УДК 621.314.21:621.3.048.22:004.942

О. С. Чорний

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

У роботі розглянуто питання оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимірювальних трансформаторів в умовах тривалої експлуатації. Метою дослідження є розроблення математичного підходу, який дозволяє на основі результатів діагностування ізоляційної системи визначати поточний стан обладнання та оцінювати напрямок його подальшої зміни.

Запропонована модель базується на комплексному використанні таких діагностичних параметрів, як опір ізоляції, коефіцієнт абсорбції, тангенс кута діелектричних втрат та кутова похибка. Оскільки зазначені параметри мають різні одиниці вимірювання та характер впливу на стан ізоляції, виконано їх нормування до єдиної шкали. На основі отриманих нормованих значень сформовано інтегральний показник технічного стану, який характеризує загальний рівень деградації ізоляційної системи. Для прогнозування подальшого розвитку пошкоджень у модель введено оцінювання швидкості зміни інтегрального показника, що дозволяє визначати орієнтовний час досягнення граничного стану.

Перевірку працездатності запропонованої моделі виконано шляхом комп'ютерного моделювання зміни діагностичних параметрів ізоляційної системи протягом 30 років експлуатації трансформатора. Розглянуто декілька варіантів зміни технічного стану обладнання залежно від інтенсивності деградаційних процесів. У процесі моделювання враховано нормальний режим експлуатації, прискорене старіння ізоляції та сприятливі умови роботи, що дозволило оцінити вплив швидкості погіршення параметрів на результати прогнозування.

Отримані результати підтверджують можливість використання запропонованого підходу для комплексного аналізу стану високовольтних вимірювальних трансформаторів та визначення тенденцій їх подальшої експлуатації. Розроблена модель може бути використана як основа для вдосконалення систем технічної діагностики та переходу до прогнозного обслуговування високовольтного обладнання.

Ключові слова: *високовольтні вимірювальні трансформатори, діагностика ізоляції, технічний стан, математичне моделювання, інтегральний показник, залишковий ресурс, деградація ізоляції, прогнозування надійності.*

Вступ

Високовольтні вимірювальні трансформатори (струму та напруги) є ключовими елементами електроенергетичних систем, що забезпечують гальванічну розв'язку та точне перетворення первинних електричних величин для живлення приладів обліку, релейного захисту та автоматики. Від їх технічного стану безпосередньо залежить надійність роботи всієї системи захисту та якість електропостачання споживачів [1].

У процесі тривалої експлуатації трансформатори піддаються впливу багатьох несприятливих факторів, таких як підвищена температура, вологість, часткові розряди, перевантаження та аварійні режими. Це проявляється у зростанні струмів витоку, збільшенні тангенса кута діелектричних втрат, зниженні опору ізоляції та появі кутової похибки. Наслідком таких процесів може стати хибне спрацювання релейного захисту, помилки комерційного обліку електроенергії або, у критичних випадках, аварійне виведення обладнання з експлуатації.

Традиційні методи періодичного контролю (вимірювання опору ізоляції, tanδ, коефіцієнта абсорбції) дозволяють оцінювати окремі характеристики ізоляційної системи, однак самостійне використання цих параметрів не забезпечує комплексного прогнозування залишкового ресурсу [2]. У зв'язку з цим актуальним науковим і практичним завданням є розробка математичних

моделей, які забезпечують комплексну кількісну оцінку технічного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів та прогнозування їхнього ресурсу з урахуванням реальних умов експлуатації.

Наукова новизна роботи полягає у розробленні математичної моделі комплексного оцінювання технічного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів на основі інтегрального показника, сформованого за результатами аналізу сукупності нормованих діагностичних параметрів ізоляційної системи. Запропоновано підхід до прогнозування залишкового ресурсу, який, на відміну від оцінювання лише поточного стану обладнання, враховує швидкість зміни інтегрального показника в процесі експлуатації. Це дозволяє визначати тенденцію розвитку деградаційних процесів та оцінювати час досягнення критичного стану ізоляційної системи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблема діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів активно досліджується як в Україні, так і за кордоном. Значний внесок у розвиток цих методів зробили Бржезицький В. О. та співавтори [3], які систематизували традиційні методи контролю технічного стану електрообладнання, особливу увагу приділивши вимірюванню опору ізоляції, коефіцієнта абсорбції та випробуванням підвищеною напругою. Подібний підхід розвивається також у роботі Клименко Б. В. [4], де особливу увагу приділено оцінюванню технічного стану комутаційної апаратури. Автором було запропоновано комплексний підхід до оцінки їх технічного стану з урахуванням режимів експлуатації. Водночас обидві роботи переважно орієнтовані на нормативний контроль і практично не розглядають математичне прогнозування деградації ізоляції.

