

УДК 621.3.048.1

Барабан О.Д.¹, Поляков М.О.²

¹ асп. НУ «Запорізька політехніка»

² д-р. техн. наук., проф. НУ «Запорізька політехніка»

ВПЛИВ ТЕПЛОВОЇ ДЕГРАДАЦІЇ НА ЦЕЛЮЛОЗНУ ІЗОЛЯЦІЮ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТІ ПРОГРАМ FEMM

Предмет дослідження розробка моделі в середовищі FEMM (Finite Element Method Magnetics) для підвищення точності прогнозування старіння целюлозної ізоляції силових трансформаторів шляхом аналізу теплових процесів та їх впливу на деградацію матеріалів.

Мета та завдання є моделювання теплових полів у трансформаторі з подальшим застосуванням рівняння Арреніуса для оцінки швидкості деградації ізоляції. Завдання включають: створення 2D-моделі трансформатора в FEMM [3] для аналізу температурних розподілів. Дослідження впливу локальних перегрівів на старіння целюлози. Ідентифікацію додаткових факторів деградації (напр., механічних навантажень). Оцінку перспектив переходу до мультипольових моделей.

Хоча теплові процеси в трансформаторах детально вивчені, вплив механічних деформацій (від напруг або вібрацій) на структуру ізоляції залишається недостатньо дослідженим. Це дослідження акцентує увагу на взаємодії температурних і механічних факторів, що прискорюють деградацію.

Об'єкт дослідження: автотрансформатор АТДТН [2] (ВАТ «Запоріжтрансформатор») з урахуванням паспортних даних.

Інструменти: FEMM обрано через точність у моделюванні електромагнітних та теплових процесів. Виконано 2D-моделювання поперечного перерізу, що дозволило визначити: Температурний розподіл у активній зоні (обмотки, ізоляція). Зони локального перегріву, критичні для старіння. Оцінка деградації: Застосовано рівняння Арреніуса для кількісного аналізу впливу температури на швидкість хімічного руйнування ізоляції.

Практична значимість результати дозволяють:

Оптимізувати конструкцію трансформатора для покращення теплового режиму. Розробити ефективніші системи охолодження.

Прогнозувати термін експлуатації ізоляції, зменшуючи ризики аварій. Отримані дані можуть стати основою для мультифізичних моделей, що інтегрують теплові, механічні та електричні параметри. Оцінка старіння на основі рівняння Арреніуса. Для кількісної оцінки впливу температури на процес деградації ізоляції використано рівняння Арреніуса [1], що описує залежність швидкості хімічних реакцій від температури:

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

де: k – константа швидкості реакції; A – коефіцієнт, що враховує вплив вологості, кислот і кисню, год^{-1} ; E – енергія активації для процесу теплового старіння паперу в трансформаторному маслі, кДж/моль ; R – молярна газова стала, $\text{Дж/(моль} \cdot \text{К)}$; T – температура, К .

Результати дослідження та аналіз. Моделювання в FEMM виявило нерівномірний розподіл температур у силовому трансформаторі: максимальна температура в обмотках сягає 110°C , тоді як у менш нагрітих зонах ізоляції – 85°C . Це суттєво впливає на ресурс целюлозної ізоляції: При 110°C термін служби становить $\approx 50\,000$ год. ($\approx 5,7$ років). При 85°C ресурс зростає до $\approx 150\,000$ год. (≈ 17 років).

Вплив температури на деградацію ізоляції. Дані [4-5] підтверджують експоненційний характер старіння ізоляції згідно з рівнянням Арреніуса. Зокрема, підвищення температури на кожні 10°C зменшує термін служби вдвічі («правило 10-градусів»). Це дозволяє прогнозувати «слабкі» зони, де ризик виходу з ладу максимальний. Локальні термічні аномалії. На моделі виявлено ділянку ізоляції з температурою, що перевищує середні значення. Такі аномалії, зумовлені недостатнім тепловідведенням або механічними навантаженнями [4-5], призводять до: Прискореної деградації матеріалу в місцях перегріву. Зниження загального ресурсу трансформатора.

Рекомендації з мінімізації впливу. Моніторинг: впровадження телевізійного контролю або сенсорних систем для відстеження критичних зон. Оптимізація конструкції: покращення тепловідведення шляхом змін геометрії ізоляції.

Охолодження: використання сучасних технологій (наприклад, примусової циркуляції олії). Висновки та обмеження моделі. Комбінація FEMM та рівняння Арреніуса забезпечує точний прогноз терміну служби ізоляції, але не враховує вплив вологості, кисню, продуктів окислення олії та механічних навантажень. Перспективи дослідження: інтеграція мультифізичних факторів (термічних, механічних, хімічних) для створення комплексної прогностичної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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>. 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. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.91-2011.

5 Jusner, P., Schwaiger, E., Potthast, A., & Rosenau, T. (2021). Thermal stability of cellulose insulation in electrical power transformers – A review. *Carbohydrate Polymers*, 252, 117196.