

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

## **АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ НА ПРОЦЕС ЗНОСУ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТІ ПРОГРАМ FEMM**

Силові трансформатори займають дуже важливе місце в електропостачанні промислових та побутових споживачів, виконуючи перетворення, розподіл та передачу енергії. Одним з найважливіших елементів силового трансформатора є целюлозна ізоляція. В процесі експлуатації відбувається старіння ізоляції, яке супроводжується зниженням її діелектричних властивостей, що в свою чергу може призвести до аварійного виходу з ладу силового трансформатора. Тому прогнозування процесу старіння ізоляції силового трансформатора є дуже важливим напрямом в сьогодишній науці. В даній статті зроблений огляд літератури про старіння целюлозної ізоляції та за допомогою пакету програм FEMM побудована модель силового трансформатора за допомогою якої досліджено вплив теплового поля на старіння целюлозної ізоляції. Моделювання процесу старіння ізоляції силового трансформатора в пакеті програм FEMM дозволяє більш детально дослідити процес старіння целюлозної ізоляції, дає змогу проаналізувати вплив різних фізичних явищ на ресурсні характеристики ізоляції, підвищити точність прогнозування її стану та швидкості старіння. В той же час є напрями, які потребують уточнення такі як фактор прикладеного зусилля до целюлозної ізоляції в момент часу. Насамкінець слід зазначити, що більш детальне дослідження полів які впливають на старіння ізоляції силового трансформатора дозволяє подовжити термін експлуатації та знизити витрати на обслуговування трансформатора.

**Ключові слова:** трансформатор, математична модель, старіння ізоляції, пакет програм FEMM.

*M. POLYAKOV, V. VASILEVSKY O. BARABAN*

## **ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THERMAL AND ELECTRIC FIELDS ON THE WEAR PROCESS OF CELLULOSE INSULATION OF A POWER TRANSFORMER IN THE FEMM SOFTWARE PACKAGE**

Power transformers occupy a very important place in the power supply of industrial and domestic consumers, performing energy conversion, distribution and transmission. One of the most important elements of a power transformer is cellulose insulation, which is subject to insulation aging over time, which reduces dielectric properties, which in turn can lead to emergency failure of the power transformer. Therefore, predicting the aging process of power transformer insulation is a very important area in today's science. In this article, we review the literature on the aging of cellulose insulation and use the FEMM software package to build a model of a power transformer to study the effect of thermal and electric fields on the aging of power transformer insulation. Modelling the aging process of power transformer insulation in the FEMM software package allows for a more detailed study of the aging process of cellulose insulation and makes it possible to analyse the effects of various physical phenomena on the service life of the insulation and improve the prediction of its condition and aging rate. At the same time, there are areas that need to be clarified, such as the factor of the force applied to cellulose insulation at a given time. In conclusion, it should be noted that a more detailed study of the fields affecting the aging of power transformer insulation can extend the service life and reduce the cost of transformer maintenance.

**Keywords:** transformer, mathematical model, insulation ageing, FEMM software package.

**Предмет дослідження.** Комп'ютерне моделювання стану целюлозної ізоляції силового трансформатора та визначення впливу теплових полів на старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора.

**Мета роботи:** підвищення точності прогнозування старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора із використанням моделі трансформатора в програмному середовищі FEMM (Finite Element Method Magnetics). Для досягнення поставленої мети передбачається моделювання теплових процесів, що впливають на змінення стану целюлозної ізоляції, із подальшим застосуванням рівняння Арреніуса для оцінки швидкості її старіння.

Також у роботі розглядаються можливості використання FEMM для врахування додаткових чинників, які впливають на старіння, зокрема механічних навантажень а також переходу до використання мультиполів.

### **Завдання роботи:**

1. Розробка моделі силового трансформатора в пакеті програм FEMM для аналізу впливу фізичних процесів на стан трансформатора в процесі експлуатації та оцінки старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора.

2. Аналіз впливу температурних полів на процес старіння целюлозної ізоляції.

3. Уточнення факторів, які потребують додаткового моделювання.

4. Аналіз можливості використання отриманих даних для побудови мультипольової моделі.

