

М.О. ПОЛЯКОВ, В.В. ВАСИЛЕВСЬКИЙ, О.Д. БАРАБАН

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МУЛЬТИПОЛЬОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОСУ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Важливим напрямком теоретичних досліджень є математичне моделювання стану целюлозної ізоляції, що визначає ресурс силового трансформатора. Прогнозування стану целюлозної ізоляції потребує комп'ютерного моделювання. Відомі математичні моделі прогнозування старіння целюлозної ізоляції мають недоліки. Тому треба формалізувати завдання мультипольового моделювання, вибрати засіб для мультипольового моделювання та виконати огляд літератури щодо моделей (зосереджена, пошарова та ін.) і вибрати засіб мультипольового моделювання (FEMM та ін.). Водночас є питання, яке потребують вирішення/уточнення такі як фактор прикладеного зусилля до целюлозної ізоляції в момент часу. Тому потрібно розробити нову математичну модель та необхідно перейти до використання польових моделей.

Ключові слова: трансформатор, математична модель, старіння ізоляції.

M. POLYAKOV, V. VASILEVSKY, O. BARABAN

STATEMENT OF THE PROBLEM OF MULTIPOLE MODELLING OF WEAR PROCESSES OF CELLULOSE INSULATION OF A POWER TRANSFORMER

An important area of theoretical research is the mathematical modelling of the state of cellulose insulation, which determines the life of a power transformer. Predicting the state of cellulose insulation requires computer modelling. The known mathematical models for predicting the aging of cellulose insulation have drawbacks. Therefore, it is necessary to formalise the task of multipole modelling, select a multipole modelling tool and review the literature on models (concentrated, layered, etc.) and select a multipole modelling tool (FEMM, etc.). At the same time, there are issues that need to be addressed/clarified, such as such as the factor of the applied force to the cellulose insulation at the moment in time. Therefore, it is necessary to develop a new mathematical model and move to the use of field models.

Keywords: transformer, mathematical model, insulation aging.

Предмет дослідження. Стан целюлозної ізоляції визначає ресурс силового трансформатора.

Прогнозування стану целюлозної ізоляції потребує комп'ютерного моделювання.

Мета роботи: підвищення точності прогнозування шляхом переходу до польових моделей.

Завдання роботи: формалізувати завдання мультипольового моделювання, вибрати засіб для мультипольового моделювання/огляд літератури щодо моделей (зосереджена, пошарова та ін.) і засобів мультипольового моделювання (програми FEMM та ін.). Водночас є питання, яке потребують вирішення/уточнення такі як фактор прикладеного зусилля до целюлозної ізоляції в момент часу.

Аналіз сучасних моделей.

Модель Арреніуса (Модель деструкції піролізу) є однією з найбільш широко використовуваних моделей старіння целюлозної ізоляції. Вона заснована на припущенні, що швидкість старіння пропорційна експоненціальній функції від температури. Але вона має недолік такий як те що вона припускає, що швидкість старіння залежить тільки від температури, ігноруючи інші фактори, як вологість, окислення або наявність дефектів в ізоляції.

У 1889 році Сванте Арреніус запропонував рівняння, яке описує залежність постійної швидкості реакції від температури [1]

$$k = A \times e^{\frac{-E}{R \times T}} \quad (1)$$

де k – константа швидкості реакції;

A – показник швидкості старіння, обумовленого впливом вологи, кислот та кисню, год^{-1} ; E – енергія активації для процесу теплового старіння паперу у трансформаторному маслі, кДж/моль ; R – молярна газова стала Дж/моль/К ;

T – температура, $^{\circ}\text{C}$.

Проаналізувавши модель видно з формули, що дана модель не враховує вплив вологості в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі, вплив кисню в баку трансформатора, вплив продуктів старіння масла та вплив механічних (вібраційних) навантажень на целюлозну ізоляцію трансформатора.

Модель деструкції гідролізу вона базується на степені зволоженості целюлозної ізоляції [1].

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V(K_W) dt \quad (2)$$

де $L(t_0, t_0 + T)$ – скорочення строку служби ізоляції в інтервалі часу, який починається в момент t_0 та має тривалість T ; V – відносна швидкість скорочення строку служби ізоляції трансформатора; K_W – коефіцієнти впливу вологи на старіння ізоляції трансформатора, відповідно.

