

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

УДК 621.35.035

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.64.064>

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНИХ КАНАЛЬНИХ ПЕЧАХ З УРАХУВАННЯМ МЕТАЛЕВИХ КАРКАСІВ

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

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: ugoris@ied.org.ua

На основі сформульованої математичної моделі для дослідження електромагнітних процесів у двофазній (двоіндукторній) індукційній каналній печі розраховано електричні втрати в металевих каркасах печі для різних варіантів їхнього секціонування. Визначено вплив фазового кута між напругами, що живлять індуктори печі, на розподіл питомих та інтегральних втрат у каркасах. Представлено практичні рекомендації щодо зменшення цих втрат з метою підвищення ККД плавильних печей. Бібл. 5, рис. 5.

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

Вступ. Індукційні каналні печі завдяки високому ККД знайшли широке застосування для плавлення різноманітних металів та сплавів. Особливо доцільне їхнє використання у тих випадках, коли до металу, що виплавляється, висуваються високі вимоги, зокрема за мінімальними газовмістом та вмістом неметалевих включень. Саме тому індукційні каналні печі в першу чергу служать для плавлення міді й різноманітних сплавів на її основі, особливо коли мова йде про отримання безкисневої міді для високоякісної провідникової продукції, зокрема струмопровідних жил для електричних кабелів [1].

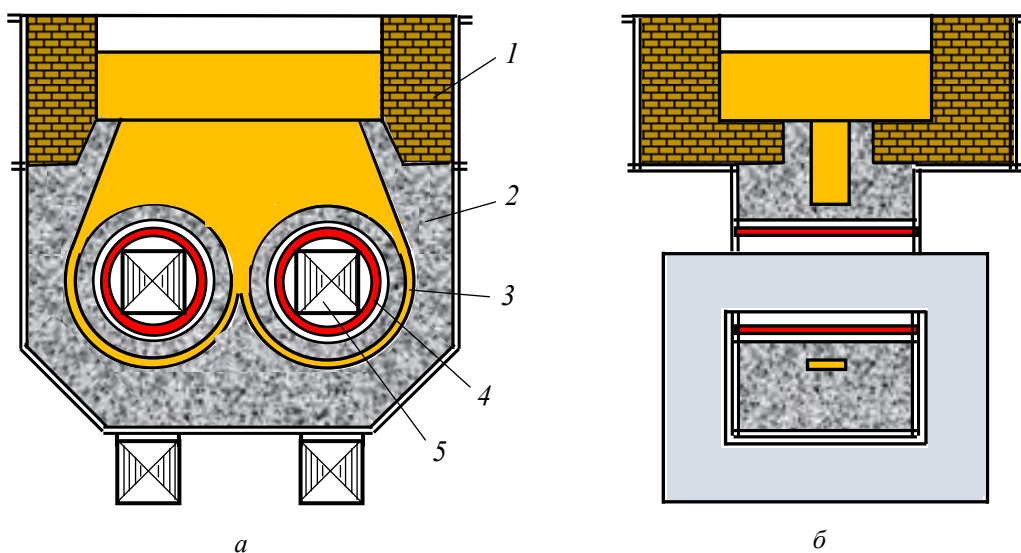


Рис. 1

У електромагнітному відношенні індукційна канална піч подібна до силового трансформатора, що працює в режимі короткого замикання. На рис. 1 наведено ескіз одного із варіантів конструктивного виконання такої печі. На ньому представлено двофазну каналну піч типу ІЛК-1,2, призначену для плавлення міді й різноманітних сплавів на її основі [2].

Конструктивно така піч складається з двох частин – з облицьованої жароміцною цеглою ванни 1, в якій знаходиться основна маса розплаву, та індукційного каналного блока (індукційної одиниці) 2, що знаходиться під ванною. Саме цей блок і є тим умовним трансформатором, вторинна обмотка якого являє собою короткозамкнений виток 3 рідкого металу, який називають індукційним каналом. У цьому каналі за допомогою котушки 4 (первинної обмотки) із замкнутим магнітопроводом 5 наводиться електричний струм, який і нагріває рідкий метал. Індукційні канали печі формуються в процесі її запуску (введення в експлуатацію) за рахунок спікання на відповідну товщину меленого кварциту. Для цього використовується мідний шаблон, що за формою і геометричними розмірами в точності відповідає каналній частині печі, який футерується в каркасі блока меленим кварцитом. Спікання кварциту відбувається за рахунок індукційного нагрівання зазначеного шаблона, який наприкінці повністю розплавляється.