Фундаментальні питання моделювання процесів старіння трансформаторної ізоляції висвітлено у працях Kulkarni S. V. та Khaparde S. A. [5], а також у рекомендаціях Bureau of Reclamation [6]. Ці роботи пропонують досить розвинені моделі для силових трансформаторів великої потужності. Однак специфіка високовольтних вимірювальних трансформаторів (менші габарити, інша конструкція ізоляції, менша кількість масла) накладає обмеження через відмінності конструкції та умов експлуатації.

Подальший розвиток методів діагностування трансформаторного обладнання пов'язаний із застосуванням сучасних методів аналізу та інтелектуальної обробки даних. Зокрема, у роботах Матвійчука В. А. та співавторів [7], а також Чорного О. С. [8] (2020 – 2025) розвинуто підходи, що ґрунтуються на використанні частотного аналізу (Frequency Response Analysis, FRA) та методів нечіткої логіки для оцінювання технічного стану трансформаторного обладнання. Запропоновані рішення демонструють високу чутливість до змін технічного стану, однак переважно орієнтовані на виявлення окремих видів дефектів і не забезпечують комплексного прогнозування процесів старіння ізоляції.

Аналогічні тенденції простежуються і в сучасних зарубіжних дослідженнях. Так, Parkash C., Abbasi A. [9] у 2023 році дослідили можливості застосування частотного аналізу для раннього виявлення дефектів ізоляції вимірювальних трансформаторів, тоді як Shang H. та співавтори [10] запропонували методи машинного навчання для автоматизованого виявлення часткових розрядів у високовольтних трансформаторах. Незважаючи на високу ефективність цих підходів щодо виявлення окремих дефектів, їх практичне застосування потребує значних обсягів експериментальних даних, а також не завжди забезпечує кількісне оцінювання ступеня старіння ізоляції та прогнозування залишкового ресурсу обладнання.

Хроматографічний аналіз розчинених газів (Dissolved Gas Analysis, DGA), хоча і є ефективним для силових трансформаторів, для вимірювальних застосовується значно рідше через малий об’єм масла. Також складно отримати точні дані про температуру обмоток у

реальних умовах експлуатації.

Таким чином, проведений аналіз літературних джерел свідчить, що сучасні методи діагностування забезпечують ефективне виявлення окремих дефектів та оцінювання поточного технічного стану трансформаторного обладнання. Водночас недостатньо розробленими залишаються інтегральні математичні моделі, здатні поєднати доступні для високовольтних вимірювальних трансформаторів діагностичні параметри (електричні характеристики ізоляції, коефіцієнт абсорбції, температурні впливи та експлуатаційні фактори) у єдиний показник технічного стану з можливістю прогнозування залишкового ресурсу. Саме вирішення цієї наукової задачі є основною **метою цієї статті**.

Мета та задачі дослідження

Враховуючи проаналізовану проблематику, метою дослідження є розробка математичної моделі оцінки технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимірювальних трансформаторів на основі доступних електричних параметрів ізоляції.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Визначити систему діагностичних параметрів, доступних для практичного застосування у вимірювальних трансформаторах (опір ізоляції, коефіцієнт абсорбції, тангенс кута діелектричних втрат, кутова похибка);
2. Розробити математичну модель, яка дозволяє комплексно оцінювати технічний стан трансформаторів шляхом інтеграції обраних параметрів;
3. Сформувати підхід до розрахунку інтегрального показника технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу обладнання;
4. Провести комп’ютерне моделювання запропонованої моделі та оцінити її працездатність на основі тестових даних.

Реалізація зазначених задач дозволить отримати інструмент для кількісної оцінки технічного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів, що є важливим кроком для підвищення надійності електроенергетичних систем.