Проаналізувавши модель видно з формули, що дана модель не враховує вплив підвищеної температури, вплив кисню в баку трансформатора, вплив продуктів старіння масла та вплив механічних (вібраційних) навантажень на целюлозну ізоляцію трансформатора.

Модель деструкції окислення вона базується на тому що кількість кисню в баці трансформатора та окислення масла в баку трансформатора експоненціально пришвидшує старіння целюлозної ізоляції трансформатора [1]

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} (K_A \cdot V_{O_2}) dt \quad (3)$$

де K_A , K_{O_2} – коефіцієнти впливу кисню та розчинних кислот на старіння ізоляції трансформатора.

Проаналізувавши модель видно з формули, що дана модель не враховує вплив підвищеної температури,

© М.О. Поляков, В.В. Василевський, О.Д. Барабан, 2024

вплив вологості, вплив продуктів старіння масла та вплив механічних (вібраційних) навантажень на целюлозну ізоляцію трансформатора.

Пошарова модель [2] ґрунтується на концепції активної маси і містить у собі різні чинники, такі як температура, вологість, кисневе оточення і тиск.

$$L(t_0, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} (V_\theta \cdot V_w \cdot V_K) dt \quad (4)$$

де V_K - відносна швидкість старіння ізоляції, що залежить від ступеня окислення трансформаторного масла;

V_w відносна швидкість старіння ізоляції в залежності від ступеня вологості паперу;

V_θ - швидкість теплового зносу ізоляції;

T - тривалість часового інтервалу.

Згідно з формулою, наведеною вище, дана модель не враховує вплив механічних (вібраційних) навантажень на процес старіння целюлозної ізоляції трансформатора.

З аналізу всіх актуальних моделей вище видно що пошарова модель враховує кілька чинників, що робить її більш комплексною і точною порівняно з моделлю Арреніуса (модель деструкції піролізу), моделі деструкції гідролізу, моделі деструкції окиснення. Однак, вона вимагає більш точних даних про фактори старіння, що може бути викликом при практичному застосуванні. А також вона не включає в себе фактор прикладеного зусилля до целюлозної ізоляції в момент часу. Це призводить до зниження точності прогнозування.

Проте, наукова проблема, ще не вирішена зазначеними вище моделями, полягає у недосконалості математичних моделей для діагностики целюлозної ізоляції силових трансформаторів. Існуючі моделі не враховують можливу зміну умов експлуатації трансформатора на період прогнозу та роль етапу виробництва у формуванні ресурсу целюлозної ізоляції.

В рамках наукового огляду інструментів для моделювання, одним з ключових ресурсів, що заслуговують на увагу, є програмний комплекс

Finite Element Method Magnetics (FEMM) [3-5]. FEMM представляє собою набір програм, розроблених для розв'язання задач електромагнетизму низької частоти в двовимірних плоских та осесиметричних областях. Цей інструмент надає можливості для моделювання та аналізу магнітних, електростатичних, теплових та електричних потоків.

FEMM спеціалізується на моделюванні електромагнітних полів за допомогою методу скінченних елементів (FEM). Цей інструмент зазвичай використовується для дослідження магнітних полів в електротехнічних пристроях, таких як трансформатори.

Особливості FEMM полягають у тому, що він надає зручний інтерфейс для побудови та аналізу 2D та 3D моделей магнітних систем. Він дозволяє визначати розподіл магнітного поля, потенціалів і заломлювань струму, що може бути корисним при аналізі взаємодії ізоляційних матеріалів з магнітним полем в трансформаторах. Системні вимоги:

Операційна система: Windows XP/Vista/7/8/10.

Обсяг на жорсткому диску: 7 ГБ.

Оперативна пам'ять - 4 ГБ.

Відеокарта: дискретну відеокарту з пам'яттю 1 ГБ.

FEMM включає в себе різні модулі, що дозволяють проводити аналіз в різних областях, включаючи магнітостатику, електростатику, теплопровідність та постійний струм. Ці модулі можуть бути використані окремо або в комбінації для проведення більш складного аналізу.

Важливою особливістю FEMM є його здатність до автоматизації. Завдяки вбудованому скриптовому двигуну Lua, користувачі можуть автоматизувати процеси моделювання та аналізу, що значно підвищує продуктивність роботи.