Представлена на рис. 1 плавильна піч має у своєму складі два канали і два індуктори (котушки), які живляться в загальному випадку різними за фазами напругами. Індукційний каналний блок і ванна печі футеруються теплоізоляційними жаротривкими матеріалами, які знаходяться у металевих каркасах (кожухах). Оскільки ці каркаси, особливо 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 вихрових струмів у каркасі індукційного блока роблять «розрізи», складаючи його з декількох електрично ізольованих один від одного секцій. Як правило, в каркасі індукційного блока такої печі роблять один горизонтальний «розріз», що проходить через осі обох індукторів, або два вертикальних «розрізи», які проходять через осі кожного індуктора (рис. 2). Таким чином, у першому випадку нижній каркас складається з двох ізольованих секцій, у другому – з трьох. Верхній і нижній каркаси печі з'єднані між собою болтами без електричної ізоляції.

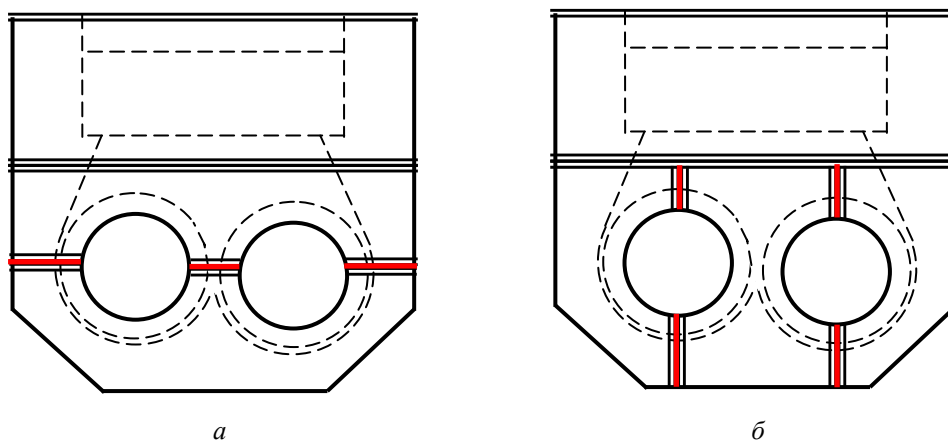


Рис. 2

За нашими даними, проблемі зменшення втрат в металевих каркасах електроплавильних установок, зокрема індукційних каналних печей, донині не приділялося належної уваги скоріш за все тому, що електричні втрати в них порівняно з іншими втратами вважаються незначними. Ось чому дослідження впливу металевих каркасів на технічні характеристики таких печей не проводилися. Проте, як показують наші оцінки, в окремих випадках втрати в каркасах такого обладнання можуть бути вагомими.

Мета цієї роботи – шляхом тривимірного математичного моделювання електромагнітних процесів визначити електричні втрати в металевих каркасах індукційних каналних печей та встановити залежності цих втрат від системи живлення печі.

Математична модель. Формулювання зазначеної моделі проводили стосовно індукційної каналної печі, ескіз якої (у двох проекціях) наведено на рис. 1. Слід зазначити, що в роботі [3] для такої печі представлено математичну модель для дослідження електромагнітних процесів без урахування впливу на них металевих каркасів. Незважаючи на таке припу-

щення, вона дозволила з прийнятною для практики точністю визначити електромагнітні параметри печі. Розбіжність між розрахованими і експериментально отриманими на промисловій печі даними склала менше 10 %.

Математична модель, яка враховує металеві каркаси печі, у цій роботі побудована за таких припущень.

