

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.365.51

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.60.005>**РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ В ІНДУКЦІЙНІЙ КАНАЛЬНІЙ ПЕЧІ В УСТАЛЕНОМУ РЕЖИМІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ТЕПЛОВИХ КІЛ**

А.А. Щерба^{1*} чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев**^{1**} докт. техн. наук,
Ю.В. Перетятко^{2***} канд. техн. наук, **В.М. Золотарьов**³, докт. техн. наук, **Р.В. Білянin**³,
канд. техн. наук.

¹—Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна
e-mail: podol@ied.org.ua

²—Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна

³— ПАТ «Завод «Південкабель»,
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

На основі теорії теплових кіл розроблено комп'ютерну модель індукційної каналної печі, що використовується для отримання в режимі безперервного лиття мідної катанки промислового призначення. Модель дає змогу розраховувати усталені електротеплові процеси з урахуванням потоків холодного та розплавленого металу в її активній зоні. У розробленій тепловій моделі запропоновано враховувати конвекційні потоки теплоти в металі за допомогою керованих джерел струму. Проведено розрахунок розподілу температури в активній зоні каналної печі й показано вплив масової витрати металу на вході та виході з печі на нерівномірність розподілення температури в активній зоні. Одержані результати дають змогу визначити необхідну електричну потужність печі за різних значень витрати металу, що безперервно рухається крізь її активну зону, нагріваючись за цих обставин до заданої температури. Розроблена модель є відносно простою в реалізації, завдяки використанню для цього пакет Matlab/Simulink, і дає змогу в режимі on-line оцінювати температуру розплаву в різних зонах залежно від електричної потужності, що споживає піч, та витрати металу на виході з печі, а також визначити раціональні режими її роботи. Бібл. 7, рис. 4.

Ключові слова: індукційна канална піч, електротеплові процеси, теплові кола, усталений режим, розподіл температури.



Рис. 1

На сьогодні в світі працює понад 200 індукційних каналних печей типу UPCAST [1,2] з продуктивністю від 1 до 40 тисяч тонн міді на рік. Їхньою перевагою є зменшення вмісту кисню в металі в процесі плавлення мідних заготовок (катодів) й отримання катанки необхідного діаметра безпосередньо під час безперервного лиття безкисневої міді. Особливістю такого типу печей є те, що в їхній активній зоні одночасно здійснюються режими нагрівання та плавлення шихти та безперервного лиття заготовок, що значно ускладнює процес моделювання таких печей. Конструктивно канална піч складається з футерованої ванни, в якій знаходиться вся маса металу, що розплавляється, й індукційної одиниці, що мі-

стить індуктор із каналом розплаву та знаходиться під цією ванною. Індуктор може розглядатися як первинна обмотка однофазного трансформатора, а як вторинна обмотка використовується контур із розплавленим металом. Фото каналної печі продуктивністю 10000 тон на рік наведено на рис. 1.

Розплавлений метал, що утворює вторинну обмотку трансформатора, нагрівається через виділену в ньому енергію джоулевого тепла, а рівномірність розподілу температури в його об'ємі забезпечується тепло- та масо переносом між каналом та ванною. Рух розплавленого металу головним чином обумовлено дією електродинамічних сил, що виникають у каналі, і частково завдяки конвективному переносу нагрітого металу в каналі в зовнішню ванну внаслідок термогравітації.

Щодо фізичних процесів у індукційних каналних печах безперервно протікають взаємопов'язані електромагнітні, теплові і гідродинамічні процеси, математичне моделювання яких ускладнюється такими факторами як тривалий режим нагріву, нелінійні властивості матеріалів, складна тривимірна геометрія активних елементів, наявність фазових переходів, змінення маси розплаву та ін. Одночасне врахування всіх цих факторів у тривимірній польовій моделі є вкрай складною науковою задачею, а отримання чисельних рішень потребує використання значних комп'ютерних ресурсів та тривалого часу розрахунку.

Рациональним підходом до вирішення ряду задач, що виникають у електротехнологічних установках, може бути проведення комп'ютерного моделювання на основі теорії мультифізичних кіл як більш простого в реалізації методу порівняно з польовим методом – див., наприклад, [3, 4]. У статті представлено результати досліджень, отриманих із використанням саме такого підходу чисельного розрахунку електротеплових процесів у індукційній каналній печі.

