

ТЕОРЕТИЧНА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОФІЗИКА

УДК 621.365.5

DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2021.59.005>**ДВА ПІДХОДИ ДО РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРОТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВУ РУХОМОЇ ЗАГОТОВКИ – НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ПОЛЯ ТА ТЕОРІЇ ТЕПЛОВИХ КІЛ**

А.А. Щерба^{1*}, чл.-кор. НАН України, **О.Д. Подольцев^{1**}**, докт. техн. наук, **І.М. Кучерява¹**, докт. техн. наук, **В.М. Золотарьов²**, докт. техн. наук, **Р.В. Білянin²**, канд. техн. наук

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

²ПАТ "Завод Південкабель",
вул. Автогенна, 7, Харків, 61099, Україна

Розроблено модель для розрахунку теплових процесів в установках індукційного нагріву рухомої заготовки за допомогою еквівалентних теплових кіл. У моделі для врахування конвективного перенесення теплоти вздовж рухомої заготовки використано додаткові елементи – керовані джерела струму. Модель реалізована в пакеті Matlab/Simulink і дає змогу отримувати розподіл температури вздовж заготовки в усталеному тепловому режимі нагрівання. Результати порівнюються з розрахунком на основі альтернативного методу, що базується на теорії електромагнітного та теплового полів, реалізацію якого здійснено в програмі Comsol. Показано збіг результатів розрахунків розподілу температури вздовж заготовки, отриманих за двома методами. Визначаються наявні переваги та недоліки кожного з використаних розрахункових підходів. Бібл. 8, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: установка індукційного нагріву, рухома заготовка, розрахунок електромагнітного та теплового полів, тепла колова модель установки, конвективне теплоперенесення, порівняння результатів розрахунків.

Вступ. Завдання побудови комп'ютерних моделей для розрахунку електротеплових процесів в індукційних установках є актуальними і дають змогу на етапі проектування таких установок визначати їхні оптимальні параметри та ефективні режими електромагнітної керуваної обробки струмопровідних матеріалів [1–3].

Комп'ютерні моделі для розрахунку таких процесів можуть створюватися як на основі теорії електромагнітного та теплового полів, так і на основі теорії еквівалентних теплових кіл. Моделі на основі теорії теплових кіл широко використовуються, наприклад, для аналізу теплових процесів в електричних машинах [4, 5]. Під час побудови теплової моделі індукційної установки для нагріву рухомої заготовки важливу роль відіграють процеси конвективного перенесення теплоти. Для врахування цього механізму необхідно використовувати додаткові елементи, що не знайшло відображення у вищезазначеній літературі.

Колова тепла модель індукційної установки була створена під час виконання цієї роботи, і для підтвердження достовірності отриманих на її основі результатів використовувалася тестова задача індукційного нагріву довгопротяжної мідної заготовки, що безперервно рухається в магнітному полі циліндричного індуктора. Для розв'язання цієї задачі використовувалися моделі, побудовані на основі двох означених підходів. Далі наведено постановки та результати порівняльного аналізу розрахунків польової задачі та задачі на основі запропонованого методу теплових схем заміщення.

Метою цієї роботи є порівняльний аналіз результатів розрахунків процесу індукційного нагріву рухомої заготовки в полі циліндричного індуктора через застосування двох альтернативних методів, побудованих на основі теорії електромагнітного та теплового полів та теорії теплових еквівалентних кіл з урахуванням конвективного теплоперенесення, а також визначення переваг кожного з методів.

Тестова задача індукційного нагріву та її розв'язання на основі теорії поля. Досліджується система індукційного нагріву, конструктивні та технічні характеристики якої наведено в таблиці й на рис. 1. На ньому показано також розрахункову область задачі та складові елементи області.