Переваги FEMM включають вільний доступ, безоплатне використання та простий та зрозумілий інтерфейс. Однак, варто зазначити, що інтерфейс програми доступний лише англійською мовою, що може бути недоліком для деяких користувачів.

Ansys Maxwell [6-8] є програмним продуктом для моделювання низькочастотних електромагнітних полів, призначеним для інженерів, які розробляють різні електромагнітні та електромеханічні пристрої, у тому числі електричні двигуни, приводи, трансформатори, датчики та котушки. У Maxwell можливе рішення як статичних електромагнітних завдань, так і завдань у частотній та часовій областях.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows 7, 8, 10 64-bit

Процесор: Pentium® 4 2.0 ГГц або Athlon® 2000

Обсяг на жорсткому диску: 7 ГБ.

Оперативна пам'ять - 4 ГБ, (32 ГБ).

Відеокарта: NVIDIA GeForce® FX 8 серії.

Серед переваг можливо зазначити наявність безкоштовної версії, яка забезпечує доступ до 90% програми без обмежень за часом. Це сприяє навчанню студентів та допомагає дослідникам моделювати фізичні процеси.

Недоліками є високі системні вимоги до комп'ютера, оскільки для виконання розрахунків потрібен потужний персональний комп'ютер. Це є обмеженням для деяких користувачів з менш потужними системами.

COMSOL Multiphysics [9-11] представляє собою програмний пакет, призначений для аналізу методом скінченних елементів, розв'язання та моделювання різноманітних фізичних та інженерних задач. Цей пакет дозволяє вирішувати складні багатопараметричні задачі, включаючи взаємодію різних фізичних явищ.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows, macOS та Linux.

Оперативна пам'ять: 4 ГБ.

Вільне місце на жорсткому диску: 20 ГБ

Процесор: 64-бітний процесор Intel або AMD з підтримкою SSE4. Apple Silicon на macOS1.

Відеокарта: дискретну відеокарту з пам'яттю 4 ГБ.

Серед переваг можна відзначити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачеві легко виконувати завдання від налаштування геометрії до візуалізації результатів. Крім того, в програмі вбудовано

вана велика бібліотека матеріалів, що спрощує вибір та використання матеріалів у моделюванні.

Проте, серед недоліків можна зазначити відсутність загальнодоступної публічної студентської версії COMSOL Multiphysics, доступною для вивчення та досліджень. Натомість, є лише пробна 2-тижнева ліцензія, що може обмежувати доступність програми для студентів та дослідників.

OpenFOAM [12-14] (Open Field Operation and Manipulation) представляє собою вільний та відкритий програмний пакет, призначений для обчислення гідродинаміки та теплообміну, заснований на методі обчислення CFD (Computational Fluid Dynamics). Цей програмний інструмент активно розвивається та підтримується спільнотою користувачів та розробників, а також має широке використання в наукових дослідженнях, промисловості та освіті.

Особливості OpenFOAM включають його застосування в різних галузях, таких як авіація, автомобілебудування, енергетика, металургія, медицина, будівництво та інші. Цей програмний засіб дозволяє інженерам та дослідникам проводити реалістичне моделювання різних фізичних процесів.

Системні вимоги:

Операційна система: Linux.

GNU Compiler Collection: 4.8.5.

Cmake: 3.3 (required for ParaView and CGAL build).

Boost: 1.48 (required for CGAL build).

fftw: 3.3.7 (optional - required for FFT-related functionality).

Qt: 4.8 (optional - required for ParaView build).

Серед переваг можна відзначити наявність безкоштовної версії для студентів та дослідників, яка сприяє використанню OpenFOAM для навчальних цілей та досліджень.

Серед недоліків можливо зазначити високі системні вимоги до комп'ютера, тому що для розрахунків необхідний потужний персональний комп'ютер, що може бути обмеженням для користувачів з менш потужними системами.

MagNet [15-17] - це програмне забезпечення, призначене для моделювання електромагнітних полів в тривимірному просторі. Воно застосовується для проведення досліджень та аналізу різноманітних електромагнітних систем, таких як електродвигуни, трансформатори, магнітні датчики та інші.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows 10/8.1/7

Процесор: Багатоядерний процесор серії Intel або вище, еквівалент Xeon або AMD

Оперативна пам'ять: 8 ГБ

Обсяг на жорсткому диску: 4 ГБ

Особливості MagNet полягають у можливості моделювання складних електромагнітних систем з високою точністю. Програма відрізняється гнучкістю та можливістю використання для різних завдань, від проектування до аналізу виробництва. Крім того, MagNet має широкий набір інструментів для визначення параметрів електромагнітних полів.