Під час аналізу електромагнітних процесів у таких печах, які використовуються для виробництва мідної катанки, і відповідно у процесі побудови їхніх математичних моделей необхідно виділяти два режими їхньої роботи:

1. *Перехідний електротепловий режим роботи.* Це режим первинного запуску (введення в експлуатацію) індукційної установки – режим відносно повільного нагрівання мідного шаблону, що слугує для формування каналу, від кімнатної температури до температури плавлення, поступового заповнення ванни печі розплавом, забезпечення його електродинамічного перемішування для вирівнювання температури, а також висихання та спікання термофутеровки печі. Тривалість такого процесу досягає понад 36 годин.

2. *Усталений електротепловий режим роботи.* Це робочий режим забезпечення необхідної температури розплавленої міді безпосередньо в процесі отримання з неї катанки, коли в печі утворюються два практично безперервні потоки металу – потік холодної міді у вигляді твердої шихти, яка безперервно або з деяким періодом подається у ванну з розплавом, і потік рідкого металу, який надходить у кристалізатор і утворює після безперервної розливки та кристалізації мідну катанку на виході.

Перший режим є особливо важливим щодо отримання каналу розплаву із заданими температурними характеристиками, який згодом буде безперервно експлуатуватися протягом усього терміну роботи печі (прогнозований термін: 3,5–4 роки). Розрахунок перехідних процесів у такому режимі виконувався раніше авторами цієї статті [5]. Під час протікання другого режиму важливим є підтримання та моніторинг температурного стану ванни та індуктора печі для прогнозування їхнього ресурсу й недопущення аварійної ситуації, а також підтримання температури розплавленого металу на виході з печі на заданому рівні в разі можливого змінення значень електричної потужності джерела живлення печі та витрати рідкого металу на вході та виході з печі.

Метою цієї роботи є розробка на основі теорії теплових кіл комп'ютерної електротеплової моделі індукційної каналної печі типу UPCAST в усталеному режимі роботи, комп'ютерна реалізація цієї моделі в програмному середовищі Matlab/Simulink [6] та проведення розрахунку температури в активних елементах такої печі, що використовується для виробництва високоякісної мідної катанки, яка використовується у виготовленні, зокрема, високовольтних силових кабелів.

Дослідження проводилися на прикладі однієї плавильно-роздавальної установки 10-ти струмкової лінії безперервного лиття безкисневої міді UPCAST продуктивністю 10 000 тон металу на рік, фото якої наведено на рис. 1.

Опис Simulink-моделі каналної печі та результати розрахунку. В усталеному режимі роботи каналної печі температура розплавленого металу в каналі повинна дорівнювати заданій величині. Це дає змогу визначити величину електропровідності розплаву й окремо розрахувати спочатку електричну задачу для визначення джоулевих втрат у розплаві, а потім – теплову задачу на основі отриманих даних.

Simulink-модель, що використовувалася для розрахунку електричних процесів у каналній печі, наведена на рис. 2 а. Вона містить джерело гармонійної напруги з внутрішніми параметрами R, L , однофазний трансформатор, первинна обмотка якого відповідає індуктору печі, а вторинна обмотка є контуром із розплавленим металом. Величина активного опору цього контуру залежить як від геометричних розмірів каналу, так і від температури металу – його значення розраховується в програмі за допомогою блоку $RH(T)$ і реалізується через керуване джерело струму (блок $R(T)$). Далі розраховується електрична потужність, що споживається цим блоком, і значення цієї потужності передається в теплову задачу.

