

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 1: ЗАГАЛЬНИЙ ОГЛЯД; ОСОБЛИВОСТІ IN-HOUSE РОЗРОБОК

Для комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у складних сучасних технічних об'єктах, наприклад у актуаторах і електромагнітах вакуумних комутаційних апаратів, потрібно використовувати сучасне прикладне програмне забезпечення, орієнтоване на розв'язання всього спектра зазначених задач або тієї чи іншої їх «підмножини». Комплекси прикладних програм повинні реалізовувати сучасні математичні моделі та відповідні ефективні чисельні алгоритми, а також мати зручні інтерфейси як для підготовки та введення вихідної інформації (препроцесор), так і для виведення й аналізу отриманих результатів (постпроцесор). Наявність максимально «дружніх до користувача» препроцесора та постпроцесора є надзвичайно важливою, вважаючи саме на значну складність процесів, що моделюються, а також конструкцій, що розглядаються дослідником та/або інженером-проектувальником. Представляє інтерес виконання порівняльного аналізу конкретних програмних продуктів, з метою вибору «інструменту» для реалізації комплексу розрахункових досліджень (комп'ютерне моделювання мультифізичних процесів у конструктивних елементах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ), зазначених вище. В статті розглядаються критерії, за якими можна зробити обґрунтований вибір програмного забезпечення, яке в подальшому буде безпосередньо використане для проведення математичного моделювання технічних об'єктів і процесів, що розглядаються.

Ключові слова: актуатор, електромагнітні вакуумні комутаційні апарати, математична модель, розрахунок

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 1: GENERAL OVERVIEW; FEATURES OF IN-HOUSE CODES

For computer modeling of multiphysics processes in complex modern technical objects, for example, in actuators and electromagnets of vacuum switching devices, it is necessary to use modern application software aimed at solving the entire spectrum of the specified problems or one or another "subset" of them. Complexes of applied programs must implement modern mathematical models and corresponding effective numerical algorithms, as well as have convenient interfaces both for the preparation and input of initial information (preprocessor), and for the output and analysis of the obtained results (postprocessor). The presence of the most "user-friendly" preprocessor and postprocessor is extremely important, considering the significant complexity of the processes being modeled, as well as the structures considered by the researcher and/or design engineer. It is of interest to carry out a comparative analysis of specific software products, with the aim of choosing a "tool" for the implementation of a complex of computational studies (computer modeling of multiphysics processes in the structural elements of medium and high voltage vacuum switching devices, taking into account contact phenomena), specified above. The article considers the criteria by which a reasonable choice of software can be made, which will be directly used for mathematical modeling of technical objects and processes under consideration.

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

Вступ. У роботі [1] авторами запропонована удосконалена методика мультифізичного комп'ютерного моделювання зв'язаних (тобто саме мультифізичних) процесів у конструктивних елементах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги, з урахуванням контактних явищ. Новизна розробленого підходу полягає в урахуванні контактної взаємодії елементів конструкцій, що розглядаються, в процесі зміни їх напружено-деформованого стану. На думку авторів, відповідні чисельні розрахунки доцільно виконувати [1] методом скінченних елементів у двовимірній постановці з використанням комерційних програмних продуктів і (або) програмного забезпечення, створеного безпосередньо для проведення зазначених досліджень.

Для комп'ютерного моделювання мультифізичних (електромагнітних полів, теплових процесів, механічних явищ, гідро- та/або аеродинамічних явищ, процесів у електричних і магнітних ланцюгах та ін.) у складних сучасних технічних об'єктах, у тому числі у актуаторах і електромагнітах вакуумних комутаційних апаратів, потрібно використовувати сучасне прикладне програмне забезпечення, орієнтоване на розв'язання саме всього спектра зазначених задач або тієї чи іншої їх «підмножини». Комплекси прикладних програм по-

винні реалізовувати сучасні математичні моделі та відповідні ефективні чисельні алгоритми, а також зручні інтерфейси як для підготовки та введення вихідної інформації (препроцесор), так і для виведення й аналізу отриманих результатів (постпроцесор). Наявність максимально «дружніх до користувача» препроцесора та постпроцесора є надзвичайно важливою, вважаючи саме на значну складність процесів, що моделюються, а також конструкцій, що розглядаються дослідником та/або інженером-проектувальником.