Відомий ряд наукових робіт різних авторів, в яких наведені результати детального моделювання теплових процесів в силових трансформаторах, проте певні напрями вимагають додаткових досліджень. Зокрема, одним з ключових факторів, що потребує врахування, є механічні навантаження, які прикладаються до целюлозної ізоляції в різні моменти часу. Механічні зусилля, викликані напруженнями у трансформаторі або вібраційними впливами, можуть впливати на старіння ізоляції, змінюючи її структуру та збільшуючи швидкість деградації.

**Моделювання силового трансформатора в середовищі FEMM.** В роботі виконане комп'ютерне моделювання теплових полів в активній частині трансформатора під час його експлуатації та визначення впливу нерівномірності цих полів на старіння ізоляції. Для моделювання було обрано автотрансформатор типу АТДТН виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор», м. Запоріжжя з урахуванням його теплових характеристик (рис. 1, 2). Для моделювання був обраний програмний пакет FEMM, який, згідно з аналізом, наведеним у статті [1, 3], демонструє найкращі характеристики для моделювання фізичних процесів, що відбуваються всередині силових трансформаторів у процесі їх експлуатації. Це програмне забезпечення вирізняється точністю розрахунків і зручністю у використанні для задач, пов'язаних із

електромагнітними та тепловими процесами.

У даному дослідженні пакет FEMM був застосований для моделювання поперечного перерізу трифазного автотрансформатора типу АТДТН у двовимірному (2D) просторі. Використання FEMM дозволяє виконувати детальний аналіз теплових процесів, що протікають у трансформаторі, забезпечуючи можливість оцінити розподіл температури, тепловий потік та ефективність тепловідведення в межах конструкції. Зокрема, програмне забезпечення дозволяє ідентифікувати критичні зони локального перегріву, які можуть стати причиною прискореної деградації матеріалів ізоляції або зниження загальної надійності пристрою.

Проведений аналіз також показує, що FEMM є ефективним інструментом для прогнозування поведінки трансформатора в умовах підвищених теплових навантажень. Цей підхід забезпечує інженерів необхідними даними для оптимізації конструкції трансформатора з метою покращення теплових характеристик, підвищення надійності обладнання та продовження терміну його експлуатації.

Дані, отримані за допомогою FEMM, можуть використовуватися для розробки нових методів охолодження, зменшення термічних аномалій і впровадження сучасних матеріалів ізоляції. Таким чином, застосування цього програмного пакета є важливим етапом у дослідженні і розробках у галузі трансформаторобудування. Детальна інформація про параметри трансформатора наведена в [2], основні технічні характеристики трансформатора зведені до табл. 1. Трансформатор моделюється з урахуванням фактичного номіналу на паспортній табличці трансформатора.



Рис. 1. Загальний вид моделі трансформатора АТДТН-150 МВА виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор»

Таблиця 1 – Технічні характеристики автотрансформатор АТДТН-150 МВА з технічного паспорту

|                                   |                                                  |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------|
| Номінальна потужність:            | 150 МВА                                          |
| Напруга ВН/НН (без навантаження): | 500/138 кВ                                       |
| Тип охолодження:                  | Масляне з примусовим повітряним охолодженням     |
| Частота:                          | 50 Гц                                            |
| Символ з'єднання:                 | Y/Δ                                              |
| Загальна маса:                    | 250 тонн                                         |
| Габаритні розміри:                | довжина 12105 мм, ширина 6770 мм, висота 8290 мм |

Із використанням даних, наведених в табл. 1 та на рис. 1 побудовано модель активної частини

трансформатора в середовищі пакету програм FEMM (рис. 4-5). Середовище FEMM [3-5] дозволяє виконати моделювання температурних полів в трансформаторі, що в свою чергу дозволяє підвищити точність оцінки теплового старіння целюлозної ізоляції за рахунок врахування теплового профілю трансформатора.

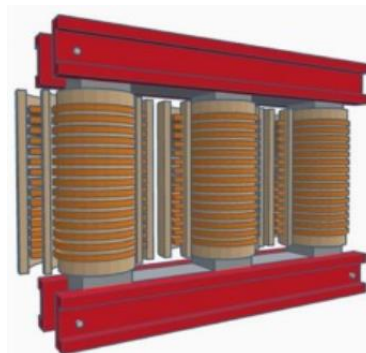


Рис. 2. Розріз автотрансформатора АТДТН 150 МВА виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор»

Процес моделювання включав себе наступні етапи: 1. Створення геометричної моделі трансформатора. 2. Задання матеріальних властивостей. 3. Моделювання теплових полів.

