

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

АНАЛІЗ ВПЛИВУ МІКРОТРИЩИН НА МУЛЬТИПОЛЬОВУ МОДЕЛЬ СТАРІННЯ ЦЕЛЮЛОЗНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

В сучасному світі силові трансформатори займають важливе місце тому що вони використовуються в розподілі, перетворенні та передачі електричної енергії та використовуються в усіх напрямках електропостачання, тому дослідження процесу старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора є актуальним та досліджується багатьма вченими, але ще є питання які досі не вирішені та полягають подальшого дослідження. У роботі описано модель впливу мікротріщин та метод побудови двовимірної моделі для дослідження процесу старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора з використанням пакета програм FEMM (Finite Element Method Magnetics). Показано, як мікротріщини впливають на целюлозну ізоляцію та допомагають оцінити вібраційні впливи на обмотки і пов'язати рівні динамічних напружень з імовірністю формування мікротріщин в паперовій ізоляції. Наведено методику кількісного моделювання процесу старіння з урахуванням механічного поля (циклічна втома), термохімічного впливу та перевірок випробувань (DP, фенольні, фуранові маркери в олії, вимірювання вібрації). Ключові висновки ґрунтуються на аналізі сучасної літератури зі старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора та дослідженнях вібраційного впливу на целюлозну ізоляцію в пакета програм FEMM. Також слід зазначити, що більш детальне дослідження впливу як і впливають на старіння ізоляції силового трансформатора дозволяє подовжити термін експлуатації та знизити витрати на обслуговування трансформатора, тому можна сказати що дослідження вважається актуальним та доцільним.

Ключові слова: трансформатор, мікротріщини, математична модель, температурне поле, поле вологи, поле кислотності старіння ізоляції, пакет програм FEMM.

M. POLYAKOV, V. VASILEVSKY, O. BARABAN

ANALYSIS OF THE IMPACT OF MICROCRACKS ON THE AGING OF CELLULOSE INSULATION OF POWER TRANSFORMERS

In today's world, power transformers play an important role because they are used in the distribution, conversion and transmission of electrical energy and are used in all areas of power supply. Therefore, research into the ageing process of cellulose insulation in power transformers is relevant and is being studied by many scientists, but there are still issues that remain unresolved and require further research. The paper describes a model of the influence of microcracks and a method for constructing a two-dimensional model for studying the ageing process of cellulose insulation in power transformers using the FEMM (Finite Element Method Magnetics) software package. It shows how microcracks affect cellulose insulation and helps to assess the vibration effects on the windings and to link the levels of dynamic stresses with the probability of microcrack formation in paper insulation. A methodology for quantitative modelling of the ageing process is presented, taking into account the mechanical field (cyclic fatigue), thermochemical effects and verification tests (DP, phenolic/furan markers in oil, vibration measurements). The key conclusions are based on an analysis of the current literature on the ageing of cellulose insulation in power transformers and studies of the vibration impact on cellulose insulation in the FEMM software package. It should also be noted that a more detailed study of the fields affecting the ageing of power transformer insulation allows to extend the service life and reduce the cost of transformer maintenance, therefore, it can be said that the study is considered relevant and expedient.

Keywords: transformer, microcracks, mathematical model, temperature field, moisture field, acidity field, insulation ageing, FEMM software package.

Предмет дослідження є вплив мікротріщин в середовищі пакету програм FEMM на мультипольову модель старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора.

Мета роботи кількісно оцінити внесок механічно-індукованих мікротріщин (вібрація від короткого замикання, процесів вмикання/вимикання) у прискорене старіння маслонаповненої паперової ізоляції трансформатора, комбінуючи [1-2]:

- електромагнітне моделювання (FEMM) для розрахунку сил і розподілу магнітного поля при перехідних/короткозамкнених режимах;
- перерахунок цих сил в механічні напруження і цикли (FE/ручний аналіз);
- втомний розрахунок для оцінки утворення/зростання тріщин;
- кінетичну модель хіміко-термічного старіння целюлози (DP-кінетика, Arrhenius) і комбіноване правило відмови ($DP \leq \text{поріг}$ або сумарна втома $D \geq 1$) [3-4].

Завдання роботи:

1 Порівняння типів трансформатора для використання в електропостачанні. 2 Розробка моделі силового трансформатора в середовищі пакету програм FEMM та аналіз впливу мікротріщин на старіння целюлозної ізоляції. 3 Дослідження впливу мікротріщин на мультипольову модель процесу старіння ізоляції. 4 Аналіз

можливості використання отриманих даних для створення більш точної мультипольової моделі, що дозволить враховувати одночасний вплив різних фізичних полів на ізоляцію.