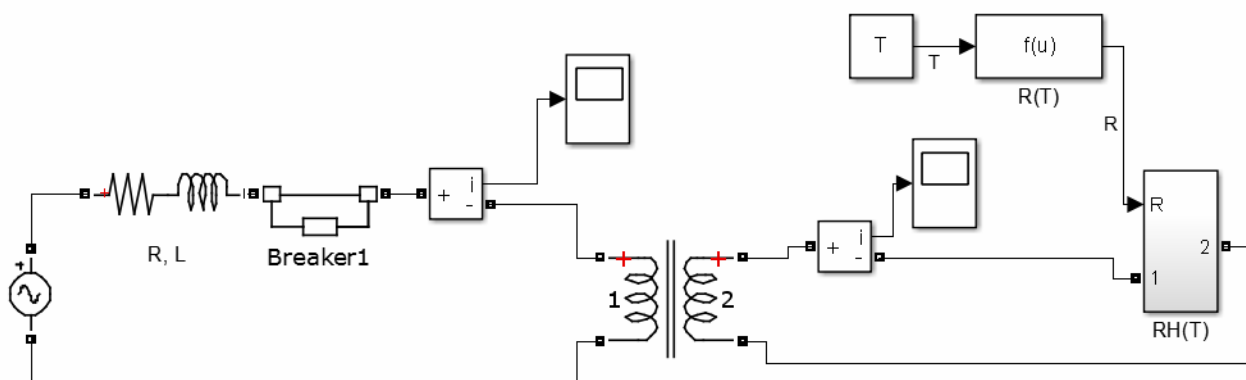


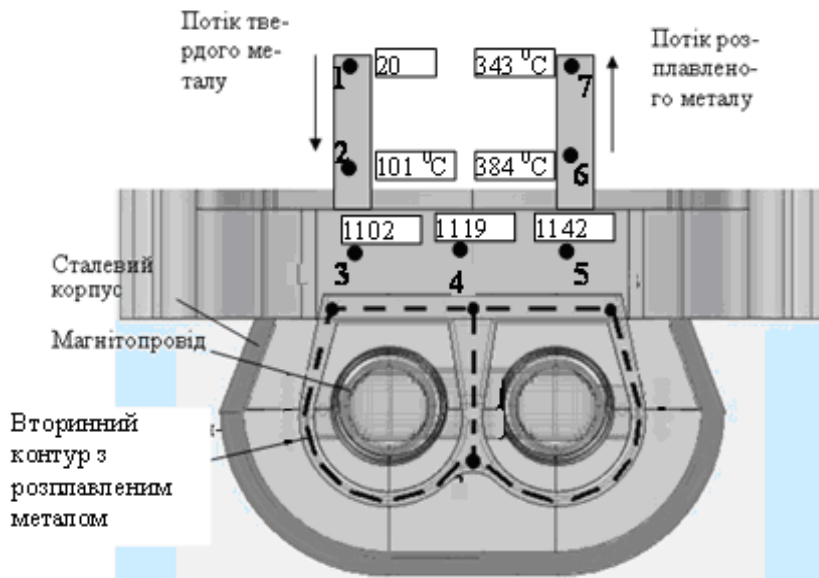
Рис. 2

Розрахунок теплових процесів у індукційній каналній печі в усталеному режимі має багато спільного з розрахунком процесів індукційного нагріву рухомої заготовки, які розглядалися з використанням теплових кіл авторами цієї статті в роботі [7]. Дійсно, холодний метал в обох технологічних установках безперервно надходить в активну зону, де за допомогою електричної енергії він нагрівається до необхідної температури і потім виходить із цієї активної зони. Різниця між індукційною установкою і каналною піччю полягає в тому, що в печі матеріал розплавляється і на виході твердне в додатково встановленому кристалізаторі. Ці відмінності можуть бути враховані відповідним вибором значень параметрів матеріалу заготовки, які є залежними від температури. Отже, можна зробити висновок, що теплова модель каналної печі може бути створена на основі моделі індукційної установки, дає змогу задати конкретне значення температури навколишнього середовища ($E=20^{\circ}\text{C}$), а електричні опори, що приєднані до цього джерела, відповідають інтегральним тепловим потокам, що передаються від поверхні елементів до цього середовища. У процесі розрахунків використовувалися такі дані: загальна електрична потужність печі – 135 кВт, масова витрата металу на вході в піч та на виході з неї становить $Q = 200$ кг/год, середнє значення коефіцієнта тепловіддачі з поверхні рідкого металу та корпусу печі дорівнює 12 Вт/м²К.