Серед переваг можна відзначити наявність безкоштовної студентської версії програми.

Проте, серед недоліків слід зазначити високі вимоги до обладнання, оскільки для виконання розрахунків необхідний потужний персональний комп'ютер.

ThermNet (Simcenter MAGNET Thermal) [17-19] є програмним забезпеченням, призначеним для моделювання теплових полів у двовимірному і тривимірному просторі. Воно застосовується для аналізу теплового розподілу в різних системах і пристроях, таких як радіатори, електроніка, теплообмінники та інші.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows 10/8.1/7

Процесор: Багатоядерний процесор серії Intel або вище, еквівалент Xeon або AMD

Оперативна пам'ять: 8 ГБ

Обсяг на жорсткому диску: 4 ГБ

Особливості ThermNet включають можливість моделювання теплових процесів у складних системах з урахуванням різних матеріалів і геометрій. Програма забезпечує аналіз теплових потоків і розподілу температур у пристроях та системах. Крім того, ThermNet підтримує різні умови інтерфейсу для введення теплових параметрів та розрахунків.

Серед переваг можна відзначити наявність безкоштовної студентської версії програми.

Проте, слід зазначити, що для виконання розрахунків ThermNet вимагає потужний персональний комп'ютер.

Jmag Designer [20-22] це програмне забезпечення, яке використовується для моделювання та аналізу електромагнітних полів, що виникають у різних системах. Воно надає можливість інженерам та дослідникам розробляти та вдосконалювати електромагнітні пристрої, такі як електродвигуни, трансформатори, датчики, генератори та інші. Крім того, Jmag Designer використовується для аналізу електромагнітних властивостей матеріалів, які застосовуються у пристроях та системах.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows, Linux

Процесор: Багатоядерний процесор серії Intel або вище, еквівалент Xeon

Оперативна пам'ять: мінімально 4 ГБ (8 ГБ)

Обсяг на жорсткому диску: 40 ГБ

Особливості Jmag Designer включають моделювання електромагнітних полів у тривимірному просторі з високою точністю, аналіз магнітних, електричних та теплових властивостей систем та пристроїв, а також підтримку різних видів аналізу, таких як статичний, динамічний, гармонічний аналіз тощо. Крім того, програма інтегрується з іншими програмами для комплексного аналізу систем.

Серед переваг можна відзначити наявність безкоштовної версії програми.

Проте, для виконання розрахунків в Jmag Designer необхідний потужний персональний комп'ютер.

CST Studio Suite [23-25] є високопродуктивний пакет програмного забезпечення для електромагнітного (EM) аналізу в 3D, призначений для проектування, аналізу та оптимізації електромагнітних компонентів і систем.

Пакет програм для всього спектра електромагнітних полів доступні в єдиному користувацькому інтерфейсі пакета CST Studio Suite. До предметів ЕМ аналізу належать продуктивність і ефективність антен і фільтрів, електромагнітна сумісність і перешкоди, вплив людського тіла на електромагнітні поля, електро-ромеханічні ефекти в двигунах і генераторах, а також теплові ефекти в пристроях високої потужності.

Цей пакет програм можна об'єднувати для гібридного імітаційного моделювання, що дає конструкторам змогу ефективно і швидко аналізувати цілі системи, які складаються з безлічі компонентів. Спільне проектування з використанням інших продуктів SIMULIA дає змогу інтегрувати ЕМ-імітаційне моделювання в процес проектування та керувати процесом розроблення з найбільш ранніх етапів.

Системні вимоги:

Операційна система: Windows 10

Процесор: Intel® Core™ i7-1165G7 11-го покоління

Оперативна пам'ять: мінімально 16 ГБ

Обсяг на жорсткому диску: 1 ТБ

Особливості CST Studio Suite включають високу точність та ефективність при моделюванні складних електромагнітних систем, зокрема трансформаторів. Ця програма надає засоби для аналізу взаємодії магнітних полів з ізоляційними матеріалами і може бути корисною для дослідження старіння целюлозної ізоляції.