В результаті моделювання отриманий розподіл температури в активній частині трансформатора, особливо в зонах обмоток і паперової ізоляції. З розрахунку можна визначити, що максимальна температура в обмотках трансформатора досягає, 110°C, тоді як в інших частинах ізоляції температура 85°C при максимальному навантаженні.

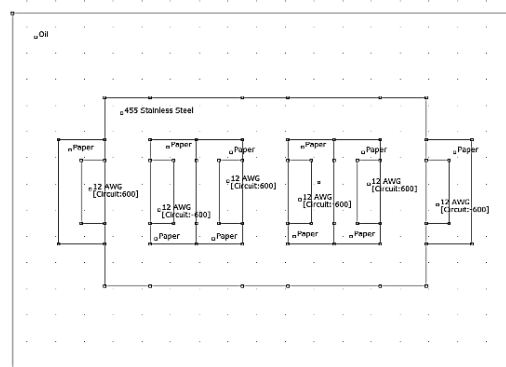


Рис. 3. Модель трансформатора в пакеті програм FEMM

**Оцінка старіння на основі даних FEMM.** Розрахунок скорочення терміну служби целюлозної ізоляції виконаний із використанням рівняння Арреніуса [6-11]. Воно пов'язує швидкість хімічних реакцій з температурою і дає можливість кількісно оцінити вплив температури на процес деградації ізоляційного матеріалу. Формула рівняння Арреніуса має вигляд:

$$k = A \times e^{\frac{-E}{R \times T}}$$

де  $k$  – константа швидкості реакції;  $A$  – показник швидкості старіння, обумовленого впливом вологи, кислот та кисню, год<sup>-1</sup>;  $E$  – енергія активації для процесу теплового старіння паперу у трансформаторному маслі,

кДж/моль;  $R$  – молярна газова стала Дж/моль/К;  $T$  – температура, °K.

Використовуючи результати моделювання, отримані в FEMM, можна провести оцінку прогнозованого терміну служби ізоляції для різних зон трансформатора (рис. 4). Для зони з температурою 110°C прогнозований термін служби ізоляції буде значно скорочено (50 000 годин, або близько 5,7 років). У зоні з нижчою температурою, близько 85°C, термін служби збільшиться і може скласти 150 000 годин, або близько 17 років.

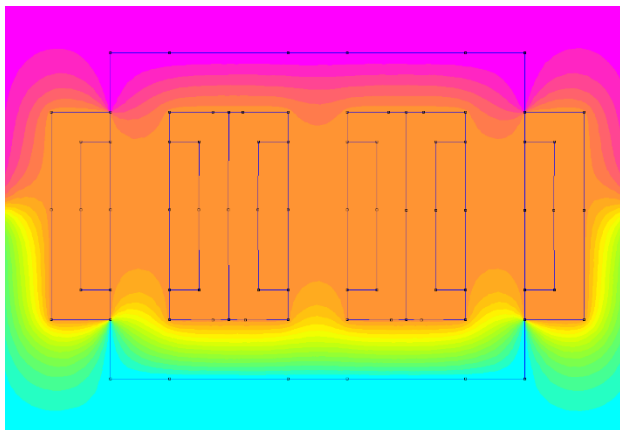


Рис. 4. Результати моделювання теплових полів в пакеті програм FEMM

**Вплив температурних градієнтів на термін служби.** Дані щодо розподілу температури, отримані в процесі моделювання, демонструють вплив температурних градієнтів на термін служби целюлозної ізоляції. Там, де температура вища, термін служби скорочується експоненціально відповідно до рівняння Арреніуса. У результаті можна визначити «слабкі» зони трансформатора, де ризик виходу з ладу через старіння ізоляції найбільший.

Розрахунок швидкості реакції старіння ( $k$ ) залежно від температури навколишнього середовища та умов експлуатації можна розрахувати швидкість реакції старіння ізоляції. Припустимо, що температура експлуатації трансформатора становить 110°C (або 383 K). Підставляючи значення в рівняння Арреніуса, отримуємо графік залежності швидкості реакції старіння від підвищення температури (рис. 6).