Аналіз типів трансформаторів. Силовий трансформатор – ключовий елемент електричних систем, що забезпечує перетворення рівня напруги для передачі, розподілу та постачання кінцевих споживачів. Правильний вибір типу трансформатора визначається безліччю факторів: потужністю і напругою, умовами монтажу (в приміщенні/на відкритому повітрі), вимогами щодо пожежої безпеки та екології, ступенем надійності та ремонтпридатності, умовами охолодження та режимами навантаження. Основні міжнародні вимоги та рекомендації щодо проектування та випробувань трансформаторів закріплені в серії стандартів IEC 60076.

Порівняльний аналіз основних типів [5-6].

Маслонаповнені трансформатори [5].

Плюси: висока теплова стабільність і здатність утримувати високу потужність при обмеженому обсязі; зазвичай вища енергоефективність і кращі показники втрат на однакову потужність; хороша переважна здатність при короткочасних перевантаженнях. Мінуси: ризик витіку масла і пожежонебезпека (в залежності від типу рідини), більш суворі

© М.О. Поляков, В.В. Василевський, О.Д. Барабан, 2026

вимоги до облаштування майданчика, необхідність обслуговування масла, екологічні обмеження (в ряді місць – вимоги до ефірних масел як альтернативи).

Сухі трансформатори (cast-resin)[5]

Плюси: відсутність горючої рідини – підвищена пожежна безпека і можливість установки поблизу технологічного обладнання і всередині будівель; менші вимоги щодо локалізації витоків; простий монтаж і менший обсяг обслуговування. Мінуси: як правило, більші габарити і маса при тій же потужності, гірше по тепловідводу (обмежена перевантажувальна здатність), частіше – вища вартість при великих потужностях.

Автотрансформатори [5]

Плюси: компактність і економія міді/сталі для випадків, коли гальванічна розв'язка не потрібна; часто застосовуються для регулювання між близькими рівнями напруги.

Мінуси: відсутність гальванічної розв'язки; питання щодо захисту та можливих струмів замикання.

Генераторні (GSU) [6]

GSU проектується з урахуванням високих короткозамикальних зусиль, необхідності швидкого охолодження і найвищої надійності; вимоги до них суворіші, і вартість одиниці обладнання велика. Для електростанцій GSU зазвичай використовуються маслонаповнені трансформатори великої потужності з системою примусового охолодження і розширеним комплексом захистів і діагностики.

Для промислових підприємств [5-7]

Вибір залежить від конкретики виробництва:

Якщо пріоритет – пожежна безпека, мінімальне обслуговування і установка всередині будівель (наприклад, в харчовій, фармацевтичній, електронній промисловості) – сухі трансформатори (cast-resin) часто є кращим вибором. Вони дозволяють розміщувати трансформатор ближче до споживачів, знижують вимоги до маслосбору і забезпечують безпеку людей і обладнання [5].

Якщо потрібні високі потужності, компактність і висока перевантажувальна здатність (важке виробництво, металургія, великі технологічні комплекси) – частіше вибирають маслонаповнені трансформатори з відповідною системою протипожежного захисту і локалізацією масла. При виборі важливо враховувати вимоги до обслуговування масла і екологічні норми (IEC 60076) [7]. Для ділянок з високим рівнем гармонік (приводи, випрямлячі) – необхідні трансформатори з розрахунком на теплові режими і можливість установки додаткових компенсуючих пристроїв; конструкція і охолодження підбираються індивідуально. Підсумок для промислових підприємств: якщо потужність невелика/середня і критична безпека – сухий тип; якщо потрібні великі потужності і щільність потужності – масляний, при відповідних заходах безпеки. Для електростанцій.

Для електростанцій (особливо теплових, гідро- і атомних), де потрібно підняти напругу генератора до рівня мережі, вимоги наступні:

Генераторні (GSU) [6] майже завжди виконуються як великі маслонаповнені трансформатори з примусовим або комбінованим охолодженням. Причини:

високі потужності (десятки-сотні МВА), необхідність компактності щодо потужності, хороші умови розсіювання втрат через масло, можливість використання систем аварійного охолодження та моніторингу. Надійність і простота ремонту – критичні фактори [6]. У деяких специфічних випадках (наприклад, невеликі когенераційні установки, вітроенергетика на рівні турбіни) застосовують сухі рішення, але для великих паркових електростанцій і великих генераторів маслонаповнені GSU залишаються стандартом [5]. Підсумок для електростанцій: для основних генераторів – маслонаповнені GSU з примусовим охолодженням і розширеним комплексом захистів; сухі – лише для нішевих, малих застосувань.

Підсумовуючи вище сказане з урахуванням техніко-економічних показників найчастіше використовують трансформатори в маслонаповненому виконанні. Тому для дослідження було обрано автотрансформатор типу АТДЦТН-125000/330/110, виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор» м. Запоріжжя, (табл. 1), (рис. 1) (паспорт та технічні параметри трансформатора [8-9]).