На цей час розроблено та використовується для виконання наукових досліджень та інженерних розрахунків дуже (іноді, мабуть, занадто) 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
- Особливості будови та застосування комплексів програм, що відносяться до зазначених груп, розглядаються у статті.

Представляє інтерес виконання порівняльного аналізу конкретних програмних продуктів з усіх трьох пе-

релічених груп з метою вибору «інструменту» для реалізації комплексу розрахункових досліджень (комп'ютерне моделювання мультифізичних процесів у конструктивних елементах вакуумних комутаційних апаратів середньої та високої напруги з урахуванням контактних явищ), зазначених вище. В статті розглядаються критерії, за якими можна зробити обґрунтований вибір програмного забезпечення, яке в подальшому буде безпосередньо використане для проведення математичного моделювання технічних об'єктів і процесів, що розглядаються.

Отже, **мета роботи** – порівняльний аналіз різноманітних програмних засобів для комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформівного стану і на цій основі вибір конкретних програмних продуктів для застосування при виконанні відповідних розрахункових досліджень.

Загальний огляд програмних засобів для чисельного розв'язання мультифізичних задач. Сучасне програмне забезпечення, призначене для комп'ютерного моделювання різноманітних мультифізичних процесів і побудоване, головним чином, на використанні метода скінчених елементів, можна розподілити на наступні групи з огляду на особливості їх створення та розповсюдження:

1) «Саморобні» (в англійській літературі, in-house) програми [2, 3] розробляються персоналом (науково-педагогічні працівники, аспіранти, студенти) навчально-наукових і дослідних підрозділів (кафедр, відділів) закладів вищої освіти та науково-дослідних установ у рамках виконання тих чи інших дослідницьких робіт (проектів). Таке програмне забезпечення найчастіше призначено лише для «внутрішнього користування» колективом розробників (іноді може передаватися підприємству-замовнику науково-дослідної роботи) і не завжди має високорозвинутий інтерфейс як для підготовки та введення вихідної інформації (препроцесор), так і для виведення й аналізу отриманих результатів (постпроцесор). Іноді представникам «сторонніх організацій» вдається отримати таке програмне забезпечення безкоштовно в рамках програм наукового співробітництва, у тому числі міжнародного.

2) Комерційні (так би мовити, «платні») програмні продукти [4-6 та ін.] створюються найчастіше всього достатньо відомими приватними компаніями-розробниками (хоча, звісно, кожна комерційна компанія проходить певний шлях від заснування до визнання). До слова, такі компанії часто-густо засновані відомими вченими у відповідній галузі науки. Зазначене 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 відповідних задач, які цікавлять дослідника та/або інженера-конструктора. Деяким виключенням можуть бути так звані «університетські версії» програмного забезпечення, які надаються закладам вищої освіти у безоплатне користування, але мають суттєво обмежені можливості, тобто призначені для «оглядового» ознайомлення студентами та працівниками університетів.

3) Програмні коди з відкритим доступом [7] розробляються, так би мовити, вченими-ентузіастами та розповсюджуються безкоштовно у мережі Інтернет. За своїми можливостями вони в цілому поступаються комерційним програмним продуктам, але можуть переважати in-house розробки.

Критерії вибору програмного забезпечення. Виходячи з попереднього досвіду використання різноманітного програмного забезпечення для чисельного розв'язання різноманітних мультифізичних задач [3, 8-11], можна запропонувати наступні критерії вибору прикладних програмних продуктів:

1) «Доступність» програмного забезпечення, тобто можливість його інсталяції, тривалого використання та, бажано, оновлення за прийнятні кошти або безкоштовно. Зрозуміло, що українські заклади вищої освіти та науково-дослідні установи, як правило, не мають коштів на придбання «ліцензій» на користування комерційними програмними продуктами, які можуть коштувати десятки тисяч доларів США. З цієї точки зору, доцільним представляється самостійна розробка програмного забезпечення при наявності відповідних спеціалістів, використання кодів з відкритим доступом або отримання доступу до комерційних комплексів програм чи in-house кодів «сторонньої» розробки у рамках, в першу чергу, міжнародного наукового співробітництва