Виклад основного матеріалу

Відповідно до поставлених завдань, у цьому розділі послідовно описано процес розробки математичної моделі оцінки технічного стану високовольтних вимірювальних трансформаторів.

Першим кроком стало визначення системи діагностичних параметрів, доступних для практичного застосування. Для високовольтних вимірювальних трансформаторів були обрані параметри, які можна надійно вимірювати в умовах експлуатації: опір ізоляції ($R_{\text{із}}$), коефіцієнт абсорбції ($K_{\text{абс}}$), тангенс кута діелектричних втрат ($tan\delta$) та кутова похибка (δ). Ці параметри є найбільш інформативними для оцінки стану основної ізоляції цього типу обладнання і не вимагають складного додаткового обладнання.

Оскільки зазначені параметри мають різні одиниці вимірювання та різні діапазони зміни, для забезпечення можливості їх спільного аналізу виконано нормування. У результаті кожен параметр приводиться до безрозмірної шкали в діапазоні від 0 до 1, де значення 0 відповідає справному стану трансформатора, а значення 1 – критичному стану.

Для параметрів, збільшення яких свідчить про погіршення технічного стану (тангенс кута діелектричних втрат та кутова похибка), використовується пряма нормалізація:

$$d_i = \frac{P_i - P_{i,min}}{P_{i,max} - P_{i,min}}. \quad (1)$$

Для параметрів, зменшення яких характеризує погіршення стану ізоляції (опір ізоляції та

коефіцієнт абсорбції), застосовується обернена нормалізація:

$$d_i = \frac{P_{i,max} - P_i}{P_{i,max} - P_{i,min}}, \quad (2)$$

де P_i – виміряне значення i-ого параметра; $P_{i,max}$ та $P_{i,min}$ – граничні значення згідно з нормативними документами.

Такий підхід дозволяє привести параметри, які мають різні одиниці вимірювання та шкали, до єдиного масштабу, що є необхідною умовою для їх подальшої інтеграції в єдиний показник технічного стану.

У результаті нормування сформовано набір діагностичних складових моделі: $d_{R_{\text{із}}}$ – нормований опір ізоляції, $d_{K_{\text{абс}}}$ – нормований коефіцієнт абсорбції, $d_{\tan\delta}$ – нормований тангенс кута діелектричних втрат та d_δ – нормована кутова похибка.

Після нормування всі параметри використовуються для розрахунку інтегрального показника технічного стану трансформатора R, який визначається як зважена сума нормованих діагностичних параметрів:

$$R = w_1 d_{R_{\text{із}}} + w_2 d_{K_{\text{абс}}} + w_3 d_{\tan\delta} + w_4 d_\delta. \quad (3)$$

У загальному випадку інтегральний показник технічного стану може бути представлений у вигляді:

$$R = \sum_{i=1}^{n} w_i d_i, \quad (4)$$

де d_i – нормоване значення i-го діагностичного параметра; w_i – ваговий коефіцієнт, що характеризує його вплив на інтегральний показник технічного стану; n – кількість параметрів, які враховуються у моделі, при цьому

$$\sum_{i=1}^{n} w_i = 1. \quad (5)$$

Значення вагових коефіцієнтів у запропонованій моделі прийнято на основі аналізу діагностичної інформативності окремих параметрів ізоляційної системи та їх ролі у визначенні технічного стану високовольтного обладнання. Найбільшу вагу надано опору ізоляції, оскільки він є одним із основних показників стану ізоляції високовольтного обладнання. Для коефіцієнта абсорбції та тангенса кута діелектричних втрат прийнято однакові вагові коефіцієнти, оскільки ці параметри характеризують процеси старіння та погіршення діелектричних властивостей ізоляції. Кутову похибку враховано з меншою вагою через її залежність від конструктивних особливостей трансформатора. У проведених розрахунках прийнято такі значення вагових коефіцієнтів: $w_{R_{\text{із}}} = 0{,}35$; $w_{K_{\text{абс}}} = 0{,}25$; $w_{tan\delta} = 0{,}25$; $w_\delta = 0{,}15$, що забезпечує виконання умови з виразу (5).