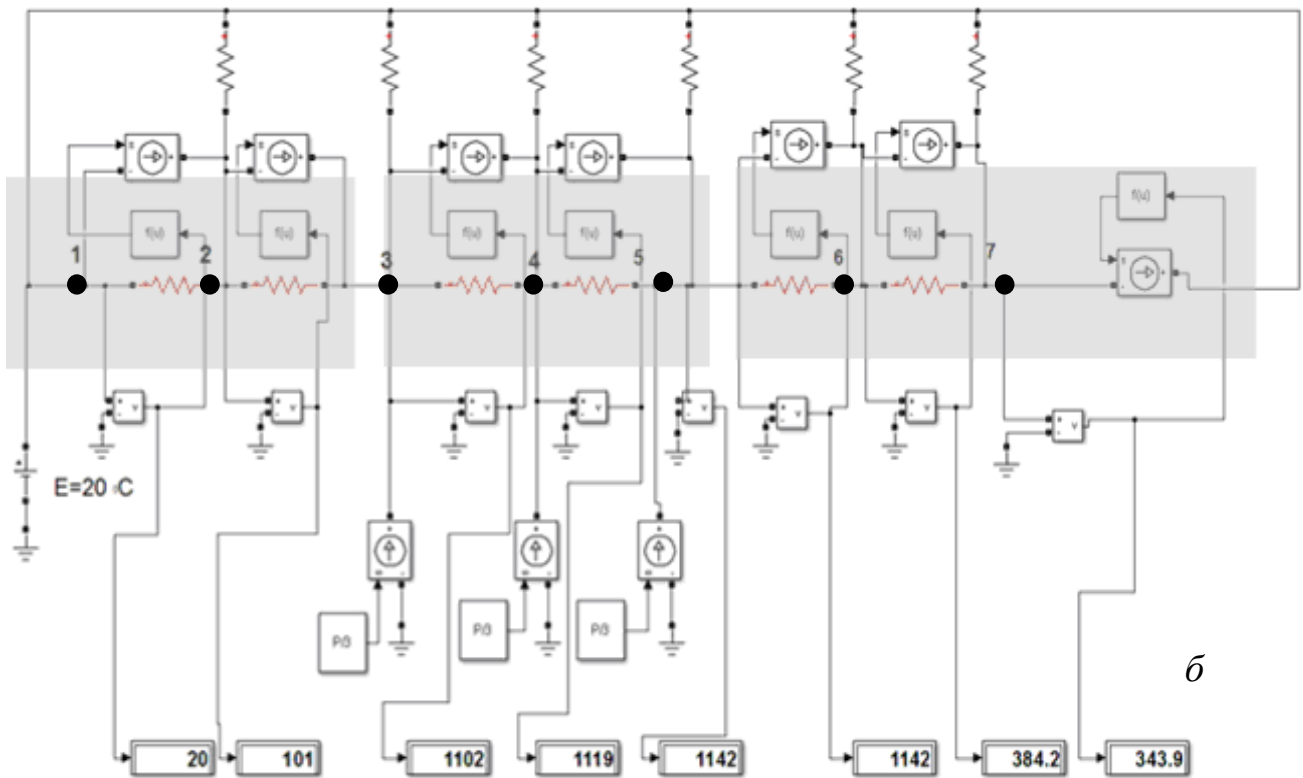
Результати розрахунку температури в усталеному режимі роботи печі наведені на рис. 3 а, де показані значення температури біля кожного вузла. Ці значення в тепловому колі вимірюються за допомогою відповідних вольтметрів, показники яких виводяться на екрани дисплеїв (рис. 3 б, внизу). Із наведених результатів розрахунку температури видно, що внаслідок

док руху металу температура на вході в піч набуває меншого значення, ніж на виході (1102°C та 1142°C відповідно), а на виході з печі в зоні кристалізації метал значно охолоджується.

На рис. 4 показано результати теплових розрахунків для двох випадків: у разі збільшення витрати металу з 200 до 250 кг/год (а) та в разі зменшення цієї витрати до 150 кг/год (б). Видно, що в процесі збільшення витрати металу на вході в піч унаслідок більш швидкої подачі холодного металу він твердне, і в цьому випадку необхідно збільшити електричну потужність, що споживає піч. У разі зменшення витрати металу він значно перегрівається, що потребує зменшення електричної потужності печі. На скільки в цих двох випадках необхідно



а



б

Рис. 3

змінювати потужність може бути визначено за результатами комп'ютерних розрахунків із використанням запропонованої моделі.

