

**ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ ВИСОКОЇ НАПРУЖЕНОСТІ НА СТАРІННЯ
ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТІ
ПРОГРАМ FEMM**

Барабан О.Д.¹, Поляков М.О.², Василевський В.В.³

¹аспірант, ²професор, доктор технічних наук, ³доцент, кандидат технічних наук

^{1,2,3}НУ "Запорізька політехніка"

Анотація. Прогнозування старіння целюлозної ізоляції силових трансформаторів є важливою умовою підвищення надійності енергосистем. У роботі проаналізовано чинники деградації ізоляції з акцентом на вплив електричного поля. Для дослідження його розподілу створено математичну модель трансформатора в середовищі FEMM. Це дозволило візуалізувати просторові характеристики поля та оцінити його взаємодію з ізоляційними матеріалами. Моделювання підтвердило ключову роль електричного поля у процесах старіння целюлози. Також підкреслено значення механічних навантажень, як додаткового фактору деградації. Подальший розвиток мультифізичних моделей сприятиме підвищенню точності прогнозування, оптимізації експлуатації та подовженню ресурсу трансформаторів.

Інструменти на ґрунті FEMM відкривають нові можливості для комплексного аналізу старіння в енергетичному обладнанні.

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

Предмет дослідження: Розробка методів точного прогнозування деградації целюлозної ізоляції силових трансформаторів на основі математичного моделювання, що дозволить оптимізувати їх експлуатацію та запобігти критичним відмовам.

Мета роботи: Підвищення точності оцінки старіння ізоляції за рахунок комп'ютерного моделювання електричних і фізико-хімічних процесів у середовищі Finite Element Method Magnetics (FEMM). Для цього розроблено модель силового трансформатора, що враховує вплив електричних полів на зміни параметрів ізоляції. Швидкість деградації визначається за рівнянням Ареніуса та аналізом тангенсу кута діелектричних втрат.

Ключові завдання:

1. Створення моделі трансформатора в FEMM для аналізу розподілу електричних полів та їх впливу на старіння ізоляції.
2. Дослідження закономірностей деградації матеріалу під дією електричних навантажень.
3. Уточнення моделі шляхом інтеграції додаткових факторів: температурних коливань, вологості та механічних напружень.
4. Оцінка можливості побудови мультипольової моделі для комплексного аналізу взаємодії різних фізичних полів.

Наукова новизна: Розширено існуючі підходи, які зосереджені переважно на теплових процесах, шляхом включення механічних навантажень. Останні, викликані електромагнітними силами та вібраціями, призводять до мікротріщин у целюлозі, прискорюючи її старіння. Інтеграція цих факторів у FEMM-модель дозволяє отримати точніші прогнози ресурсу ізоляції.

Експериментальна частина: Моделювання проведено для автотрансформатора типу АТДТН (виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор»), з аналізом нерівномірності електричних полів у його активній частині. Результати демонструють кореляцію між локальними напруженостями поля та зонами прискореної деградації ізоляції.

Практична значимість: Отримані дані є основою для розробки стратегій технічного обслуговування, оптимізації експлуатаційних режимів та створення мультифізичних моделей, що враховують мультипараметричний вплив на стан трансформаторів.

Методика моделювання

У дослідженні застосовано пакет FEMM (Finite Element Method Magnetism), який довів свою ефективність у розрахунках розподілу електромагнітних полів в електротехнічних пристроях [1,3]. Програмний комплекс використано для двовимірного (2D) моделювання поперечного перерізу трифазного автотрансформатора АТДТН.

Аналіз підтвердив, що метод скінченних елементів у FEMM забезпечує високу точність прогнозування експлуатаційних характеристик трансформатора. Отримані дані можуть стати основою для розроблення математичних моделей, що описують старіння ізоляції під впливом електричних полів.

Етапи моделювання

Геометричне моделювання - побудова контурів активної частини (обмотки, магнітопровід, ізоляційні елементи).

Визначення матеріальних властивостей - завдання електричних параметрів матеріалів (провідники, магнітна сталь, діелектрики).

Розрахунок електричних полів - аналіз розподілу потенціалу, напруженості та градієнтів поля в критичних зонах конструкції.

Реалізація етапів дала змогу візуалізувати зони підвищеного електричного навантаження, що важливо для оптимізації ізоляційних систем трансформатора.