Серед переваг CST Studio Suite слід відзначити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який дозволяє користувачеві легко виконувати завдання від налаштування геометрії до візуалізації результатів. Крім того, програма має дуже велику вбудовану бібліотеку матеріалів а також вільну версію для студентів. Проте, серед недоліків CST Studio Suite маю зазначити лише те що програма потребує потужний комп'ютер за системними вимогами.

Висновки

1. В статті наведено аналіз актуальних математичних моделей визначення ресурсних характеристик целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів. Зокрема, проаналізовано моделі Арреніуса (модель деструкції піролізу), модель деструкції гідролізу, модель деструкції окислення, поширена модель розрахунку ресурсу целюлозної ізоляції для моделювання скорочення строку служби целюлозної ізоляції впродовж експлуатації трансформатора. З аналізу видно що моделі дозволяють враховувати не лише теплове старіння ізоляції, але й вплив хімічно агресивних середовищ (вологи та кислот) на зменшення її ресурсу. Разом з тим, існуючі моделі не враховують в достатній мірі зміну факторів експлуатації в майбутньому та їх взаємозв'язок, до уваги не береться також проведення ремонтів (технічного обслуговування) ізоляційної системи трансформатора в ході експлуатації та їх вплив на швидкість старіння целюлозної ізоляції. Також не береться до уваги фактор прикладеного зусилля до целюлозної ізоляції в момент часу, який може негативно вплинути на строк служби трансформатора.

2. Проаналізувавши програми для моделювання процесу старіння целюлозної ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів можна сказати що всі програми мають низку переваг і недоліків. У загальному і цілому, зі своїми основними завданнями, а саме, моделюванням і розрахунками, програми виконують однаково добре. Однак, якщо брати до уваги всі аспекти даного порівняння, то пакет Finite Element Method Magnetism має кращі показники. Багато в чому це пов'язано з вільним доступом до програми, а також Finite Element Method Magnetism має більш низькі системні вимоги що дозволяє його використовувати усім користувачам.

3. Підсумовуючи вищесказане треба розробити нову математичну модель та необхідно перейти до використання польових моделей, оскільки лише вони можуть описати складний нерівномірний просторовий розподіл полів, що впливають на процес старіння ізоляції. Для розробки більш точної моделі треба використання полів впливу підвищеної температури, вологості в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі, кисню в баку трансформатора, продуктів старіння масла, механічних (вібраційних) навантажень на целюлозну ізоляцію трансформатора все це є необхідним для повного прогнозування стану ізоляції з урахуванням просторової нерівномірності розподілу полів, які впливають на старіння ізоляції.

Список літератури

- 1 Конограй С.П. Застосування моделі старіння твердої ізоляції силових маслонаповнених трансформаторів для їхньої діагностики в режимі експлуатації. Електротехніка та Електромеханіка = Electrical engineering & Electromechanics. - 2010. - № 1. - С. 43-45.
- 2 Poliakov M.A., Vasilevskij V.V., Andrienko P.D. Layered model of the consumption of the insulation resource of the windings of a power oil-immersed transformer // IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP) - 2020 - С. 1-4. DOI: 10.1109/paep49887.2020.9240834
- 3 Vasil Spasov; Enhancing the capabilities of the FEMM software by a novel torque computation method. AIP Conf. Proc. 24 January 2024; 2980 (1): 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0184368>
- 4 K. B. Baltzis, The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering, Journal volume & issue, JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW (JAN 2008), Vol. 1, no. 1, pp. 83 – 89
- 5 Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed 01 March 2024). D. Meeker, Finite Element Method Magnetism, Version 4.2, (01 March 2022 release).
- 6 Available at <https://www.ansys.com/support/spaceclaim-support/system-requirements/> System Requirements (accessed 01 March 2024).
- 7 Available at <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-maxwell.html#:~:text=ANSYS%20Maxwell%20являється%20программным%20продуктом,%2C%20трансформаторы%20датчики%20и%20катушки.> ANSYS Maxwell (accessed 01 March 2024).
- 8 Y. Özüpak, "Bir Transformatorün Endüktanslarının Deneysel Analizi ve Ansys@Maxwell ile Simülasyon Hesabı", ijiea, IJIEA, c. 5, sy. 1, ss. 1–5, 2021, doi: 10.46460/ijiea.864239.
- 9 Available at <https://www.comsol.com/system-requirements/62/server-system-requirements> (accessed 02 March 2024).
- 10 Available at <https://www.comsol.com/products/Manual> (accessed 02 March 2024).
- 11 Vajdi M., Sadegh Moghanlou F., Sharifianjazi F., Shahedi Asl, M., & Shokouhimehr M. (2020). A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics. Journal of Composites