Шихтовані магнітопроводи печі вважаються ненасиченими, їхня магнітна проникність приймається постійною. Реальна неоднорідна структура котушок (індукторів), яка включає в себе електропровідні (провідники) і неелектропровідні (каркаси, ізоляція) елементи, представляється однорідним неелектропровідним середовищем з рівномірною густиною струму. Каркаси печі (як один з можливих варіантів) виготовлені з немагнітної нержавіючої сталі.

Моделювання електромагнітного поля печі проводиться у безіндукційному наближенні, тобто без врахування поля, що виникає в результаті руху рідкого металу. Як показують оцінки, вклад цього поля в сумарне поле печі у більшості випадків є незначним. Це дозволяє окремо розглядати електромагнітні процеси в печі, не залучаючи гідродинаміку.

За таких підходів електромагнітне поле печі, приймаючи, що вона живиться від джерела заданої синусоїдної напруги $\dot{U}_i (i = 1, 2)$, можна описати системою диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд векторного магнітного потенціалу $\dot{\mathbf{A}}$ та рівнянь балансу напруги для обох індукторів.

Рівняння для векторного потенціалу:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0)^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в області рідкого металу;} \quad (1)$$

$$j\omega\sigma_{Fr}\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu_{Fr})^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в області металевих каркасів;} \quad (2)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \dot{I}_i w / S, \quad (i = 1, 2) \quad \text{– в області індукторів;} \quad (3)$$

$$\nabla \times ((\mu_0\mu_{Fe})^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в області магнітопроводів;} \quad (4)$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad \text{– в навколишній області,} \quad (5)$$

де $\omega = 2\pi\nu$ – кругова частота, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, σ – питома електропровідність рідкого металу, σ_{Fr} і μ_{Fr} – питома електропровідність і відносна магнітна проникність матеріалу каркасів, μ_{Fe} – відносна магнітна проникність магнітопроводів, w – число витків індуктора, S – площа поперечного перерізу індуктора.

Рівняння балансу напруги:

$$\dot{U}_i = \dot{I}_i R_{AC} + j\omega\dot{\Psi}, \quad (i = 1, 2), \quad (6)$$

де $\dot{\Psi} = \frac{w}{S} \int_V \dot{A}_r dV$ – потокозчеплення кожного індуктора з густиною струму $\dot{I}_i w / S$ в перерізі індуктора, \dot{A}_r – тангенціальна відносно індуктора компонента векторного потенціалу, V – об'єм індуктора, R_{AC} – активний опір індуктора.

Граничною умовою для цієї електромагнітної задачі є умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях всієї розрахункової області ($\dot{\mathbf{A}} = 0$).

Представлена математична модель реалізована в програмному середовищі Comsol Multiphysics [4].

Постановка задачі дослідження. Виходячи з наведеної мети, задача цього дослідження полягає у визначенні впливу металевих каркасів індукційної каналної печі на її ефективність залежно від конструктивного виконання (секціонування) каркасу індукційного блока для різних систем живлення печі (різних значень фазового кута між напругами на індукторах) з метою забезпечення мінімальних електричних втрат у них.

Вихідні дані для моделювання печі приймалися такими. Рідкий метал – розплавлена мідь з питоною електропровідністю $\sigma = 4,5 \cdot 10^6$ 1/Ом·м. Поперечний переріз індукційних каналів на більшій їхній частині за довжиною складає $2,75 \cdot 10^3$ мм² (габаритні розміри цього перерізу – 105 мм і 26 мм), внутрішній діаметр каналів (рідкометалевих витків) – 0,51 м. Розміри кожного індуктора: зовнішній діаметр – 0,34 м, довжина – 0,65 м, число витків індуктора – $w = 45$. Відносна магнітна проникність магнітопроводів – $\mu_{Fe} = 1000$. Товщина стінок

металевих каркасів 10 мм, питома електропровідність і відносна проникність матеріалу каркасів – $\sigma_{Fr} = 1 \cdot 10^6$ 1/Ом·м і $\mu_{Fr} = 1$. Вважається, що між окремими секціями нижнього каркасу забезпечується ідеальна ізоляція, а між нижнім і верхнім каркасами – ідеальний електричний контакт.