Результати та аналіз

Моделювання в середовищі FEMM дозволило визначити розподіл електричних полів у активній зоні трансформатора, зокрема в обмотках та паперовій ізоляції. Виявлено, що напруженість поля є нерівномірною, особливо в целюлозній ізоляції, з локальними зонами підвищених значень. Такі ділянки є критичними з точки зору прискореного старіння матеріалів через електромеханічний вплив. Найбільша інтенсивність поля спостерігається у приосередкових зонах, де його розподіл залежить від геометрії вертикальної осі магнітопроводу.

Отримані дані можуть стати основою для:

1. Оптимізації конструкції трансформатора з метою зменшення нерівномірності електричних полів.
2. Розробки моделей старіння ізоляції, що враховують просторову динаміку електромагнітних параметрів.
3. Створення діагностичних методик для прогнозування залишкового ресурсу ізоляції на базі чисельного аналізу.
4. Використання FEMM дозволяє не лише візуалізувати поля, але й інтегрувати їхні характеристики в мультифізичні моделі. Це сприяє розробці нових підходів до оцінки довговічності трансформаторів, підвищуючи їхню надійність та ефективність експлуатації.
5. Оцінка старіння целюлозної ізоляції трансформатора: тепловий та електричний аналіз. Для прогнозування терміну служби целюлозної ізоляції

силових трансформаторів використано комбінацію моделювання в програмному пакеті FEMM та аналітичних методів на основі рівняння Арреніуса та тангенсу кута діелектричних втрат.

Тепловий вплив: рівняння Арреніуса.

Кінетика деградації ізоляції описується рівнянням Арреніуса, яке кількісно пов'язує температуру зі швидкістю старіння:

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

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, $^{\circ}\text{К}$. [1]



Рисунок 1. Графік залежності швидкості реакції старіння від температури

Результати моделювання в FEMM та розрахунків за рівнянням (рис. 1) показали:

При температурі 115°C термін служби ізоляції скорочується вдвічі порівняно з паспортними даними виробника.

Зниження температури до 80°C зменшує швидкість деградації на 50%, що підтверджує критичний вплив теплового режиму на ресурс матеріалу.

Електричний вплив: тангенс кута діелектричних втрат

Тангенс кута діелектричних втрат ($\tan\delta$) характеризує енерговтрати в ізоляції через провідність:

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (2)$$

де $\varepsilon''(\omega)$ - комплексной относительной проницаемости,

$\varepsilon'(\omega)$ - действительная часть постоянная проводимости.

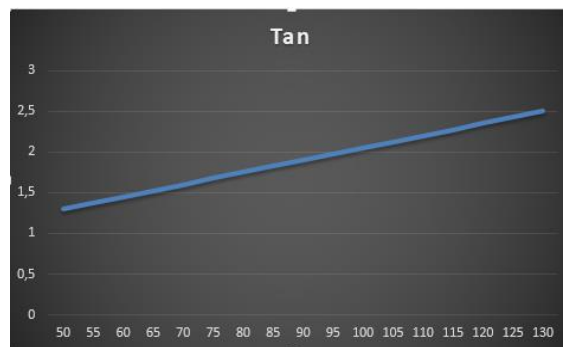


Рисунок 2. Графік залежності тангенса кута діелектричних втрат від температури

Зростання температури призводить до:

Зменшення проникності (від 4.0 при 20°C до 3.0 при 100°C) через втрату вологи.

Збільшення проводимості (10-15 до 10-12 См/м) через активізацію іонів.

За температури 100°C термін служби додатково скорочується на 50% через посилення теплової деградації (рис. 2). Взаємодія електричних та теплових факторів

Аналіз розподілу електричного поля в FEMM виявив зони з підвищеною напруженістю (>30 кВ/мм) мають удвічі вищу швидкість старіння через локальний перегрів та окиснення. Локальні концентрації поля сприяють формуванню мікродефектів, що призводить до втрати механічної міцності ізоляції. Найкритичнішими є області близько активних частин трансформатора, де комбінується високий електричний стрес і теплове навантаження.

Висновки. Нерівномірність електричного поля значно прискорює деградацію ізоляційних матеріалів, знижуючи експлуатаційний ресурс трансформаторів. Ідентифікація зон із підвищеним навантаженням дозволяє впроваджувати цільові заходи, такі як локальне зміцнення ізоляції або використання матеріалів із підвищеною діелектричною стійкістю.