Параметри	Значення
Довжина індуктора, м	6
Діаметр мідної заготовки, мм	300
Товщина магнітопроводу, мм	150
Довжина заготовки, м	8
Швидкість руху заготовок, мм/с	7
Необхідна температура нагріву, °C	800
Густина струму в індукторі за частоти 50 Гц, А/м ²	10·10 ⁶

Система може функціонувати як з магнітопроводом, так і без нього. Через неї здійснюється нагрівання заготовки, що безперервно рухається зі швидкістю v з метою подальшої її обробки гідравлічним пресом. Холодні заготовки постійно надходять у зону індуктора та нагріваються на його виході до

заданої температури. Змінення частоти і густини струму в індукторі дає змогу змінювати характер розподілу температури за довжиною і товщиною заготовки, а також регулювати значення максимальної температури на виході з індуктора.

Математична модель системи індукційного нагріву мідних циліндричних заготовок розроблена для двовимірного випадку в циліндричній системі координат rOz для розрахунку процесів в області, що показана на рис. 1. Модель дає змогу досліджувати пов'язані між собою електромагнітний і тепловий процеси в установці і базується на таких двох задачах.

Електромагнітна задача. Електромагнітний процес в індукційній системі описується системою диференціальних рівнянь щодо комплексного векторного магнітного потенціалу $\dot{\mathbf{A}} = (0, \dot{A}_\varphi, 0)$:

$$j\omega\sigma(T)\dot{\mathbf{A}} + \nabla \times ((\mu_0\mu(T))^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \text{ в області заготовки;}$$

$$\nabla \times ((\mu_0\mu(T))^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \text{ в області магнітопроводу;}$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = \mathbf{J}_0 \text{ в області індуктора;}$$

$$\nabla \times (\mu_0^{-1}\nabla \times \dot{\mathbf{A}}) = 0 \text{ в навколишньому середовищі.}$$

У наведених рівняннях: $\sigma(T)$, $\mu(T)$ – електропровідність і відносна магнітна проникність матеріалу, які в загальному випадку треба розглядати залежними від температури; μ_0 – магнітна проникність вакууму; ω – кутова частота; \mathbf{J}_0 – відома густина струму в області індуктора; $T(r, z)$ – температура, що визначається з теплової задачі, представленої далі; j – уявна одиниця.

Граничними умовами електромагнітної задачі є умова симетрії відносно осі Oz (рис. 1) та умова магнітної ізоляції на зовнішніх границях: $A_\varphi = 0$.

Теплова задача. Теплова задача відносно невідомої температури T формулюється лише в області заготовок на основі рівняння:

$$\rho C_p \mathbf{v} \nabla T - \nabla \cdot \lambda \nabla T = Q,$$

де $\rho(T)$, $C_p(T)$, $\lambda(T)$ – густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу заготовок відповідно; \mathbf{v} – вектор швидкості руху заготовок (має тільки осьову складову); Q – питома потужність теплового джерела, що обумовлює нагрів заготовок наведеними струмами і визначається формулою:



Рис. 1

$$Q = \frac{J \cdot J^*}{\sigma} = \omega^2 \sigma (A_\varphi \cdot A^*),$$

де $J = -j\omega\sigma A_\varphi$ – діюче значення густини наведеного струму; A^* – комплексно-сполучена величина магнітного потенціалу.

Для теплової задачі задається гранична умова Неймана $\partial T / \partial r = 0$ на осі симетрії Oz (рис. 1), а на зовнішніх границях заготовок – умова теплообміну з навколишнім середовищем:

$$-\lambda \partial T / \partial n = k(T - T_0),$$

де k – коефіцієнт тепловіддачі; T_0 – температура навколишнього середовища; n – вектор зовнішньої нормалі до відповідної границі.

Електромагнітна та тепла задачі розв'язувались чисельним методом кінцевих елементів у прикладному пакеті програм мультифізичного моделювання Comsol [6, 7].