2) Відносна легкість використання, що включає в себе наявність детальної документації та прикладів розв'язаних задач, присутність у складі програмного комплексу «дружнього до користувача» (user friendly interface) препроцесора та постпроцесора, можливість отримання (онлайн) консультацій з розробниками чи службою підтримки. З огляду на це, на першому місці знаходяться комерційні програмні продукти, далі - програми з відкритим доступом і in-house коди, хоч останні можуть мати беззаперечну перевагу над іншими у частині безпосереднього спілкування з розробниками

3) Можливість використання «доступної» обчислювальної техніки, а саме звичайних настільних комп'ютерів чи ноутбуків, для розв'язання реальних прикладних задач, бо у випадку задач з дуже великою кількістю ступенів свободи доступ до суперкомп'ютерів гіпотетично можливий лише у рамках міжнародного наукового співробітництва. З цієї точки зору потрібно обирати програмні продукти, в яких реалізовані найбільш ефективні чисельні алгоритми, які оптимізують час та обсяг пам'яті, потрібні для виконання розрахунків

4) Наукова та комерційна репутація колективу розробників та/або компанії-виробника програмного забезпечення, яка повинна бути підтверджена науковими публікаціями високого рівня, попитом на комерційні продукти, відгуками спеціалістів у відповідній галузі. На погляд авторів, усі in-house, комерційні та відкриті програмні продукти, що розглядаються або лише згадуються у цій статті [2-8], відповідають цьому критерію, що підтверджується багаторічним досвідом їх використання для проведення відповідних розрахункових досліджень

5) Здатність моделювати досить широкий «спектр»

мультифізичних (зв'язаних) процесів відповідно до цілей дослідження, сформульованих вище, а саме розрахувати розподіли електромагнітних і теплових полів, а також напружено-деформований стан технічних об'єктів з урахуванням контактних явищ. Це є найбільш вибаглива вимога, задоволення якої вимагає відповідного аналізу можливостей програмних продуктів, що відносяться до усіх трьох груп, що розглянуті вище. Наступний підрозділ статті присвячено саме огляду можливостей деяких програмних продуктів.

Деякі можливості використання in-house розробок. Майже кожен науковий колектив, який виконує дослідження тих чи інших електротехнічних та електромеханічних пристроїв/апаратів, в недавньому минулому розробляв свої власні програмні засоби для комп'ютерного моделювання електромагнітних полів і, хоча й не завжди, відповідних теплових і механічних процесів, що мають місце в процесі роботи технічних об'єктів, що досліджуються. Поява кодів з відкритим доступом і відносно доступних комерційних програмних продуктів частково зменшила потребу у власних in-house розробках, хоча відповідні роботи все одно продовжуються з метою розв'язання специфічних наукових задач, які ще не «охоплені» комерційними та «відкритими» програмними засобами.

В якості in-house розробок, які є відносно доступними для використання авторами цієї статті, розглянемо наступні:

1) Комплекси програм EleFAnT2D [2, 10, 11] і EleFAnT3D, розроблені в Інституті основ і теорії електротехніки (IGTE) Технічного університету м. Грац (TU Graz), Австрія. Ці програмні засоби призначені для комп'ютерного моделювання мультифізичних електромагнітних і теплових процесів у різноманітних електротехнічних пристроях і обладнанні у двовимірній та тривимірній постановках, відповідно. In-house програмне забезпечення EleFAnT2D було безоплатно передано розробником (IGTE TU Graz) кафедрі електричних апаратів НТУ «ХПІ» і застосовувалось для виконання досліджень та у навчальному процесі [10, 11]. Програмний комплекс має достатньо «дружній» інтерфейс користувача: один з прикладів підготовленої вихідної інформації стосовно геометрії об'єкта, що досліджується, наведено на рис. 1 [10], а рис. 2 ілюструє приклади графічного зображення результатів розрахунку розподілу електромагнітного та теплового поля [10].

