

ЕЛЕКТРОТЕПЛОВІ ПРОЦЕСИ ІНДУКЦІЙНОЇ ОБРОБКИ СЕГМЕНТОВАНОЇ ЖИЛИ СИЛОВОГО КАБЕЛЮ (ДОСЛІДЖЕННЯ З ЕЛЕМЕНТАМИ БАГАТОМАСШТАБНОГО МОДЕЛЮВАННЯ)

І.М. Кучерява, докт. техн. наук
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: rB.irinan@gmail.com

У роботі проводиться вивчення електротеплових процесів при індукційній обробці сегментованої жили кабелю, яка рухається в змінному магнітному полі циліндричного індуктора. Дослідження виконується на двох масштабних рівнях: у масштабі всієї жили та індуктора (шляхом розв'язання двовимірної електромагнітної задачі) та в окремому сегменті жили як її базовому елементі (за результатами електромагнітного розрахунку послідовно розв'язується тривимірна теплова задача). Проаналізовано характер розподілу густини струму, джоулевих втрат та температури в поперечному перерізі та вздовж рухомої жили. Визначено особливості нагріву жили під час термообробки та умови досягнення її необхідної температури. Бібл. 19, рис. 6.

Ключові слова: сегментована жила, силовий кабель, індукційний нагрів, зв'язані електромагнітні і теплові процеси, елементи багатомасштабного моделювання, комп'ютерне моделювання,

Вступ. Індукційний нагрів як метод безконтактного нагріву струмопровідних матеріалів використовується в різних технологічних процесах [1, 2], зокрема для обробки металів і сплавів, а також виробництва кабельно-провідникової продукції. Пристрої індукційного нагріву інтегруються в діючі лінії вулканізації зшитого поліетилену у процесі виготовлення кабелів з поліетиленовою ізоляцією з метою підвищення якості і швидкості зшивання ізоляційних шарів, що особливо актуально для кабелів на високі і надвисокі напруги, які, як правило, мають великий переріз (до 3000 мм²) і сегментовану жилу (рис. 1).

В індукційних установках, що перетворюють електричну енергію джерела живлення в енергію електромагнітного поля і потім в теплову енергію, основними процесами є взаємопов'язані між собою електромагнітні та теплові процеси.

Основи аналізу електротеплових процесів при індукційному нагріві викладено, наприклад, у роботах [1, 3]. На даний час розроблено різні підходи до розрахунку індукційних установок. Так у роботі [4, глава 7] запропоновано використання багатомасштабного моделювання зв'язаних електромагнітних і теплових процесів в сталевому реакторі і матеріалі всередині цього реактора, що нагрівається індукційним способом. Процеси розглядаються на двох масштабних рівнях – в об'ємі всієї установки і в об'ємі окремого витка індуктора. Під час розв'язання електромагнітної задачі для окремого витка визначається еквівалентний опір індуктора, далі цей опір використовується для розрахунку струму в індукторі на рівні всієї установки.

У теперішній час багатомасштабне моделювання успішно розвивається [4–10]. Воно призначено для розв'язання певного класу задач, в яких процеси і явища, що відбуваються в малих об'ємах об'єктів, впливають на протікання процесів у більших областях, що характерно для систем із вкладеною ієрархічною структурою.

У ряді випадків багатомасштабний підхід поєднується з розв'язанням мультифізичних задач [8, 11–14]. Реалізація мультифізичного моделювання в рамках багатомасштабного підходу надає можливості розв'язувати та зв'язувати дво- і тривимірні задачі на різних просторових рівнях, отримувати більш високу точність і ефективність розрахунків, досягати більш повного розуміння явищ і процесів у різних фізичних об'єктах [11–14]. Підходи до моделювання і принципи організації зв'язків у спільних мультифізичних і багатомасштабних моделях описано в [11, 12, 14].