Рис. 1. Автотрансформатор типу АТДЦТН-125000/330/110, виробництва ВАТ «Запоріжтрансформатор» (м. Запоріжжя)

Таблиця 1 – Паспортні дані автотрансформатора АТДЦТН-125000/330/110

Тип	АТДЦТН-125000/330/110
Sn, МВА	125
Напруга обмотки ВН, кВ	330
Напруга обмотки СН, кВ	115
Напруга обмотки НН, кВ	38,5
Довжина, мм	12150
Ширина, мм	5600
Висота, мм	9250
Маса, т	245

Дослідження моделі в середовищі FEMM целюлозної ізоляції силового трансформатора та дослідження старіння паперової ізоляції через вплив мікротріщин.

У даній роботі руйнівні електромагнітні сили в обмотці силового трансформатора оцінюються з використанням параметрів: перехідних струмів і магнітної індукції. Електромагнітні сили в обмотці трансформатора виникають як результат взаємодії перехідних струмів і магнітного поля розсіювання в областях

обмотки. [4]. Отже, сили, що діють в силовому трансформаторі, виражаються через силу Лоренца.

Векторний магнітний потенціал, розрахований за допомогою аналізу електромагнітних сил. Радіальна і осьова складові магнітної індукції виражаються через векторний магнітний потенціал (розрахований з аналізу магнітного поля). Коли магнітна індукція розділена на радіальну та осьову складові, електромагнітні сили також можуть бути розділені на радіальну та осьову складові.

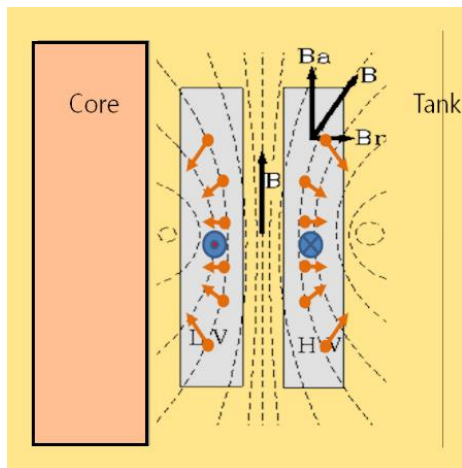


Рис. 2. Схема розподілу електромагнітних сил в силовому трансформаторі на радіальні та осьові

Як показано в (рис. 2), радіальна сила залежить від осьової складової магнітної індукції, тоді як осьові сили залежать від радіальної складової магнітної індукції.

Конфігурація обмоток силового трансформатора показана на рис. 1. У даній конфігурації радіальна сила, що впливає на внутрішню обмотку, проявляється як сила стиснення у напрямку до сердечника. А радіальні сили, що впливають на зовнішню обмотку, діють як сили розтягування у напрямку до стінки бака. Більш того, радіальна складова електромагнітних сил в обмотці силового трансформатора викликає руйнування ізоляційного матеріалу і конструкції між шарами обмотки або між сердечником і обмоткою, а також призводить до підвищення температури трансформатора. [4].

З іншого боку, осьові сили, що впливають як на внутрішню, так і на зовнішню обмотку, діють як сили стиснення в осьовому напрямку до центру. Осьова складова електромагнітних сил може бути руйнівною, викликаючи вигин обмоток.

Як правило, руйнівні осьові та радіальні сили зростають через концентрацію магнітного поля розсіювання в кінцевих точках області обмотки. Крім того, осьові сили, що діють на обмотку, переважають над іншими. Що призводить до появи мікротріщин в ізоляції силового трансформатора.

Моделювання в FEMM.

Процес моделювання включав себе наступні етапи:

1. Створення геометричної моделі трансформатора (рис. 3).

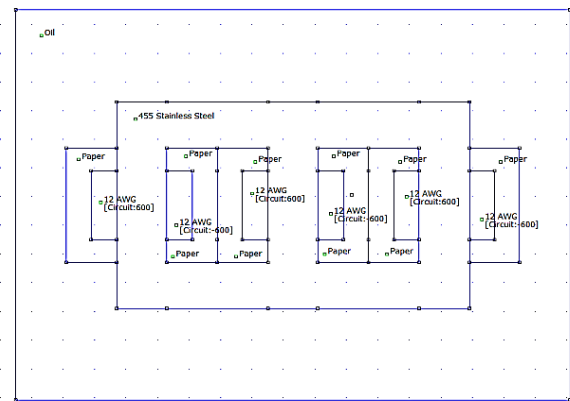


Рис. 3. Модель трансформатора в пакеті програм FEMM

2. Задання матеріальних властивостей до всіх елементів геометричної моделі целюлозної ізоляції силового трансформатора та встановлення впливу полів температури, вологості, кислотності (табл. 2).