Результати спільного розв'язання польових задач наведено на рис. 2 а – розподіл температури в перерізі заготовки, що рухається зі швидкістю $v = 0,007$ м/с, та на рис. 2 б – розподіл температури вздовж заготовки, де показано характер зростання температури в матеріалі заготовки залежно від поздовжньої координати. Температура заготовки на виході з індуктора дорівнює 830°C . На рис. 2 б наведено також порівняльні дані щодо рівня нагріву заготовки, визначеного за польовою задачею в пакеті Comsol та коловою задачею, реалізованою в пакеті Matlab/Simulink та описаною далі.

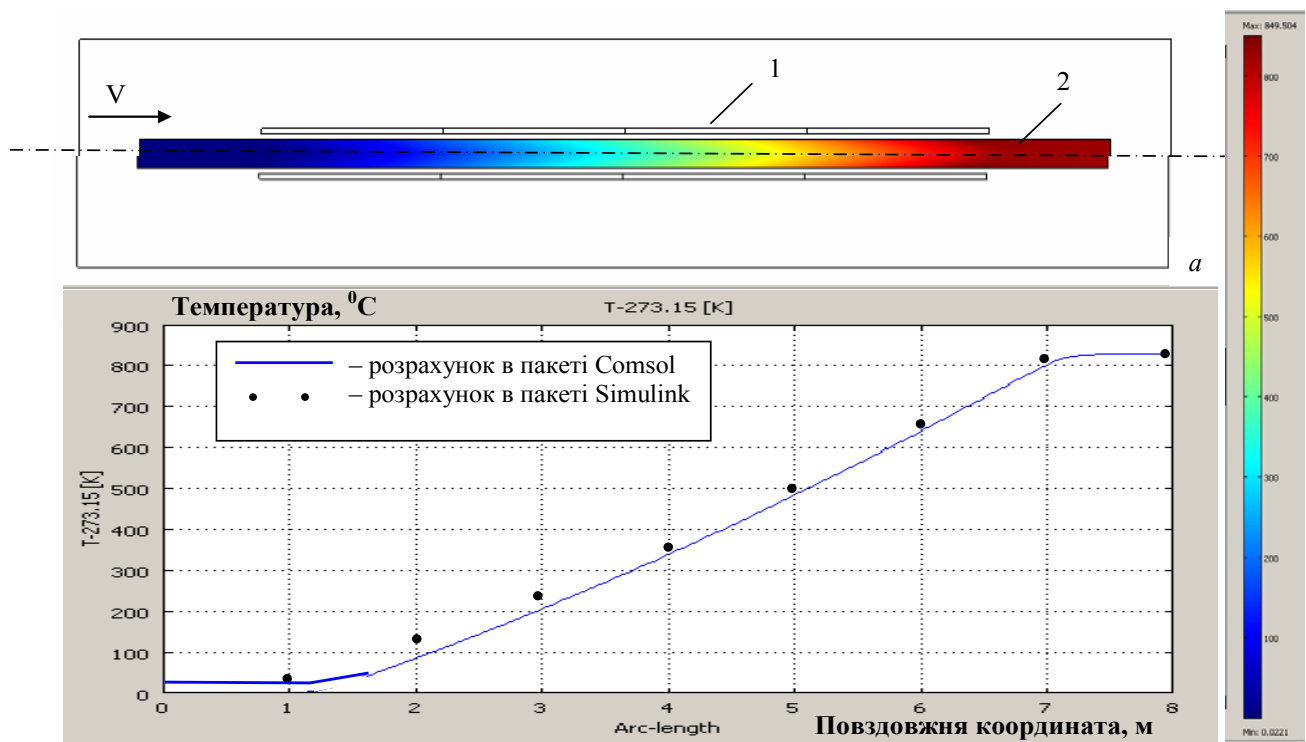


Рис. 2

б

Розрахунок температури на основі теорії теплових кіл. Описана вище електротеплова задача розв'язувалась іншим методом – за допомогою теплових еквівалентних кіл. У рамках альтернативного підходу була розроблена колова тепла модель, реалізована в пакеті Matlab/Simulink.