Під мультифізичним моделюванням в електротехніці мається на увазі моделювання сукупності зв'язаних процесів різної фізичної природи, що визначають ефективність роботи досліджуваного електротехнічного пристрою, а також розв'язання залежних між собою задач, які



Рис. 1

відповідають різним науковим галузям (електротехніка, теплофізика, прикладна механіка, гідродинаміка, аеродинаміка, біофізики, ін.) [11].

Спільне використання мультифізичного і багатомасштабного моделювання передбачає розв'язання зв'язаних задач з різною фізичною природою на різних масштабах.

Схема суміщення мультифізичного і багатомасштабного підходу для розрахунку електротехнічних пристроїв наводиться і реалізується для ряду задач в роботах [4, 11]. Основні етапи цієї схеми складаються з наступного:

- досліджуваній пристрій розглядається як ієрархічна структура, в якій виділяються характерні структурні рівні, що відрізняються за масштабом (розміром);
- на кожному обраному структурному рівні вибирається свій базовий (репрезентативний) елемент, як найбільш важливий для дослідження елементу пристрою, і для нього будується своя математична модель розрахунку електромагнітного поля і пов'язаних з ним мультифізичних процесів;
- визначається зв'язок між процесами на різних рівнях;
- за результатами чисельних розрахунків на кожному структурному рівні формується узагальнена інформація щодо характеристик, процесів і особливостей функціонування пристрою в цілому.

Приклади розв'язання задач електротехніки за такою схемою наведено в [4, 11, 15].

Метою даної роботи є чисельне дослідження на основі окремих елементів багатомасштабного моделювання мультифізичних електромагнітних і теплових процесів у сегментованій жилі силового кабелю. Така струмопровідна жила піддається високочастотному індукційному нагріву у процесі руху в змінному магнітному полі циліндричного індуктора, що передбачається технологічним процесом виготовлення кабелів.

Складові елементи багатомасштабного підходу, що обираються для дослідження, є такими: 1) розгляд двох структурних рівнів (двох масштабів) сегментованої жили – всієї жили разом з індуктором (макрорівень) і окремого сегмента жили (мікрорівень) як базового елемента структури, що характеризується кутовою періодичністю; 2) розв'язання різних задач – електромагнітної і теплової задач на різних рівнях – рівні всієї жили і виділеного її сегмента, відповідно; 3) здійснення зв'язку двох структурних рівнів шляхом передачі джоулевих втрат з електромагнітної до теплової задачі. Дослідження виконується за схемою на рис. 2. При цьому проводиться двовимірне комп'ютерне моделювання електромагнітних процесів і чисельне розв'язання тривимірної теплової задачі.

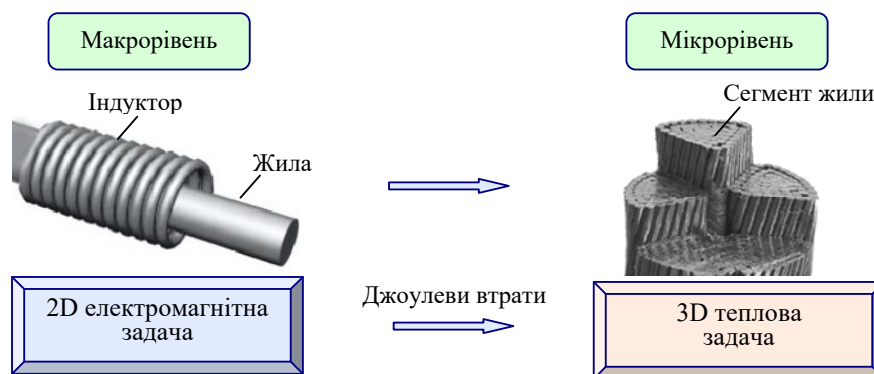


Рис. 2

Електротеплові процеси при індукційному нагріві сегментованої жили кабелю. Вивчення в даній роботі процесів термообробки сегментованої жили кабелю в технології його виготовлення продовжує дослідження [16, 17].

