

## ЕЛЕКТРОТЕХНОЛОГІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.35.035

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2020.56.072>

### ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПАРАМЕТРИ ДВОФАЗНОЇ ІНДУКЦІЙНОЇ КАНАЛЬНОЇ ПЕЧІ

**О.І. Бондар\***, канд. техн. наук, **О.І. Глухенький\*\***, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславець\*\*\***, докт. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна  
 e-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)

*Сформульовано тривимірну математичну модель для дослідження електромагнітного поля індукційної каналної печі за умови заданих напруг на індукторах. Підтверджено адекватність моделі шляхом співставлення розрахованих електромагнітних параметрів з експериментальними даними, отриманими на промисловій печі. Для двофазної індукційної каналної печі визначено вплив фазового кута між напругами на індукторах на енергетичні та електромагнітні параметри печі. Бібл. 5, рис. 4, таблиця.*

**Ключові слова:** індукційна канална піч, математичне моделювання, електромагнітні параметри, фазовий кут між напругами живлення.

Завдяки високому ККД індукційні каналні печі знайшли широке застосування для плавлення як чорних, так і кольорових металів. Порівняно з іншим плавильним обладнанням такі печі мають значні переваги. Вони забезпечують мінімальне окиснення і випаровування металу. Крім того, завдяки циркуляції розплаву, зумовленої електродинамічними і термогравітаційними силами, вони забезпечують достатньо високу однорідність хімічного складу металу у ванні печі. Така циркуляція сприяє також прискоренню процесу плавлення [1]. Особливо доцільно застосування таких печей у випадках, коли до металу, що виплавляється, ставляться високі вимоги, зокрема за мінімальними газовмістом та вмістом неметалевих включень. Саме тому вони широко використовуються насамперед для плавлення міді та різноманітних сплавів на її основі. Особливо це доречно, коли мова йде про отримання безкисневої міді, яка служить для виготовлення високоякісної металевої продукції, передусім провідникової [2]. Слід зазначити, що донедавна більше 2/3 усіх кольорових металів і сплавів на основі міді виплавляли в печах каналного типу.

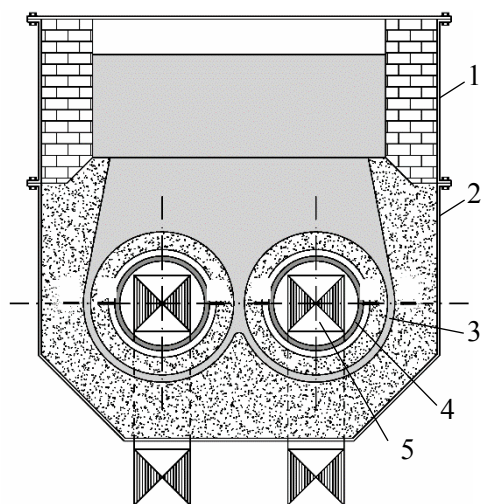


Рис. 1

На рис. 1 наведено ескіз одного із варіантів конструктивного виконання такої печі. На ньому зображено двофазну (з двома каналами та двома індукторами) піч типу ІЛК-1,2, призначену для плавлення міді та різноманітних сплавів на її основі (бронз, латуней тощо) [3]. Піч складається з облицьованої жароміцною цеглою ванни (шахти) 1, у якій знаходиться основна маса розплаву, та індукційного нагрівального блоку 2, розташованого під ванною. За принципом дії цей блок нагадує електричний трансформатор, вторинна обмотка якого являє собою короткозамкнений виток рідкого металу 3, який називають індукційним каналом. У цьому каналі за допомогою котушки 4 (первинної обмотки) із замкнутим магнітопроводом 5 наводиться елект-

ричний струм, який і нагріває рідкий метал. Зображена на цьому рисунку піч має в своєму складі два канали і два індуктори (котушки), які живляться в загальному випадку різними за фазами напругами.

У вітчизняній літературі індукційний нагрівальний блок печі часто називають "індукційною одиницею", у зарубіжній (західній) – "індуктором" ("inductor") або "індукційним блоком" ("induction unit"). Оскільки котушку в печах (як і в багатьох інших електротермічних установках) теж нерідко називають індуктором, нагрівальний блок каналної печі далі будемо йменувати індукційним блоком, а котушку – індуктором.