Складові моделі індукційної установки нагріву рухомої мідної заготовки великої довжини показано на рис. 3. Під час побудови моделі вся заготовка поділялася за довжиною на вісім рівних елементів, кожному з яких у колі відповідає свій вузол, позначений на рис. 3 як 1...8. Для розробленої колової моделі застосовано метод контрольного об'єму [8], а кожний з

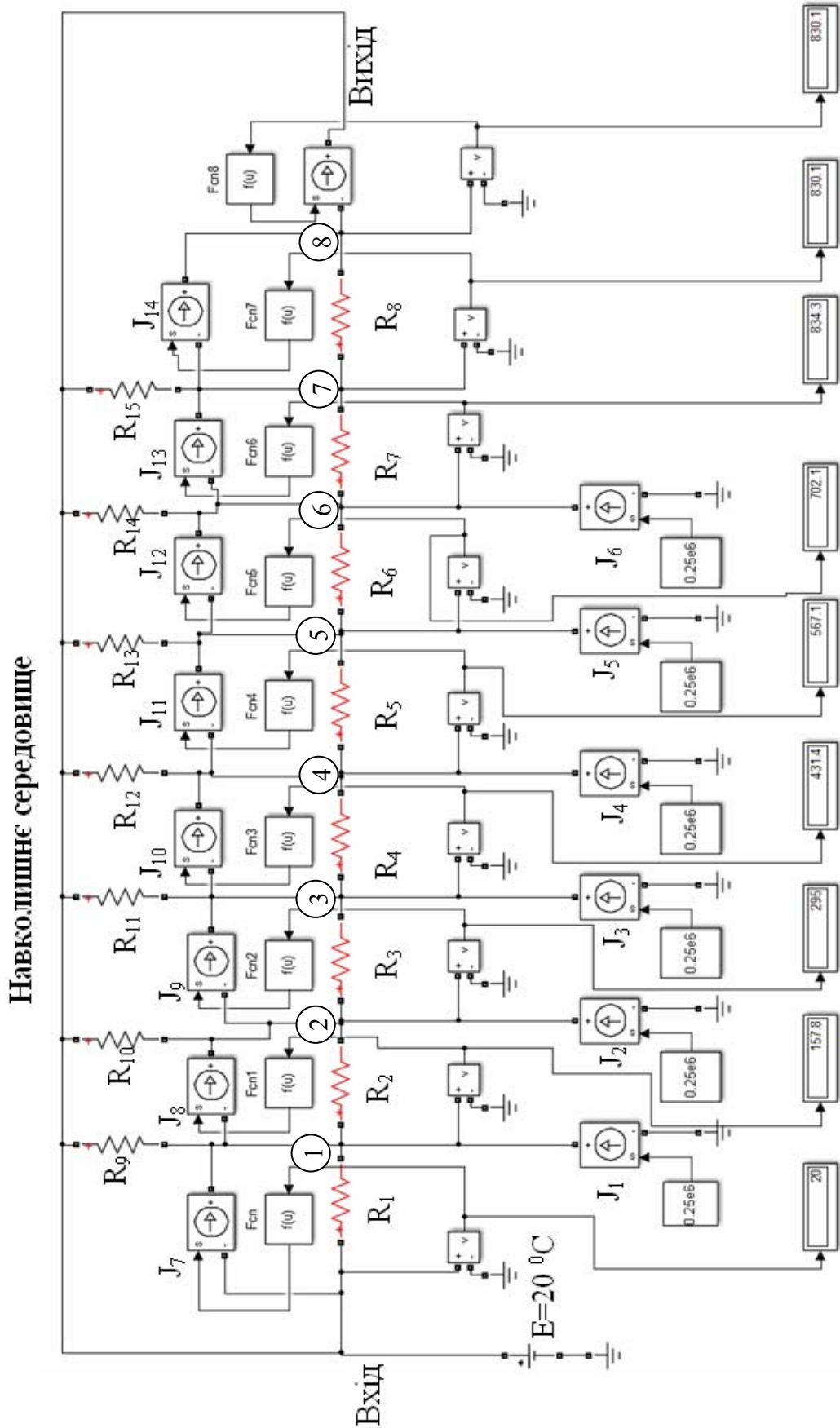


Рис. 3

елементів заготовки представлено як контрольний об'єм. З дискретного аналога диференціального теплового рівняння, що отримується за методом контрольного об'єму, визначаються вирази для розрахунку температури всіх елементів теплового еквівалентного кола.