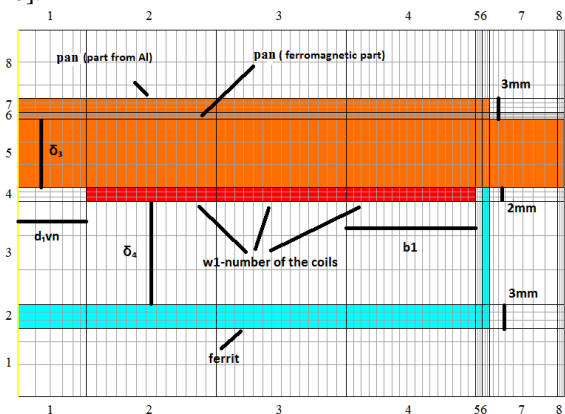


Рис. 1 – Приклад підготовленої вихідної інформації стосовно геометрії об'єкта у EleFAnT2D: спрощена розрахункова модель індукційної кухонної плити

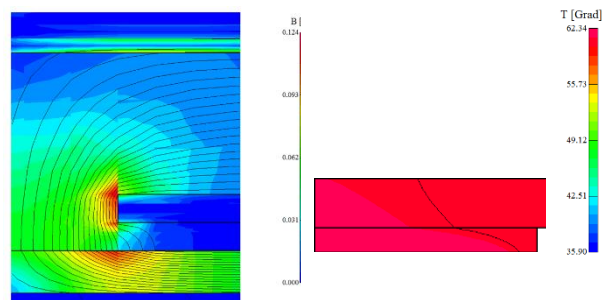


Рис. 2 – Приклади графічного зображення результатів розрахунку розподілу електромагнітного та теплового поля у EleFAnT2D у спрощеній розрахунковій моделі індукційної кухонної плити

Досвід використання комплексу програм EleFAnT2D і, деякою мірою, EleFAnT3D показав, що ці розробки ефективно розв'язують мультифізичні задачі розрахунку розподілу електромагнітних і теплових полів, але не мають програмних засобів (модулів) для моделювання механічних процесів (напружено-деформованого стану об'єктів). З цієї причини, зазначені in-house розробки не можуть бути використані для виконання розрахунків відповідно до цілей дослідження, сформульованих у цій статті.

2) Програмний комплекс KROK [12], розроблений в Інституті проблем машинобудування НАН України (ІПМаш НАНУ) та призначений для розв'язання надзвичайно широкого «спектру» двовимірних термомеханічних задач (моделювання напружено-деформованого стану конструктивних елементів парових і газових турбін, двигунів внутрішнього згоряння, ракетно-космічної техніки та багато ін.) і доповнений програмними засобами для комп'ютерного моделювання розподілу електромагнітного поля. Ця розширена версія комплексу програм, яка призначена для розв'язання задач розрахунку мультифізичних електромагнітних, теплових і механічних процесів, отримала «неофіційну» назву KROKET [13, 14].

За допомогою KROKET було розв'язано ряд задач розрахунку мультифізичних процесів у таких технічних об'єктах, як пристрої для промислового індукційного нагрівання, обладнання для контактної зварювання, синхронні турбогенератори та ін. [3, 8, 13, 14]. У тому числі, оскільки програмне забезпечення KROK і, відповідно, KROKET має спеціальні можливості для чисельного аналізу контактних термомеханічних явищ з використанням оригінальних методів і чисельних алгоритмів [12, 15], було змодельовано технологічні процеси індукційного нагрівання збирання та розбирання конструкцій з урахуванням контактної взаємодії конструктивних елементів [8].

На рис. 3 наведено розрахункову модель свердлильного верстата, розроблену для комп'ютерного моделювання індукційного нагрівання патрона і вставлення в нього хвостовика [8]. Відповідне урахування контактної взаємодії конструктивних елементів при виконанні розрахунків з використанням KROKET дозволило отримати детальні чисельні результати (рис. 4, 5) та виробити конкретні рекомендації стосовно параметрів ведення технологічного процесу індукційного нагрівання, наведені у [8].

