

М.Г. ПАНТЕЛЯТ, А.О. КУЗЬМІН

**ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ЕЛЕКТРОМАГНІТАХ І АКТУАТОРАХ ВАКУУМНИХ КОМУТАЦІЙНИХ АПАРАТІВ З УРАХУВАННЯМ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.
ЧАСТИНА 2: ОСОБЛИВОСТІ КОМЕРЦІЙНИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ І ПРОГРАМ З ВІДКРИТИМ ДОСТУПОМ**

У першій частині роботи було наведено загальний огляд і класифікацію програмних засобів для чисельного розв'язання мультифізичних задач комп'ютерного моделювання зв'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів у сучасних складних технічних об'єктах, у тому числі в актуаторах і електромагнітах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформівного стану. Також були запропоновані критерії вибору відповідного програмного забезпечення і проаналізовано особливості in-house розробок для проведення математичного моделювання технічних об'єктів і процесів, що розглядаються. Дана стаття є другою частиною роботи і присвячена детальному розгляду присутніх на ринку та доступних комерційних програмних продуктів, а також програм з відкритим доступом для можливого застосування при виконанні відповідних розрахункових досліджень, а саме чисельного аналізу мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ методом скінченних елементів. На цій основі, з урахуванням висновків стосовно in-house розробок, зроблених у першій у частині роботи, робиться вибір конкретних програмних продуктів для застосування при виконанні відповідних розрахункових досліджень.

Ключові слова: актуатор, електромагнітні вакуумні комутаційні апарати, математична модель, програмне забезпечення.

M.G. PANTELYAT, A.O. KUZMIN

**SOFTWARE FOR COMPUTER SIMULATION OF MULTIPHYSICS PROCESSES IN ELECTROMAGNETS AND ACTUATORS OF VACUUM SWITCHING DEVICES TAKING INTO ACCOUNT CONTACT INTERACTION OF STRUCTURAL ELEMENTS.
PART 2: FEATURES OF COMMERCIAL SOFTWARE AND OPEN ACCESS CODES**

The first part of the work presented a general overview and classification of software tools for the numerical solution of multiphysics problems of computer modelling of coupled electromagnetic, thermal and mechanical processes in modern complex technical objects, including actuators and electromagnets of vacuum switching devices taking into account contact phenomena when their stress-strain state changes. Criteria for choosing the appropriate software were also proposed and the features of in-house codes for mathematical modelling of technical objects and processes under consideration were analyzed. This paper is the second part of the work and is devoted to a detailed review of commercial codes present on the market and available, as well as open access tools for possible use in performing relevant computational studies, namely, numerical analysis of multiphysics processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices, taking into account contact phenomena by the Finite Element Method. On this basis, taking into account the conclusions regarding in-house codes made in the first part of the work, a selection of specific software for use in the performance of relevant calculation studies is made.

Keywords: actuator, electromagnetic vacuum switching devices, mathematical model, software.

Вступ. У роботі [1] авторами наведено загальний огляд і класифікацію програмних засобів для чисельного розв'язання широкого класу мультифізичних задач комп'ютерного моделювання зв'язаних електромагнітних, теплових і механічних процесів у сучасних складних технічних об'єктах, у тому числі в актуаторах і електромагнітах вакуумних комутаційних апаратів. Запропоновані критерії вибору програмного забезпечення для чисельного розв'язання сформульованої задачі розрахунку мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформівного стану [2]. Проаналізовано особливості, досвід попередньої роботи з деякими так званими in-house розробками та можливості їх подальшого використання для проведення математичного моделювання технічних об'єктів і процесів, що розглядаються [1, 2].

Як зазначено в [1], на цей час розроблено та використовується для виконання наукових досліджень та інженерних розрахунків багато комплексів комп'ютерних програм, які можна розподілити на три основні групи:

- 1) «Саморобні» (в англійській літературі, in-house) програми.
- 2) Комерційні (так би мовити, «платні») програмні

продукти.

- 3) Програмні коди з відкритим доступом.