Теплове коло, що показано на рис. 3, містить послідовно з'єднані резистивні елементи $R_1...R_8$, які відповідають процесу теплопередачі за механізмом теплопровідності між цими елементами. Їхні значення розраховуються за формулою

$$R = l/(\lambda S),$$

де l – довжина кожного з обраних елементів заготовки; S – площа їхнього перерізу; λ – теплопровідність матеріалу заготовки.

Керовані джерела струму $J_1...J_6$ у схемі на рис. 3 відповідають резистивним втратам в елементах заготовки, що виникають у гармонічному магнітному полі індуктора. Такі значення для кожного елемента розраховувались через розв'язання польової задачі в програмі Comsol, крім того, вони можуть бути визначені за відомою методикою розрахунку індукційних установок, наприклад, [2].

Керовані джерела струму $J_7...J_{14}$ відповідають за конвективне перенесення теплоти і розраховуються на основі виразу:

$$J = \rho \delta v C_p T,$$

де v – швидкість руху заготовки.

Резистивні елементи $R_9...R_{15}$ відповідають за передачу теплоти від заготовки у навколишнє середовище. Температура цього середовища задається за допомогою джерела постійної напруги E , рівного 20^0C . Як засоби візуалізації результатів розрахунку моделі використовувалися дисплеї, розташовані внизу на рис. 3. Вони відображають значення температури у відповідному вузлі (елементі) теплового кола.

Граничні умови задачі такі: температура заготовки на вході в індуктор задавалася рівною 20^0C , а на виході з індуктора визначався тепловий потік, що дорівнює конвективному потоку (задається за допомогою керованого джерела струму).

Результати розрахунку індукційної установки в усталеному режимі на основі розробленого теплового кола показано на рис. 2 б точками. Видно, що дані добре узгоджуються з результатами, одержаними за польовою моделлю. Це зі свого боку свідчить про достовірність побудованої теплової моделі. Деяка відмінність у значеннях температури на початковій ділянці заготовки пояснюється малою дискретизацією заготовки (використовувалося вісім елементів, розташованих за її довжиною). Зазначимо, що для підвищення точності розрахунку кількість обраних елементів може бути значно збільшено завдяки дискретизації заготовки як за довжиною, так і за радіусом.

Порівняння двох підходів. Визначимо переваги та недоліки кожного з розглянутих підходів до моделювання процесів в індукційній установці.

1) Метод теорії поля характеризується високою точністю розрахунку розподілу температури в об'ємі заготовки, але потребує використання комп'ютерів великої потужності, а також не дає змогу моделювати електричні процеси в електричному джерелі живлення складної структури, наприклад, за наявності випрямляча та інвертора.

2) Метод на основі теплових кіл є простішим у реалізації, не потребує використання комп'ютерів великої потужності, дає змогу швидко в режимі on-line одержувати значення температури заготовки за зміни вхідних параметрів (швидкість руху заготовки, струм в індукторі, ін.). Після доповнення моделі електричним колом джерела живлення такий підхід дає змогу з високою точністю моделювати процеси в інверторі як елементі джерела живлення та в компенсуючій ємності, а також моделювати в такому випадку всю систему, наприклад, автоматичного керування температурою заготовки як на виході з індуктора, так і її розподілом вздовж заготовки. Як недолік цього методу треба зазначити меншу точність розрахунку порівняно з методом на основі теорії поля.