Наприклад, залежність на рис. 6 демонструє, що при підвищенні температури на кожні 10°C термін служби паперу скорочується вдвічі. Це співвідношення відоме як правило 10-градусів і може бути корисним для практичної оцінки залишкового терміну служби ізоляції трансформатора.

Розглядаючи модель у деталях на рис. 7, було виявлено точку на целюлозній ізоляції силового трансформатора, яка характеризується вищою температурою порівняно з іншими ділянками поверхні ізоляції. Така температурна неоднорідність може спричинити прискорене старіння матеріалу в цій зоні, що, у свою чергу, знижує ресурс експлуатації ізоляції в цілому. Це може призвести до більш швидкого виникнення дефектів, що зрештою прискорить вихід з ладу силового трансформатора.

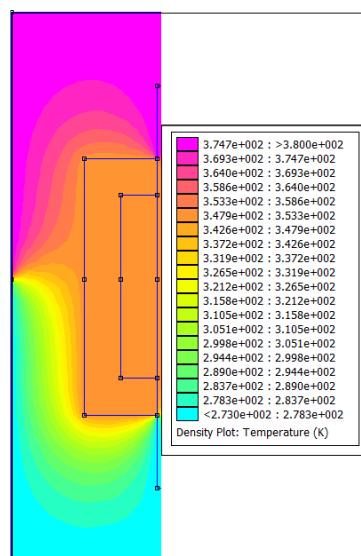


Рис. 5. Температурний профіль трансформатора, отриманий в пакеті програм FEMM

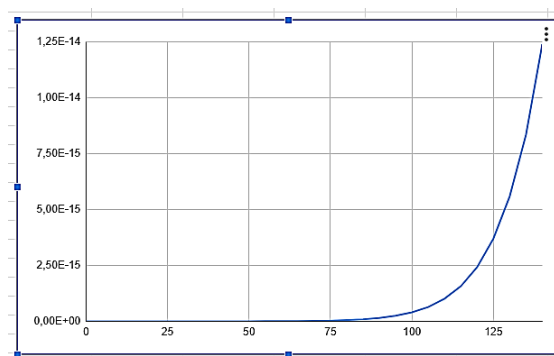


Рис. 6. Графік залежності швидкості реакції старіння від температури

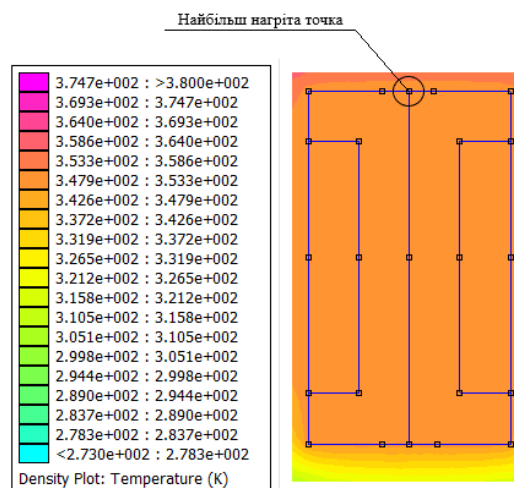


Рис. 7. Найбільш нагріта точка ізоляції целюлозної ізоляції моделі силового трансформатора в пакеті програм FEMM

Згідно з дослідженнями, подібні термічні аномалії часто пов'язані з концентрацією локальних навантажень або недостатньою тепловіддачею у певних зонах ізоляції. Дослідження, проведені в [12], підтверджують, що локальні перегріви є однією з ключових причин деградації целюлозної ізоляції в трансформаторах.

Задля зменшення негативного впливу цих процесів, рекомендується проводити регулярний моніторинг температури в критичних зонах трансформатора за допомогою тепловізійних методів або вбудованих сенсорних систем, а також застосовувати сучасні охолоджувальні технології та оптимізувати конструкцію ізоляції.

**Висновки.** Програма FEMM дає змогу отримати точні дані про розподіл температур у трансформаторі, що є основою для використання рівняння Арреніуса. Це особливо корисно для прогнозування терміну служби ізоляції в реальних умовах експлуатації.