Конструктивно індукційний блок каналної печі може мати один, два або три з'єднані між собою індукційні канали, у кожному з яких за допомогою свого індуктора наводиться електричний струм. Залежно від типу електроживлення вони розділяються на одно-, дво- та трифазні [3]. Якщо індукційний блок з одним індуктором (каналом) за способом живлення може бути тільки однофазним, то блок з двома індукторами може живитися як від однофазної, так і двофазної напруги. Індукційний блок з трьома індукторами переважно є трифазним. Частота напруги живлення індукційних каналних печей зазвичай складає 50 Гц.

Важливим для розроблення нових та удосконалення існуючих каналних печей є вміння визначати енергетичні характеристики та електромагнітні параметри цих печей на основі математичного моделювання електромагнітних явищ (електромагнітного поля). На сьогодні таке моделювання індукційних печей найчастіше виконується в двовимірній або в кращому разі в так званій квазітривимірній постановці [4]. Таке моделювання дає непогані результати з розподілу наведеного електричного струму в окремих елементах електромагнітної системи печі, наприклад, у поперечному перерізі рідкого металу індукційних каналів. Проте, стосовно інтегральних електромагнітних параметрів печі їх значення, визначені на основі таких моделей, є далекими від реальних. Зрозуміло, що покращити цю ситуацію можна шляхом проведення повного тривимірного моделювання електромагнітного поля системи. На сьогодні, коли суттєво зросла потужність обчислювальної техніки та існують ефективні програмні комплекси для математичного моделювання різних фізичних явищ, з'явилася можливість проведення такого моделювання.

**Метою роботи** є визначення електромагнітних та енергетичних параметрів двофазної індукційної каналної печі та встановлення впливу на них фазового кута зсуву між напругами її живлення на основі тривимірного математичного моделювання електромагнітного поля печі.

Моделювання електромагнітного поля зазначеної печі проводилося в безіндукційному наближенні, тобто без урахування поля, що виникає в результаті руху рідкого металу. Внесок цього поля в сумарне поле печі в більшості випадків є незначним, що дає змогу використати таке припущення. Також не брався до уваги вплив на розподіл поля металевого каркасу (кожуха) печі. Втрати енергії в такому каркасі зазвичай не перевищують 5 % від потужності печі. Для отримання більш точних результатів вони можуть бути враховані окремо.

Моделювання виконувалося за умови заданих напруг на індукторах печі. У такій постановці воно потребувало розв'язання коло-польової задачі, яка являє собою систему диференціальних рівнянь для комплексних амплітуд векторного магнітного  $\dot{\mathbf{A}}$  і скалярного електричного  $\dot{\Phi}$  потенціалів, а також інтегрального рівняння балансу напруг для кожного індуктора:

$$j\omega\sigma\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu_r)^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + \sigma\nabla\dot{\Phi} = \dot{\mathbf{J}}_e; \quad (1)$$

$$\dot{U} = \dot{I}R_{AC} + j\omega\dot{\Psi} = \dot{I}R_{AC} + j\omega\frac{w}{S_i}\int_{V_i}\dot{A}_\tau dV, \quad (2)$$

де  $\omega = 2\pi\nu$  – кругова частота;  $\sigma$  – питома електропровідність;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність відповідної розрахункової області;  $\dot{\mathbf{J}}_e$  – густина зовнішнього струму;  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}$ ,  $R_{AC}$ ,  $w$ ,  $S_i$  і  $V_i$  – напруга, струм, активний опір, число витків, площа поперечного перерізу і об'єм індуктора;  $\dot{\Psi} = \frac{w}{S_i}\int_{V_i}\dot{A}_\tau dV$  – потікзчеплення індуктора з густиною струму в пе-

перізі індуктора  $J_e = Iw / S_i$ ;  $A_r$  – тангенціальна відносно індуктора компонента векторного потенціалу.