Оскільки, як зазначено вище, in-house розробки розглянуті авторами в [1], **метою цієї статті** є детальний розгляд присутніх на ринку та доступних комерційних програмних продуктів, а також програм з відкритим доступом. На цій основі, з урахуванням висновків стосовно in-house розробок [1], у роботі робиться обґрунтований вибір конкретних програмних продуктів для застосування при виконанні відповідних розрахункових досліджень, а саме чисельного аналізу мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ методом скінченних елементів.

Можливості використання комерційних програмних продуктів. Як зазначено в [1], комерційні (так би мовити, «платні») програмні засоби комп'ютерного моделювання різноманітних процесів у технічних об'єктах створюються найчастіше всього достатньо відомими приватними компаніями-розробниками. Таке програмне забезпечення розповсюджується на «платній основі», тобто користувач купує так звану «ліцензію» на використання всього програмного комплексу або деяких його «компонентів», призначених для розв'язання конкретних задач (або їх сукупності), які

цікавлять користувача. Деяким виключенням можуть бути так звані «університетські версії» програмного забезпечення, які надаються закладам вищої освіти безоплатно, але мають суттєво обмежені можливості, тобто призначені для «ознайомчого» використання студентами та працівниками університетів.

Щоб «зорієнтуватись» у всьому різноманітті комерційних програмних засобів, доцільно звернути увагу на критерії вибору програмного забезпечення, запропоновані у [1], які стисло можна звести до наступного:

1) «Доступність» програмного забезпечення, тобто можливість його інсталяції, тривалого використання та, бажано, оновлення за прийнятні кошти або, найкраще, безкоштовно з огляду на поточний фінансовий стан українських закладів вищої освіти, які, як правило, не мають коштів на придбання «ліцензій» на користування комерційними програмними продуктами.

2) Відносна легкість використання, що включає в себе наявність детальної документації та прикладів розв'язаних задач, присутність розвинутого препроцесора та постпроцесора, можливість отримання (онлайн) консультацій з розробниками чи службою підтримки.

3) Можливість використання «доступної» обчислювальної техніки, а саме звичайних настільних комп'ютерів чи ноутбуків, для розв'язання реальних прикладних задач.

4) Комерційна та наукова репутація компанії-виробника програмного забезпечення.

5) Здатність моделювати досить широкий «спектр» мультифізичних (зв'язаних) процесів відповідно до конкретних цілей дослідження.

Розглядаючи наведений перелік вимог до комерційних програмних продуктів, зазначимо, що розгляд програмного забезпечення як потенційного «кандидата» на використання повинен розпочинатися з останнього у переліку (але не за важливістю) критерію 5, тобто з пошуку програмних засобів, орієнтованих на розв'язання саме тих задач, про які йдеться. Зазначимо також, що поширені на ринку сучасні програмні засоби так би мовити «за замовчуванням» відповідають вимозі наявності розвинутого препроцесора та постпроцесора, а також (у загальному випадку, після офіційного придбання «ліцензії» на використання) доступності детальної документації та консультацій служби підтримки.

Проаналізуємо деякі поширені на ринку комерційні програмні продукти, які відповідають саме вимозі стосовно принципової здатності чисельного розв'язання задач розрахунку мультифізичних електромагнітних, теплових і механічних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформованого стану:

1) Комплекс програм ANSYS [3, 4] – один з найбільш відомих, поширених і обґрунтовано популярних серед користувачів у всьому світі, в першу чергу серед інженерів-механіків різноманітної спеціалізації. Незважаючи на цю «традиційну» сферу застосування, ANSYS має у своєму складі досить розвинутий «інструмент» для комп'ютерного моделювання низькочастотних електромагнітних полів ANSYS Maxwell [5], отже представляє інтерес у відповідності до мети цієї

статті. Доречно також зазначити, що розробник відповідних програмних засобів, корпорація ANSYS, Inc., свого часу розширила свою сферу діяльності на розрахунок електромагнітних процесів завдяки поглинанню компанії Ansoft Corp., яка створила досить відомий та популярний серед інженерів-електриків програмний продукт Ansoft/Maxwell [6].