- and Compounds, 2(2), 35–43. <https://doi.org/10.29252/jcc.2.1.5>
- 12 Available at <https://www.openfoam.com/documentation/system-requirements>. System requirements (accessed 02 March 2024).
 - 13 Available at <https://www.openfoam.com/governance/overview> (accessed 02 March 2024).
 - 14 T. Zirwes, M. Sontheimer, F. Zhang, et al. Assessment of Numerical Accuracy and Parallel Performance of OpenFOAM and its Reacting Flow Extension EBI dnsFoam. Flow Turbulence Combust 111, 567–602 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00449-8>
 - 15 Available at <https://www.infologdesign.co.uk/magnet> Overview (accessed 02 March 2024).
 - 16 Available at <https://filecr.com/windows/siemens-simcenter-magnet> System requirements (accessed 02 March 2024)
 - 17 L.Liu, J. Li, F. Che., Electromagnetic and Thermal Modeling Based on Large Power Transformers. In: Cheng, Z., Takahashi, N., Forghani, B. (eds) Modeling and Application of Electromagnetic and Thermal Field in Electrical Engineering. Springer, Singapore. (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0173-9_14
 - 18 Available at <https://www.infologdesign.co.uk/thermnet> Overview (accessed 02 March 2024).
 - 19 Available at <https://filecr.com/windows/siemens-simcenter-thermnet/> System requirements (accessed 01 March 2024)
 - 20 Available at https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer/geometry_modeling/Modeling (accessed 11 June 2024)
 - 21 Available at <https://www.jmag-international.com/products/specification/#:~:text=%20Windows%2010%20and%20Windows%2011,ended%20on%20October%2010%2C%202023.> System requirements (accessed 11 June 2024)
 - 22 K. Shimura et al., "Alternating-Current Copper Loss Reduction in a High-Frequency Transformer for Railways Using a Magnetic Tape," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 11, pp. 1-7, Nov. 2021, Art no. 8402207, doi: 10.1109/TMAG.2021.3113498.
 - 23 Available at <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/cst-studio-suite>. Огляд accessed 11 June 2024)
 - 24 Available at <https://www.caecis.com/cistemnye-trebovaniya-k-cst-studio-suite-2022>. Системні вимоги (accessed 11 June 2024)
 - 25 Z. Judáková, L. Janoušek, L. Čárnecká and D. Oreničová, "Simulations of electromagnetic exposure system for irradiation of biological cultures: comparison of CST Studio Suite and COMSOL Multiphysics," 2021 22nd International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Hrádek u Sušice, Czech Republic, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CPEE54040.2021.9585255.
 - 5 Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed 01 March 2024). D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, (01 March 2022 release).
 - 6 Available at <https://www.ansys.com/support/spaceclaim-support/system-requirements/> System Requirements (accessed 01 March 2024).
 - 7 Available at <https://www.ansys.soften.com.ua/products/electronics/ansys-maxwell.html#:~:text=ANSYS%20Maxwell%20yavliaetsia%20programmym%20produktom,%2C%20transformatory%2C%20datchyky%20y%20katushky>. ANSYS Maxwell (accessed 01 March 2024).
 - 8 Y. Özüpak, "Bir Transformörün Endüktanslarının Deneysel Analizi ve Ansys@Maxwell ile Simülasyon Hesabı", ijiea, IJIEA, c. 5, sy. 1, ss. 1–5, 2021, doi: 10.46460/ijiea.864239.
 - 9 Available at <https://www.comsol.com/system-requirements/62/server> System requirements (accessed 02 March 2024).
 - 10 Available at <https://www.comsol.com/products> Manual (accessed 02 March 2024).
 - 11 Vajdi M., Sadegh Moghanlou F., Sharifianjazi F., Shahedi Asl, M., & Shokouhimehr M. (2020). A review on the Comsol Multiphysics studies of heat transfer in advanced ceramics. Journal of Composites and Compounds, 2(2), 35–43. <https://doi.org/10.29252/jcc.2.1.5>
 - 12 Available at <https://www.openfoam.com/documentation/system-requirements>. System requirements (accessed 02 March 2024).
 - 13 Available at <https://www.openfoam.com/governance/overview> (accessed 02 March 2024).
 - 14 T. Zirwes, M. Sontheimer, F. Zhang, et al. Assessment of Numerical Accuracy and Parallel Performance of OpenFOAM and its Reacting Flow Extension EBI dnsFoam. Flow Turbulence Combust 111, 567–602 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10494-023-00449-8>
 - 15 Available at <https://www.infologdesign.co.uk/magnet> Overview (accessed 02 March 2024).
 - 16 Available at <https://filecr.com/windows/siemens-simcenter-magnet> System requirements (accessed 02 March 2024)
 - 17 L.Liu, J. Li, F. Che., Electromagnetic and Thermal Modeling Based on Large Power Transformers. In: Cheng, Z., Takahashi, N., Forghani, B. (eds) Modeling and Application of Electromagnetic and Thermal Field in Electrical Engineering. Springer, Singapore. (2020). https://doi.org/10.1007/978-981-15-0173-9_14
 - 18 Available at <https://www.infologdesign.co.uk/thermnet> Overview (accessed 02 March 2024).
 - 19 Available at <https://filecr.com/windows/siemens-simcenter-thermnet/> System requirements (accessed 01 March 2024)
 - 20 Available at https://www.jmag-international.com/products/jmag-designer/geometry_modeling/Modeling (accessed 11 June 2024)
 - 21 Available at <https://www.jmag-international.com/products/specification/#:~:text=%20Windows%2010%20and%20Windows%2011,ended%20on%20October%2010%2C%202023.> System requirements (accessed 11 June 2024)
 - 22 K. Shimura et al., "Alternating-Current Copper Loss Reduction in a High-Frequency Transformer for Railways Using a Magnetic Tape," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 57, no. 11, pp. 1-7, Nov. 2021, Art no. 8402207, doi: 10.1109/TMAG.2021.3113498.
 - 23 Available at <https://www.3ds.com/ru/produkty-i-uslugi/simulia/produkty/cst-studio-suite>. accessed 11 June 2024)
 - 24 Available at <https://www.caecis.com/cistemnye-trebovaniya-k-cst-studio-suite-2022>. Systemni vymohy (accessed 11 June 2024)
 - 25 Z. Judáková, L. Janoušek, L. Čárnecká and D. Oreničová, "Simulations of electromagnetic exposure system for irradiation of biological cultures: comparison of CST Studio Suite and COMSOL Multiphysics," 2021 22nd International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE), Hrádek u Sušice, Czech Republic, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/CPEE54040.2021.9585255.