Комплексна потужність печі (на один індуктор) визначалася відповідно до рівняння

$$\tilde{S} = \frac{1}{2} \int_{V_i} \frac{\mathbf{J} \mathbf{J}^*}{\sigma} dV + j\omega \frac{1}{2} \int_{V_i} \mathbf{A} \mathbf{J}^* dV. \quad (3)$$

Перший доданок правої частини цього рівняння являє собою активну потужність, що виділяється у вигляді теплоти безпосередньо в індукторі (котушці). У нашому випадку, коли котушки представлено непровідним середовищем з рівномірно розподіленою густиною струму, втрати в них визначалися відповідно до виразу  $P_i = 0,5 \dot{I} \dot{I}^* R_{AC}$ , де  $\dot{I}$  – спряжений комплекс сили струму в індукторі. Опір індуктора визначався як  $R_{AC} = k R_{DC}$ , де  $k$  – коефіцієнт витіснення струму, значення якого приблизно відомо для того чи іншого типу індуктора, а опір  $R_{DC}$  розраховувався через задані розміри та число витків індуктора.

Другий доданок правої частини рівняння (3) у загальному випадку є комплексним числом, що має дійсну та уявну складові. Дійсна частина цього доданка відповідає потужності енергії  $P_m$ , що виділяється в рідкому металі печі (на один індуктор). Таким чином, активна потужність печі на один індуктор буде  $P = P_i + P_m$ . Уявна частина другого доданка рівняння (3) являє собою реактивну потужність печі  $Q$  (теж на один індуктор).

Знаючи активну і реактивну потужності печі, легко визначити її електромагнітні параметри, а саме: активний  $R$ , реактивний  $X$  та повний  $Z$  опори, а також коефіцієнт потужності печі  $\cos\varphi$

$$R = 2P/\dot{I}^2; \quad X = 2Q/\dot{I}^2; \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad \cos\varphi = R/Z. \quad (4)$$

Внаслідок симетрії печі відносно вертикальної площини, що проходить через середину поперечних перерізів каналів, задача розв'язувалася в тривимірній декартовій системі координат для однієї половини об'єму печі. Вихідні дані для моделювання приймалися такими: об'єм розплавленого металу (міді) у ванні печі складав  $1,04 \times 0,67 \times 0,45 \text{ м}^3$ , в каналах індукційного блоку –  $0,04 \text{ м}^3$ ; внутрішній діаметр каналів (короткозамкнених "витків") –  $0,51 \text{ м}$ , їхній поперечний переріз –  $25 \times 100 \text{ мм}^2$ ; розміри кожного індуктора: середній діаметр –  $0,32 \text{ м}$ , довжина –  $0,62 \text{ м}$ , число витків індуктора –  $w = 45$ ; частота і напруга живлення –  $v = 50 \text{ Гц}$  і  $U = \sqrt{2} \cdot 500 \text{ В}$ ; відносна магнітна проникність магнітопроводів приймалася постійною  $\mu_r = \mu_{Fe} = 1000$ .

Моделювання виконувалося за допомогою програмного пакету Comsol Multiphysics [5]. У результаті проведеного моделювання отримано розподіл електромагнітного поля в печі, густини електричного струму в рідкому металі, значення енергетичних параметрів (струмів і потужностей індукторів, потужності тепловиділення в рідкому металі тощо) та електромагнітних параметрів печі. Адекватність математичної моделі перевірялась шляхом співставлення розрахованих і експериментально отриманих на промисловій печі електромагнітних параметрів. У таблиці наведено таке співставлення для кожного індуктора за двофазного живлення печі з фазовим кутом між напругами  $\psi = 120$  ел.град. Розбіжність наведених даних у гіршому разі не перевищує 8 %, що є цілком прийнятним для такого об'єкту дослідження. Ймовірно, що більш точне співпадіння цих даних може бути отримано при врахуванні металевого каркасу печі.

	$Z_1, \text{ Ом}$	$R_1, \text{ Ом}$	$X_1, \text{ Ом}$	$\cos\varphi_1$	$Z_2, \text{ Ом}$	$R_2, \text{ Ом}$	$X_2, \text{ Ом}$	$\cos\varphi_2$
Розрахунок	0,444	0,233	0,378	0,524	0,437	0,153	0,409	0,351
Експеримент	0,458	0,244	0,388	0,533	0,478	0,155	0,452	0,324

Результати моделювання індукційної каналної печі показано на рис. 2–4. На рис. 2 залежно від кута  $\psi$  наведено струми  $I_1$  і  $I_2$  (ефективні значення) та активні потужності  $P_1$  і  $P_2$  для кожного індуктора, а також сумарна потужність печі  $P_{\Sigma} = P_1 + P_2$ . Як видно, всі ці пара-

