

*М.Г. ПАНТЕЛЯТ, П.С. МЯСОЕДОВ***ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ: ПОПЕРЕДНІЙ ОГЛЯД ДЕЯКИХ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

Комп'ютерне моделювання є невід'ємною складовою розв'язання сучасних задач електромагнітної сумісності технічних, а також біологічних об'єктів і систем. Для комп'ютерного моделювання відповідних електромагнітних процесів і явищ доцільно використовувати професійні комерційні програмні продукти, які добре зарекомендували себе саме або у тому числі у ході дослідження електромагнітної сумісності. Стаття присвячена попередньому розгляду та порівнянню присутніх на ринку комерційних програмних продуктів для можливого застосування при виконанні розрахункових досліджень у сфері електромагнітної сумісності технічних об'єктів і систем, в першу чергу стосовно мікропроцесорних систем керування сучасної комутаційної апаратури низької, середньої та високої напруг. На цій основі робиться попередній вибір конкретних програмних продуктів для застосування при виконанні відповідних розрахункових досліджень.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, комп'ютерне моделювання, огляд, програмне забезпечення.

*M.G. PANTELYAT, P.S. MIASOEDOV***ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF TECHNICAL OBJECTS AND SYSTEMS: A PRELIMINARY REVIEW OF SOME SOFTWARE FOR COMPUTER MODELLING**

Computer modelling is an integral part of solving modern problems of electromagnetic compatibility of technical as well as biological objects and systems. For computer modelling of the relevant electromagnetic processes and phenomena, it is advisable to use professional commercial software products that have proven themselves well, either specifically or in the course of electromagnetic compatibility research. The article is devoted to a preliminary overview and comparison of commercial software products available on the market for possible use in performing computational studies in the field of electromagnetic compatibility of technical objects and systems, primarily in relation to microprocessor control systems of modern low, medium and high voltage switching devices. On this basis, a preliminary selection of specific software products for use in performing the relevant computational studies is made.

Keywords: electromagnetic compatibility, computer modelling, overview, software.

Вступ. Задачі забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) різноманітних технічних і біологічних об'єктів і систем є надзвичайно актуальними для сучасної фундаментальної та прикладної науки та технології, з огляду на те, що відповідні вимоги є обов'язковими для виконання у всьому цивілізованому світі. Це повною мірою стосується і України, яка знаходиться на етапі активної безпосередньої підготовки до вступу до Європейського Союзу (ЄС), де діє відповідне достатньо жорстке міжнародне законодавство, обов'язкове для виконання усіма країнами-членами ЄС [1, 2].

Виконання комплексних розрахункових досліджень шляхом комп'ютерного моделювання з метою забезпечення електромагнітної сумісності є одним із сучасних шляхів розв'язання зазначених задач [3, 4]. Чисельні алгоритми, що використовуються у відповідному програмному забезпеченні, можуть базуватись на програмній реалізації різноманітних формулювань та підходів, наприклад на розрахунку магнітного моменту [5] або на використанні чисельних методів обчислення розподілу електромагнітного поля на основі відповідних рівнянь у диференціальній або інтегральній формі: метод скінченних елементів (МСЕ) та ін. [3].

У випадку використання програмних засобів, які реалізують МСЕ або інші сучасні чисельні методи аналізу розподілу електромагнітного поля, широко використовуються присутні на відповідному ринку комерційні програмні засоби, безпосередньо призначені саме або у тому числі для комп'ютерного моделювання процесів і явищ, які безпосередньо стосуються задач ЕМС. Тому, викликає значний інтерес порівняння особливостей та можливостей застосування різноманітних комерційних комплексів програм з метою запропонувати рекомендації щодо застосування тих чи

інших програмних продуктів для обчислювального моделювання, наприклад, процесів і явищ стосовно ЕМС мікропроцесорних систем керування автоматичних викивачів і контакторів низької, середньої та високої напруг.

У роботах [6, 7] виконано подібний аналіз стосовно програмних засобів іншого призначення: чисельний мультифізичний аналіз зв'язаних процесів різної фізичної природи (електромагнітних, теплових і механічних явищ) у різноманітних технічних об'єктах, таких як актуатори та електромагніти сучасних комутаційних електричних апаратів. Запропоновані також [6] критерії вибору відповідного програмного забезпечення, що доцільно виконати і стосовно програмних продуктів, орієнтованих на розв'язання задач ЕМС, що створить наукове підґрунтя для подальших досліджень.