Таким чином, інтегральний показник є узагальненою оцінкою поточного технічного стану трансформатора, оскільки враховує сукупний вплив декількох діагностичних параметрів. Однак технічний стан ізоляційної системи змінюється під дією процесів старіння та експлуатаційних факторів, тому для прогнозування залишкового ресурсу необхідно враховувати не лише поточне значення показника R, а і характер його зміни в часі. Для цього застосовуємо формулу:

$$R(t) = \sum_{i=1}^{n} w_i d_i(t), \quad (6)$$

де $d_i(t)$ – значення нормованого діагностичного параметра в момент часу t.

Враховуючи, що процес старіння ізоляційної системи є безперервним та нерівномірним, інтегральний показник технічного стану доцільно розглядати як функцію часу. У цьому випадку

швидкість деградації визначається не як середній приріст показника за окремий інтервал, а як миттєва швидкість його зміни. Швидкість деградації інтегрального показника визначається як:

$$v_R(t) = \frac{dR(t)}{dt}. \quad (7)$$

Для практичного використання за результатами періодичних діагностичних вимірювань похідна може визначатися дискретним наближенням:

$$v_R(t_i) = \frac{R(t_i) - R(t_i - 1)}{t_i - t_{i-1}}, \quad (8)$$

що забезпечує можливість застосування запропонованої моделі до експлуатаційних даних.

Отримане значення швидкості зміни інтегрального показника характеризує поточну інтенсивність деградаційних процесів ізоляційної системи. Для оцінювання залишкового ресурсу необхідно визначити час, протягом якого інтегральний показник технічного стану досягне встановленого граничного значення $R_{\text{кр}}$:

$$T_{\text{зал}} = \frac{R_{\text{кр}} - R(t)}{v_R(t)}, \quad (9)$$

де $R_{\text{кр}}$ – критичне значення інтегрального показника технічного стану.

У запропонованій моделі прийнято, що критичний стан трансформатора відповідає значенню інтегрального показника $R_{\text{кр}}$=1. Такий підхід обумовлений тим, що всі діагностичні параметри попередньо приведені до єдиної нормованої шкали від 0 до 1, де значення 0 характеризує справний стан обладнання, а значення 1 – граничний рівень погіршення технічного стану.

Таким чином, значення $T_{\text{зал}}$ характеризує прогнозований період, протягом якого інтегральний показник технічного стану досягне критичного значення з урахуванням поточної швидкості його зміни $v_R(t)$. Оскільки процеси старіння ізоляційної системи можуть мати нерівномірний характер, швидкість зміни показника $R(t)$ визначається окремо для кожного моменту діагностування на основі попередніх значень технічного стану. Значення параметрів моделі, зокрема швидкості зміни $v_R(t)$ та граничного рівня $R_{\text{кр}}$, можуть бути уточнені під час подальшої перевірки моделі за даними експлуатаційних вимірювань. Наступним етапом дослідження є комп'ютерне моделювання зміни нормованих діагностичних параметрів та визначення відповідної зміни інтегрального показника.

Для перевірки працездатності запропонованої математичної моделі сформовано набір модельних значень діагностичних параметрів, які відображають поступову зміну технічного стану високовольтного вимірювального трансформатора в процесі експлуатації. На цьому етапі основною метою є оцінювання закономірностей зміни $R(t)$ та перевірка можливості прогнозування залишкового ресурсу, тому використовуються модельні дані із заданою тенденцією деградації параметрів.

У процесі моделювання прийнято, що старіння ізоляційної системи супроводжується зниженням опору ізоляції та коефіцієнта абсорбції, а також збільшенням значень тангенса кута діелектричних втрат і кутової похибки. Така залежність відповідає загальним закономірностям зміни параметрів ізоляції високовольтного обладнання при погіршенні його технічного стану. При цьому швидкість зміни зазначених параметрів задавалася змінною в часі, що дозволяє відобразити поступове прискорення деградаційних процесів на пізніх етапах експлуатації.

Для аналізу впливу швидкості деградації на результати оцінювання розглянуто три варіанти експлуатації трансформатора:

- нормальна експлуатація трансформатора;
- прискорене старіння ізоляційної системи;
- експлуатація за сприятливих умов із меншою швидкістю деградації.

Відмінність між сценаріями полягає у швидкості зміни нормованих діагностичних параметрів, що дозволяє оцінити реакцію запропонованої моделі на різні темпи погіршення технічного стану.