Моделювання електромагнітного поля печі проводилося при заданих значеннях напруги на індукторах частотою $\nu = 50$ Гц для різних значень фазового кута ψ між ними. Особливістю цього моделювання було те, що у кожному випадку (для кожного варіанту) підбиралося таке (однакове за модулем для обох індукторів) значення напруги, яке забезпечувало задану корисну потужність печі (потужність тепловиділення в рідкому металі). Вона приймалася рівною 500 кВт.

Враховуючи геометричну симетрію печі відносно вертикальної площини, що проходить посередині печі перпендикулярно до осей обох індукторів, моделювання електромагнітних процесів у ній виконувалося для однієї половини печі.

Результати моделювання. Моделювання електромагнітних процесів зазначеної індукційної каналної печі проводилося для двох варіантів секціонування каркасу індукційного блока, представлених на рис. 2, та чотирьох значень фазового кута між напругами $\psi = 0, 60, 120$ і 180 ел.град. Такі значення фазового кута для двофазної печі легко отримати за умови живлення її від трифазної мережі (трифазного трансформатора). Слід зазначити, що обидва варіанти секціонування, а також наведені значення кута ψ використовуються нині на діючих печах.

На рис. 3 представлено результати проведеного моделювання у вигляді залежності інтегральних електричних втрат P_{Fr} , що виникають в обох каркасах печі, від фазового кута між напругами на індукторах. Крива 1 на цьому рисунку стосується першого варіанту секціонування, який показано на рис. 2 а, а крива 2 – другого варіанту, представленого на рис. 2 б. Звідси видно, що в обох випадках втрати в каркасах печі зменшуються зі зростанням кута ψ . Порівнюючи між собою ці два конструктивні рішення, перевагу слід надати другому варіанту виконання каркасу індукційного блока, тобто каркасу, який має два вертикальних «розрізи», (особливо при малих значеннях фазового кута ψ).

Тут доречно зазначити, що робоче (оптимальне) значення цього кута для двофазних печей у першу чергу вибирають за умови забезпечення максимального тепло-масообміну в печі. Для низки конфігурацій індукційних каналів таку умову забезпечують малі значення фазового кута, включаючи $\psi = 0$ [5]. Ще одна особливість, яку потрібно враховувати для вибору того чи іншого конструктивного рішення щодо металевих каркасів, – це та, що існують печі, які мають один спільний для обох індукторів магнітопровід. У таких печах відсутня можливість змінювати фазовий кут між напругами; у них він постійний і складає $\psi = 180$ ел.град. [1].

Цікаво розглянути розподіл електричних втрат, зумовлених протіканням вихрових струмів у каркасах печі, для розглянутих варіантів секціонування за різних фазових кутів між напругами. Оцінка таких втрат в об'ємі каркасів показує, що найбільші втрати у всіх випадках виникають у передній і задній лицьових стінках нижнього каркасу печі. На рис. 4 для каркасу печі з горизонтальним «розрізом» показано розподіли питомих втрат енергії для двох значень фазового кута: $\psi = 0$ (рис. а) і $\psi = 180$ ел.град. (рис. б). Незважаючи на різний рівень (за величиною) цих втрат, обидва розподіли подібні один до одного. Максимальні втрати виникають внизу круглих отворів для індукторів. Така подібність характерна і для інших значень кута ψ .