метри суттєво залежать від фазового кута зсуву між напругами, що живлять двофазну піч. Що стосується струмів, то вони в обох індукторах досягають максимальних значень у разі  $\psi = 0$ , а у випадку  $\psi = 180$  ел.град. – вони мінімальні. За цих обставин у всьому діапазоні значень кута  $\psi$  струми в обох індукторах практично однакові. Нагадаємо, що розрахунки виконувалися за умови заданих і однакових (за модулем) напруг на кожному індукторі. По-іншому ведуть себе активні потужності, що споживаються цими індукторами. Тільки при двох значеннях фазового кута, а саме при  $\psi = 0$  та  $\psi = 180$  ел.град. (тобто у разі однофазного

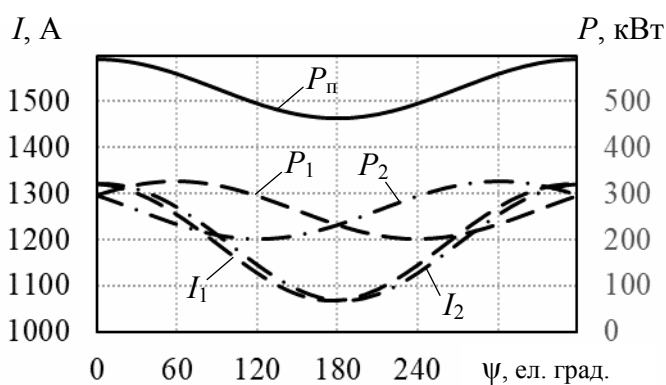


Рис. 2

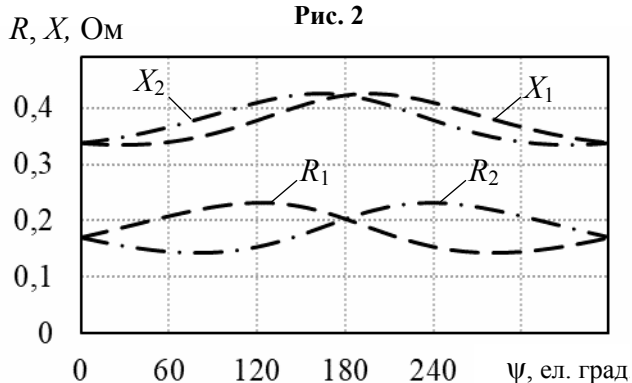


Рис. 3

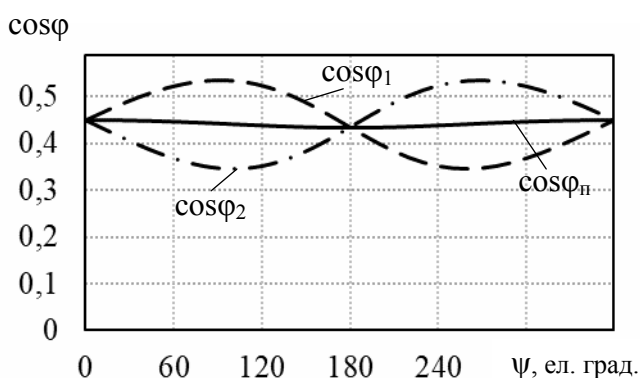


Рис. 4

живлення), ці потужності рівні, а в інших випадках – вони різні. Різними у разі двофазного живлення є і потужності тепла, що виділяється в кожному каналі. У цьому випадку відбувається своєрідне перекачування активної потужності від одного каналу до іншого. Стосовно сумарної потужності печі вона практично повторює залежності для струмів. Максимальна потужність досягається за умови  $\psi = 0$ , а мінімальна –  $\psi = 180$  ел.град.

На рис. 3 наведено залежності електромагнітних параметрів, а саме активного  $R$  і реактивного  $X$  опорів печі окремо для кожного індуктора. Природно, що обидва ці параметри однакові для обох індукторів у разі  $\psi = 0$  і  $180$  ел.град. та різні – у разі інших значень цього кута. Як впливає з цього рисунку, за умови двофазного живлення печі (тобто при  $0 < \psi < 180$  ел.град. і  $180$  ел.град.  $< \psi < 360$  ел.град.) відмінність активних опорів індукторів між собою суттєво більша порівняно з реактивними опорами. Це приводить до того, що у цьому випадку коефіцієнти потужності обох індукторів печі суттєво відрізняються між собою (рис. 4). Цікаво, що загальний коефіцієнт печі, який можна ввести як  $\cos\varphi_{\pi} = (P_1 + P_2)/(S_1 + S_2)$  і який також наведено на цьому рисунку, практично не залежить від фазового кута між напругами живлення двофазної печі.