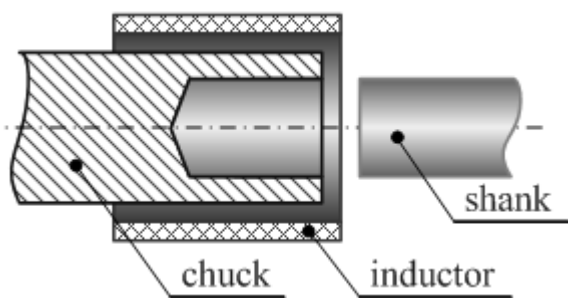


Рис. 3 – Розрахункова модель свердлильного верстата: комп'ютерне моделювання індукційного нагрівання патрона і вставлення в нього хвостовика

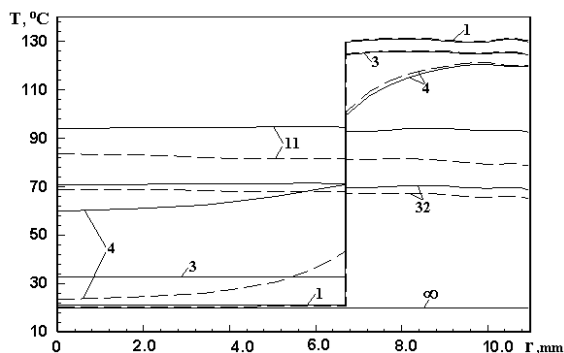


Рис. 4 – Розподіл температури по радіусу з'єднання у різні моменти часу

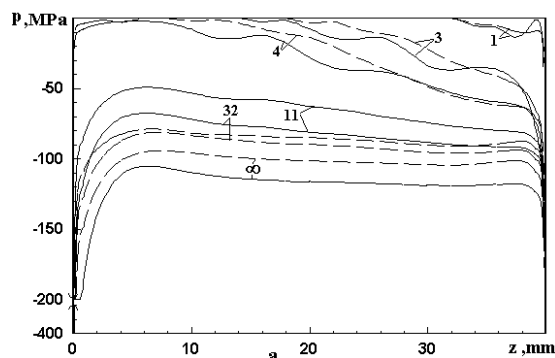


Рис. 5 – Розподіл контактного тиску у різні моменти часу

Значний досвід використання програмного забезпечення KROK і KROKET показує, що ці розробки ефективно розв'язують мультифізичні задачі розрахунку розподілу електромагнітних, теплових полів і моделювання механічних процесів (напружено-деформованого стану об'єктів) з урахуванням контактних явищ за оригінальною методикою [15]. Таким чином, зазначені in-house розробки принципово можуть бути ефективно використані для виконання розрахунків відповідно до цілей дослідження, сформульованих у цій статті. Більш того, зазначене програмне забезпечення відповідає багатьом критеріям вибору розробок для використання: лише в якості прикладу підкреслимо беззаперечну наукову репутацію колективу розробників з ІПМаш НАНУ [12-15]. Єдиною не вирішеною або, на превеликий жаль, навіть нерозв'язною проблемою може стати «доступність» зазначеного програмного забезпечення, тобто наявність реальної можливості його практичного використання для виконання відповідно до дослідницьких цілей, сформульованих у статті.

Висновки. Наведено загальний огляд і класифікація програмних засобів для чисельного розв'язання

широкого класу мультифізичних задач. Сформульовані критерії вибору програмного забезпечення для комп'ютерного моделювання мультифізичних процесів у електромагнітах і актуаторах вакуумних комутаційних апаратів з урахуванням контактних явищ при зміні їх напружено-деформованого стану. Розглянуто особливості, досвід попереднього та можливості подальшого використання деяких in-house розробок. У другій частині планується проаналізувати особливості комерційних програмних продуктів і кодів з відкритим доступом.