Для реалізації комп'ютерного моделювання задано часовий ряд зміни діагностичних параметрів протягом 30 років експлуатації трансформатора. Розрахунок виконано для базового сценарію моделювання прийнято поступову деградацію параметрів ізоляції. Зміна кожного параметра описувалася монотонною залежністю з додаванням незначних випадкових відхилень, що імітують вплив реальних умов експлуатації та похибок вимірювання.

Отримані результати моделювання для нормальної експлуатації наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати комп'ютерного моделювання зміни технічного стану трансформатора при нормальній експлуатації

Рік експлуатації	$d_{R_{із}}$	$d_{K_{абс}}$	$d_{tan\delta}$	d_{δ}	R(t)	$v_R(t)$	$T_{зал}$
5	0,035	0,026	0,022	0,032	0,029	0,008	122,390
10	0,141	0,109	0,090	0,125	0,118	0,023	38,650
15	0,285	0,250	0,219	0,267	0,257	0,032	23,197
20	0,480	0,444	0,410	0,461	0,451	0,041	13,313
25	0,719	0,696	0,670	0,709	0,700	0,054	5,549
30	0,999	1,000	0,999	1,000	0,999	0,063	0,011

Аналіз отриманих результатів показує, що в процесі моделювання інтегральний показник технічного стану має стійку тенденцію до зростання протягом усього періоду експлуатації. На початковому етапі його значення становить 0,029, тоді як через 30 років експлуатації досягає рівня 0,999. Отримана динаміка свідчить про коректне відображення процесу поступового накопичення пошкоджень ізоляційної системи, оскільки кінцеве значення показника практично відповідає встановленому критерію граничного стану $R_{кр}$=1.

На початковому етапі експлуатації нормовані значення діагностичних параметрів мають низький рівень, що відповідає справному стану ізоляційної системи трансформатора. У цей період інтегральний показник технічного стану змінюється з невеликою швидкістю, тому розрахований залишковий ресурс має максимальне значення. Це пояснюється тим, що за незначного рівня накопичених пошкоджень навіть невисока швидкість деградації відповідає значному прогнозованому часу до досягнення критичного стану.

У міру збільшення тривалості експлуатації спостерігається поступове зростання всіх нормованих діагностичних параметрів, що відображає погіршення стану ізоляційної системи. Так, через 15 років значення інтегрального показника становить ($R(t)$=0,257), а через 25 років – ($R(t)$=0,700). На пізніх етапах експлуатації найбільший вплив на формування інтегральної оцінки мають параметри $d_{K_{абс}}$, $d_{tan\delta}$ та d_{δ} оскільки саме вони найбільш чутливі до змін, пов'язаних із процесами теплового та електричного старіння ізоляції.

Дослідження зміни швидкості деградації $v_R(t)$визначеної як похідна інтегрального показника технічного стану, показало її нерівномірний характер протягом усього періоду експлуатації. На початковому етапі старіння значення швидкості зміни $v_R(t)$ є невеликим, що відповідає повільному накопиченню пошкоджень ізоляційної системи. У міру збільшення тривалості експлуатації спостерігається зростання швидкості зміни інтегрального показника, що свідчить про прискорення деградаційних процесів унаслідок накопичення пошкоджень ізоляції.

Розрахунок залишкового ресурсу показує закономірне зменшення часу до досягнення критичного стану. Якщо на початковому етапі експлуатації отримане значення $T_{зал}$ є значним через низький рівень деградації, то при наближенні до граничного стану воно швидко зменшується.

Таким чином, результати комп'ютерного експерименту підтверджують працездатність запропонованої математичної моделі. Модель дозволяє не тільки оцінити поточний технічний стан трансформатора за інтегральним показником, а й визначити тенденцію його зміни та прогнозувати наближення до критичного стану на основі швидкості деградації.

Для оцінювання впливу різної інтенсивності деградаційних процесів на результати прогнозування виконано додаткове моделювання двох альтернативних сценаріїв: прискореного старіння ізоляційної системи та експлуатації трансформатора за сприятливих умов. При цьому змінювалася лише швидкість зміни діагностичних параметрів, тоді як структура математичної моделі, система нормування та вагові коефіцієнти залишалися незмінними.

На рис. 1 наведено залежність зміни інтегрального показника технічного стану $R(t)$ у часі.