Отже, **мета роботи** – розгляд і аналіз розповсюджених комерційних програмних продуктів для комп'ютерного обчислення задач електромагнітної сумісності технічних і медико-біологічних об'єктів і систем, формулювання критеріїв (вимог) до програмного забезпечення і на цій основі виробка рекомендацій стосовно застосування програмних засобів при проведенні відповідних розрахункових досліджень.

Вимоги до комерційних платформ обчислювального моделювання. Виходячи з попереднього аналітичного аналізу стосовно мультифізичного комп'ютерного моделювання [6], можна запропонувати наступні критерії (вимоги) вибору прикладних програмних продуктів для розв'язання задач ЕМС:

1) «Доступність» комерційного комплексу програм, а саме можливість його установки, застосування та оновлення за незначні кошти або безкоштовно.

Оскільки українські навчальні та наукові установи, як правило, не мають коштів на придбання прав (так званих «ліцензій») на користування відповідними програмними засобами (десятки тисяч доларів США), представляється доцільним використання комерційних комплексів програм у рамках спільних проєктів міжнародного наукового співробітництва

2) Достатня простота застосування, а саме наявність відповідної документації, а також зручного інтерфейсу користувача, доступність отримання консультацій розробників або служби підтримки. Цю вимогу також можна задовольнити шляхом використання комерційного програмного забезпечення, отриманого завдяки закордонним партнерам

3) Можливість застосування загальнодоступної обчислювальної техніки у вигляді розповсюджених настільних комп'ютерів або ноутбуків, для обчислення реальних процесів і явищ, що становлять практичний інтерес, бо у випадку особливо складних розрахункових моделей з великою розмірністю застосування суперкомп'ютерів є принципово можливим лише завдяки технічній допомозі та безпосередній участі закордонних партнерів. Тому, доцільно обирати для використання програмні комплекси, які імплементують ефективні чисельні алгоритми, що зменшують обчислювальні ресурси, потрібні для виконання розрахунків

4) Розповсюдженість та доступність комерційного програмного засобу на відповідному міжнародному ринку завдяки відповідній репутації розробників

5) Підтверджена можливість розв'язання прикладних задач ЕМС різноманітних технічних і біологічних об'єктів і систем

Розглянемо особливості та можливості деяких присутніх на ринку комерційних програмних продуктів відповідного призначення.

Можливості застосування комерційних платформ обчислювального моделювання для розв'язання задач ЕМС. Комерційні (тобто такі, що придбаються за відповідну плату) платформи обчислювального моделювання розробляються та реалізуються на ринку відомими приватними компаніями-розробниками, дуже часто – міжнародними [7]. Для застосування таких програмних продуктів користувачеві потрібно придбати так звану «ліцензію» на використання всього програмного комплексу або його окремих «компонентів», призначених для розв'язання конкретних задач (або їх сукупності), які цікавлять користувача. Виключенням можуть бути так звані «університетські» або «демонстраційні» версії програмного забезпечення, які надаються закладам вищої освіти або новим користувачам безкоштовно, але мають значно обмежені можливості, оскільки призначені для «ознайомчого» або «пробного» використання.

Щоб «зорієнтуватись» у суттєвому різноманітті комерційних програмних засобів, доцільно виходити з вимоги (критеріїв) до програмних продуктів, наведених вище.

Розглядаючи запропонований перелік критеріїв (вимог) до комерційного програмного забезпечення, зазначимо, що, як запропоновано у [7], розгляд конкретного програмного засобу як потенційного

«кандидата» на використання повинен розпочинатися з останнього у переліку (але не за важливістю) критерію 5, тобто з пошуку комплексів програм, призначених для розв'язання саме тих конкретних задач, які представляють інтерес з точки зору сформульованої мети та тематики наукових досліджень. Звернемо також увагу [7], що присутні на сучасному ринку програмні засоби обов'язково відповідають вимозі (критерію) 2 – присутності в їх складі зручного інтерфейсу (препроцесора та постпроцесора), а також детальної документації та доступу до консультацій служби підтримки.

Проаналізуємо розповсюджені комерційні програмні засоби [3], які принципово можуть бути застосовані для комп'ютерного аналізу задач ЕМС мікропроцесорних систем керування сучасних електричних апаратів, а саме автоматичних вимикачів і контакторів.