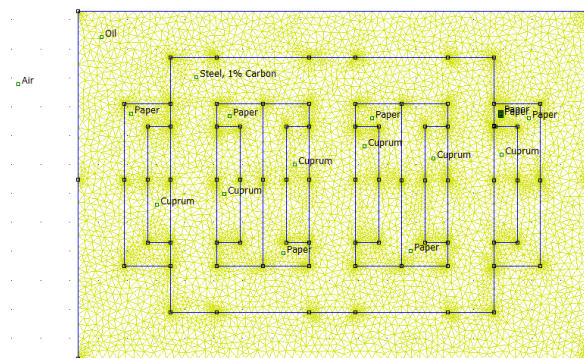


Рис. 4. Модель трансформатора в пакеті програм FEMM з встановленими властивостями матеріалів

Таблиця 2 – Матеріальні властивості для матеріалів під впливом поля температури, поля вологості, поля кислотності для целюлозної ізоляції силового трансформатора

T (°C)	H (%)	K (мг КОН/г)
80	0.5	0.05
105	1.5	0.28
130	2.5	0.51

3. Моделювання полів температури з впливом поля кислотності та вологості, які впливають на целюлозну ізоляцію силового трансформатора (рис. 5-9).

- Модель трансформатора при температурі 80 °C, вологості 0.5%, кислотності 0.05 мг КОН/г.

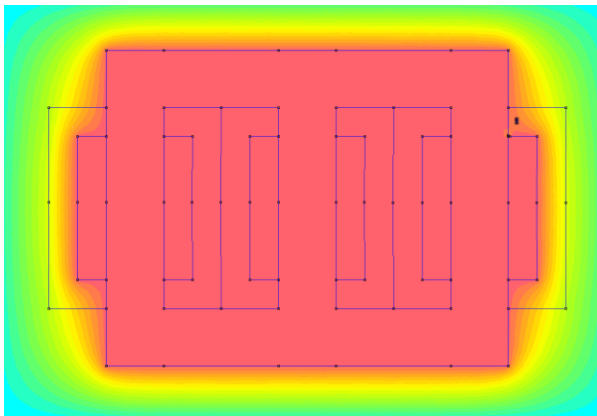


Рис. 5. Результати моделювання без макротіришин полів в пакеті програм FEMM (трансформатор показаний в стані включення трансформаторне мастило ще не нагрілось до робочої температури)

- Модель трансформатора при температурі 105 °С, вологості 1.5%, кислотності 0.28 мг КОН/г.

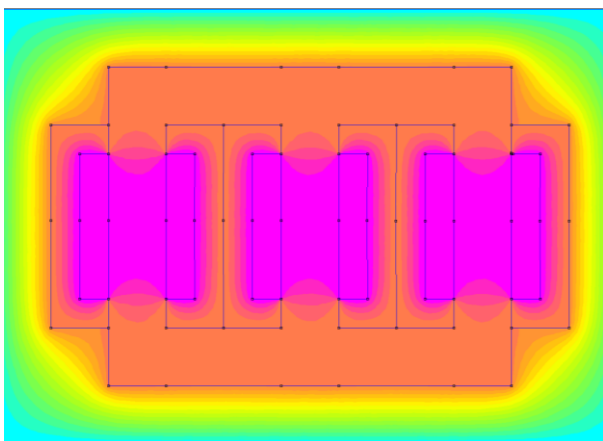


Рис. 6. Результати моделювання теплових полів в пакеті програм FEMM з мікротріщиною (трансформаторне мастило охолоджується примусовим зовнішнім охолодженням повітрям корпусу трансформатора)

- Модель трансформатора при температурі 130 °С, вологості 2.5%, кислотності 0.51 мг КОН/г.

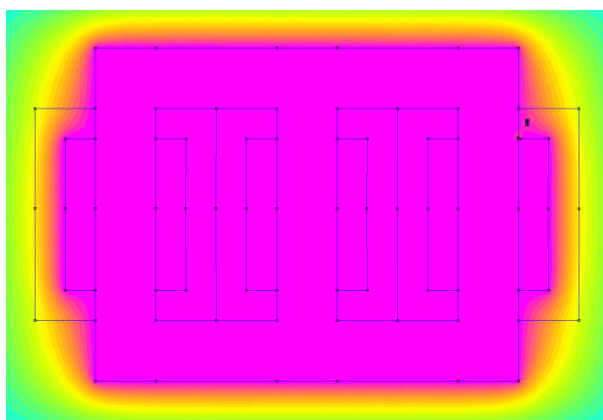
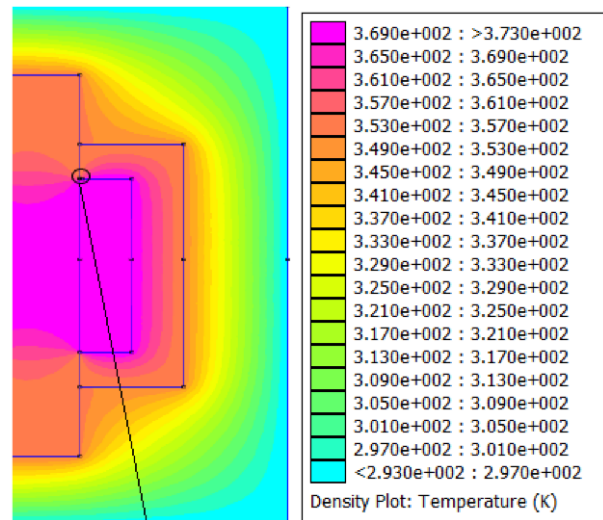


Рис. 7. Температурний профіль трансформатора, отриманий в пакеті програм FEMM з мікротріщинами

- Модель трансформатора при температурі 130 °С, вологості 2.5%, кислотності 0.51 мг КОН/г з появою мікротріщин.