Висновки. У роботі представлено модель для розрахунку теплових процесів в установках індукційного нагріву заготовки, що рухається. Модель базується на еквівалентних теплових колах і враховує конвективне перенесення теплоти вздовж рухомої заготовки через використання додаткових елементів, якими є керовані джерела струму. Модель реалізована в програмному пакеті Matlab/Simulink. За її допомогою визначається розподіл температури вздовж заготовки в усталеному тепловому режимі нагрівання. Результати розрахунків за такою моделлю

лю порівнюються з розрахунковими даними, отриманими альтернативним методом, на основі теорії електромагнітного і теплового поля, реалізацію якого проведено в програмі комп'ютерного моделювання Comsol. Показано близький збіг результатів розрахунків розподілу температури вздовж заготовки, отриманих за допомогою двох різних підходів. Зазначаються переваги та недоліки кожного з розглянутих методів.

Робота 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 р., протокол № 339 та Постановою від 23.12.2020 р., протокол № 296. Державний реєстраційний номер робот 0120U2125. КПКВК 6541030.

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of induction heating. Marcel Dekker Inc. 2003, 800 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420028904>
2. Немков В.С., Демидович В.Б. Теория и расчет устройств индукционного нагрева. Л., Энергоатомиздат, 1988, 280 с.
3. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Многомасштабное моделирование в электротехнике. Киев: Артпринт. 2011, 256 с.
4. Филиппов И.Ф. Основы теплообмена в электрических машинах. Л.: Энергия, 1974, 384 с.
5. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. No 3. Pp. 871–882. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>
6. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
7. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование в электротехнике. К.: Институт электродинамики, 2015, 305 с.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984, 150 с.

TWO APPROACHES TO THE COMPUTATION OF ELECTROTHERMAL PROCESSES AT INDUCTION HEATING OF MOVING INGOTS – BY FIELD THEORY AND THERMAL CIRCUIT THEORY

A.A. Shcherba¹, A.D. Podoltsev¹, I.M. Kucheriava¹, V.M. Zolotarev², R.V. Bilianin²

¹Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv, Ukraine

e-mail: podol@ied.org.ua,

²Yuzhcable works, PJSC,

Avtogenna str., 7, Kharkiv, 61099, Ukraine

The model for the computation of thermal processes in induction heating installations with moving ingots is developed using equivalent thermal circuits. The controlled current sources as additional elements in the model are used to take into account the convective heat transfer along the moving ingot. The model is implemented in the program Matlab/Simulink and makes it possible to determine the temperature distribution along the ingot under steady-state heating conditions. The results are compared with data obtained by the alternative method which is based on the electromagnetic and thermal field theory and realized in the Comsol program. As shown the computational results by two methods concerning the temperature distribution along the ingot are in good agreement. The existing advantages and shortcomings of the used approaches are discussed. Ref. 8, fig. 3, table.

Keywords: induction heating installation, moving ingot, computation of electromagnetic and thermal fields, thermal circuit model of the installation, convective heat transfer, comparison of computed results.

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of induction heating. Marcel Dekker Inc. 2003, 800 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420028904>
2. Nemkov V.S., Demidovich V.B. Theory and calculation of induction heating devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988, 280 p. (Rus)
3. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiscale modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, Ukrainian Academy of Sciences, 2011, 256 p. (Rus)
4. Philippov I.F. Basics of heat exchange in electric motors. Leningrad: Energiia, 1974. 384 p. (Rus)
5. Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C. Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines. *IEEE Trans. on Industrial Electronics*. 2009. Vol. 56. No 3. Pp. 871–882. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2011622>
6. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com/>
7. Podoltsev A.D., Kucheriava I.M. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institute of Electrodynamics, 2015, 305 p. (Rus)
8. Patankar S. Numerical heat transfer and fluid flow. Moskva: Energoatomizdat, 1984, 150 p. (Rus)