1) Програмний продукт CST Studio Suite [8, 9], який останнім часом стає все більш поширеним серед спеціалістів у галузі електротехніки та електроенергетики всьому світі та призначений для чисельного моделювання надзвичайно широкого переліку відповідних процесів і явищ.

Як стверджують розробники, програмне забезпечення дозволяє [9] у тому числі розв'язувати такі задачі у тривимірній постановці, як: перевірка дотримання вимог стосовно ЕМС; віртуальне тестування об'єктів стосовно ЕМС; аналіз електромагнітних перешкод; дослідження електромагнітного впливу на навколишнє середовище; моделювання кабельних джгутів стосовно ЕМС. Одним із прикладів розв'язаних задач є моделювання електромагнітних перешкод і їх урахування при розробці конструкцій пристроїв для мобільної телефонії (рис. 1) [9].

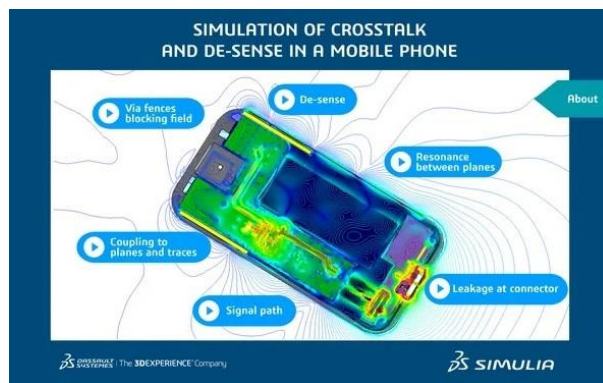


Рис. 1. Узагальнена діаграма моделювання задач ЕМС з використанням CST Studio Suite [9]

Інший приклад розв'язання однієї з сучасних задач ЕМС стосовно бездротової системи передачі енергії наведено у [10] (рис. 2). Присутність у складі цього програмного засобу зручного інтерфейсу користувача дає змогу розглядати цей комплекс програм у якості реального «кандидата» на використання у процесі виконання обчислень, які безпосередньо цікавлять авторів статті. Перепоною для цього є складність (точніше, фактична неможливість) придбання відповідної дуже кошовної «ліцензії» на застосування CST Studio Suite. Можливість уникнення зазначеної проблеми: отримання доступу

до програмного продукту в рамках програм міжнародного наукового співробітництва або (на першому етапі роботи з програмним забезпеченням) використання безкоштовної «учбової» версії програмного забезпечення з обмеженими можливостями [11].

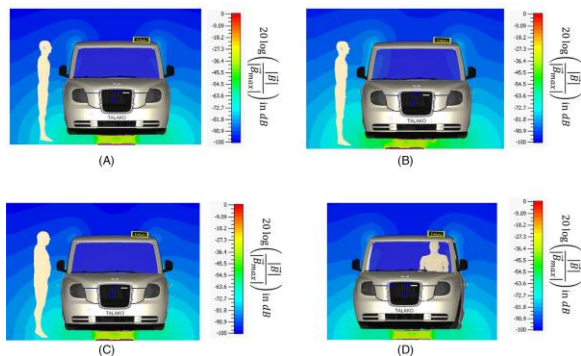


Рис. 2. Приклад графічного зображення результатів розрахунку розподілу електромагнітного поля у CST Studio Suite [10]

2) Комерційний програмний продукт COMSOL Multiphysics [12], який знайшов широке застосування у багатьох сферах дослідження, розробки та конструювання різноманітного електротехнічного обладнання.

Колеги авторів статті з кафедри електричних апаратів НТУ «ХПІ» мають значний досвід використання COMSOL Multiphysics для комп'ютерного моделювання мультифізичних (зв'язаних) електромагнітних, теплових і механічних процесів і явищ у різноманітних сучасних електричних апаратах [13, 14]. Відомо також про цікаві успішні спроби використання зазначеного програмного продукту для чисельного розв'язання тривимірних задач EMC, а саме реконструкції джерел електромагнітних перешкод (застосування: бездротова зарядка електромобілів; медичне обладнання на кшталт магнітоенцефалографів [15]) і розробка експериментального обладнання для проведення досліджень на EMC на радіочастотах (рис. 3, 4) [16].