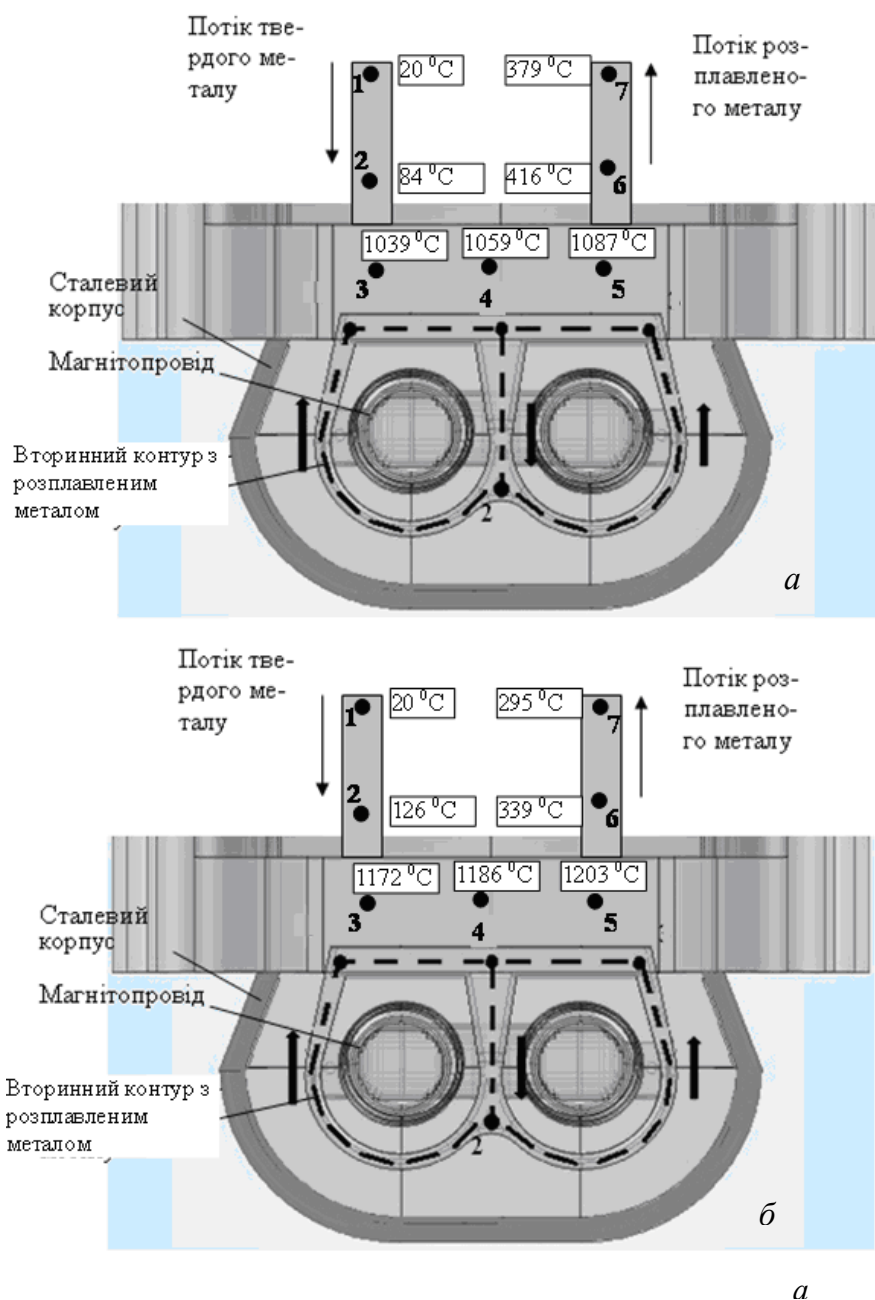


Рис. 4

потоків холодного та розплавленого металу в її активній зоні. У розробленій тепловій моделі запропоновано враховувати конвективні потоки теплоти за допомогою керованих джерел струму як додаткових елементів у тепловому колі.

Проведено розрахунок розподілу температури в активній зоні каналної печі й показано вплив масової витрати металу на вході та виході з печі на нерівномірність розподілення температури в активній зоні. Одержані результати дають змогу вибирати необхідне значення електричної потужності печі за різних значень витрати металу, що безперервно рухається крізь активну зону, нагріваючись за таких умов до заданої температури на виході.

Розроблена модель реалізована за допомогою пакета програм Matlab/Simulink, є відносно простою в реалізації і дає змогу в режимі on-line оцінювати температуру розплаву в

Стосовно переваги запропонованого підходу щодо розрахунку електротеплових процесів у індукційних каналних печах, зазначимо, що оскільки розрахунок одного варіанту потребує орієнтовно однієї хвилини комп'ютерного часу, то такі розрахунки можуть проводитися оператором печі в режимі on-line, що дає змогу йому здійснювати керування електричними процесами, спираючись на одержану інформацію щодо характеру протікання теплових процесів у активній зоні печі.

Висновки.

На основі методу теплових кіл розроблено комп'ютерну модель для розрахунку електротеплових процесів у індукційній каналній печі, що використовується для отримання в режимі безперервного лиття мідної катанки промислового призначення. Модель дає змогу розраховувати усталені режими роботи з урахуванням

активній зоні печі залежно від загальної електричної потужності, що споживає індукційна піч, та витрати металу на виході з печі, а також вибирати раціональні режими її роботи.