Мікротріщина - Макротріщина
Найбільш нагріта точка

Рис. 8. Температурний профіль трансформатора, отриманий в пакеті програм FEMM з мікротріщинами, які переходять в макротріщину

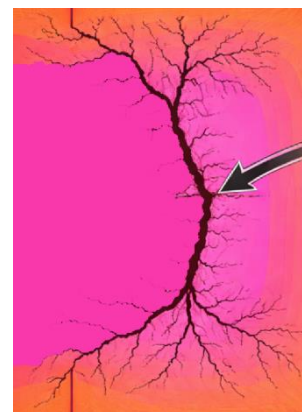


Рис. 9. Температурний профіль трансформатора, отриманий в пакеті програм FEMM з мікротріщинами, які переходять в макротріщину під збільшенням до макрорівня

Дослідивши модель (рис. 8, 9) можна побачити об'єднання дефектів при досягненні критичної щільності мікротріщин, які об'єднуються в макротріщину та відбувається різке зниження механічних і діелектричних властивостей, ступінь поляризації падає, збільшуються діелектричні втрати і ймовірність пробоя. Практичні критерії ступінь поляризації менше 200–300 та концентрація фуранів в олії вище контрольного порогу.

Оцінка впливу мікротріщин на термін служби ізоляції. Для кількісної оцінки впливу мікротріщин які переходять в макротріщини (рис. 4) знаходимо найбільш нагріту точку в місці руйнування ізоляції та за допомогою формули Монтзінгера [10–12], яка пов'язує швидкість хімічних реакцій із температурою:

$$L(t, t_0 + T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0 + T} \exp\left[\ln 2 \times \frac{(\theta_h - 98)}{\Delta}\right] dt \quad (1)$$

де θ_h – температура найбільш нагрітої точки обмотки; Δ – температурна константа старіння згідно з IEC 60076-7.

Згідно результатам розрахунку за формулою (1) та розрахунку згідно IEC 60076-7 отримуємо графік (рис. 10, 11) швидкості старіння в найбільш зруйнованій точці через об'єднання мікротріщин в макротріщини целюлозної ізоляції силового трансформатора з найбільш нагрітою точкою.



Рис. 10. Графік залежності прискорення процесу старіння від температури найбільш нагрітої точки в макротріщині

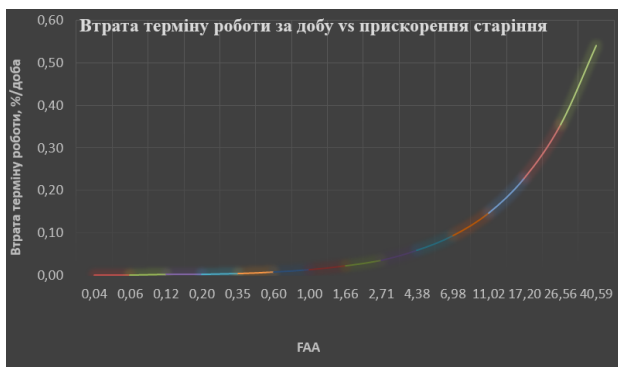


Рис. 11. Графік залежності втрат терміну роботи трансформатора на добу в % від прискорення реакції старіння

Згідно графіків (рис. 10, 11) ми бачимо що з підвищенням температури ми бачимо що ресурс ізоляції силового трансформатора зменшується до рівня коли роки експлуатації зменшуються до днів. Однак даний напрям має недоліки через використання тільки температурного поля без врахування поля вологості та кислотності. Тому потрібно використовувати мультипольову модель для більш точного прогнозування стану ізоляції.

Розглянемо вплив поля вологості [15-17] та побудуємо графік швидкості старіння за допомогою формули (2):

$$V_{okisl} = \left(\frac{K_w}{K_{base}} \right)^y \quad (2)$$

де K_w – вміст води ізоляції, г/т; K_{base} – базові значення вмісту води у ізоляції; y – показники який характеризує вплив води на целюлозну ізоляцію 1,0–1,8 згідно IEEE Std C57.91-2025, IEEE C57.12.60-2025 [12, 18].



Рис. 12. Графік залежності прискорення процесу старіння від вологості ізоляції

Як видно з графіку (рис. 12) вплив поля вологості має суттєвий вплив на старіння целюлозної ізоляції тому не врахування впливу поля вологості значно знижує точність моделі.