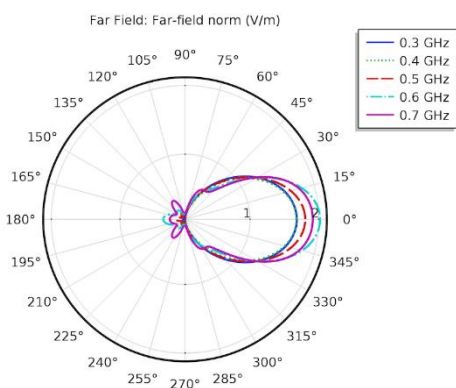


Рис. 3. Комп'ютерне моделювання діаграми спрямованості антенної системи з використанням COMSOL Multiphysics (двовимірне зображення у полярній системі координат) [16]

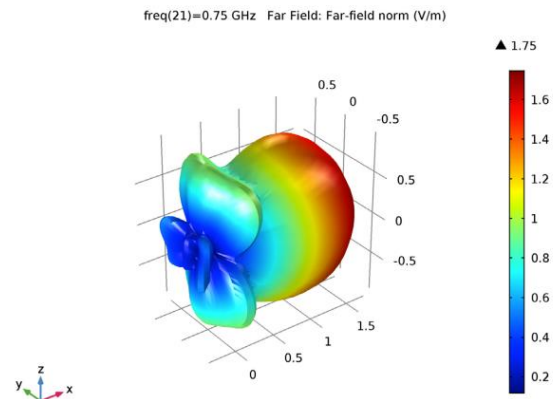


Рис. 4. Комп'ютерне моделювання діаграми спрямованості антенної системи з використанням COMSOL Multiphysics (тривимірне моделювання) [16]

Загалом, COMSOL Multiphysics є потужним програмним засобом, який також може бути «рекомендованим» для використання з метою розрахункового дослідження різноманітних процесів і явищ, асоційованих з EMC. Щодо безпосереднього його використання, головною складністю, як і у випадку CST Studio Suite, також є фактична неможливість придбання відповідної надзвичайно кошовної «ліцензії». Відповідно, можливим шляхом виходом теж може бути отримання доступу до програмного продукту в рамках програм міжнародного науково-технічного співробітництва.

3) Sim4Life [17] – достатньо нова платформа обчислювального моделювання, призначена для розв'язання різноманітних задач у сферах електромагнетизму, мультифізики, радіотехніки та EMC з орієнтацією в першу чергу на медичні та медико-біологічні проблеми на кшталт дослідження безпеки магніторезонансної томографії (МРТ), особливо в контексті EMC імплантованих медичних пристроїв. Має у своєму складі безкоштовну онлайн-версію Sim4Life.lite для використання, в першу чергу, студентами відповідних спеціальностей з навчальною метою [18]. Серед цікавих та значною мірою «специфічних» застосувань можна відзначити, наприклад, спеціалізовані «інструменти» для генерації маршрутизації траєкторій електродів імплантів з детальним урахуванням розташування судин і нервів для оцінки безпеки МРТ (рис. 5) [19].

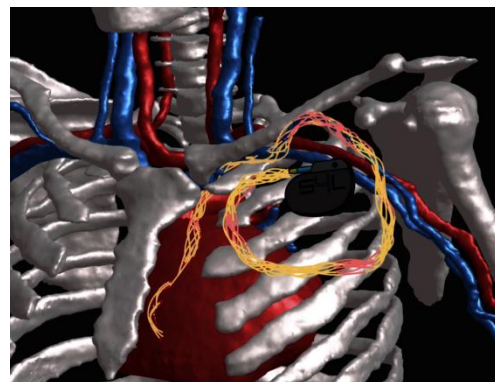


Рис. 5. Детальна розрахункова модель фрагмента тіла людини для розв'язання задач EMC (оцінка безпеки МРТ) у Sim4Life [19].

Загалом, хоча платформа Sim4Life має у своєму складі відповідні засоби для комп'ютерного моделювання ЕМС технічних об'єктів і систем, її першочергова орієнтація на медичні застосування зводить можливість використання з метою розв'язання задач ЕМС мікропроцесорних систем керування сучасної комутаційної апаратури низької, середньої та високої напруг.

4) Feko [20] – програмний продукт для комп'ютерного моделювання височастотних електромагнітних процесів, таких як мобільний зв'язок, антенні та радіотехнічні пристрої, радіолокація, біоелектромагнетизм, ЕМС та ін. Як зазначають розробники [20], програмне забезпечення надає можливість, наприклад, аналізувати радіоперешкоди між декількома передавачами та приймачами (радіомовні станції і аеронавігаційне обладнання або бездротові мережі), щоб передбачати, аналізувати та пом'якшувати вплив радіоперешкод на функціонування різноманітного обладнання. Також, програмний продукт призначений для дослідження ефективності екранування, впливу електромагнітних імпульсів і блискавки та інших процесів і явищ, які стосуються ЕМС.