Силовий кабель з поліетиленовою ізоляцією та сегментованою жилою показано на рис. 1. Процеси досліджуються в п'ятисегментній жилі кабелю на напругу 330 кВ. Жила має поперечний переріз 1600 мм² і знаходиться в змінному магнітному полі циліндричного індуктора (рис. 3, а).

Електромагнітна задача. Розглядається випадок використання довгого індуктора, що дає змогу аналізувати електромагнітні процеси в двовимірній постановці в поперечному перерізі жили. Під час розрахунку магнітного поля рух самої жили не враховується. Матеріал жили (алюміній) є немагнітним. Контактний опір між дротами в кожному сегменті покладається рівним нулю.

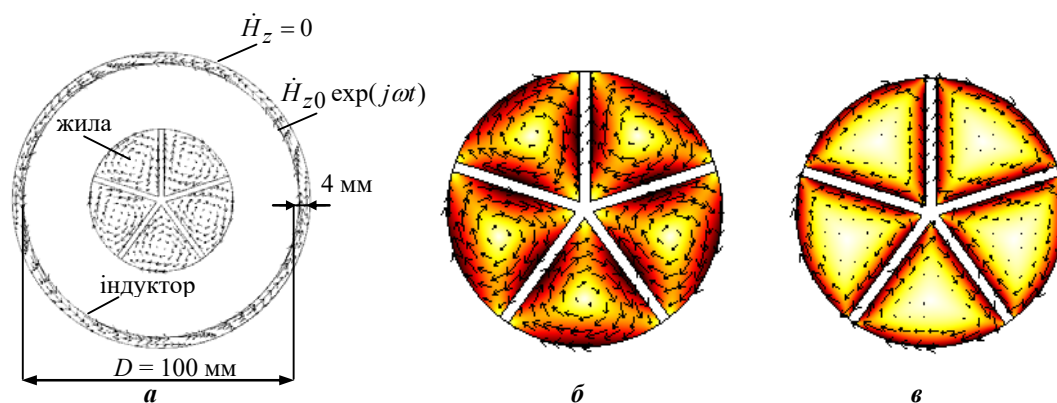


Рис. 3

Електропровідність матеріалу ізоляційних проміжків між сегментами (електротехнічний картон) припускається рівною нулю.

Польова задача формується для вектора напруженості магнітного поля (комплексної величини), що має єдину ненульову z -складову – $\dot{\mathbf{H}} = (0, 0, \dot{H}_z)$.

Із системи рівнянь Максвелла для вектора $\dot{\mathbf{H}}$

$$\nabla \times \dot{\mathbf{H}} = \sigma \dot{\mathbf{E}}, \quad \nabla \times \dot{\mathbf{E}} = -j\omega\mu_0 \dot{\mathbf{H}}, \quad \nabla \cdot \mu_0 \dot{\mathbf{H}} = 0$$

записується основне диференціальне рівняння

$$\nabla \times (\sigma^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{H}}) = -j\omega\mu_0 \dot{\mathbf{H}}. \quad (1)$$

Джерелом поля є задана напруженість на внутрішній поверхні індуктора $\dot{H}_{z0} \exp(j\omega t)$ (приймається $\dot{H}_{z0} = 10^5$ А/м як амплітудне значення), на зовнішній поверхні індуктора поле покладається рівним нулю – $\dot{H}_z = 0$ (рис. 3, а).

Після визначення поля $\dot{\mathbf{H}}$ в перерізі жили значення вектора густини струму $\dot{\mathbf{J}}$ і потужності джоулевих втрат q в кожній точці розрахункової області визначаються за наступними виразами: $\dot{\mathbf{J}} = \nabla \times \dot{\mathbf{H}}$, $q = |\dot{\mathbf{J}}|^2 / \sigma$.

Розв'язання рівняння (1) з наведеними граничними умовами виконується чисельно методом кінцевих елементів в програмі Comsol [18]. Зауважимо, що початковими даними для розрахунків в Comsol були саме амплітудні значення заданих величин, а основні використані вирази, наведені вище, записано без урахування цього у загальному вигляді для діючих значень.