Рівняння Арреніуса – перевірений метод оцінки старіння, який надає простий і точний спосіб прогнозування терміну служби ізоляційних матеріалів на основі температурних даних. У поєднанні з результатами моделювання в FEMM можна отримати достовірні оцінки. Комплексний підхід поєднання даних з FEMM і рівняння Арреніуса дає змогу врахувати температурний вплив, що робить прогноз терміну служби точнішим і надійнішим.

Застосування рівняння Арреніуса в поєднанні з моделюванням температурного поля у програмі FEMM дає змогу отримати більш точну і комплексну оцінку терміну служби целюлозної ізоляції силового трансформатора. Моделювання в FEMM дає можливість отримати деталізовану картину теплових полів в активній частині трансформатора під час його експлуатації, що слугує основою для розрахунку швидкості старіння і залишкового терміну служби ізоляції. Температурні градієнти і напруги, виявлені під час моделювання, можуть бути використані для оптимізації експлуатації трансформатора і зниження ризику виходу його з ладу.

Однак цей комплексний підхід не враховує вплив наявності кисню, продуктів старіння масла та механічних (вібраційних) навантажень на стан целюлозної ізоляції трансформатора. Тому перспективним є використання запропонованої теплової моделі в поєднанні із моделлю динаміки вологості в целюлозній ізоляції та трансформаторному маслі, даними про наявність кисню в баку трансформатора, продуктів старіння масла, впливу механічних (вібраційних) навантажень на целюлозну ізоляцію трансформатора. Зазначені дані є необхідними для повного прогнозування стану ізоляції з урахуванням просторової нерівномірності розподілу полів, які впливають на старіння ізоляції.

#### Список літератури

- 1 Барабан О., Поляков М., & Василевський, В. (2024). Постановка задачі мультипольового моделювання процесів зносу целюлозної ізоляції силового трансформатора. Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (12)), 24–28. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.05>
- 2 Available at <https://ztr.ua/products>. Огляд accessed 11 June 2024)

- 3 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).
- 4 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>
- 5 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
- 6 CIGRE D1.01.02. "Thermal Modelling and Life Management of Power Transformers." – Technical Brochure, 2013.
- 7 Arrhenius, S. "Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte." – Z. Phys. Chem., 1889.
- 8 Moser, H. "Aging and Failure Mechanisms of Paper Insulation in Power Transformers." – Electrical Engineering Journal, 2008.
- 9 Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics." – Marcel Dekker Inc., 2004.
- 10 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011.
- 11 Поляков, М. О., Василевський, В. В. (2022). Метод оцінки нерівномірності старіння шарів целюлозної ізоляції обмоток силових трансформаторів. Електротехніка і електромеханіка, (5), 47-54. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.5.08>
- 12 Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. Carbohydrate Polymers, 252, 117196.

#### References (transliterated)

- 1 Baraban O., M. Poliakov, V. Vasylevskiy. "Statement of the Problem of Multipole Modelling of Wear Processes of Cellulose Insulation of a Power Transformer". *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 2 (12), 2024, Pp. 24-28, doi:10.20998/2079-3944.2024.2.05.
- 2 Available at <https://ztr.ua/products>. Accessed 11 June 2024)
- 3 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).
- 4 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>
- 5 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
- 6 CIGRE D1.01.02. "Thermal Modelling and Life Management of Power Transformers." – Technical Brochure, 2013.
- 7 Arrhenius, S. "Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte." – Z. Phys. Chem., 1889.
- 8 Moser, H. "Aging and Failure Mechanisms of Paper Insulation in Power Transformers." – Electrical Engineering Journal, 2008.
- 9 Kulkarni, S.V., Khaparde, S.A. "Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics." – Marcel Dekker Inc., 2004.
- 10 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011.
- 11 Poliakov, M. O., and V. V. Vasylevskiy. "Method for Assessing Unevenness of Cellulose Insulation Layers Aging of Power Transformers Winding". *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 5, Sept. 2022, Pp. 47-54, doi:10.20998/2074-272X.2022.5.08.
- 12 Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. Carbohydrate Polymers, 252, 117196.

Надійшла (received) 25.11.2024

Відомості про авторів / About the authors

**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@zp.edu.ua](mailto:polyakov@zp.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](mailto:lisses@ukr.net).

**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](mailto:o.b.baraban@gmail.com).