,17 \cdot 10^7$ См/м). Очевидно, що за однакової електропровідності електричні втрати в обох феромагнітних каркасах печі менші втрат у каркасах, виготовлених із немагнітного матеріалу.

Висновки. Для зменшення електричних втрат у металевих каркасах двоіндукторних індукційних каналних печей їх варто виготовляти із нержавійної сталі з вертикальними «розрізами» нижнього каркасу (перевагу бажано надавати магнітним нержавійним сталям) або із бронзи з високою питомою електропровідністю за будь-якого секціонування зазначеного каркасу. Бажано, щоб електроживлення такої печі забезпечило фазовий кут між напруженнями на індукторах у 180 ел. град.

Фінансується за кошти держбюджетної теми "Розробити методи та засоби підвищення ефективності та надійності індукційних установок електротермічної обробки металевих розплавів і деталей складної форми" (Елінд-П). Державний реєстраційний номер роботи 0122U000534. КПКВК 6541030.

1. <https://www.otto-junker.com/en/products-technologies/furnaces-plants-for-copper-and-copper-based-alloys/foundry/channel-type-induction-furnaces-for-melting/> (Accessed: 15.05.2023)
2. Kirpo M., Jakovičs A., Nacke B., Baake E., Langejürgen M. LES of Heat and Mass Exchange in Induction Channel Furnaces. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. R. 84. No 11. Pp. 154–158.
3. Бояревич В.В., Фрейберг Я.Ж., Шилова Е.И., Щербинин Э.В. Электровихревые течения. Рига: Зинатне, 1985. 315 с.
4. Бондар О.І., Гориславець Ю.М., Жаркін А.Ф. Інтенсифікація тепло-масообміну в індукційних каналних печах. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.049>
5. Гориславець Ю.М., Глухенький О.І., Залозний В.І. Моделювання електромагнітних процесів в індукційних каналних печах з урахуванням металевих каркасів. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2023. Вип. 64. С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.064>
6. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com/> (Accessed: 15.05.2023)
7. ABP Induction Systems GmbH. <https://abpinduction.com/en/> (Accessed: 15.05.2023)
8. <https://www.upcast.com/> (Accessed: 15.05.2023)
9. Fisk M., Ristinmaa M., Hultkrantz A., Lindgren L.-E. Coupled electromagnetic-thermal solution strategy for induction heating of ferromagnetic materials. *Applied Mathematical Modelling*. November 2022. Vol. 111.

- Pp. 818–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.07.009>
10. Siesing L., Frogner K., Cedell T., Andersson M. Investigation of Thermal Losses in a Soft Magnetic Composite Using Multiphysics Modelling and Coupled Material Properties in an Induction Heating Cell. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. September 2016. Vol. 8. No 9. Pp. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2016.89018>
 11. <https://www.comsol.ru/release/5.2> (Accessed: 15.05.2023)
 12. Адашкин А.М., Зуев В.М. Материаловедение (металлообработка): учебное пособие. М.: Издательский центр "Академия". 2013. 288 с.
 13. <https://www.comsol.com/blogs/exploiting-symmetry-simplify-magnetic-field-modeling/> (Accessed: 15.05.2023)

INFLUENCE OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF MATERIALS ON ELECTRICAL LOSSES IN METAL FRAMES OF INDUCTION CHANNEL FURNACES

Yu.M. Goryslavets, O.I. Glukhenkyi, V.I. Zaloznyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Beresteiskiy ave., 56, Kyiv, 03057, Ukraine

e-mail: ugoris@ied.org.ua

On the basis of mathematical modelling of electromagnetic processes, electrical losses in the metal frames of the two-inductor induction channel furnace in a wide range of specific electrical conductivity of the non-magnetic material of the frames were determined. Research was conducted for two options for sectioning the lower frame of the furnace (vertical and horizontal) and two values of the phase angle between the voltages on the inductors (0 and 180 electrical degrees). For these cases, losses in furnace frames made of ferromagnetic material (construction carbon steel and magnetic stainless steel) were also calculated. Recommendations are presented on the selection of the frame material, the sectioning option and the phase angle between the voltages, which ensure minimal electrical losses. Ref. 13, fig. 4.

Key words: induction channel furnace, metal frames, mathematical modelling, electrical losses.

1. <https://www.otto-junker.com/en/products-technologies/furnaces-plants-for-copper-and-copper-based-alloys/foundry/channel-type-induction-furnaces-for-melting> (Accessed: 15.05.2023)
2. Kirpo M., Jakovičs A., Nacke B., Baake E., Langejürgen M. LES of Heat and Mass Exchange in Induction Channel Furnaces. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2008. R. 84. No 11. Pp. 154–158.
3. Boyarevich V.V., Freyberg Ya.Zh., Shilova E.I., Shcherbinin E.V. Electrovortex flows. Riga: Zinatne, 1985. 315 p. (Rus)
4. Bondar O.I., Goryslavets Yu.M., Zharkin A.F. Intensification of heat and mass exchange in induction channel furnaces. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.049> (Ukr)
5. Goryslavets Yu.M., Glukhenkyi O.I., Zaloznyi V.I. Modelling of electromagnetic processes in induction channel furnaces taking into account metal frames. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. No 64. Pp. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.064> (Ukr)
6. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com/> (Accessed: 15.05.2023)
7. ABP Induction Systems GmbH. <https://abpinduction.com/en/> (Accessed: 15.05.2023)
8. <https://www.upcast.com/> (Accessed: 15.05.2023)
9. Fisk M., Ristinmaa M., Hultkrantz A., Lindgren L.-E. Coupled electromagnetic-thermal solution strategy for induction heating of ferromagnetic materials. *Applied Mathematical Modelling*. November 2022. Vol. 111. Pp. 818–835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2022.07.009>
10. Siesing L., Frogner K., Cedell T., Andersson M. Investigation of Thermal Losses in a Soft Magnetic Composite Using Multiphysics Modelling and Coupled Material Properties in an Induction Heating Cell. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*. September 2016. Vol. 8. No 9. Pp. 182–196. DOI: <https://doi.org/10.4236/jemaa.2016.89018>
11. <https://www.comsol.ru/release/5.2> (Accessed: 15.05.2023)
12. Adaskin A.M., Zuev V.M. Materials science (metalworking): textbook. M.: Publishing center Akademiya. 2013. 288 p. (Rus)
13. <https://www.comsol.com/blogs/exploiting-symmetry-simplify-magnetic-field-modeling/> (Accessed: 15.05.2023)

Надійшла: 07.06.2023

Прийнята: 18.09.2023

Submitted: 07.06.2023

Accepted: 18.09.2023