Моделювання в FEMM (Finite Element Method Magnetics) є ефективним інструментом для аналізу надійності ізоляційних систем та оптимізації конструкцій трансформаторів. Метод забезпечує точне відображення температурних полів, що дає змогу інтегрувати рівняння Арреніуса (оцінка

впливу температури на старіння) і тангенса кута діелектричних втрат (врахування електричного поля та стану діелектрика). Їх комбінація із FEMM дозволяє прогнозувати термін служби целюлозної ізоляції, враховуючи температурні градієнти, локальні перевантаження та електричні фактори.

Однак запропонована модель не включає вплив кисню, продуктів деградації трансформаторного масла, механічних та вібраційних навантажень. Перспективним напрямом є розробка мультифізичних моделей, що інтегрують теплові, вологісні, хімічні (окиснення, старіння масла) та механічні фактори. Такий підхід забезпечить комплексну оцінку деградації ізоляції, підвищуючи точність прогнозування її ресурсу в реальних умовах експлуатації.

Поєднання аналітичних методів із сучасними інструментами моделювання відкриває нові можливості для проектування енергоефективного та довговічного трансформаторного обладнання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Барабан , О. ., Поляков , М. ., & Василевський , В. . (2024). Постановка задачі мультипольового моделювання процесів зносу целюлозної ізоляції силового трансформатора. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання 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/uploads/2015/05/Pasport-Transformator.pdf>. Pasport Transformator ATDTNH150 Огляд accessed 11 January 2025)
3. Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed 01 March 2025). 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. и 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.
13. Boss, P., Csepes, G., Der Houhanessian, V., Filippini, J., Guuinic, P., Gafvert, U., Karius, V., Lapworth, J., Urbani, G., Werelius, P. and Zaeng, W., 2003. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(3), pp.12-18.
14. L. M. Dumitran, A. Manea and T. Gorjanu, "Effect of Accelerated Aging Under High Electric Field and Partial Discharges on Electric Conduction in Mineral Oil," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 30, no. 4, pp. 1623-1631, Aug. 2023, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3292804>.

THE EFFECT OF A HIGH-INTENSITY ELECTRIC FIELD ON THE AGING OF CELLULOSE INSULATION OF A POWER TRANSFORMER IN THE FEMM SOFTWARE PACKAGE

Baraban O.D., Polyakov M.O., Vasilevskyi V.V.

Abstract. *Predicting the aging of cellulose insulation of power transformers is an important condition for improving the reliability of power systems. The paper analyses the factors of insulation degradation with a focus on the influence of the electric field. To study its distribution, a mathematical model of the transformer was created in the FEMM environment. This made it possible to visualise the spatial characteristics of the field and assess its interaction with insulating materials. The modelling confirmed the key role of the electric field in the aging process of cellulose. The importance of mechanical loads as an additional degradation factor was also emphasised. Further development of multiphysics models will help to improve the accuracy of predictions, optimise operation and extend the life of transformers.*

Tools such as FEMM open up new opportunities for comprehensive ageing analysis in power equipment.

Keywords: transformer, mathematical model, insulation aging, FEMM software package

REFERENCES

1. Baraban, O., Polyakov, M., & Vasilevsky, V. (2024). Setting the problem of multipole modeling of the processes of wear of cellulose insulation of a power transformer. Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of improvement of electrical machines and devices. Theory and Practice, (2 (12)), 24-28. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.2.05>

2. Available at <https://ztr.ua/products/uploads/2015/05/Pasport-Transformator.pdf>. Passport Transformator ATDTNH150 Overview accessed January 11, 2025)
3. Available at <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. (accessed March 01, 2025). D. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, (March 01, 2022 release).
4. Vasil Spasov; Enhancing the capabilities of the FEMM software by a novel torque computation method. AIP Conf. Proc. January 24, 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 Dissoziationsgrad 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. Polyakov, M. O. and Vasilevsky, V. B. (2022). Method for assessing the unevenness of aging of cellulose insulation layers of power transformer windings. Electrical Engineering and Electromechanics, (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.
13. Boss, P., Csepes, G., Der Houhanessian, V., Filippini, J., Guuinic, P., Gafvert, U., Karius, V., Lapworth, J., Urbani, G., Werelius, P. and Zaeng, W., 2003. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 19(3), pp.12-18.
14. L. M. Dumitran, A. Manea and T. Gorjanu, «Вплив прискореного старіння в умовах високого електричного поля та часткових розрядів на електропровідність мінеральної оливи», в IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 30, no. 4, pp. 1623-1631, Aug. 2023, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2023.3292804>.