Відповідно до мети цієї статті, особливий інтерес становить наявність у складі ANSYS програмних засобів, призначених для чисельного розв'язання контактних задач у різноманітних постановках [4], включаючи термоконтатні задачі.

Використовуючи ANSYS Maxwell спільно з іншими «інструментами» цього величезного програмного комплексу, призначеними для розв'язання теплових і механічних задач, можна досить ефективно моделювати мультифізичні (зв'язані) процеси у різноманітних електротехнічних пристроях, зокрема у сучасних електричних апаратах (рис. 1) [7]. При цьому, слід зазначити, що науковці та інженери-проектувальники, які працюють у сфері дослідження, розробки та конструювання саме електротехнічного обладнання, мають суттєво менший досвід використання ANSYS, аніж спеціалісти в області механіки та теплотехніки, оскільки в електротехніці частіше застосовуються інші програмні продукти, деякі з яких будуть розглянуті нижче.

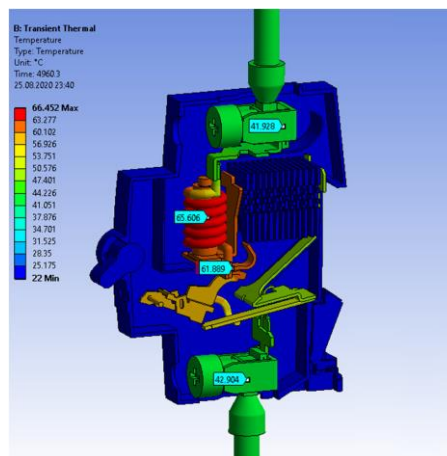


Рис. 1. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу теплового поля автоматичного вимикача у ANSYS [7]

Але головною проблемою, що суттєво стримує можливість використання ANSYS, є значна вартість відповідної «ліцензії», яка навіть у випадку придбання не усіх, а лише деяких з програмних «модулів», потрібних для розв'язання конкретних задач, є фактично «непід'ємною» для українських університетів.

2) Програмне забезпечення COMSOL Multiphysics [8], яке, на відміну від ANSYS, розглянутого вище, більшою мірою використовується інженерами-електриками у різноманітних областях дослідження та розробки електротехнічного обладнання.

Колеги авторів статті з кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» мають значний досвід використання COMSOL Multiphysics для комп'ютерного моделювання електромагнітних, теплових і механічних процесів у сучасних електричних апаратах [9, 10] (один із

прикладів отриманих чисельних результатів наведено на рис. 2 [9]).

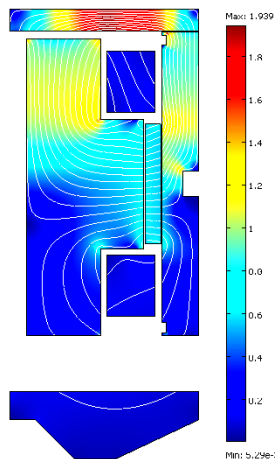


Рис. 2. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу магнітного поля актуатора автоматичного вимикача у COMSOL Multiphysics [9]

Треба віддати належне розробникам COMSOL Multiphysics: програмний продукт постійно вдосконалюється, розширюється перелік процесів і явищ, які можна моделювати з його використанням. Останнім часом з'явилась і можливість розв'язувати термомеханічні контактні задачі (рис. 3) [11, 12].