Значення джоулевих втрат в перерізі кабелю використовуються для подальшого розв'язання теплової задачі.

Розрахункову область електромагнітної задачі з граничними умовами та розподіл густини струму у вигляді стрілок у поперечному перерізі жили кабелю і в індукторі за частоти струму 50 Гц (в перерізі жили $|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 5,9$ А/мм²) показано на рис. 3, а. Розподіл густини струму $|\dot{\mathbf{J}}|$ (у кольоровому зображенні) та вектора $\dot{\mathbf{J}}$ (стрілками) в перерізі жили для частоти $f = 500$ Гц ($|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 33,6$ А/мм²) і $f = 2400$ Гц ($|\dot{\mathbf{J}}|_{\max} = 63,5$ А/мм²) представлено на рис. 3, б і в, відповідно. Показано, що через наявність ізолюваних сегментів жили розподіл густини струму має п'ятивихрову структуру, причому максимальний струм локалізований не на зовнішній (як у випадку суцільної жили), а на внутрішніх поверхнях сегментів – у центральній зоні бічних граней сегментів, що являє собою прояв ефекту близькості між сегментами. Це відображено також на рис. 4 для окремого сегмента (базового елемента).

Показаному на рис. 3, 4 розподілу густини струму відповідає нерівномірний розподіл джоулевого тепла, що забезпечує нагрів жили. Розподіл джоулевих втрат q (у кольорі) в перерізі жили кабелю для частоти $f = 50$ Гц ($q_{\max} = 7,5 \cdot 10^5$ Вт/м³) представлено на рис. 5, а. Аналогічним розподілам втрат в жилі відповідають значення $q_{\max} = 1,06 \cdot 10^8$ Вт/м³ за частоти 2,4 кГц та $q_{\max} = 4,38 \cdot 10^8$ Вт/м³ за $f = 10$ кГц. На рис. 5, б показано розподіл втрат q в одному сегменті. Такий

розподіл задається лише в зоні індуктора (зоні 2 на рис. 5, б) для розв'язання теплової задачі в масштабі одного сегмента жили.

Теплова задача розв'язується в тривимірній постановці в нерухомій системі координат, пов'язаній з індуктором. У цьому випадку за постійній швидкості руху жили температурне поле є тривимірним і стаціонарним (незалежним від часу). Внаслідок існуючої кутової симетрії тривимірною розрахунковою областю теплової задачі складається з базового елемента – окремого сегмента (рис. 5, б).

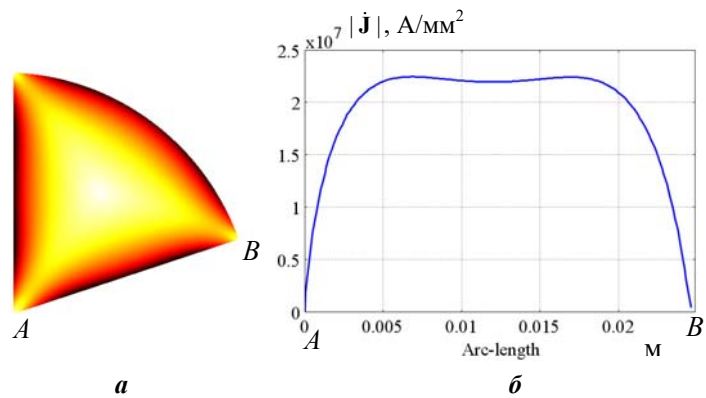


Рис. 4

Рівняння теплопровідності в сегменті жили, яке враховує теплоперенос за рахунок механізмів конвекції і дифузії, має вигляд

$$\rho C \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla(\lambda \nabla T) + q, \quad (2)$$

де ρ , C , λ – відповідно густина, теплоємність і теплопровідність – задані постійні величини, тобто їхні залежності від змінення температури матеріалу під час індукційного нагріву не враховуються (за даними [19] такі залежності слабо змінюються в діапазоні температури, що розглядається в роботі); $\mathbf{v} = (0, 0, v_z)$ – швидкість руху жили вздовж координати z (рис. 5, б); q – залежна від просторової координати потужність джоулевих втрат у провідниках жили в зоні розташування індуктора і визначена з електромагнітної задачі.