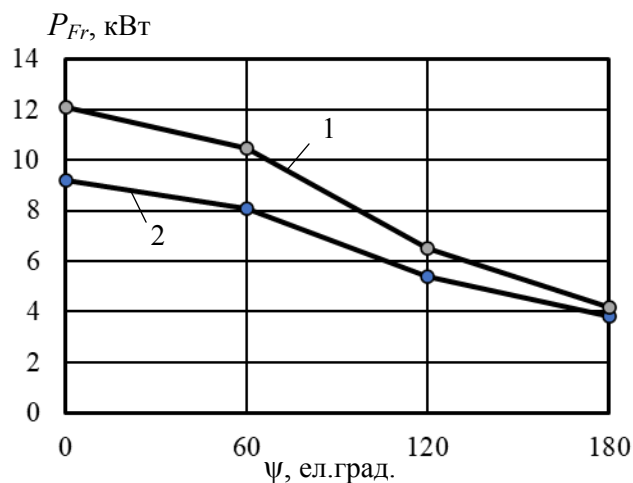


Рис. 3

1 Psi = 0. Surface: Volumetric loss density (W/m³)

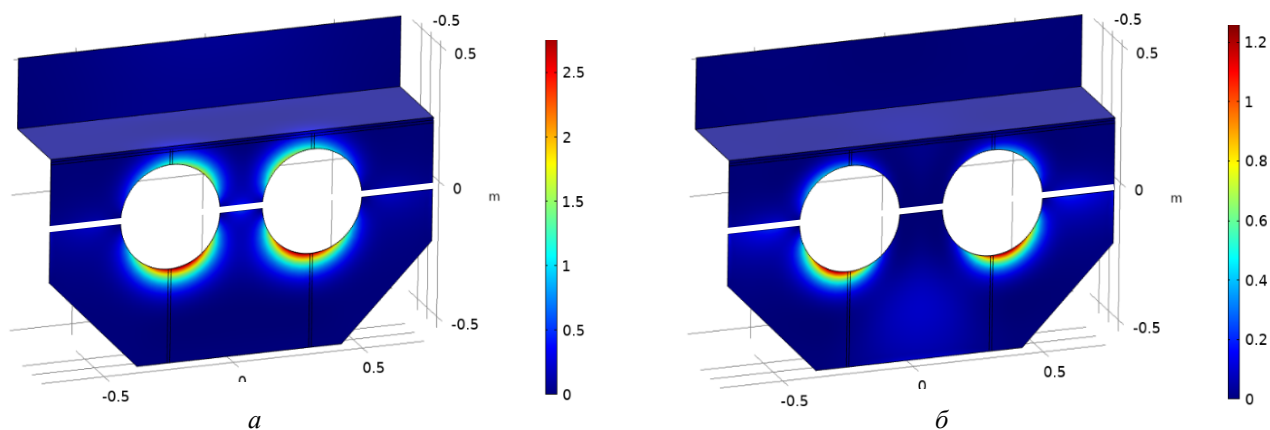


Рис. 4

Інша картина спостерігається у випадку каркаса з двома вертикальними «розрізами». Розподіл питомих втрат для цього випадку представлено на рис. 5, з якого видно, що за $\psi = 0$ (рис. а) максимальні втрати концентруються на внутрішніх (відносно отворів) ділянках лицевої стінки нижнього каркасу, а за $\psi = 180$ ел.град. (рис. б) – на зовнішніх.

На завершення розглянемо можливість зменшення електричних втрат у каркасах печі за рахунок встановлення додаткової ізоляції між верхнім і нижнім каркасами. До цього, як було зазначено, всі розглянуті варіанти розраховувалися за умови наявності ідеального електричного контакту між цими каркасами. Це приводить до того, що вихрові струми, які наводяться, наприклад, у нижньому каркасі, мають змогу замикатися і через верхній каркас. Якщо ізолювати ці каркаси один від одного, це повинно зменшити шляхи протікання вихрових струмів, а отже, зменшити втрати, які вони зумовлюють.