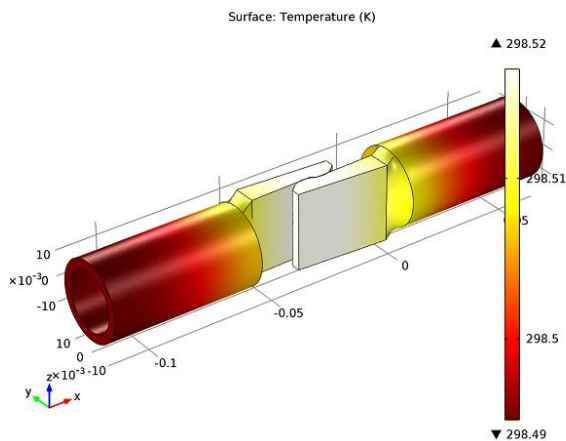


Рис. 3. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу температури вимикача у COMSOL Multiphysics [11]

В цілому, програмне забезпечення COMSOL Multiphysics являє собою потужний «інструмент», який можна «рекомендувати» для використання з метою розрахунку мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформівного стану. Стосовно практичного використання COMSOL Multiphysics, головним ускладненням, як і у випадку ANSYS, є також фактична неможливість придбання відповідної «ліцензії» у зв'язку з її значною вартістю. Можливим шляхом розв'язання цієї проблеми є отримання доступу до програмного продукту в рамках програм наукового співробітництва, у першу чергу міжнародного.

3) Дещо менш відомі програмні продукти CST Studio

Suite [13], які останнім часом стають все більш поширеними (можливо, деякою мірою завдяки тому, що вони фактично являють собою розвиток дуже розповсюдженого раніше програмного комплексу ABAQUS [14]).

Серед спеціалістів у галузі електромагнетизму та електротехніки найбільш відомими є чисельні дослідження розподілу електромагнітних полів з використанням CST Studio (приклад розв'язання однієї з сучасних задач електромагнітної сумісності наведено у [15], рис. 4). При цьому, наявність у цьому комплексі програм досить розвинутого «інструменту» для розв'язання термомеханічних задач [16], а також мультифізичних (зв'язаних) задач магнітотермомеханіки [17] (рис. 5) дозволяє принципово розглядати цей програмний продукт у якості реального «кандидата» на використання у процесі проведення відповідних досліджень. При цьому проблемою також є фактична неможливість придбання відповідної «ліцензії» у зв'язку з її вартістю. Можливі шляхи уникнення: отримання доступу до програмного продукту в рамках програм міжнародного наукового співробітництва (наприклад, [18]) або (на першому етапі роботи з програмним забезпеченням) використання безкоштовної «учбової» версії програмного забезпечення з обмеженими можливостями [19].

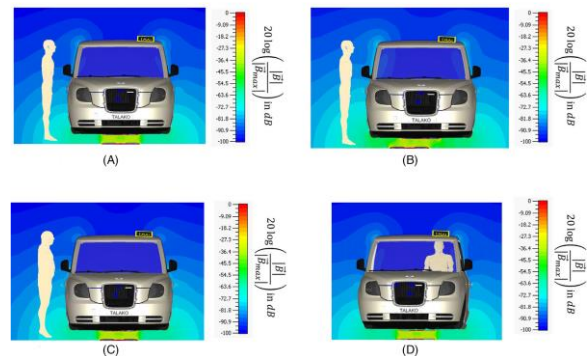


Рис. 4. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу електромагнітного поля у CST Microwave Studio [15]

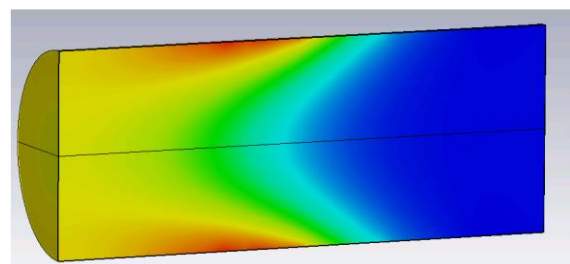


Рис. 5. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу теплового поля металеві заготовки у промисловому індукційному нагрівачі (CST Studio Suite – Multiphysics [17])

4) Програмні продукти Flux 2D/3D [20], які протягом тривалого часу активно використовуються інженерами-електриками для дослідження електромагнітних і теплових процесів у різноманітному електротехнічному обладнанні [21] (один із прикладів наведено на рис. 6). При всій (вже дещо у минулому) популярності,

головний недолік цих розробок – неможливість виконувати розрахунки механічних процесів і явищ, що фактично не дозволяє використовувати зазначені комерційні програмні продукти для виконання досліджень, про які йдеться у цій статті.