Список літератури:

1. 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. – No. 2. – с. 15-18. doi: 10.20998/2079-3944.2021.2.03.
2. Tutorial EleFAnT2D. - Graz: IGTE TU Graz. 2003. - 224 p.
3. Pantelyat M.G. Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization // Electrical engineering & electromechanics. – 2013. – No. 3. – pp. 29-35.
4. <https://www.comsol.com/models>
5. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
6. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
7. <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
8. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating // Electrical engineering & electromechanics. – 2016. – No. 4. – pp. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
9. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers // Electrical engineering & electromechanics. – 2020. – No. 3. – pp. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
10. Pantelyat M.G., Bíró O., Bauernfeind Th. Computational electromagnetics in education: finite element analysis of induction cookers' electromagnetic and thermal fields. // Abstracts of the 17th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, Graz, Austria, September 2016. – 2016. – p. 20.
11. Pantelyat M.G., Baida E.I. Computational electromagnetics in education, part II: a technique for calculation and design of induction cooker inductors. // Abstracts of the 19th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, Graz, Austria, September 2020. – 2020. – p. 41.
12. Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н. и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1989. – 232 с. ISBN 5-12-000891-7.
13. Пантелят М.Г. Численное решение осесимметричных задач магнитотермомеханики. – Дис... канд. физ.-мат наук: 01.02.04. – Харьков: Акад. наук УССР, Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, 1990. – 151 с.
14. Pantelyat M.G. Coupled electromagnetic, thermal and elastic-plastic simulation of multi-impulse inductive heating // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 1998. – vol. 9. – pp. 11-24. doi: 10.3233/JAEM-1998-088.
15. Гармаш Н.Г. Двумерный конечноэлементный анализ контактных задач с учетом теплообмена. – Дис... канд. техн. наук: 01.02.04. – Харьков: Нац. акад. наук Украины, Ин-т проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного, 1999. – 163 с.

References (transliterated):

1. 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.

2. Tutorial EleFAnT2D. - Graz: IGTE TU Graz. 2003. - 224 p.
3. Pantelyat M.G. Multiphysical numerical analysis of electromagnetic devices: state-of-the-art and generalization // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2013. – No. 3. – pp. 29-35.
4. <https://www.comsol.com/models>
5. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell>
6. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>
7. <https://www.femm.info/wiki/HomePage>
8. Pantelyat M.G., Doležel I. Finite element technique for solution of thermo-contact problems and its application in numerical analysis of devices working with induction heating // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2016. – No. 4. – pp. 22-27. doi: 10.20998/2074-272X.2016.4.03.
9. Baida E.I., Klymenko B.V., Vyrovets S.V., Pantelyat M.G., Clemens M. Investigations of the dynamics of a bistable electromagnet with improved characteristics for medium voltage vacuum circuit breakers // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2020. – No. 3. – pp. 3-8. doi: 10.20998/2074-272X.2020.3.01.
10. Pantelyat M.G., Bíró O., Bauernfeind Th. Computational electromagnetics in education: finite element analysis of induction cookers' electromagnetic and thermal fields. // *Abstracts of the 17th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, Graz, Austria, September 2016. – 2016. – p. 20.
11. Pantelyat M.G., Baida E.I. Computational electromagnetics in education, part II: a technique for calculation and design of induction cooker inductors. // *Abstracts of the 19th International IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, Graz, Austria, September 2020. – 2020. – p. 41.
12. Podgorny A.N., Gontarovskiy P.P., Kirkach B.N. et al. Problems of contact interaction of structural elements. – Kyiv: Naukova dumka, 1989. – 232 p. (in Russian). ISBN 5-12-000891-7.
13. Pantelyat M.G., Numerical solution of axisymmetrical problems of magnetothermomechanics. – Dissertation of the Candidate of Physical & Mathematical Sciences: 01.02.04.– Kharkiv: Academy of Sciences of the USSR, Institute of Mechanical Engineering Problems named after A.N. Podgorny, 1990.– 151 p. (in Russian).
14. Pantelyat M.G. Coupled electromagnetic, thermal and elastic-plastic simulation of multi-impulse inductive heating // *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. – 1998. – vol. 9. – pp. 11-24. doi: 10.3233/JAEM-1998-088.
15. Garmash N.G. Two-dimensional finite element analysis of contact problems taking into account heat transfer. Dissertation of the Candidate of Technical Sciences: 01.02.04. – Kharkiv: National Academy of Sciences of Ukraine, A.N. Podgorny Institute of Mechanical Engineering Problems. – 1999. – 163 p. (in Russian).

Надійшла (received) 15.10.22

Відомості про авторів / About the Authors

Пантеліят Михайло Гарріюович (Panteliat 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.