Граничні умови теплової задачі наступні: на вході (вздовж руху жили) температура на торці сегмента дорівнює температурі навколишнього середовища $T_c = 20^\circ\text{C}$; на бічних поверхнях сегмента задається умова теплоізоляції, а на зовнішній поверхні – тепловіддача в навколишнє середовище, що описується рівнянням: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = k_{\text{эф}}(T - T_c)$, ($k_{\text{эф}}$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі; \mathbf{n} – вектор зовнішньої нормалі до границі). На виході з індуктора на торці сегмента задається конвективний перенос тепла, тобто рівність нулю похідної температури по зовнішній нормалі.

Розв'язання рівняння (2) з описаними граничними умовами виконувалося у програмі Comsol. Особливістю реалізації комп'ютерної методики розрахунку зв'язаних електротеплових процесів при індукційному нагріві жили було використання в тривимірній тепловій задачі результатів розв'язання двовимірної електромагнітної задачі. Це було здійснено шляхом обміну даними між Comsol-моделями через програмне середовище Comsol-script і використання можливості формування структурних змінних та інтерполяції за допомогою оператора postinterp.

Розв'язання теплової задачі проводилося за довжини індуктора (зони 2 на рис. 5, б) 0,2 м і довжині розглянутої ділянки жили 0,5 м. Положення початку індуктора задавалось на відстані 0,1 м від системи відліку. Швидкість руху жили $v_z = 0,01$ м/с.

Результати комп'ютерних розрахунків показано на рис. 6, а саме розподіл температурного поля за довжиною сегмента ($T_{\text{max}} = 107,1^\circ\text{C}$ на виході з індуктора) за частоти струму в індукторі $f = 2400$ Гц (рис. 6, а). На вставці зверху показано характерний неоднорідний розподіл температури в