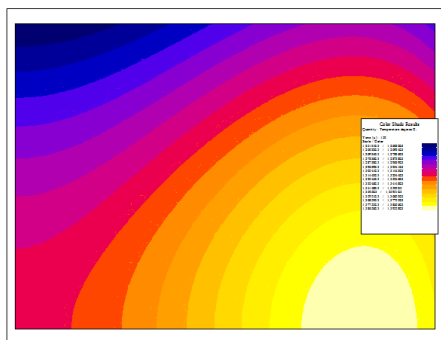


Рис. 6. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу теплового поля сталеної стрічки у промисловому індукційному нагрівачі (Flux 2D [21])

Узагальнення інформації стосовно проаналізованих вище, а також деяких інших комерційних програмних продуктів дозволяє попередньо зробити висновок щодо доцільності орієнтуватись на використання COMSOL Multiphysics та/або CST Studio Suite – Multiphysics у випадку отримання доступу до програмного забезпечення в рамках програм міжнародного наукового співробітництва.

Програмне забезпечення з відкритим доступом.

Найбільш відомим та обґрунтовано популярним серед інженерів-електриків і дослідників у багатьох галузях електротехніки є програмний комплекс Femm [22, 23], який вільно, тобто безкоштовно, розповсюджується в мережі Інтернет і використовується для дослідження електромагнітних і, деякою мірою, теплових процесів у різноманітному електротехнічному обладнанні.

Колеги авторів статті з кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» мають значний досвід використання Femm для комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів у сучасних електричних апаратах і їх конструктивних елементах [9, 10] (один із прикладів отриманих чисельних результатів наведено на рис. 7 [9]).

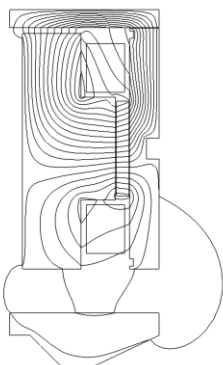


Рис. 7. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу магнітного поля актуатора автоматичного вимикача у Femm [9]

Треба визнати, що за багатьма ознаками, особливо стосовно відносної легкості використання (див. вище),

Femm несуттєво поступається багатьом комерційним програмним продуктам. Головний недоліком цієї розробки, з точки зору мети статті, є неможливість виконувати розрахунки механічних процесів і явищ. Крім того, слід зазначити, що репутація розробника програмного забезпечення [23] є дещо неоднозначною у науковому середовищі. Це може деякою мірою стримувати використання Femm, особливо в процесі виконання відповідальних наукових проектів, у першу чергу в рамках програм міжнародного наукового співробітництва.

Висновки. Розглянуто особливості, досвід попереднього та можливості використання поширених комерційних програмних продуктів і програмного забезпечення з відкритим доступом, які відповідають вимозі принципової здатності чисельного розв'язання задач розрахунку мультифізичних електромагнітних, теплових і механічних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформованого стану. Узагальнення інформації стосовно програмних комплексів, проаналізованих у цій статті, а також in-house розробок дозволяє попередньо зробити висновок щодо доцільності використання комерційних програмних продуктів COMSOL Multiphysics та/або CST Studio Suite – Multiphysics у разі отримання доступу до цього програмного забезпечення в рамках програм міжнародного наукового співробітництва.