На рис. 6 наведені приклади чисельного розв'язання деяких задач ЕМС стосовно технічних об'єктів і відкритого простору [21].

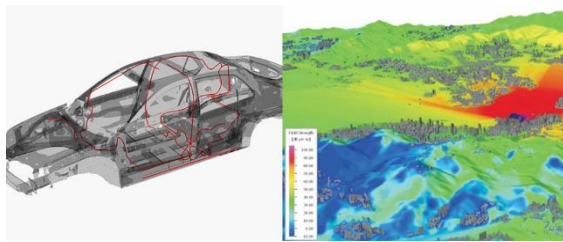


Рис. 6. Приклади чисельного розв'язання задач ЕМС у Feko [21]

В цілому, програмне забезпечення Feko в першу чергу призначено для дослідження електромагнітних процесів на високих частотах, що обмежує можливість його використання для розв'язання задач ЕМС стосовно сучасних електричних апаратів.

Висновки. Проаналізовано особливості та можливості застосування розповсюджених на ринку комерційних платформ обчислювального моделювання для комп'ютерного розв'язання задач електромагнітної сумісності технічних об'єктів і систем, в першу чергу сучасної комутаційної апаратури низької, середньої та високої напруг. Аналіз інформації стосовно комерційних програмних продуктів, розглянутих у цій статті, дозволяє попередньо рекомендувати використання комерційних програмних засобів CST Studio Suite та/або COMSOL Multiphysics за умови отримання доступу до них в рамках програм міжнародного науково-технічного співробітництва.

Підтримка виконання роботи. Автори вдячні проф. Маркусу Клеменсу, Бергський університет м. Вупперталь, Німеччина (Prof. Markus Clemens, Bergische Universität Wuppertal, Germany) за курс лекцій з питань електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних систем (Elektromagnetische Verträglichkeit technischer

Systeme / Electromagnetic Compatibility of Technological Systems) [3], люб'язно наданий ним.

Acknowledgment. The authors are grateful to Prof. Markus Clemens, Bergische Universität Wuppertal, Germany for a course of lectures on electromagnetic compatibility (EMC) of technological systems (Elektromagnetische Verträglichkeit technischer Systeme / Electromagnetic Compatibility of Technological Systems) [3] kindly provided by him.

Список літератури

1. Пантелєят М.Г., Мясоедов П.С. Електромагнітна сумісність технічних об'єктів і систем: огляд системи та органів стандартизації Європейського Союзу та Федеративної Республіки Німеччина // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2023. – No. 1 (9). – с. 26-30. doi: 10.20998/2079-3944.2023.1.04.
2. Пантелєят М.Г., Мясоедов П.С., Ламаш Г.В. Електромагнітна сумісність технічних об'єктів і систем: стилізований огляд основних нормативних документів Європейського Союзу та Федеративної Республіки Німеччина // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2024. – No. 1 (11). – с. 83-89. doi: 10.20998/2079-3944.2024.1.03.
3. Clemens M. Electromagnetic Compatibility of Technical Systems. – Lecture notes, Wintersemester 2022/2023. – Wuppertal: University of Wuppertal, 2022.
4. Пантелєят М.Г., Мясоедов П.С. Попередній огляд деяких програмних засобів для комп'ютерного моделювання задач електромагнітної сумісності / Тези доповідей XXVII Міжнародного симпозіуму SIEMA'2024 «Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки». – Харків, Україна, 24-25 жовтня 2024 р. – с. 34. ISBN 978-617-05-0506-4.
5. Середа О.Г., Середа О.Г., Крюкова Н.В. Дослідження можливості підвищення ефективності автоматичної компенсації змінного магнітного моменту струмів трифазного електроустаткування // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – 2023. – No. 1(6). – с. 15-18. doi: 10.20998/2224-0349.2023.01.15.
6. Пантелєят 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 вдосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2022. – No. 2 (8). – с. 15-19. doi: 10.20998/2079-3944.2022.2.03.
7. Пантелєят 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 2: Особливості комерційних програмних продуктів і програм з відкритим доступом. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Проблеми вдосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – 2023. – No. 1 (9). – с. 21-25. doi: 10.20998/2079-3944.2023.1.03.
8. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: веб-сайт. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite> (дата звернення: 14.04.2025).
9. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: веб-сайт. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/electromagnetic-simulation/compatibility> (дата звернення: 14.04.2025).
10. 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.
11. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: веб-сайт. URL: <https://www.3ds.com/edu/education/students/solutions/cst-le> (дата звернення: 14.04.2025).
12. Comsol Multiphysics: веб-сайт. URL: <https://www.comsol.com/models> (дата звернення: 14.04.2025).