Розглянемо вплив поля вплив поля окислення та побудуємо графік швидкості старіння за допомогою формули (3):

$$V_{volog} = \left(\frac{W_w}{W_{base}} \right)^z \quad (3)$$

де W_w – кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; W_{base} – вміст кислот та кисню в маслі відповідно, г/т; z – показники який характеризує вплив окислення на целюлозну ізоляцію 1,2–1,8 згідно IEEE Std C57.91-2025, IEEE C57.12.60-2025 [12, 18].

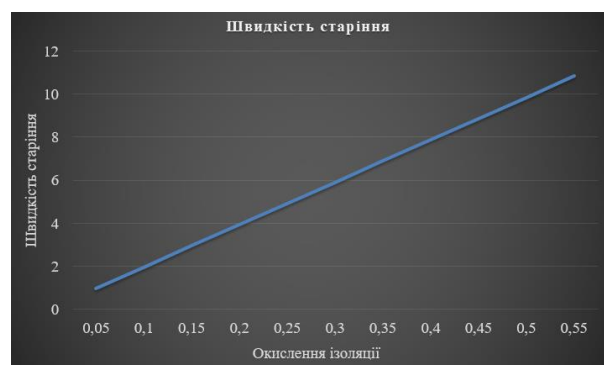


Рис. 13. Графік залежності прискорення процесу старіння від окислення ізоляції

Як видно з графіку (рис. 13) вплив поля окислення має суттєвий вплив на старіння целюлозної ізоляції тому не врахування впливу поля окислення значно знижує точність моделі.

Тепер об'єднуємо вплив поля температури (рис. 10), поля вологості (рис. 12) та поля кислотності (рис. 13) і отримуємо мультипольовий ефект та графік залежності втрата ресурсу за добу від швидкості прискорення реакції старіння (рис. 14).

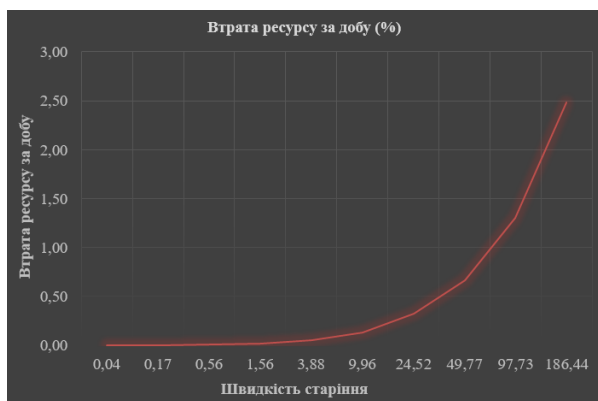


Рис. 14. Графік залежності втрати ресурсу за добу (%) від прискорення процесу старіння

Як ми бачимо з графіку (рис. 14) використання мультипольової моделі дає більш чіткий прогноз старіння целюлозної ізоляції силового трансформатора.

Висновки. Проведений аналіз і моделювання процесів теплового, електричного і механічного старіння ізоляції в силових трансформаторах показали, що використання маслонаповнених трансформаторів типу АТДЦТН є найбільш раціональним рішенням для енергетичних систем середнього і високого класу напруги. Дані трансформатори забезпечують оптимальне поєднання теплової стабільності, діелектричної міцності, ресурсної надійності та ремонтпридатності в умовах змінних експлуатаційних навантажень.

Основною перевагою маслонаповнених трансформаторів є ефективне тепловідведення, обумовлене циркуляцією трансформаторного масла, яке одночасно виконує функції охолоджуючого та ізолюючого середовища. На відміну від сухих або газонаповнених аналогів, трансформатори типу АТДЦТН мають підвищену стійкість до локальних перевантажень, вібраційних впливів і механічних деформацій, що виникають в результаті електромагнітних сил і зовнішніх вібрацій. Це особливо важливо при експлуатації в системах з високою динамікою навантажень, де стійкість ізоляційної системи визначає довговічність всього обладнання.

Крім того, трансформатори даного типу демонструють меншу швидкість деградації целюлозно-масляної ізоляції, завдяки стабільним термоокислювальним властивостям масла і можливості регулярної регенерації. Проведені дослідження підтверджують, що в умовах мультипольових впливів (температура, вологість, вібрації) саме маслонаповнена конструкція дозволяє мінімізувати ризик утворення мікротріщин і втрати діелектричної міцності паперової ізоляції.

Таким чином, трансформатори типу АТДЦТН доцільно розглядати як базовий варіант для енергосистем, де пріоритетом є надійність, довговічність і ремонтпридатність обладнання. Їх експлуатаційні характеристики, підтвержені чисельним моделюванням (у тому числі методом кінцевих елементів у програмному середовищі FEMM), роблять їх оптимальним вибором при проектуванні та модернізації енергетичних підстанцій.