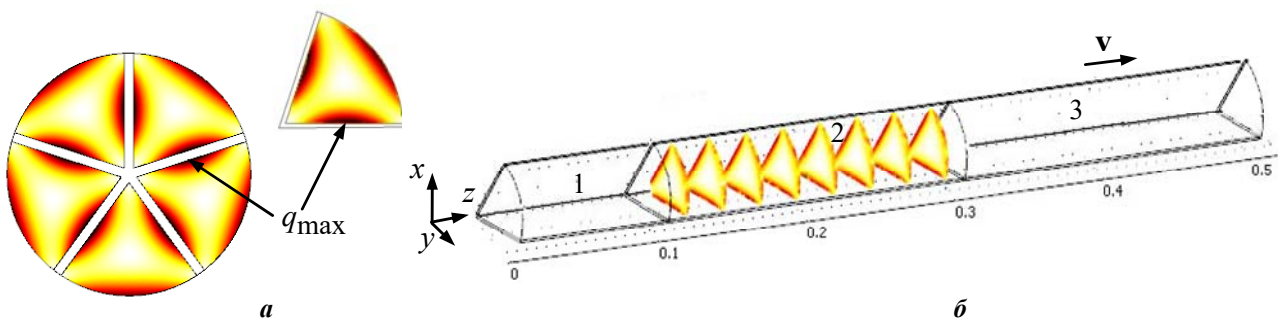


Рис. 5

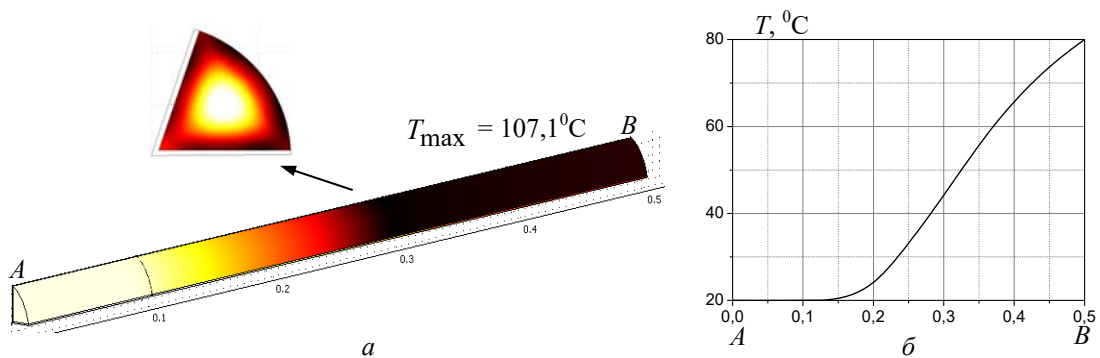


Рис. 6

поперечному перерізі сегмента. Змінення температури вздовж лінії AB , що проходить через верхню кутову точку сегмента, відображено на рис. 6, б.

Основні результати і висновки. У роботі проведено кількісне дослідження з використанням елементів багатомасштабного моделювання електротеплових процесів, що відбуваються при індукційному нагріві сегментованої жили силового кабелю. Дослідження складається з послідовного розв'язання мультифізичних задач різної просторової розмірності – двовимірної електромагнітної задачі в масштабі всієї індукційної установки і жили та тривимірної теплової задачі на рівні окремого сегмента жили.

Розробку та реалізацію запропонованої схеми дослідження спрямовано на визначення режимних параметрів індуктора для забезпечення технологічних умов термообробки сегментованих жил силових кабелів.

Результати чисельних розрахунків свідчать про досить нерівномірні розподіли густини струму і джоулевих втрат по перерізу жили. Виявлено, що максимальні значення цих величин локалізовані не на зовнішній поверхні кожного сегмента, як у випадку суцільної жили, а в центральній зоні бічних граней сегмента (рис. 3–5).

За вибраних геометричних параметрах індуктора та умовах індукційного нагріву:

- температура вздовж довжини сегмента зростає приблизно за лінійним законом (рис. 6);
- індуктор з високою частотою струму (більше 2,4 кГц) забезпечує майже однорідний нагрів жили на виході з індуктора до необхідної за технологією температури – не менше 100°C (рис. 6);
- досягнення заданого рівня нагріву за більш низькій частоті можливо за умови зменшення швидкості руху жили або подовження індуктора.

Автор висловлює вдячність чл.-кор НАН України А.А. Щербі за привертання уваги до застосування елементів багатомасштабного моделювання для задач індукційного нагріву сегментованих жил силових кабелів.

Роботу виконано за рахунок бюджетної теми "Розробити методи та засоби підвищення ефективності та надійності індукційних установок електротермічної обробки металевих розплавів і деталей складної форми", КПКВК 6541030.

ELECTRO-THERMAL PROCESSES AT INDUCTION HEATING OF MILLIKEN CONDUCTOR OF POWER CABLE (STUDY WITH ELEMENTS OF MULTISCALE MODELING)

I.M. Kucheriava

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
Beresteiskyi Ave., 56, Kyiv, Ukraine.

E-mail: rB.irinan@gmail.com.

The article presents the study of electromagnetic-thermal processes during the induction treatment of cable segmented (Milliken) conductor moving in the alternating magnetic field of cylindrical inductor. The study is carried out at two scale levels: at the scale of the entire conductor and inductor (by numerical solution of two-dimensional electromagnetic problem) and at the scale of separate segment of the conductor as its basic (representative) element (the three-dimensional thermal problem is successively solved with the use of electromagnetic results). The characteristic properties of the distributions of current density, Joule losses and temperature in the cross-section and along the moving conductor are analyzed. The special features of conductor heating during the treatment and the conditions for reaching the required temperature are determined. References 19, figures 6.

Key words: Milliken conductor, power cable, induction heating, coupled electromagnetic and thermal processes, elements of multiscale modeling, computer modeling.