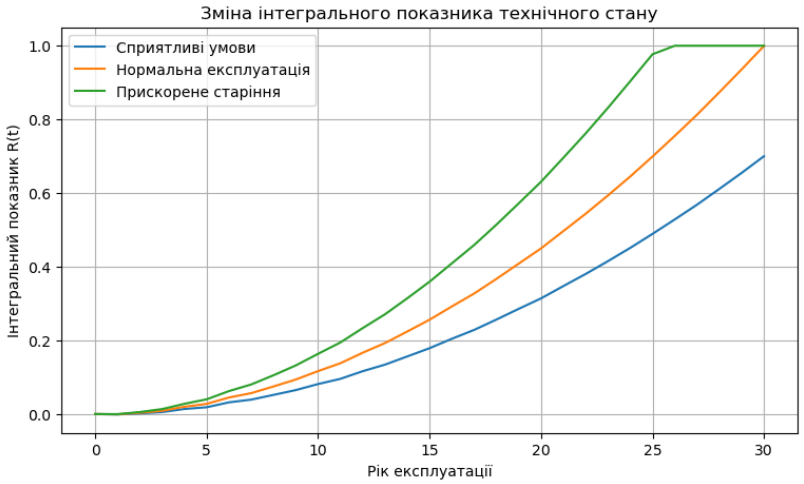


Рис. 1. Зміна інтегрального показника технічного стану R(t), для різних сценаріїв експлуатації

Як видно з рис. 1, інтегральний показник технічного стану має тенденцію до збільшення в усіх розглянутих випадках, що відповідає поступовому накопиченню пошкоджень ізоляційної системи. При цьому найбільш швидке зростання показника $R(t)$, спостерігається для сценарію прискореного старіння, тоді як за сприятливих умов експлуатації зміна технічного стану відбувається повільніше.

Отримана залежність підтверджує, що інтегральний показник, є чутливим до зміни швидкості деградаційних процесів і може використовуватися для порівняльного оцінювання технічного стану трансформаторів, які експлуатуються в різних умовах.

Наступним етапом є оцінювання прогнозованого залишкового ресурсу трансформатора від часу експлуатації. На рис. 2 зображено цю залежність.

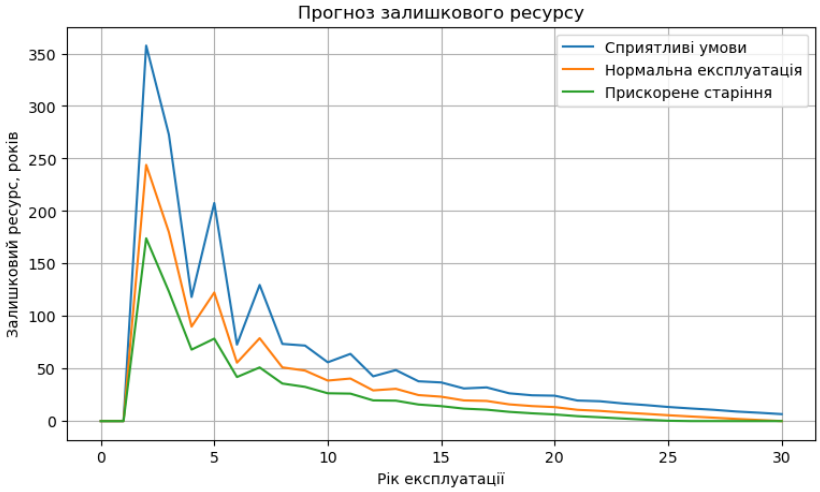


Рис. 2. Зміна прогнозованого залишкового ресурсу залежно від часу експлуатації

Аналіз залежності $T_{зал}$ показує, що зі збільшенням інтегрального показника $R(t)$, прогнозований залишковий ресурс закономірно зменшується. Високе значення прогнозованого залишкового ресурсу на початковому етапі моделювання пояснюється низьким рівнем деградації ізоляційної системи та малим значенням швидкості зміни інтегрального показника $v_R(t)$. Отримане значення слід розглядати не як фактичний термін експлуатації обладнання, а як результат математичної екстраполяції поточного темпу зміни технічного стану. У реальних умовах значення залишкового ресурсу повинно обмежуватися нормативними строками служби та уточнюватися за результатами періодичних діагностичних вимірювань.