Проведене дослідження показало, що використання виключно одно-польових чисельних підходів

(наприклад, тільки електромагнітного або тільки теплового аналізу) не забезпечує достатньої точності при оцінці процесів старіння і деградації ізоляції силових трансформаторів. Особливо це проявляється в умовах комбінованого впливу температурних, механічних і електричних полів, при яких в паперово-масляній ізоляції можуть виникати мікротріщини, що прискорюють процеси діелектричного пробую і погіршення ізоляційних властивостей.

Комбіноване застосування програми FEMM (Finite Element Method Magnetics) і мультипольового підходу дозволяє більш повно врахувати взаємопов'язані фізичні явища – розподіл магнітного поля, локальні температурні перепади, механічні напруження і динаміку мікродфектів. FEMM [13, 14] забезпечує точне моделювання електромагнітних процесів і розподілу втрат в активній частині трансформатора, тоді як мультипольова модель описує комплексний вплив різних факторів, включаючи вологість, окислення і вібраційні навантаження.

Отже, комбінований підхід на основі FEMM і мультипольового аналізу з урахуванням утворення мікротріщин є більш ефективним і науково обґрунтованим інструментом для моделювання процесів старіння ізоляції та оптимізації експлуатаційної надійності силових трансформаторів.

Список літератури

- 1 Yuan Z., Wang Q., Ren Z., Lv F., Xie Q., Geng J., Zhu J., Teng F. Investigating Aging Characteristics of Oil-Immersed Power Transformers' Insulation in Electrical-Thermal-Mechanical Combined Conditions [Електронний ресурс]. Polymers. – 2023. – Vol. 15, Iss. 21. – P. 4239. – Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/polym15214239>. – Назва з екрана. – Дата звернення: 15.04.2025.
- 2 Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User Manual [Електронний ресурс]. – Version 4.2. – 2022. – Режим доступу: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. – User Manual. – Дата звернення: 01.03.2025.
- 3 Ahmad A. et al. Short circuit stress analysis using FEM in power transformer on HV winding displaced vertically & horizontally. Alexandria engineering journal. – 2018. – Т. 57. – No 1. – Pp. 147-157.
- 4 Ahn H. M. et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer. IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Т. 47. – No 3. – С. 1267-1272.
- 5 ABB – special report and technical reviews on oil-filled and oil-free transformers [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A6487&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch-01-64> ABB – special report. – Дата звернення: 21.03.2025.
- 6 Guides and articles on selecting GSU (Generator Step-Up) and power station practices [Електронний ресурс] : каталог продукції / Prolec. – 2024. – Режим доступу: https://www.prolec.energy/wp-content/uploads/2024/12/PGE_Data-Sheet_Generation_Step-Up_Transformers_RGB_ENG_0224_V1.pdf. – Generator Step-Up. – Дата звернення: 25.03.2025.
- 7 United for Efficiency – Guide to Energy Efficiency in Transformers (Overview of Technologies and Practices) [Електронний ресурс]. – 2017. – Режим доступу: <https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/11/U4E-TransformersGuide-201711-Final.pdf>. – Overview of Technologies and Practices. – Дата звернення: 12.03.2025.
- 8 Запорожтрансформатор. Паспорт силового трансформатора [Електронний ресурс]. – Запоріжжя : ЗТР, 2015. – Режим доступу: <https://ztr.ua/products/uploads/2015/05/Pasport/Transformator.pdf>. – Transformator. – Дата звернення: 11.01.2025.