References (transliterated)

- 1 Konohrai S.P. Zastosuvannia modeli starinnia tverdoi izoliatsii sylovykh maslonapovnenykh transformatoriv dlia yikhnoi diahnostryky v rezhymy ekspluatatsii. Elektrotekhnika ta Elektromekhanika = Electrical engineering & Electromechanics. 2010. No 1. Pp. 43-45.
- 2 Poliakov M.A., Vasilevskij V.V., Andrienko P.D. Layered model of the consumption of the insulation resource of the windings of a power oil-immersed transformer. IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). 2020. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/paep49887.2020.9240834
- 3 Vasil Spasov; Enhancing the capabilities of the FEMM software by a novel torque computation method. AIP Conf. Proc. 24 January 2024; 2980 (1): 030001. <https://doi.org/10.1063/5.0184368>
- 4 K. B. Baltzis, The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering, Journal volume & issue, JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY REVIEW (JAN 2008), Vol. 1, no. 1, pp. 83 – 89

Надійшла (received) 27.02.2024

Відомості про авторів / About the authors

Барабан Олег Дмитрович (Baraban Oleh) – аспірант, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8814-3833>; e-mail: o.b.baraban@gmail.com.

Поляков Михайло Олександрович (Poliakov Mykhailo) – доктор технічних наук, професор, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7772-3122>, e-mail: polyakov@zpu.edu.ua.

Василевський Володимир Валентинович (Vasylevskiy Volodymyr) – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Запорізька політехніка»; м. Запоріжжя, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6220-8398>, e-mail: lisses@ukr.net.