Отримані результати моделювання дозволяють оцінити характер зміни технічного стану трансформатора залежно від інтенсивності деградаційних процесів. Аналіз зміни інтегрального показника R та прогнозованого залишкового ресурсу $T_{зал}$ показує взаємозв'язок між накопиченням пошкоджень ізоляції та скороченням часу до досягнення критичного стану.

Висновки

У роботі запропоновано математичний підхід до оцінювання технічного стану та прогнозування залишкового ресурсу високовольтних вимірювальних трансформаторів на основі комплексу діагностичних параметрів ізоляційної системи. Як вихідні параметри моделі використано опір ізоляції, коефіцієнт абсорбції, тангенс кута діелектричних втрат та кутову похибку. Для забезпечення їх спільного аналізу виконано нормування параметрів та сформовано інтегральний показник технічного стану, який враховує сукупний вплив окремих діагностичних ознак.

Запропонована модель доповнена оцінюванням швидкості зміни інтегрального показника, що дозволяє визначати тенденцію розвитку деградаційних процесів та прогнозувати час до досягнення критичного стану. За результатами комп'ютерного моделювання встановлено, що при нормальному сценарії експлуатації показник R(t) поступово збільшується від 0,029 на 5 році експлуатації до 0,700 через 25 років та наближається до критичного значення 0,999 через 30 років. Зміна прогнозованого залишкового ресурсу має закономірний характер і залежить від швидкості накопичення пошкоджень.

Моделювання різних умов експлуатації показало, що запропонований підхід здатний враховувати зміну інтенсивності деградаційних процесів та може бути використаний для порівняльного оцінювання технічного стану трансформаторів. Отримані результати підтверджують можливість застосування інтегральної оцінки як основи для переходу від

періодичної діагностики до прогнозування технічного стану обладнання.

Перспективними напрямами подальших досліджень є:

- проведення експериментальної перевірки моделі на основі фактичних експлуатаційних даних високовольтних вимірювальних трансформаторів;
- уточнення вагових коефіцієнтів діагностичних параметрів з урахуванням типу обладнання, режимів роботи та умов експлуатації;
- адаптація запропонованого підходу для різних конструктивних виконань трансформаторів та інших видів високовольтного обладнання;
- дослідження можливості інтеграції моделі з автоматизованими системами моніторингу технічного стану.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. IEC 61869-1:2023. Instrument transformers – Part 1: General requirements. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2023. (Міжнародний стандарт).

2. IEC 60422:2013. Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guide. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2013. 76 с. (Міжнародний стандарт).

3. Бржезицький В. О., Проценко О. Р., Гайдук А. В. Експлуатація та діагностування електрообладнання електричних станцій і підстанцій. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 350 с.

4. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Харків : Точка, 2012. 340 с.

5. Kulkarni S. V., Khaparde S. A. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 2013. 750 p.

6. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. Transformer Maintenance. Facilities Instructions, Standards, and Techniques. Vol. 3-30. Denver, CO : Bureau of Reclamation, 2000. 87 p. URL: https://www.usbr.gov/power/data/fist/fist3_30/fist3_30.pdf (дата звернення: 16.07.2026).

7. Матвійчук В. А., Рубаненко О. Є., Лежнюк П. Д. Діагностика силових трансформаторів із використанням частотного аналізу та інтелектуальних методів обробки інформації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4. С. 45–52.

8. Чорний О. С. Методи та засоби діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Т. 353, № 3.2. С. 387–392. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-353-54.

9. Parkash C., Abbasi A. R. Transformer's Frequency Response Analysis Results Interpretation Using a Novel Cross Entropy Based Methodology. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. Article 6604. DOI:10.1038/s41598-023-33606-0.

10. Partial Discharge Fault Diagnosis in Power Transformers Based on SGMD Approximate Entropy and Optimized BILSTM / H. Shang et al. *Entropy*. 2024. Vol. 26, №7, Article 551. DOI: 10.3390/e26070551.

Стаття надійшла до редакції 22.07.2026.
Стаття пройшла рецензування 14.09.2026.
Стаття опублікована 30.09.2026.

Чорний Олександр Сергійович – аспірант кафедри КЕМСК, e-mail: chornyi_oleksandr@ukr.net, ORCID: 0009-0003-6118-0447.

Вінницький національний технічний університет.