- 9 Довідник. Довідкові дані по трансформаторах і автотрансформаторах із вищою напругою 220-500 кВ [Електронний ресурс]. – Запоріжжя : ЗТР. – Режим доступу: <https://forca.com.ua/info/spravka/spravochnye-dannye-po-transformatoram-i-avtotransformatoram-s-vysshim-napryazheniem-220-500-kv.html>. – ATDCNT 220-500. – Дата звернення: 11.03.2025.
- 10 Li J. et al. A novel aging indicator of transformer paper insulation based on dispersion staining colors of cellulose fibers in oil // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2018. – Т. 34. – №. 4. – С. 8-16.
- 11 Cigré B. 323: Ageing of cellulose in mineral oil insulated transformers // Study Committee D. – 2007. – Т. 1.
- 12 Матусевич О. О. Удосконалення системи діагностування силових трансформаторів тягових підстанцій електрифікованих залізниць // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2014. – № 92. – С. 31-36.
- 13 Поляков М. О., Василевський В. В., Барабан О. Д. Постановка задачі мультипольового моделювання процесів зносу целюлозної ізоляції силового трансформатора. – 2024.
- 14 Поляков, М., Василевський, В., & Барабан, О. (2025). Аналіз впливу теплових полів на процес зносу целюлозної ізоляції силового трансформатора в пакеті програм FEMM. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (13)), 59–62. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.12>
- 15 Liang Z. et al. Innovative transformer life assessment considering moisture and oil circulation //Energies. – 2024. – Т. 17. – № 2. – С. 429.
- 16 Yang L. et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method // Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao(Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering). – Chinese Society for Electrical Engineering, 2011. – Т. 31. – № 31. – С. 196-203.
- 17 Fan X. et al. FDS measurement-based moisture estimation model for transformer oil-paper insulation including the aging effect // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Т. 70. – С. 1-10.
- 18 Enderle T. P. et al. Adapting the IEEE C57. 91 Standard for Underground Transformers with Natural Ester Insulating: Analysis, Thermal Modeling and Life Expectancy Estimation // IEEE Access. – 2025.
- <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107046A6487&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch-01-64-ABB-special-report>. – Accessed: 21.03.2025.
- 6 Guides and articles on selecting GSU (Generator Step-Up) and power station practices: kataloh produktiv / Prolec. – 2024. – Available at: https://www.prolec.energy/wp-content/uploads/2024/12/PGE_Data-Sheet_Generation_Step-Up_Transformers_RGB_ENG_0224_V1.pdf. – Generator Step-Up. – Accessed: 25.03.2025.
- 7 United for Efficiency – Guide to Energy Efficiency in Transformers (Overview of Technologies and Practices). – 2017. – Available at: <https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2017/11/U4E-TransformersGuide-201711-Final.pdf>. – Overview of Technologies and Practices. – Accessed: 12.03.2025.
- 8 Zaporozhtransformator. Pasport sylovoho transformatora. – Zaporizhzhia : ZTR, 2015. – Available at: <https://ztr.ua/products/uploads/2015/05/Pasport/Transformator.pdf>. – Transformator. – Accessed: 11.01.2025.
- 9 Dovidnyk. Dovidkovi dani po transformatorakh i avtotransformatorakh iz vyshchoiu napruhoiu 220-500 kV. – Zaporizhzhia : ZTR. – Available at: <https://forca.com.ua/info/spravka/spravochnye-dannye-po-transformatoram-i-avtotransformatoram-s-vysshim-napryazheniem-220-500-kv.html>. – ATDCNT 220-500. – Accessed: 11.03.2025.
- 10 Li J. et al. A novel aging indicator of transformer paper insulation based on dispersion staining colors of cellulose fibers in oil. IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2018. – Т. 34. – No 4. – Pp. 8-16.
- 11 Cigré B. 323: Ageing of cellulose in mineral oil insulated transformers. Study Committee D. – 2007. – Т. 1.
- 12 Matusевич O.O. Udokonalennia systemy diahnostuvannia sylovykh transformatoriv tiahovykh pidstantsii elektryfikovanykh zaliznyts. Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka. – 2014. – No. 92. – Pp. 31-36.
- 13 Poliakov M. O., Vasylevskiy V. V., Baraban O. D. Postanovka zadachi multypolovoho modeliuвання protsesiv znosu tseliuloznoi izoliatsii sylovoho transformatora. – 2024.
- 14 Poliakov, M., Vasylevskiy, V., & Baraban, O. (2025). 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. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, (1 (13)), 59–62. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.12>
- 15 Liang Z. et al. Innovative transformer life assessment considering moisture and oil circulation. Energies. – 2024. – Т. 17. – No 2. – Pp. 429.
- 16 Yang L. et al. Improvement of lifetime model on thermal aging of oil-paper insulation by time-temperature-moisture superposition method. Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao (Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering). – Chinese Society for Electrical Engineering, 2011. – Т. 31. – No. 31. – Pp. 196-203.
- 17 Fan X. et al. FDS measurement-based moisture estimation model for transformer oil-paper insulation including the aging effect. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Т. 70. – Pp. 1-10.
- 18 Enderle T. P. et al. Adapting the IEEE C57. 91 Standard for Underground Transformers with Natural Ester Insulating: Analysis, Thermal Modeling and Life Expectancy Estimation. IEEE Access. – 2025.

References (transliterated):

- 1 Yuan Z., Wang Q., Ren Z., Lv F., Xie Q., Geng J., Zhu J., Teng F. Investigating Aging Characteristics of Oil-Immersed Power Transformers' Insulation in Electrical-Thermal-Mechanical Combined Conditions. *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, Issue 21. – P. 4239. <https://doi.org/10.3390/polym15214239>. – Accessed: 15.04.2025.
- 2 Meeker D. Finite Element Method Magnetics. User Manual. – Version 4.2. – 2022. – Available at: <https://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>. – User Manual. – Accessed: 01.03.2025.
- 3 Ahmad A. et al. Short circuit stress analysis using FEM in power transformer on HV winding displaced vertically & horizontally. *Alexandria engineering journal*. – 2018. – Т. 57. – No. 1. – Pp. 147-157.
- 4 Ahn H. M. et al. Finite-element analysis of short-circuit electromagnetic force in power transformer. *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2011. – Т. 47. – No. 3. – Pp. 1267-1272.
- 5 ABB – special report and technical reviews on oil-filled and oil-free transformers. – 2018. – Available at:

Надійшла (Received) 25.01.2026
 Прийнята (Accepted) 06.02.2026
 Опублікована (Published) 30.04.2026

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.

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.

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.