1. Rudnev V., Loveless D., Cook R., Black M. Handbook of induction heating. Marcel Dekker, Inc., 2003. 800 p.
2. Lucia O., Maussion P., Enrique J.D., Burdío J.M. Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014. Vol. 61. No 5. Pp. 2509–2520. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2013.2281162>.
3. Nemkov V.S., Demidovich V.B. Theory and calculation of induction heating devices. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. 280 p. (Rus)
4. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Multiscale modeling in electrical engineering. Kyiv: Institut Elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2011. 255 p. (Rus)
5. Weinan E. Principles of multiscale modeling. New York: Cambridge University Press, 2011, 488 p.
6. Kochmann D.M. Multiscale modeling. Mechanics & Materials Lab, Institute of Mechanical Systems. ETH Zurich, 2023. 179 p. URL: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/mechanical-systems/mm-dam/documents/Notes/CompMultMod_Notes.pdf (accessed at 22.12.2023).
7. Bi J., Hanke F., Ji H., McLendon R., Todd S., Dalrymple T., Salazar-T.R. et al. Multiscale modeling for the science and engineering of materials. *International Journal for Multiscale Computational Engineering*. 2021. Vol. 19. Is. 3. Pp. 1–80. DOI: <https://doi.org/10.1615/IntJMultCompEng.2021040247>.
8. Giessen E., Schultz P.A., Bertin N. et al. Roadmap on multiscale materials modeling. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 28. No 4. 043001. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab7150>.
9. Chopard B., Falcone J.L., Kunzli P., Veen L., Hoekstra A. Multiscale modeling: recent progress and open questions. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*. 2018. Vol. 1. No 8. Pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41939-017-0006-4>.
10. Groen D., Knap J., Neumann P., Suleimenova D., Veen L., Leiter K. Mastering the scales: a survey on the benefits of multiscale computing software. *Philosophical Transactions of the Royal Society A – Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2019. Vol. 377. Article No 20180147. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2018.0147>.
11. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Multiphysics modeling in electrical engineering. Kyiv: Institut Elektrodinamiki NAN Ukrainy, 2015. 255 p. (Rus)
12. Cross M., Croft T.N., Slone A.K., Williams A.J., Christakis N., Patel M.K., Bailey C., Pericleous K. Computational modelling of multi-physics and multi-scale processes in parallel. *Internat. Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*. 2007. No. 8. Pp. 1–12.
13. Groen D., Zasada S.J., Coveney P.V. Survey of multiscale and multiphysics applications and communities. *Computing in Science and Engineering*. 2014. Vol. 16. Is. 2. Pp. 34–43. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2013.47>.
14. Larson J.W. Ten organising principles for coupling in multiphysics and multiscale models. *The ANZIAM Journal*. 2009. Vol. 48. DOI: <https://doi.org/10.21914/anziamj.v48i0.138>.
15. Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N. Application of multilevel modeling to study electrothermal processes in induction heating installation. *Tekhnichna elektrodynamika. Tematychnyi vypusk Problemy suchasnoi elektrotekhniki*. Part 3. 2006. Pp. 17–20. (Rus)
16. Shydlovskiy A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N., Zolotarev V.M. Induction heating of segmented conductor of power cable at the stage of its manufacture. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2009. No 1. Pp. 53–60. (Rus)
17. Shydlovskiy A.K., Shcherba A.A., Podoltsev A.D., Kucheriavaia I.N., Zolotarev V.M. Analysis of electromagnetic processes and equivalent parameters of segmented conductors of power cables for voltage of 330 kV. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2008. No 6. Pp. 7–13. (Rus)
18. Comsol multiphysics modeling and simulation software. URL: <http://www.comsol.com> (accessed at 22.12.2023)
19. Stolovich N.N., Mynytskaia N.S. Temperature dependences of the thermophysical properties of some metals. Minsk: Nauka i tekhnika, 1975. 157 p. (Rus)

Надійшла 08.01.2024
Остаточний варіант 29.01.2024