Фінансується за держбюджетною темою «Розвиток теорії, розроблення методів інтелектуалізації технологічних процесів та засобів керування, моніторингу, діагностування і вимірювання в електроенергетичних та електротехнічних системах» (шифр «ІНТЕХЕН-2»), що виконується за Постановою Президії від 18.12.2019, протокол № 339 та Постановою від 23.12.2020, протокол № 296. Державний реєстраційний номер робіт 0120U2125. КПКВК 6541030.

1. UPCAST Products: официальный сайт компании UPCAST. URL <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>.
2. Gandhewar V.R. Induction Furnace A Review. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. Vol. 3(4). Pp. 277–284.
3. Бондар О.І., Глухенький О.І., Гориславец Ю.М., Западничук О.П. Чисельне моделювання теплового стану індукційної каналної печі. *Технічна електродинаміка*. 2021. № 3. С. 44–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044>
4. Wang Q., Baokuan LI, Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. No. 2. Pp. 311–320. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.311>
5. Щерба А.А., Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н., Золотарев В.М., Белянин Р.В. Моделирование и контроль длительно протекающих электромагнитных и тепловых процессов в индукционной каналной печи для производства медной катанки. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055>
6. <https://www.mathworks.com/>
7. Щерба А.А., Подольцев О.Д., Кучерява І.М., Золотарьов В.М., Білянін Р.В. Два підходи до розрахунку електротеплових процесів при індукційному нагріванні рухомої заготовки – на основі теорії поля та на основі теорії теплових кіл. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2021. Вип. 59. С.5–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005>

CALCULATION OF ELECTROTHERMAL PROCESSES IN THE INDUCTION CHANNEL FURNACE IN THE STEADY-STATE OPERATION BASED ON THE THEORY OF THERMAL CIRCUITS

A.A. Shcherba¹, O.D. Podoltsev¹, Yu.V. Peretiatko², V.M. Zolotarev³, R.V. Bilianin³

¹ - Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: podol@ied.org.ua

² - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

³ - Yuzhcable works, PJSC,
Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

Based on the theory of thermal circuits, a computer model of an induction channel furnace has been developed, which is used to obtain industrial copper wire rods in the mode of continuous casting. The model allows calculating the established electrothermal processes considering the flows of cold and molten metal in its core. In the developed thermal model, it is proposed to consider the convection fluxes of heat in the metal using controlled current sources. The temperature distribution in the active zone of the channel furnace is calculated, and the influence of the mass flow of metal at the inlet and outlet of the furnace on the non-uniformity of temperature distribution in the active zone is shown. The obtained results allow determining the required electric power of the furnace at different values of the flow rate of the metal that moves continuously through its core while heating to a given temperature. The developed model is relatively easy to implement, using the Matlab/Simulink package, and allows online to estimate the melt temperature in different zones depending on the electric power consumed by the furnace and the metal consumption at the outlet of the furnace, as well as to determine rational modes of its operation. Ref. 7, fig. 4.

Keywords: induction channel furnace, electrothermal processes, thermal circuits, steady-state, temperature distribution

1. UPCAST Products: the official website of UPCAST. URL: <http://www.upcast.com/rus/upcast-products.html>
2. Gandhewar V.R. Induction Furnace – A Review. *International Journal of Engineering and Technology*. 2011. Vol. 3(4). Pp. 277–284.
3. Bondar O.I., Glukhenky O.I., Goryslavets Yu.M., Zapadynchuk O.P. Numerical modeling of induction channel furnace thermal state. *Tekhnichna electrodynamika..* 2021. No 3. Pp. 40–49. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.03.044> (Ukr)
4. Wang Q., Baokuan LI, Tsukihashi F. Modeling of a thermo-electromagneto-hydrodynamic problem in continuous casting tundish with channel type induction heating. *ISIJ International*, 2014. Vol. 54. No. 2. Pp. 311–320. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.311>
5. Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N., Zolotarev V.M., Bslanin R.V. Modeling and control of long-lasting electromagnetic and thermal processes in an induction channel furnace for the production of copper wire rod. *Tekhnichna electrodynamika..* 2017. No 4. Pp. 55–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.055> (Rus)
6. <https://www.mathworks.com/>
7. Shcherba A.A., Podoltsev O.D., Kucheryava I.M. Two approaches to the calculation of electrothermal processes in induction heating of a moving workpiece - based on field theory and based on the theory of thermal circuits. *Pratsi Instytutu Electrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*, 2021. Issue 59. Pp. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005> (Ukr)

Надійшла: 08.09.2021

Received: 08.09.2021