13. 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.
14. Лелюк М.А. Удосконалення вакуумних контакторів з монстабільними поляризованими електромагнітами. – Дис... канд. техн. наук: 05.09.01. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 229 с.
15. Comsol Multiphysics: веб-сайт. URL: <https://www.comsol.com/paper/emc-simulation-using-source-reconstruction-52381> (дата звернення: 14.04.2025).
16. Comsol Multiphysics: веб-сайт. URL: <https://www.comsol.com/blogs/designing-accurate-emcemi-testing-equipment-with-rf-modeling> (дата звернення: 14.04.2025).
17. Sim4Life: веб-сайт. URL: <https://sim4life.swiss/> (дата звернення: 14.04.2025).
18. Sim4Life: веб-сайт. URL: <https://s4l-lite.io/> (дата звернення: 14.04.2025).
19. Sim4Life: веб-сайт. URL: <https://sim4life.swiss/#tools> (дата звернення: 14.04.2025).
20. Altair: Feko: веб-сайт. URL: <https://altair.com/feko> (дата звернення: 14.04.2025).
21. Altair: Feko: веб-сайт. URL: <https://altair.com/feko-applications/> (дата звернення: 14.04.2025).
- enerhoefektyvnist. – 2023. – No. 1 (6). – Pp. 15-18. doi: 10.20998/2224-0349.2023.01.15.
6. Panteliat, M., and A. 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". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 2 (8), Dec. 2022, pp. 15-19, doi:10.20998/2079-3944.2022.2.03.
7. Panteliat, M., & Kuzmin, A. (2023). 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. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, (1 (9), 21–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2023.1.03>.
8. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/cst-studio-suite> (Accessed: 14.04.2025).
9. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/electromagnetic-simulation/compatibility> (Accessed: 14.04.2025).
10. 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.
11. Dassault Systèmes: CST Studio Suite: URL: <https://www.3ds.com/edu/education/students/solutions/cst-le> (Accessed: 14.04.2025).
12. Comsol Multiphysics: URL: <https://www.comsol.com/models> (Accessed: 14.04.2025).
13. Baida Ye.I. Multyfizychni modeli vysokovoltnykh vakuumnykh vymykachiv z bistabilnyimi poliaryzovanyimi aktuatoryami v dynamichnykh rezhymakh. – Dys... dokt. tekhn. nauk: 05.09.01. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2018. – 376 p.
14. Leliuk M.A. Udoskonalennia vakuumnykh kontaktoriv z monstabillnyimi poliaryzovanyimi elektromagnitamy. – Dys... kand. tekhn. nauk: 05.09.01. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019. – 229 p.
15. Comsol Multiphysics: веб-сайт. URL: <https://www.comsol.com/paper/emc-simulation-using-source-reconstruction-52381> (Accessed: 14.04.2025).
16. Comsol Multiphysics: веб-сайт. URL: <https://www.comsol.com/blogs/designing-accurate-emcemi-testing-equipment-with-rf-modeling> (Accessed: 14.04.2025).
17. Sim4Life: URL: <https://sim4life.swiss/> (Accessed: 14.04.2025).
18. Sim4Life: URL: <https://s4l-lite.io/> (Accessed: 14.04.2025).
19. Sim4Life: URL: <https://sim4life.swiss/#tools> (Accessed: 14.04.2025).
20. Altair: Feko: URL: <https://altair.com/feko> (Accessed: 14.04.2025).
21. Altair: Feko: URL: <https://altair.com/feko-applications/> (Accessed: 14.04.2025).

References (transliterated)

Надійшла (received) 15.04.25

Відомості про авторів / About the authors

Пантеліят Михайло Гаррієвич (Panteliat Mykhailo Garriyovich) – 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.

Мясоєдов Павло Сергійович (Miasoedov Pavlo Sergijovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант, кафедра електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: Pavel.miasoedov.97@gmail.com.