Список літератури

1. Пантелят М.Г., Кузьмін А.О. Програмні засоби для комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактної взаємодії конструктивних елементів. Частина 1: Загальний огляд; особливості in-house розробок // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2022. – № 2. – с. 15-19. doi: 10.20998/2079-3944.2022.2.03.
2. Пантелят М.Г., Кузьмін А.О. Мультифізична модель процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактної взаємодії конструктивних елементів // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми вдосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2021. – № 2. – с. 15-18. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.03.
3. Ansys | Engineering Simulation Software <https://www.ansys.com>
4. ANSYS Contact Technology Guide. – ANSYS Release 9.0. – Canonsburg: ANSYS, Inc. 2004. – 105 p
5. Ansys Maxwell | Electromechanical Device Analysis Software <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
6. Wu T., Tang Y., Tang Sh., Li Y., He W., Chen E. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor // IET Electric Power Applications. – 2017. – vol. 11. – No. 4. – pp. 1558-1565. doi: 10.1049/iet-epa.2017.0208.
7. Szulborski M., Łapczyński S., Kolimas Ł., Zalewski D. Transient thermal analysis of the circuit breaker current path with the use of FEA simulation // Energies. – 2021. – vol. 14. –pp. 1-24. doi: 10.3390/en14092359.
8. 1000+ COMSOL Multiphysics® Modeling Examples for Download <https://www.comsol.com/models>
9. Байда Є.І. Мультифізичні моделі високовольтних вакуумних вимикачів з бістабільними поляризованими актуаторами в динамічних режимах. – Дис... докт. техн. наук: 05.09.01. – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – 376 с.
10. Лельок М.А. Удосконалення вакуумних контакторів з монстабільними поляризованими електромагнітами. – Дис... канд. техн. наук: 05.09.01. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 229 с.
11. Analyzing Electrical and Thermal Conductance in a Contact Switch |

- COMSOL Blog <https://www.comsol.com/blogs/analyzing-electrical-thermal-conductance-contact-switch/>
12. Mechanical Contact Modeling News in COMSOL Multiphysics® <https://www.comsol.com/video/mechanical-contact-modeling-news-in-comsol-multiphysics>
 13. CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
 14. Abaqus - Mechanical and Civil Engineering Simulation <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
 15. Haussmann N., Zang M., Mease R., Schmuelling B., Clemens M. Magnetic dosimetry simulations of wireless power transfer systems with high resolution voxel models utilizing the cosimulation scalar potential finite difference scheme // *International Journal of Numerical Modelling*. – 2022. – e3075. – pp. 1-11. doi: 10.1002/jnm.3075.
 16. CST Studio Suite. Thermal and Mechanical Simulation. – Version 2020.0 – 8/16/2019. – Stuttgart: Dassault Systemes Deutschland GmbH. 2019. – 58 p.
 17. CST Studio Suite - Multiphysics https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/training/2020_course_overview/cst_mps-summary20.pdf
 18. Allgemeine Vorlage zur Erstellung von Word-Dokumenten (Querformat) https://static.daad.de/media/daad_de/pdfs_nicht_barrierefrei/%C3%9Cb%20bersicht_gef%C3%B6rderte_projekte_ukraine_digital_2022.pdf
 19. Learning edition | CST Studio Suite <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/learning-edition/>
 20. Accelerate Motor, Sensor, and Actuator Design | Altair Flux <https://www.altair.com/flux>
 21. Codrean M., Simina C., Popa M., Leuca T., Giurgiu N.C. Modelling the process of induction heating in volume of a bar strip using Flux 2D software, coupled with Minitab experimental design software // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – 2016. – vol. 9. – No. 1. – pp. 5-8.
 22. Home Page: Finite Element Method Magnetism <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
 23. Meeker D. Improved open boundary conditions for magnetic finite elements // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – vol.49. – No. 10. – pp. 5243-5247. doi: 10.1109/TMAG.2013.2260348.

References (transliterated)