**Висновки.** Сформульована в роботі тривимірною математичною моделлю дає змогу з достатньою для практики точністю визначати електромагнітні та енергетичні параметри індукційних каналних печей. Для двофазної каналної печі встановлено залежності зазначених параметрів від фазового кута зсуву між напругами її живлення.

Фінансується за держбюджетними темами «Розробити електромагнітні та напівпровідникові системи модульної структури для енергоефективної термообробки металевих розплавів і деталей» (шифр «ЕЛТЕРМ-П»), що виконується за Постановою Бюро ВФТПЕ НАН України від 29.05.2018 р., протокол № 9, державний реєстраційний номер роботи 0119U001212 та «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН-2»), що виконується відповідно до Постанови Президії НАН України від 18.12.2019 р. № 339 (в рамках договору № 3-137/01-20 від 02.01.2020 р.), державний реєстраційний номер роботи 0120U002125. КПКВК 6541030.

1. Иванова Л.И., Грובה Л.С., Сокунов Б.А. Индукционные каналные печи. Екатеринбург: Изд-во УГ-ТУ. УПИ. 2002. 105 с.
2. UPCAST. URL: <http://www.upcast.com>, Finland. (дата звернення: 15.05.2020)
3. Фарбман С.А., Колобнев И.Ф. Индукционные печи для плавки металлов и сплавов. М.: Metallurgy. 1968. 496 с.
4. Гориславец Ю.М. Математичне моделювання електромагнітних процесів в індукційних каналних печах. *Вісник нац. ун-ту «Львівська політехніка»*. 2007. № 597. С. 61–65.
5. Comsol Multiphysics. URL: <https://www.comsol.com/>. (дата звернення: 15.05.2020)

УДК 621.35.035

### ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХФАЗНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ КАНАЛЬНОЙ ПЕЧИ

**А.И. Бондарь**, канд. техн. наук, **А.И. Глухенький**, канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславец**, докт. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина

*Сформулирована трехмерная математическая модель для исследования электромагнитного поля индукционной каналной печи при заданных напряжениях на индукторах. Подтверждена адекватность модели путем сопоставления рассчитанных электромагнитных параметров с экспериментальными данными, полученными на промышленной печи. Для двухфазной индукционной каналной печи определено влияние фазового угла между напряжениями на индукторах на энергетические и электромагнитные параметры печи. Библи. 5, рис. 4, таблица.*

**Ключевые слова:** индукционная каналная печь, математическое моделирование, электромагнитные параметры, фазовый угол между напряжениями питания.

### ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF TWO-PHASE INDUCTION CHANNEL FURNACE

**O.I. Bondar**, **O.I. Glukhenkyi**, **Yu.M. Goryslavets**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine

*Three-dimensional mathematical model for study of electromagnetic field of induction channel furnace with inductors' given voltages has been formulated. The adequacy of the mathematical model has been confirmed by means of comparison of calculated electromagnetic parameters with experimental data obtained on industrial furnace. For two-phase induction channel-type furnace the influence of phase angle between inductors' voltages on energy and electromagnetic furnace parameters have been determined. References 5, figures 4, table.*

**Key words:** induction channel furnace, mathematical modelling, electromagnetic parameters, phase angle between power supply voltages.

1. Ivanova L.I., Grobova L.S., Sokunov B.A. Induction channel furnaces. Ekaterinburg: Publishing house of Ural State Technical University UPI. 2002. 105 p. (Rus)
2. UPCAST, <http://www.upcast.com>, Finland. (accessed: 15.05.2020)
3. Farbman S.A., Kolobnev I.F. Induction furnaces for melting metals and alloys. Moskva: Metallurgy. 1968. 496 p. (Rus)
4. Goryslavets Yu.M. Mathematical modelling of electromagnetic processes in induction channel furnaces. *Bulletin of the Nat. University Lvivska politehnika*. 2007. No 597. Pp. 61–65. (Ukr)
5. Comsol Multiphysics, <https://www.comsol.com/> (accessed: 15.05.2020) .

Надійшла: 18.05.2020

Received: 18.05.2020