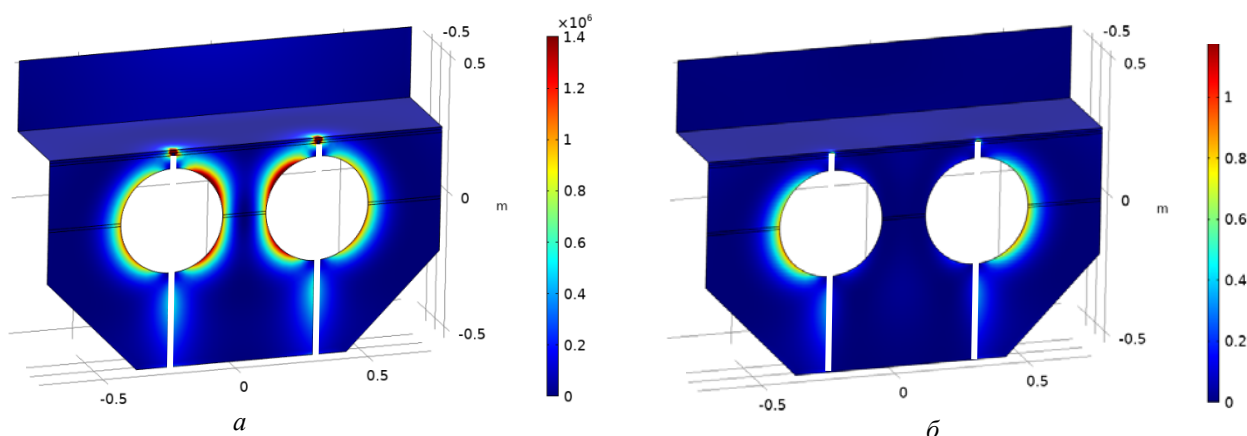


Рис. 5

Проведене моделювання обох варіантів секціонування нижнього каркаса печі з додатковим «розрізом» між верхнім і нижнім каркасами дало змогу встановити, що таке конструктивне виконання каркасів печі дозволяє зменшити сумарні втрати в каркасах на 12...20 % для першого варіанта (горизонтальний «розріз») і на 20...28 % – для другого (вертикальні «розрізи»). В обох випадках більші значення стосуються малих фазових кутів ψ .

Висновки. Для зменшення електричних втрат у металевих каркасах двофазних (двоіндукторних) індукційних каналних печей можна рекомендувати наступне:

1. Для печей, які живляться від системи напруги з малими фазовими кутами між напругами на індукторах (0...60 ел.град.), каркас індукційного блока слід виконувати з двома вертикальними «розрізами», що проходять через осі індукторів.

2. Додаткове зменшення зазначених втрат у будь-якому випадку можна отримати, якщо електрично ізолювати один від одного верхній і нижній металеві каркаси печі.

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. UPCAST, <http://www.upcast.com>, Finland.
2. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Metallurgy. 1968. 496 с.
3. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславец Ю.М. Електромагнітні параметри двофазної індукційної каналної печі. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2020. Вип. 56. С. 72–76. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.072>
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com/>.
5. Бондар О.І., Гориславец Ю.М., Жаркін А.Ф. Інтенсифікація тепло-масообміну в індукційних каналних печах. *Технічна електродинаміка*. 2022. № 3. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.049>

MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN INDUCTION CHANNEL FURNACES TAKING INTO ACCOUNT METAL FRAMES

Yu.M. Goryslavets, O.I. Gluhenky, V.I. Zalozny

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine
e-mail: ugoris@ied.org.ua

On the basis of the formulated mathematical model for the study of electromagnetic processes in a two-phase (two-inductor) induction channel furnace, electrical losses in the metal frameworks of the furnace were calculated for various options for their sectioning. The influence of the phase angle between the voltages feeding the inductors of the furnace on the distribution of specific and integral losses in the frames is determined. Practical recommendations for reducing these losses in order to increase the efficiency of melting furnaces are presented. Ref. 5, fig. 5.

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

1. UPCAST, <http://www.upcast.com>, Finland.
2. Farbman S.A., Kolobnev I.F. Induction furnaces for melting metals and alloys. Moscow: Metallurgy. 1968. 496 p.
3. Bondar O.I., Glukhenkyi O.I., Goryslavets Yu.M. Electromagnetic parameters of a two-phase induction channel furnace. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2020. No 56. Pp. 72-76. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.072>
4. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com/>.
5. Bondar O.I., Goryslavets Yu.M., Zharkin A.F. Intensification of heat and mass transfer in induction channel furnaces. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2022. No 3. Pp. 49-55. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2022.03.049>

Надійшла: 27.03.2023

Прийнята: 20.04.2023

Submitted: 27.03.2023

Accepted: 20.04.2023