1. Pantelyat M.G., Kuzmin A.O. Software for computer simulation of multiphysics processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices taking into account contact interaction of structural elements. Part 1: general overview; features of in-house codes. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Problemy vdoskonaliuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. – 2022. – No. 2. – pp. 15-19 (in Ukrainian). doi: 10.20998/2079-3944.2022.2.03.
2. Pantelyat M.G., Kuzmin A.O. A multiphysics model of processes in electromagnets and actuators of vacuum switching devices taking into account contact interaction of structural elements. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Problemy vdoskonaliuvannya elektrychnykh mashyn i aparativ. Teoriia i praktyka*. – 2021. – No. 2. – pp. 15-18 (in Ukrainian). doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.03.
3. Ansys | Engineering Simulation Software <https://www.ansys.com>
4. ANSYS Contact Technology Guide. – ANSYS Release 9.0. – Canonsburg: ANSYS, Inc. 2004. – 105 p
5. Ansys Maxwell | Electromechanical Device Analysis Software <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
6. Wu T., Tang Y., Tang Sh., Li Y., He W., Chen E. Design and analysis of a new down-the-hole electromagnetic hammer driven by tube linear motor. *IET Electric Power Applications*. – 2017. – vol. 11. – No. 4. – pp. 1558-1565. doi: 10.1049/iet-epa.2017.0208.
7. Szulborski M., Łapczyński S., Kolimas Ł., Zalewski D. Transient thermal analysis of the circuit breaker current path with the use of FEA simulation. *Energies*. – 2021. – vol. 14. – pp. 1-24. doi: 10.3390/en14092359.
8. 1000+ COMSOL Multiphysics® Modeling Examples for Download <https://www.comsol.com/models>
9. Baida E.I. Multiphysical models of high-voltage vacuum circuit breakers with stable polarized actuators in dynamic modes. – Dissertation of Doctor of Technical Sciences. 05.09.01. Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2018. – P. 376 (in Ukrainian).
10. Leliuk M.A. Improving vacuum contactors with monostable polarized electromagnets. – Dissertation of Candidate of Technical Sciences 05.09.01. Kharkiv: NTU “KhPI”. – 2019. – P. 229 (in Ukrainian).
11. Analyzing Electrical and Thermal Conductance in a Contact Switch | COMSOL Blog <https://www.comsol.com/blogs/analyzing-electrical-thermal-conductance-contact-switch/>
12. Mechanical Contact Modeling News in COMSOL Multiphysics® <https://www.comsol.com/video/mechanical-contact-modeling-news-in-comsol-multiphysics>
13. CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
14. Abaqus - Mechanical and Civil Engineering Simulation <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
15. Haussmann N., Zang M., Mease R., Schmuelling B., Clemens M. Magnetic dosimetry simulations of wireless power transfer systems with high resolution voxel models utilizing the cosimulation scalar potential finite difference scheme. *International Journal of Numerical Modelling*. – 2022. – e3075. – pp. 1-11. doi: 10.1002/jnm.3075.
16. CST Studio Suite. Thermal and Mechanical Simulation. – Version 2020.0 – 8/16/2019. – Stuttgart: Dassault Systemes Deutschland GmbH. 2019. – 58 p.
17. CST Studio Suite - Multiphysics https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/SIMULIA/PDF/training/2020_course_overview/cst_mps-summary20.pdf
18. Allgemeine Vorlage zur Erstellung von Word-Dokumenten (Querformat) https://static.daad.de/media/daad_de/pdfs_nicht_barrierefrei/%C3%9Cb%20bersicht_gef%C3%B6rderte_projekte_ukraine_digital_2022.pdf
19. Learning edition | CST Studio Suite <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/learning-edition/>
20. Accelerate Motor, Sensor, and Actuator Design | Altair Flux <https://www.altair.com/flux>
21. Codrean M., Simina C., Popa M., Leuca T., Giurgiu N.C. Modelling the process of induction heating in volume of a bar strip using Flux 2D software, coupled with Minitab experimental design software // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. – 2016. – vol. 9. – No. 1. – pp. 5-8.
22. Home Page: Finite Element Method Magnetism <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
23. Meeker D. Improved open boundary conditions for magnetic finite elements. *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2013. – vol. 49. – No. 10. – pp. 5243-5247. doi: 10.1109/TMAG.2013.2260348.

Поступила (received) 25.04.23

Відомості про авторів / About the authors

Пантелейт Михайло Гаррійович (Pantelyat Mykhailo Garrijovich) – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1357-2134>; e-mail: m150462@yahoo.com.

Кузьмін Артем Олексійович (Kuzmin Artem Oleksijovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: artyokuzmi@gmail.com.